

# Broušení materiálů s využitím kubického nitridu boru

Jiří Čop

---

Bakalářská práce  
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jiří ČOP

Studijní program: B 3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Technologická zařízení

Téma práce: Broušení materiálů s využitím kubického nitridu boru

Zásady pro vypracování:

- 1) Popište teorii a technologii broušení
- 2) Popište doprovodní jevy technologie broušení
- 3) Hodnoťte dynamické jevy procesu broušení
- 4) Určete vliv technologických podmínek na výstupní parametry procesu broušení

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího bakalářské práce**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Luboš Rokyta**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **19. února 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2010**

Ve Zlíně dne 20. ledna 2010



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.  
*vedoucí katedry*

Příjmení a jméno: ..... ČOP JIRÍ

Obor: ..... TECHNOLOGICKÁ ZARÍZENÍ

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby<sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3<sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji 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 ..... 28.5.2010

.....  


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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá broušením s využitím kubického nitridu boru.

V teoretické části je obecně popsána problematika technologického procesu broušení, jevy spojené s broušením a materiál kubický nitrid boru jeho výroba, vlastnosti a použití.

Praktická část bakalářské práce se zabývá rozdíly a porovnáními mezi výsledky naměřených řezných sil, jakostí povrchu pro různé materiály při různých řezných podmínkách a to pro dva brousící kotouče z nichž jeden obsahuje brusná zrna z kubického nitridu boru.

Klíčová slova: broušení, kubický nitrid boru, jakost povrchu, řezné síly

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals grinding materials with using cubic boron nitride.

In the theoretical part is widely described problem of a grinding as technological process, phenomena associated with grinding and cubic boron nitride as material and his produce, properties and application.

Practical part bachelor thesis deals with differences and confront between results of measured cutting forces, quality of surface for the differently materials in the differently cutting conditions and this for two grinding wheels. One of them includes cutting grain of cubic boron nitride.

Keywords: grinding, cubic boron nitride, quality of surface, cutting forces

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce Ing. Luboši Rokytovi. Za jeho obětavý přístup, cenné připomínky a rady, za podklady a čas strávený nad touto prací. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Šálkovi za jeho odbornou pomoc při měření na brusce v laboratořích UVI.

*Motto:*

*„Toho, co víme, je kapka. Toho, co nevíme, je moře.“*

*Latinské přísloví*

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 TEORIE BROUŠENÍ</b> .....	<b>13</b>
1.1 TVORBA TRÍSKY PŘI BROUŠENÍ .....	13
1.2 ŘEZNÉ SÍLY PŘI BROUŠENÍ .....	15
1.3 BROUSÍCÍ NÁSTROJE .....	17
1.3.1 Značení brousících kotoučů .....	17
1.3.2 Rozměr brousícího kotouče.....	17
1.3.3 Brusivo .....	18
1.3.4 Zrnitost .....	20
1.3.5 Tvrdost .....	20
1.3.6 Struktura.....	21
1.3.7 Pojivo .....	22
<b>2 JAKOST POVRCHU</b> .....	<b>24</b>
2.1 DRSNOST POVRCHU .....	25
2.1.1 Střední aritmetická úchylka profilu Ra .....	25
2.1.2 Výška nerovností profilu z deseti bodů Rz .....	26
2.1.3 Největší výška nerovností Rm.....	27
2.1.4 Střední rozteč profilu Sm .....	28
2.1.5 Střední rozteč místních výstupků S .....	28
2.1.6 Nosný podíl tp .....	29
2.1.7 Značení drsnosti .....	30
2.2 VLNITOST POVRCHU .....	30
2.3 DOSAHOVANÁ PŘESNOST A JAKOST POVRCHU .....	31
<b>3 DOPROVODNÉ JEVY VZNIKAJÍCÍ PŘI BROUŠENÍ</b> .....	<b>32</b>
3.1 TEPelné JEvy PŘI BROUŠENÍ.....	32
3.1.1 Rozdělení teplot .....	32
3.1.2 Řezné prostředky při broušení.....	33
3.1.3 Vznik jisker při broušení.....	34
3.2 ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ .....	34
3.3 ZPEVNĚNÍ .....	35
3.4 OPOTŘEBENÍ BROUSÍCÍHO KOTOUČE.....	36
<b>4 KUBICKÝ NITRID BORU</b> .....	<b>38</b>
4.1 VÝROBA .....	38
4.2 VLASTNOSTI .....	38
4.3 POUŽITÍ .....	39
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>41</b>
<b>5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</b> .....	<b>42</b>



<b>6</b>	<b>BROUŠENÍ, MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL A MĚŘENÍ DRSNOSTI .....</b>	<b>43</b>
6.1	BRUSKA BRH 20.03F.....	43
6.2	MĚŘENÍ SIL.....	44
6.3	MĚŘENÍ JAKOSTI POVRCHU.....	45
<b>7</b>	<b>CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ .....</b>	<b>47</b>
7.1	OCEL 14 109 .....	47
7.2	OCEL 19 436 .....	47
7.3	PMMA – POLYMETYLMETAKRYLÁT .....	48
7.4	PP – POLYPROPYLEN.....	48
<b>8</b>	<b>CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ .....</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>HODNOCENÍ ŘEZNÝCH SIL PODLE DRUHU KOTOUČE A VELIKOSTI ÚBĚRU.....</b>	<b>50</b>
9.1	MATERIÁL 14109.4 .....	51
9.1.1	Porovnání velikosti řezné síly $F_c$ pro jednotlivý brousící kotouč při různé $a_p$ .....	51
9.1.2	Porovnání velikosti řezné síly $F_p$ pro jednotlivý brousící kotouč při různé $a_p$ .....	52
9.2	MATERIÁL 19436.4 .....	53
9.2.1	Porovnání velikosti řezné síly $F_c$ pro jednotlivý brousící kotouč při různé $a_p$ .....	53
9.2.2	Porovnání velikosti řezné síly $F_p$ pro jednotlivý brousící kotouč při různé $a_p$ .....	54
9.3	MATERIÁL PMMA .....	55
9.3.1	Porovnání velikosti řezné síly $F_c$ pro jednotlivý brousící kotouč při různé $a_p$ .....	55
9.3.2	Porovnání velikosti řezné síly $F_p$ pro jednotlivý brousící kotouč při různé $a_p$ .....	56
9.4	MATERIÁL PP.....	57
9.4.1	Porovnání velikosti řezné síly $F_c$ pro jednotlivý brousící kotouč při různé $a_p$ .....	57
9.4.2	Porovnání velikosti řezné síly $F_p$ pro jednotlivý brousící kotouč při různé $a_p$ .....	58
<b>10</b>	<b>VYHODNOCENÍ ŘEZNÝCH SIL MEZI JEDNOTLIVÝMI MATERIÁLY .....</b>	<b>59</b>
10.1	KOTOUČ A 99B 80 Is(K) 9V .....	59
10.1.1	Porovnání velikosti řezné síly $F_c$ pro $a_p= 0,03\text{mm}$ .....	59
10.1.2	Porovnání velikosti řezné síly $F_p$ pro $a_p= 0,03\text{mm}$ .....	59
10.1.3	Porovnání velikosti řezné síly $F_c$ pro $a_p= 0,005\text{mm}$ .....	60
10.1.4	Porovnání velikosti řezné síly $F_p$ pro $a_p= 0,005\text{mm}$ .....	60
10.2	KOTOUČ B 126K 100 8-VII.....	61
10.2.1	Porovnání velikosti řezné síly $F_c$ pro $a_p= 0,03\text{mm}$ .....	61
10.2.2	Porovnání velikosti řezné síly $F_p$ pro $a_p= 0,03\text{mm}$ .....	62

10.2.3	Porovnání velikosti řezné síly $F_c$ pro $a_p=0,005\text{mm}$ .....	62
10.2.4	Porovnání velikosti řezné síly $F_p$ pro $a_p=0,005\text{mm}$ .....	63
<b>11</b>	<b>VYHODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU .....</b>	<b>64</b>
11.1	KOTOUČE A 99B 80 Is(K) 9V .....	64
11.1.1	Vyhodnocení drsnosti $R_a$ pro $a_p=0,03\text{mm}$ .....	64
11.1.2	Vyhodnocení drsnosti $R_a$ pro $a_p=0,005\text{mm}$ .....	64
11.2	KOTOUČE B 126K 100 8-VII.....	65
11.2.1	Vyhodnocení drsnosti $R_a$ pro $a_p=0,03\text{mm}$ .....	65
11.2.2	Vyhodnocení drsnosti $R_a$ pro $a_p=0,005\text{mm}$ .....	66
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>68</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>74</b>

## ÚVOD

Současné trendy v rozvoji výrobních systémů se dají charakterizovat snahou o stále lepší a kvalitnější dosahovanou jakost povrchu. Nové požadavky na strojní součásti, které se projevují v posledních letech, vycházejí ze snahy o zvyšování přesnosti výroby, ze snahy o zavádění nových, pokrokových výrobních technik a ze snahy uplatňovat přesnější kontrolní metody. Přesnější výroba znamená zlepšování provozních vlastností výrobků, především těch, které pracují v extrémních podmínkách zatěžování anebo jsou na ně kladeny zvláštní funkční požadavky. Výsledná přesnost je ovlivněna jak makroskopickými chybami tvaru tak i mikroskopickými úchylkami, které se promítají do vlastností povrchové vrstvy. Vlastnosti povrchové vrstvy jsou důležité u součástí, které na sebe dosedají, vzájemně se pohybují nebo mají vykazovat vlastnosti jako je např. korozní odolnost, tepelná vodivost, odraz světla, vlnění, tlumení a další jiné. Jedna ze základních metod, pomocí které můžeme dosahovat těchto přesných integrit povrchu a na které jsou kladeny vysoké požadavky a jenž se stále rozvíjí a vylepšuje, je proces broušení.

Broušení je třískový obráběcí proces. Výsledná jakost a vlastnosti povrchu jsou při broušení závislé na mnoha faktorech ať už se jedná o volbu kotouče, tuhost soustavy, správné vyvážení kotouče nebo správně zvolené řezné a technologické podmínky. Volba kotouče, jeho tvar a velikost závisí na tvaru plochy broušené na součásti a především na materiálu obrobku a jeho mechanických vlastnostech. Aby byla zachována samoostřicí schopnost kotouče volí se pro broušení tvrdších materiálů kotouče měkčí a naopak. Na některé těžko-obrobitelné, nástrojové či kalené oceli se je ovšem nutno kvůli jejich vysoké pevnosti použít supertvrdých materiálů jako je např. diamant či kubický nitrid boru.

Kubický nitrid boru je jako polykrystalický materiál využíván pro nástroje s definovanou geometrií ale také pro brousící kotouče. Nástroje s kubickým nitridem boru (KNB) jsou využívány v moderní době nejen pro obrábění kalených a vysoce pevných materiálů, ale i při dokončování vysoce přesných povrchů.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 TEORIE BROUŠENÍ

Broušení je jemné dokončování obrábění mnohobřítým nástrojem. Břity jsou tvořeny zrný tvrdých materiálů navzájem spojených vhodným pojivem. Hlavní pohyb při broušení vykonává rotující broušící kotouč, vedlejší pohyby vykonává nástroj nebo obrobek.

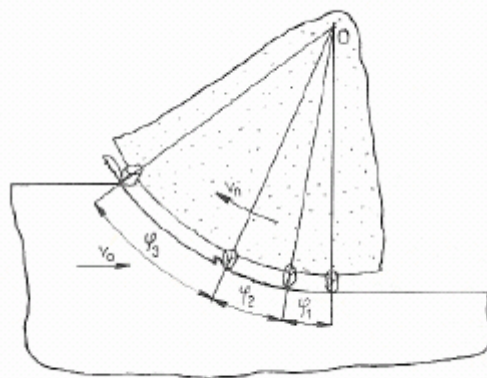
Broušení patří mezi abrazivní metody obrábění, které jsou charakterizovány použitím nástrojů s nedefinovanou geometrií břitu a představují nejvíce využívané aplikace při obrábění strojních součástí, u kterých jsou požadovány vysoké parametry přesnosti obroběných ploch.

Broušící proces má základní charakteristiky podobné jako jiné obráběcí procesy a zvláště blízký je frézování. Při broušení však dochází ke kvantitativním i kvalitativním odlišnostem, které souvisí zejména s vlastnosti broušícího kotouče a řeznými podmínkami. Broušení se od frézování odlišuje především různorodostí geometrického tvaru brusných zrn a jejich nepravidelným rozmístěním po ploše broušícího nástroje. Úhel čela zrn se mění a bývá vesměs záporná. Broušící proces se uskutečňuje při vysokých řezných rychlostech (30 až 100 m.s<sup>-2</sup>) a při malých průřezech třísky (10<sup>-3</sup> až 10<sup>-5</sup> mm<sup>2</sup>). Od jiných způsobů obrábění se práce broušícího kotouče liší schopností tzv. samoostření. Tato vlastnost broušícího kotouče souvisí s poměrně málo pevným zakotvením broušícího zrna ve vazbě kotouče. V důsledku zvýšených řezných sil na otupených zrnech se tato vylomí a jejich funkci přebírají zrna neotupená. [6]

### 1.1 Tvorba třísky při broušení

Na proces tvoření třísky při broušení mají vliv topografie broušícího kotouče, změna velikosti a geometrie broušících zrn, proměnlivá hloubka odřezávané vrstvy a ohřev obráběného materiálu v místě broušení. [2]

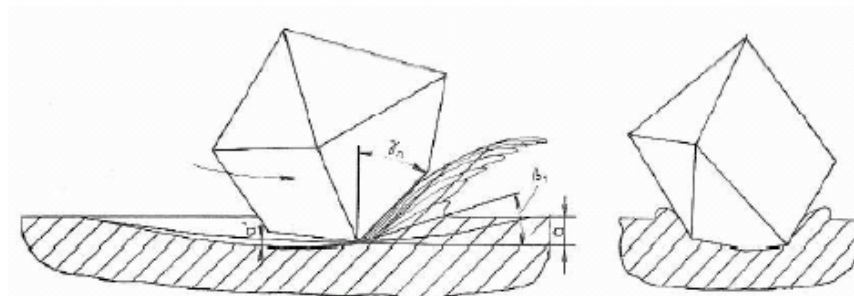
Každé zrno, které odřezává materiál při pohybu v kontaktní zóně, prochází třemi stádii: pružná deformace povrchu, plastická deformace povrchu a odebrání třísky. Spolehlivou informaci o procesu tvoření třísky při broušení lze získat zkoumáním právě těchto jednotlivých oblastí. To je možné pouze pomocí experimentálních metod. [2]



Obr. 1. Schéma fáze broušení.

$\varphi_1$  - fáze pružné deformace,  $\varphi_2$  - fáze plastické deformace,  $\varphi_3$  - fáze tvoření třísky

Při práci všeobecně orientovaným brousicím zrnem se tvoří plynulá tříska. Výrazná mez plastické deformace, ohraničené úhlem  $\beta$ , 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  $\alpha$ . Kromě tvoření třísky ve směru pohybu zrna se i plasticky vytlačí materiál v příčném směru. K tomu dochází za brousicím zrnem v závislosti na podmínkách broušení a proměnlivé hloubce  $\alpha'$ . Strana třísky obrácená k brousicímu zrně je lesklá, zadní strana má stopy po vystupujících vrypech. Obrobený povrch je pak tvořen soustavou drážek po brousicích zrnech a stopami po plastickém vytlačení materiálu z drážek. V důsledku velkých plastických deformací a vnějšího tření se určité část třísky ohřeje natolik, že se roztaví a vytvoří kapku kovu nebo shoří (jiskření). [2]



Obr. 2. Model tvoření třísky při broušení

## 1.2 Řezné síly 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:

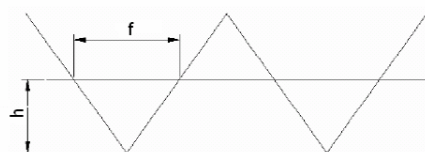
- 1) Tangenciální síla  $F_c$
- 2) Radiální síla  $F_p$
- 3) axiální síla  $F_f$

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<sup>-1</sup>), 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. [11]



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  $z$ , ze zvolené hloubky řezu  $a_e$  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

$a_e$  – hloubka řezu (příčný posuv na jeden dvojdvih)

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

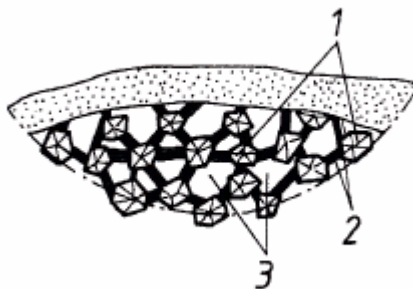
Pro obráběné ocele platí (5):

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



### 1.3 Broušící nástroje

Základní část broušících materiálů tvoří broušící zrna, která se používají ve formě volných zrn (broušící, lapovací a leštící prášky) zrn nanesených a přilepených k pružnému podkladu (broušící a leštící plátna a papíry) zrn rozptýlených v mazadlech a tekutinách (broušící a leštící pasty) nebo nejčastěji zrn spojených pojivem v tuhá tělesa potřebného tvaru (broušící kotouče a segmenty). Zrnité brusivo je smícháno s pojivem např. Z keramiky nebo umělé pryskyřice, vytvarované na brusný kotouč a vytvrzené.



Obr. 4. Struktura broušícího nástroje

#### 1.3.1 Značení broušících kotoučů

Označování broušících nástrojů podle ČSN ISO 525 se skládá z určení tvaru, rozměrů, specifikace složení broušícího materiálu a maximální obvodové. Broušící materiál charakterizuje druh broušícího materiálu, zrnitost, tvrdost, strukturu, druh pojiva a rozměr. [6]

<b>T1</b>	<b>300x50x76</b>	<b>49C</b>	<b>80</b>	<b>K</b>	<b>9</b>	<b>V</b>	<b>35m.s<sup>-1</sup></b>
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
TVAR KOTOUČE	ROZMĚR	TYP ZRNA	ZRNITOST	TVRDOST	STRUKTURA	POJIVO	OBVODOVÁ RYCHLOST

#### 1.3.2 Rozměr broušícího kotouče

Volba rozměru broušícího kotouče nebo tělíska je dána typem stroje a druhem prováděné operace. Čím větší je průměr broušícího kotouče, tím méně je následkem delší ochlazovací dráhy brusné zrno namáháno, což je příznivé pro životnost kotouče. Zvětšíme-li podstatně průměr broušícího kotouče při jeho stálé obvodové rychlosti, sníží se drsnost obráběného povrchu, neboť se prodlužuje stykový oblouk kotouče a obrobku a zmenšuje se tloušťka

třísky odebíraná jedním zrnem. Zvětší-li se však průměr kotouče nepodstatně, kvalita broušené plochy se nezlepšuje. [10,1]

### 1.3.3 Brusivo

Volí se v závislosti na vlastnostech obrobku:

Značení na brousicích kotoučích:

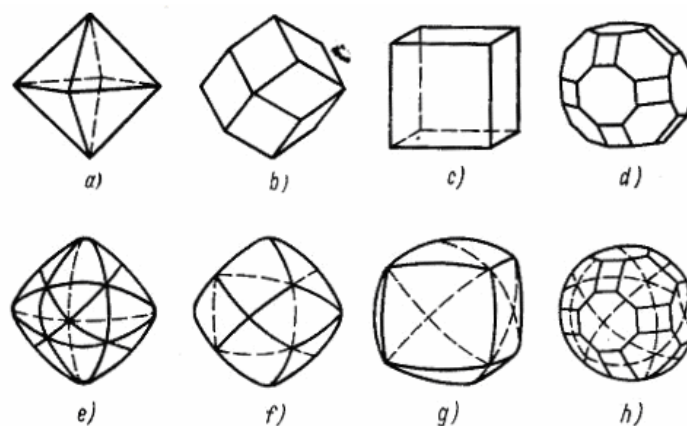
**A** - brusné materiály založené na oxidu hlinitém  $Al_2O_3$ -korundy se obecně používají na broušení železa, oceli. (A-korund, 38A-bílý korund, 86A-rubínový korund, 32A-monokrystalický korund). [8]

**C**- brusné materiály založené na karbidu křemíku se obecně používají na broušení neželezných kovů, nekovových materiálů, skla, keramiky případně lehkých kovů. (37C-černý karbid křemíku, 39C-zelený karbid křemíku). [8]

#### **Brusiva se používají:**

a) **Přírodní** – přírodní diamant, korund, křemen, smirek atd.

• Přírodní diamant – je modifikací uhlíku krystalické struktury, která obvykle obsahuje nevelké množství příměsí různých chemických prvků. Diamantové krystaly mají různý tvar, který se blíží ke geometricky pravidelnému tvaru. Nejčastěji se vyskytují tyto krystalické tvary:



Obr. 5. Tvar krystalů přírodního diamantu

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

- Korund – je minerál skládající se hlavně z krystalického oxidu hlinitého ( až 80 až 90%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ) 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.
- Smírek - minerál na bázi krystalického oxidu hlinitého, obsahující ne více než 60%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  . Různé vedlejší příměsi snižují v porovnání s korundem jeho brusné vlastnosti.
- Křemen – Minerál, který obsahuje hlavně oxid křemičitý (až 97%  $\text{SiO}_2$ ) a příměsi dalších minerálů.

Přírodní brusiva se úspěšně nahrazují umělými (syntetickými).

b) **Umělá** – umělý diamant, kubický nitrid boru, elektrokorund, karbid křemíku, karbid boru a jejich různé směsi.

- Umělý diamant – 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 podstatně mění podstatně vlastnosti materiálu a z měkkého grafitu vzniká velmi tvrdý materiál.
- Elektrokorund – je krystalický oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 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. Vyráběný elektrokorund je vhodným brusivem na broušení materiálů s velkou pevností v tahu, a při broušení legovaných kalených ocelí s malou tepelnou vodivostí.
- Karbid křemíku – je sloučenina křemíku s uhlíkem ( $\text{SiC}$ ), 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 křemíkování uhlíkových částic párami kyseliny křemičité. Technický karbid křemíku bývá dvojího druhu. Zelený karbid křemíku (KZ) s obsahem alespoň 97%  $\text{SiC}$  je tvrdší, ale méně houževnatý; používá se hlavně k ostření nástrojů ze slinutých karbidů. Černý karbid křemíku (KČ) má černou nebo tmavě modrou barvu a kovový lesk. Obsahuje neméně 95%  $\text{SiC}$ . Používá se ho často na brou-

šení kovů s malou pevností v tahu, jako je např. šedá a bílá litina, měď, mosaz, křehké druhy bronzu atd.

- Karbid boru – obsahuje krystalický karbid boru (do 94%  $B_4C$ ) a malé množství příměsí; vyrábí se v elektrických pecích z technické kyseliny borité ( $B_2O_3$ ) a uhlíkatého materiálu s malým obsahem popela ropného koksu

#### 1.3.4 Zrnitost

Volí se podle požadované drsnosti broušeného povrchu. Čím vyšší požadavky na drsnost povrchu, tím jemnější zrnitost. Pro větší úběr materiálu a případně broušení mědi, mosazi a hliníku se volí hrubší zrnitost. Označení zrnitosti podle ČSN ISO 525 (22 4503) koresponduje se světlostí ok kontrolních sít. Čím větší je údaj zrnitosti, tím je kontrolní síto (a také zrno) jemnější. To je podstatná změna oproti značení ČSN 22 4501, kde zrnitost vyjadřuje rozměr brusných zrn (číslo zrnitosti  $\times 10 =$  rozměr zrna v  $\mu m$ ). [6]

Tab.1. Značení zrnitosti

	Označení	
	ČSN 22 4501	ČSN ISO 525 (22 4502)
<b>Velmi hrubá</b>	250, 200, 160	Není
<b>Hrubá</b>	125, 100, 80, 63	4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 22, 24
<b>Střední</b>	50, 40, 32, 25	30, 36, 40, 46, 54, 60
<b>Jemná</b>	20, 16, 12, 10	70, 80, 90, 100, 120, 150, 180
<b>Velmi jemná</b>	8, 6	220, 240, 280, 320, 260, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200
<b>Zvlášť jemná</b>	4, 3, M32, M22, M15	Není

#### 1.3.5 Tvrdost

Tvrdost broušícího kotouče je dána silou jakou drží v broušícím kotouči jednotlivá zrna. Je do jisté míry závislá na podílu pojiva v broušícím kotouči a na velikosti lisovacího tlaku, kterým se broušící nástroj vytváří. Tvrdost je značena velkými písmeny abecedy. Čím je písmeno dále od počátku abecedy, tím je broušící nástroj tvrdší. [8]

Tab.2. Značení tvrdosti

	Označení	
	ČSN 22 4501	ČSN ISO 525 (22 4502)
<b>Velmi měkký</b>	G, H	Není
<b>Měkký</b>	I, J, K	A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K
<b>Střední</b>	L, M, N, O	L, M, N, O, P, Q
<b>Tvrký</b>	P, Q, R, S	R, S, T, U, V, W, X, Y
<b>Velmi tvrdý</b>	T, U	Není
<b>Zvlášť tvrdý</b>	V, W, Z	Není

### 1.3.6 Struktura

Struktura vyjadřuje vzdálenost mezi broušícími zrny (tzv. pórovitost) nebo také hutnost broušícího nástroje. Označuje se čísly od 0 do 14. Čím vyšší je číslo, tím je také vzdálenost mezi zrny větší. Hutné broušící materiály se volí na broušení tvrdých a křehkých materiálů. Na broušení houževnatých materiálů jsou vhodné kotouče pórovité. Zvlášť pórovité kotouče slouží k broušení součástí, které se nesmí broušením zahřívát. Běžně používané broušící kotouče mají strukturu podle této tabulky: [6]

Tab.3. Rozdělení struktur broušících zrn

Označení	Struktura	Objem pórů (%)
3	Hutná	13
4		18
5	polohutná	23
6		28
7		33
8	pórovitá	38

### 1.3.7 Pojivo

Pojivo vytváří můstky mezi brousicími zrny a jeho vlastnosti významně ovlivňují tzv. samoostření brousicího nástroje. Z hlediska chemického i technologického rozlišujeme několik typů pojiv: [6]

- Keramická pojiva – Nízkotavitelná - **V,VS,VX,VH,VP**,  
– Vysokotavitelná - **VBE,VXPC**
- Pryskyřičná pojiva – **B** (B28,B38,B5) ,
- Umělá pryskyřičná pojiva s textilní výztuží - **BF**
- Pryžové pojiva – **R** , pryžová pojiva s textilní výztuží – **RF**
- Silikátové pojiva - **S**
- Polyuretanové pojiva - **U**

Méně používané pojiva:

- Magnetizové pojiva - **Mg** , ● Šelakové pojiva - **E**

Keramické pojivo - brousicí nástroje s keramickým pojivem jsou křehké, citlivé vůči nárazu a bočnímu tlaku. Řezná kapalina jim neškodí a při dobrém skladování se jejich vlastnosti nemění. Mají univerzální použití.

Pryskyřičné pojivo - je nejpoužívanější při broušení slinutých karbidů a ocelí. Vyznačuje se vysokou produktivitou při broušení, dobrými samoostřicími vlastnostmi a nízkým vývinem tepla. Nástroje s pojivem z umělé pryskyřice jsou méně citlivé vůči nárazům a bočním tlakům, zvláště kotouče se sklotextilní výztuží. Slouží k Hrubování, broušení vnějších i vnitřních válcových ploch, rovinných ploch, řezání kovů, kamene a keramiky.

Pryžové pojivo - kotouče s pryžovým pojivem se používají na jemné ostření nástrojů, broušení a leštění.

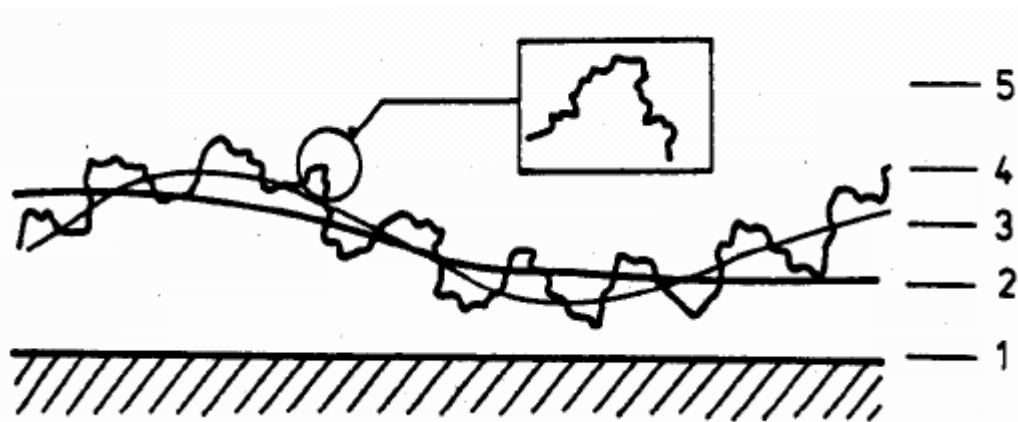
Polyuretanové pojivo – nástroje s polyuretanovým pojivem jsou určeny pro jemné broušení a leštění.

Magnetitové pojivo - pevnost magnetitového pojiva se skladováním snižuje, škodí mu vlhko, kyselé i zásadité prostředí. Kotouče s tímto pojivem jsou křehké, používají se jen pro jemný výbrus bez tepelného ovlivnění součástí.

Šelakové pojivo - kotouče s šelakovým pojivem se používají jako leštící pro leštění kame-  
ne.[6]

## 2 JAKOST POVRCHU

Moderní konstrukce jsou z velké části namáhány dynamicky. Proto je řada konstrukcí limitována únavovými činiteli, vlastnostmi materiálu, jeho strukturou apod. Příklady z provozu a analýza lomů dynamicky namáhaných součástí ukazují, že únavový lom vzniká obvykle na povrchu nebo těsně pod povrchem součásti. Bere-li se u součásti v úvahu její odolnost proti korozi pod napětím, pak je nutné zdůraznit, že povrch součásti, jeho stav a mikrogeometrie jsou prvotními činiteli, které ovlivňují podmínky vzniku koroze a následující únavový lom. Z toho vyplývá, že kromě jiných vlastností je odolnost proti únavě, resp. odolnost proti korozi, přímo závislá na jakosti povrchu dokončené plochy. Přesnost dodržení předepsaných geometrických parametrů je dána souhrnem jejich odchylek od ideální geometrie. Úchytky jsou definovány jako rozdíly skutečného tvaru plochy a tvaru plochy jmenovité ideální geometrie. V současné době není technologicky možné a často ani žádoucí vyrobit ideální rovné a hladké plochy, vyrobené technické povrchy mají odchylky tvaru, polohy a drsnosti. [7,3]



Obr. 6. Schématické znázornění geometrie povrchu v řezu

- kde
- 1 – ideální rovný povrch
  - 2 – odchylky tvaru a polohy
  - 3 – vlnitost povrchu
  - 4 – mikroskopické drsnosti
  - 5 – submikroskopické nerovnosti



## 2.1 Drsnost povrchu

Na drsnosti povrchu obrobku závisí hlavně počáteční opotřebení součásti a kvalita povrchové vrstvy má zase vliv na opotřebení během provozu. Vytváření mikrogeometrie a kvality povrchové vrstvy je složitý fyzikální proces, při kterém na sebe vzájemně chemicky a mechanicky působí všechny zúčastněné materiály. Na povrchové vrstvě obrobku se působením zrn brusiva vytváří velmi mnoho mikroskopických rýh, tvořících mikroprofil. Broušená plocha získá určitou ustálenou drsnost po velkém počtu průchodů brousicího kotouče s daným úsekem obrobku. Tato ustálená drsnost závisí na geometrických parametrech a vlastnostech zrna, stupni plastické deformace a chvění technologické soustavy.

Požadavky na drsnost povrchu se vyjadřují charakteristikou (veličinou) drsností povrchu (buď jednou, nebo několika) podle ČSN 01 4451, číselnou hodnotou příslušné veličiny a základní délkou, na které se veličina určuje. Normalizované charakteristiky drsnosti povrchu jsou následující:

**Ra** – střední aritmetická úchylka profilu

**Rz** – výška nerovnosti profilu z deseti bodů

**Rm** – největší výška nerovnosti profilu

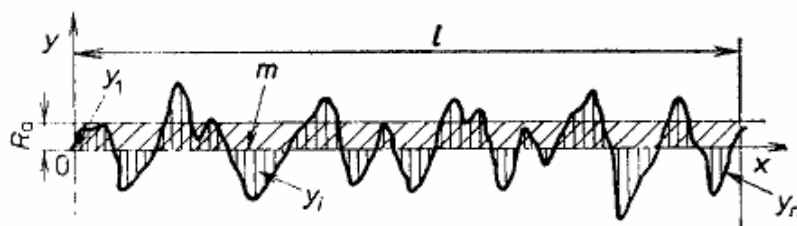
**Sm** – střední rozteč nerovnosti profilu

**S** – střední rozteč místních výstupků profilu

**tp** – nosný podíl

Definice jednotlivých charakteristik, možnosti jejich využití k popisu profilu, resp. nedostatky jsou následující: [3]

### 2.1.1 Střední aritmetická úchylka profilu Ra



Obr. 7. Vyjádření hodnoty Ra

Je přednostní výškovou charakteristikou drsnosti povrchu. Je to střední aritmetická hodnota absolutních úchylek profilu v rozsahu základní délky (6).

$$Ra = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l |y(x)| dx \quad \text{nebo} \quad Ra \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y(x_i)| \quad (6)$$

kde  $x$  – je úsečka profilu odečítaná na střední čáře

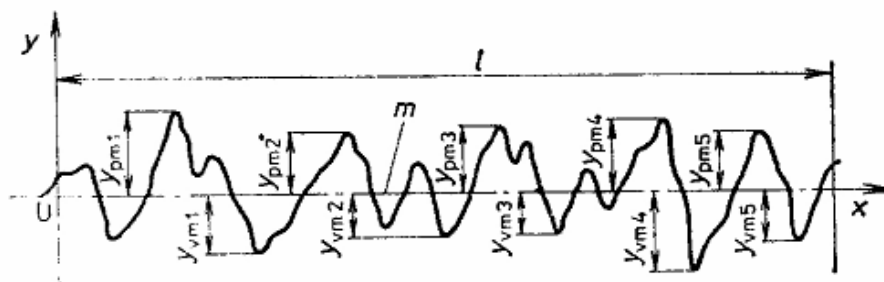
$y(x)$  – funkce popisující profil

$y_i$  – souřadnice  $n$  bodů profilu v mezích základní délky;  $i = 1, 2, 3, \dots, n$

$l$  – základní délka ;  $n$  – počet bodů profilu na základní délce

Je třeba si uvědomit, že výšková charakteristika  $Ra$  ve své podstatě udává pouze střední hodnotu vzdálenosti souřadnic jednotlivých bodů profilu zkoumaného povrchu od střední čáry profilu. Je pouze statistickou hodnotou. Z tohoto důvodu nemusí být  $Ra$  ve všech případech efektivní při hodnocení drsnosti povrchu, resp. Může vést i k omylům v případech posuzování povrchu členitých, pórovitých, povrchů porušených hlubokými rýhami, trhlinami, apod. Získané hodnoty vykazují poměrně značnou přesnost při opakovaném měření. Je zaručeno i jednoduché označování předepsané drsnosti povrchu na dílenských výkresech či v jiné výrobní dokumentaci. Není však možno přehlednout známou skutečnost, že dva povrchy mající stejnou hodnotu  $Ra$  mohou být zcela rozdílné ve svém chování z hlediska funkční spolehlivosti, popř. životnosti součásti. [3]

### 2.1.2 Výška nerovností profilu z deseti bodů $Rz$



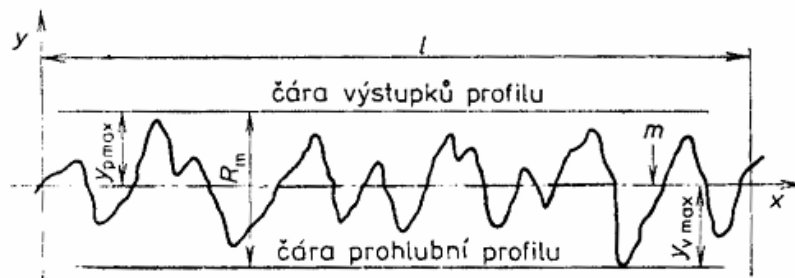
Obr. 8. Vyjádření hodnoty  $Rz$

Je definována jako střední hodnota absolutních výšek pěti nejvyšších výstupků profilu a hloubek pěti nejnižších prohlubní profilu v rozsahu základní délky (7) .

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vmi}|}{5} \quad (7)$$

Rz je zvláště vhodná pro hodnocení hrubých povrchů, například tam, kde není možno tyto povrchy pro jejich hrubost zhodnotit dotykovými profilometry, u nichž není možno nastavit příslušnou hodnotu mezní rozteče nerovnosti. [3]

### 2.1.3 Největší výška nerovností $R_m$



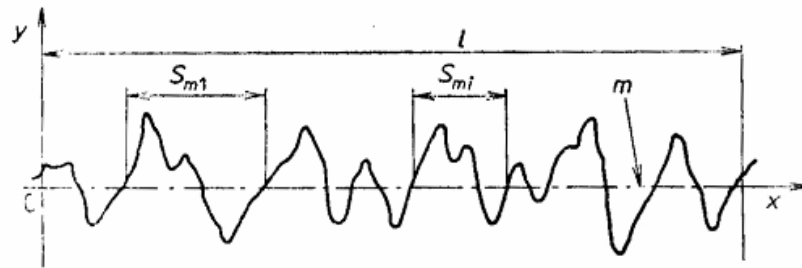
Obr. 9. Vyjádření hodnoty  $R_m$

Je výšková charakteristika drsnosti povrchu určená vzdáleností mezi čarou výstupku profilu a čarou prohlubní profilu v rozsahu základní délky, tedy (8) :

$$R_m = y_{pmax} - y_{vmax} \quad (8)$$

Největší výška nerovnosti  $R_m$  tedy udává pouze největší hloubku profilu kontrolované plochy v rozsahu základní délky. Je využívána pouze jako doplňkové měřítko drsnosti povrchu. Jako míra drsnosti povrchu má u funkčních povrchů poměrně malý význam, protože v řadě případů nevyjádří správně drsnost povrchu. [3]

### 2.1.4 Střední rozteč profilu $S_m$



Obr. 10. Vyjádření hodnoty  $S_m$

Je charakteristikou drsnosti povrchu v podélném směru povrchu. Určuje se jako střední hodnota roztečí nerovnosti profilu  $S_{mi}$  v rozsahu základní délky (9).

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi} = \frac{2l_1}{k-1} \quad (9)$$

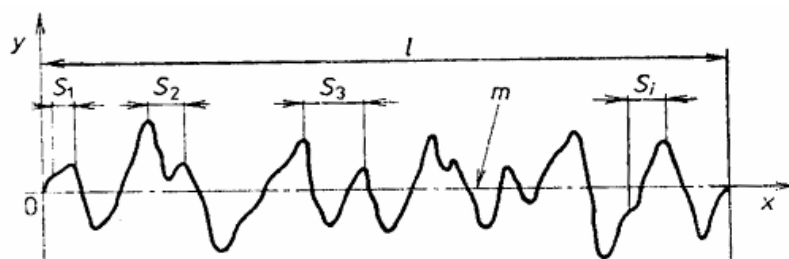
kde  $l_1$  - je délka úseku na střední čáře profilu ( $l_1 > l$ ) ohraničená prvním a posledním lichým průsečíkem křivky profilu se střední čarou.

$k$  - počet průsečíků křivky profilu se střední čarou na délce měřeného úseku

$n$  - počet roztečů na střední čáře profilu

Střední rozteč nerovností slouží pro délkové (frekvenční) ocenění drsnosti povrchu, zvláště pak pro zhodnocení základní periodické složky v profilu povrchu. U soustružení se hodnota střední rozteče nerovnosti profilu rovná hodnotě posuvu. [3]

### 2.1.5 Střední rozteč místních výstupků $S$



Obr. 11. Vyjádření hodnoty  $S$

Je charakteristikou drsnosti povrchu v podélném směru profilu. Určuje se jako střední hodnota roztečí místních výstupků, ležící v rozsahu základní délky (10).

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi} = \frac{l}{N-1} \quad (10)$$

kde  $S_1$  – rozteč místních výstupků, resp. Délka úseků střední čáry profilu mezi průmětem dvou nejvyšších bodů sousedních místních výstupků profilu.

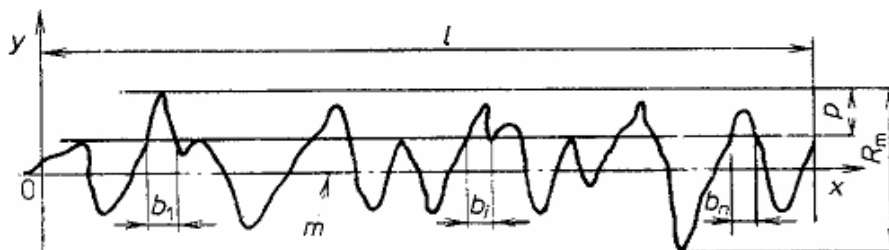
$n$  – počet roztečí na střední čáře profilu

$N$  – počet nejvyšších bodů místních výstupků profilu v rozsahu základní délky

$l$  – základní délka

Podobně jako střední rozteč nerovností profilu slouží i střední rozteč místních výstupků pro délkové (frekvenční) ocenění drsnosti povrchu. Zvláště pro zhodnocení náhodné složky v profilu povrchu. [3]

### 2.1.6 Nosný podíl $t_p$



Obr. 12. Vyjádření hodnoty  $t_p$

Je tvarovou charakteristikou profilu. Je definován jako poměr nosné délky profilu k základní délce (11).

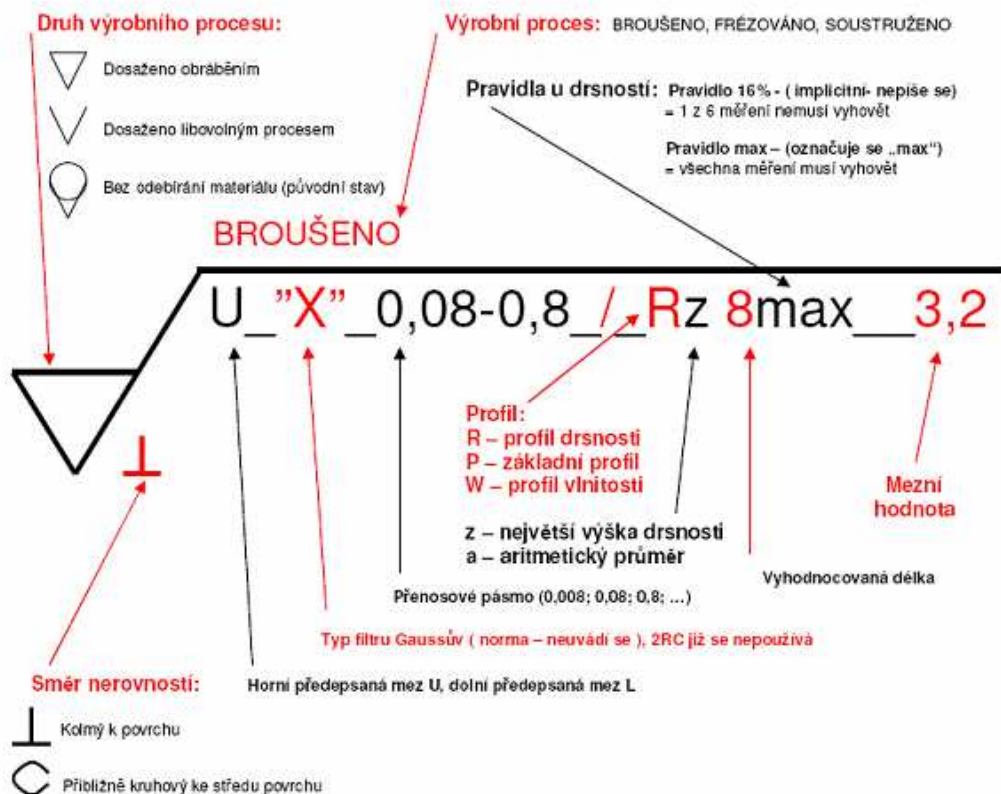
$$t_p = \frac{l_p}{l} \quad (11)$$

kde  $l$  – základní délka

$l_p$  – nosná délka profilu, součet délek úseků, vytvořených v určité poloze řezu v materiálu profilu čarou, ekvidistantní se střední čarou profilu v rozsahu základní délky.

Hodnocení tvaru povrchu pomocí nosného podílu, resp. Nosné křivky je poměrně starý dosud velmi užívaný způsob. Je však třeba kriticky poznamenat, že vyhodnocení nosného podílu plochy a následující sestavená nosných křivek plochy vychází z určitých předpokladů, které jsou značně problematické. Zjednodušení je v tom, že se nebere ohled na různý průběh příčné a podélné drsnosti. [3]

### 2.1.7 Značení drsnosti



Obr. 13. Kompletní značení drsnosti povrchu podle ČSN EN ISO 1302

## 2.2 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, broušícího vřeteníku kotouče a jeho tvarovou úchylností (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 broušícího kotouče,

zintezivní se chvění technologické soustavy, čímž se omezuje možnost snižovat velikost vlnitosti.

### 2.3 Dosahovaná přesnost a jakost povrchu

Technologie broušení se ve většině případů používá jako dokončovací operace a požadujeme proto, aby přesnost rozměrů a jakost obrobených ploch tomu odpovídala. Tyto parametry závisí především na tuhosti a přesnosti brusky, velikosti zrna a dalších vlastnostech brousicího kotouče, na způsobu broušení a řezných podmínkách.

Při jednotlivých způsobech broušení se dosahuje o řád lepších drsností povrchu a přesnosti rozměrů oproti obrábění nástroji s definovanou geometrií břitu. [4]

Tab. 4. Dosahovaná přesnost a drsnost povrchu při broušení

Broušení		Přesnost rozměru IT		Drsnost plochy Ra [ $\mu\text{m}$ ]	
		střední	rozsah	Střední	rozsah
Vnější rotační plochy	hrubování	10	9 až 11	1,6	0,8 až 3,2
	dokončování	5	5 až 6	0,4	0,2 až 0,6
	Jemné	4	3 až 5	0,2	0,05 až 0,4
Vnitřní rotační plochy	hrubování	9	9 až 11	1,6	1,6 až 3,2
	dokončování	7	5 až 7	0,8	0,4 až 1,6
	Jemné	5	3 až 6	0,2	0,05 až 0,4
Rovinné plochy	hrubování	10	9 až 11	1,6	1,6 až 3,2
	dokončování	7	5 až 7	0,8	0,4 až 1,6
	Jemné	5	3 až 6	0,2	0,05 až 0,4

Pro zpřesnění rozměrů broušené plochy se provádí tzv. vyjiskřování, kdy se brousícím kotoučem obrobek několikrát přebrousí bez přísuvu. Tím se vyrovnají pružné deformace soustavy stroj – nástroj – obrobek – přípravek, způsobené vlivem řezných sil. [4]

### 3 DOPROVODNÉ JEVY VZNIKAJÍCÍ PŘI BROUŠENÍ

#### 3.1 Tepelné jevy při broušení

V procesu mikrořezání se vytváří v povrchové vrstvě obrobku při broušení velký počet míst s vysokými teplotami, jejichž působením se povrchová vrstva intenzivně zahřívá.

Tepelná proces v povrchové vrstvě obrobku se vyznačuje vysokou rychlostí místního ohřevu, krátkou prodlevou na této teplotě a rychlým ochlazením (zvláště při použití chladicí kapaliny).

Téměř veškerá mechanická práce v procesu mikrořezání přechází při broušení v teplo a pouze její zanedbatelná část (desetiny procenta) se spotřebuje na přeměnu krystalické mřížky obráběného materiálu.

Vzniklé teplo přechází do obrobku, kotouče, třísky a řezné kapaliny (12):

$$Q_C = Q_O + Q_K + Q_T + Q_{CH} + Q_V \quad (12)$$

kte  $Q_O$  – teplo přecházející do obrobku

$Q_K$  – teplo přestupující do kotouče

$Q_T$  – teplo odcházející třískami

$Q_{CH}$  – teplo odebírané řeznou kapalinou

$Q_V$  – teplo vyzářené

Největší množství tepla (až 80%) přechází při broušení do obrobku, nejmenší část tepla se ztrácí vyzářováním do okolního prostředí.

Vysoké teploty broušení mohou způsobit defekty povrchové vrstvy obrobku (opal nebo trhlinky) a obrobek se znehodnotí. Proto se tepelný vliv stává jedním ze základních činitelů broušení.

##### 3.1.1 Rozdělení teplot

Při broušení rozeznáváme::

- 1) okamžitou teplotu  $Q_0$ , která se vyvíjí přímo v místě záběru zrna brusiva; dosahuje vysokých hodnot po krátkou dobu



- 2) stykovou teplotu  $Q_d$  v oblasti styku kotouče a obrobku (v místě broušení); vyhodnocuje její průměrnou hodnotu v rozmezí šířky kotouče
- 3) střední teplotu  $Q_s$  – ustálenou teplotu na povrchu broušeného obrobku. Okamžitá teplota nebyla ještě experimentálně změřena, lze ji však zhruba určit nepřímo podle strukturních změn ve velmi tenkých okrajových vrstvách obrobku

O vysokých okamžitých teplotách, které vznikají při broušení materiálu s vysokou pevností, svědčí proud jisker, vznikajících dokonce i při dostatečném množství řezné kapaliny. Tyto teploty zvyšují plastičnost obráběného kovu, a tím příznivě ovlivňují odebrání třísek. Styková teplota v místě broušení je mnohem větší než okamžitá (zvláště při použití řezné kapaliny), neboť teplo z místa broušení intenzivně přestupuje do obrobku.

Vznik a rozdělení tepla při broušení závisí na všech podmínkách broušení: na typu kotouče, řezných podmínkách, mechanických a fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu, vlastnostech řezné kapaliny atd.

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

Toho lze dosáhnout:

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

### 3.1.2 Řezné prostředky při broušení

Při broušení se používají různé řezné prostředky s chladícím a mazacím účinkem v pevném, kapalném i plynném stavu. Mají různé složení a fyzikálně chemické vlastnosti a podstatně ovlivňují produktivitu broušení a kvalitu broušené plochy.]

Pevné řezné prostředky – polymerní, lehce tavitelné, chemicky aktivní vrstvy tuhé pasty nanášené na brusný kotouč nebo obrobek

Plynné řezné prostředky – především aerosoly, což jsou rozprášené řezné kapaliny

Kapalné řezné prostředky – nejčastěji používané, mají chladicí, mazací, řezný a čistící účinek

Od řezné kapaliny se vyžaduje:

1. chladicí a mazací účinek, usnadňování odvodu třísek
2. antikorozní účinek
3. chemická a fyzikální stálost
4. musí být netoxická, baktericidní a hygienická
5. bezpečnost před požárem a explozí
6. příznivý vliv na sedimentaci odpadu broušení, aby nedocházelo k jeho opakovanému oběhu

### 3.1.3 Vznik jisker při broušení

Jiskry, které vznikají při broušení kovů s vysokou pevností, jsou velmi drobné roztavené částice kovů, odletující ve směru tečny k obvodu rotujícího kotouče v místě jeho styku s obrobkem. Tříska nebo roztavené částice kovu odletují působením odstředivé síly.

Obsahuje-li broušený kov uhlík, je styk rozžhavených částic se vzduchem provázen oxidací, přičemž se uhlík spaluje na oxid uhličitý ( $C+O_2=CO_2$ ) za vzniku jisker.

Barva a tvar jisker (struktura paprsků) jsou dány hlavně chemickým složením broušeného materiálu; toho se využívá k určování druhů ocelí podle jisker vznikajících při broušení.

## 3.2 Zbytková napětí

Zbytková napětí jsou definována jako napětí, která se v materiálu vyskytují bez působení vnějšího zatížení. Jejich vznik je spojen s technologií výroby a úpravy materiálu. Velký význam mají povrchová zbytková napětí, přičemž jejich vliv může být prospěšný i škodlivý. Tahová napětí jsou považována za škodlivá. Tlaková napětí naopak zlepšují únavové vlastnosti materiálu a omezují vznik a rozvoj povrchových trhlin. Vysoké hodnoty zbytkového napětí a s nimi spojené relaxační procesy obecně ovlivňují pevnostní charakteristiky materiálu a mohou vést k nestabilitě tvaru a kvality povrchu součásti.

Zbytková napětí:

1. 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.
2. Druhu – Zasahují objem několika krystalových zrn. Porušením kompaktnosti (např. jejím rozdělením) součásti nemusí dojít ke změně makrogeometrie.
3. 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.

Zbytková napětí vznikají při:

- 1). nerovnoměrných plastických deformací v obrobeném povrchu
- 2) nerovnoměrném ohřevu a ochlazení materiálu, které vyvolá jeho roztažení a smršťování
- 3) nerovnoměrné změně struktury, vyvolané působením tepla a mechanických sil
- 4) chemických procesech, spojených s reakcí částic pronikajících do povrchové vrstvy

### 3.3 Zpevnění

Deformační zpevnění obráběného materiálu při plastické deformaci můžeme charakterizovat velikostí tangenciálního napětí  $\tau$ , které vyvolává smyk. V prvním přiblížení jej lze charakterizovat tangenciálními napětími v třech rozlišných zónách – v zóně tvoření třísky a v zóně kontaktu třísky s obráběným materiálem na čele a na hřbetu zrna. Takové rozdělení podmiňuje to, že ve sledovaných zónách je gradient deformace, rychlosti deformace a teploty. Zpevnění obráběného materiálu při plastické deformaci v zóně tvoření třísky můžeme přibližně charakterizovat střední hodnotou smykového napětí na plochu smyku  $\tau$ .

Podobně můžeme charakterizovat zpevnění při plastické deformaci v kontaktních vrstvách střední hodnotou smykového napětí deformovaných vrstev třísky podél čela zrna  $\tau_{ky}$  a střední hodnotou smykového napětí plasticky deformovaných vrstev obráběného materiálu

podél hřbetu zrna  $\tau_{ka}$ . Protože teploty a rychlost deformace na čele a hřbetu zrna se odlišují málo můžeme přibližně napsat  $\tau_{ka} \approx \tau_{ky} \approx \tau_{ka}$ .

Rozsáhlé experimentální studie plastické deformace v zóně tvoření třísky ukázalo, že velikost poměrné deformace  $\varepsilon$  a rychlost deformace  $\dot{\varepsilon}$  obráběného materiálu jsou v místě smykové plochy a v kontaktních vrstvách neobyčejně velké a mnohokrát převyšují deformaci materiálu při standardních deformačních zkouškách. Například velikost poměrné deformace na ploše smyku se při obrábění plastických materiálů pohybuje v hranicích  $\varepsilon = 2$  až  $10$  a v kontaktních vrstvách  $\varepsilon = 20$  až  $50$ . Při standardních zkouškách v tahu bývá  $\varepsilon < 1$ .

V začáteční fázi se s zvětšováním deformace materiál intenzivně zpevňuje a napětí prudce roste. Dalším zvětšováním deformace se snižuje přírůstek napětí a křivka deformačního zpevnění se asymptoticky blíží k určité hranici. Můžeme dokázat, že když smyková deformace dosahuje  $\varepsilon = 1$ , možnosti zpevňování většiny materiálů jsou vyčerpané. [2]

### 3.4 Opotřebení brousicího kotouče

Opotřebení pracovní plochy brousicího kotouče je složitý fyzikálně chemický proces jehož průběh závisí na všech podmínkách broušení: charakteristice kotouče, vlastnostech obráběného materiálu, řezných podmínkách atd.

Podle vlastnosti brousicích kotoučů (tvrdosti, druhu pojiva, brusiva atd.) a podle řezných podmínek probíhá při broušení buď otupení kotouče, nebo se uplatňuje jeho samoostření.

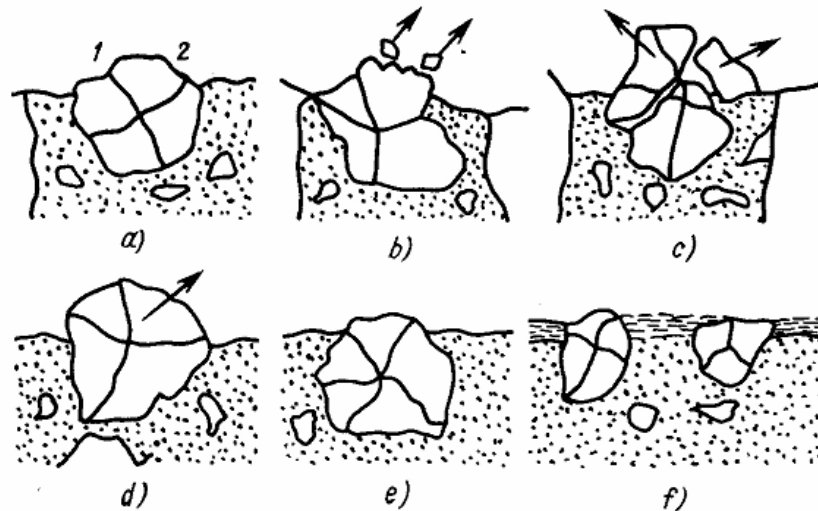
Otupení kotouče nastává v důsledku vylamování nevhodně položených zrn brusiva a jejich postupným štěpením a zaoblováním, takže zrna ztrácejí řezivost.

Samoostření brousicího kotouče probíhá v důsledku postupujícího otupování zrn brusiva, která jsou vzrůstajícím řezným odporem vylamována (celá nebo jen jejich části) z pojiva. Po vydrolení pojiva pak začínají pracovat nová zrna, takže se pracovní plocha kotouče neustále obnovuje. Tato schopnost obnovování řezné plochy je význačnou specifickou vlastností brousicích kotoučů.

Na počátku činnosti kotouče se na vrcholech zrn vytvářejí opotřebené plošky, které se postupně zvětšují a podporují účinky všech činitelů broušení a růst řezných sil, jejich působení

ním se zrno i pojivo rozrušují. Jsou –li zrna s pojivem dostatečně pevně spojena, mohou být plošky opotřebení dosti velké.

Podle podmínek broušení (fyzikálně mechanické vlastnosti urna, obráběného materiálu a pojiva, řezných podmínek atd.) rozlišujeme tyto základní druhy opotřebení:



Obr. 14. Základní způsoby opotřebení brousícího kotouče

- a) Otěr řezných částí (vrcholů) zrn brusiva se vznikem více či méně hladkých plošek
- b) Mikroskopické porušování (štěpení zrn) – s oddělováním malých úlomků
- c) Porušování celých zrn – s oddělováním celých částí zrna
- d) Úplné vylamování zrn z pojiva
- e) Porušování působením chemických vlivů ve styčném pásmu zrna a obráběného materiálu
- f) Difúzní a adhezní opotřebení – vznikající v zóně broušení při vysokých teplotách
- g) Zanášení prostoru mezi zrny (pórů) třískami a brusným odpadem

## 4 KUBICKÝ NITRID BORU

Kubický nitrid boru (CBN) je v současnosti druhým nejtvrdším materiálem. Je to syntetický materiál, který se v přírodě nevyskytuje.

### 4.1 Výroba

Podobně jako diamant je i CBN vyráběn syntézou a to hexagonálního nitridu boru. CBN 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 vícerymi 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. [10]

### 4.2 Vlastnosti

Tab. 5. Základní vlastnosti CNB

Vlastnost	KNB
Typ mřížky	Kubická
Délka strany mřížky [nm]	0,3616
Hustota [g.cm <sup>-3</sup> ]	3,48
Tvrдость podle Knoop	8000-10000
Tepelná stálost [°C]	1500-1600
Počet atomů v 1 cm <sup>3</sup>	1,69x10 <sup>23</sup>

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. [10]

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. [5]

### 4.3 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, zápusťky 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 snížená doby prostoje technologického zařízení. [5]

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 bránili 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 přísadky a vyšší tvrdostí povrchové vrstvy. [5]



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

V teoretické části bakalářské práce byla vypracována studie na téma: Broušení materiálu s využitím kubického nitridu boru. Obecněji je v této práci popsáno broušení a jeho doprovodné jevy jakožto technologie a dále je zde popsán kubický nitrid boru.

V praktické části byly řešeny následující problémy:

- 1) Broušení kovových a plastových vzorků při různých technologických podmínkách (hloubka úběru, posuvová rychlost)
- 2) Měření řezných sil při broušení různými technologickými podmínkami
- 3) Měření drsností Ra, Rz
- 4) Vyhodnocení a grafické zpracování naměřených veličin

Cílem této bakalářské práce bylo určit vliv technologických podmínek na výstupní parametry při broušení kovových a plastových vzorků. K měření jsme jako kovových vzorků použili materiál 19436.4, 14109.4 a jako plastové vzorky jsme použili materiál PP, PMMA.

## 6 BROUŠENÍ, MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL A MĚŘENÍ DRSNOSTI

Na rovinné brusce BRH 20.03 F bylo celkem broušeno 4 materiály (19436.4, 14109.4, PP, PMMA). Broušení probíhalo na všech materiálech při rychlosti posuvu 7 m/min, 14m/min a 21m/min. při úběru 0,03mm a totéž bylo provedeno pro hloubku úběru 0,005mm. Pro všechny tyto kombinace technologických podmínek byly pomocí dynamometru zaznamenávány velikosti radiální síly  $F_p$  a tangenciální řezné síly  $F_c$ . A následně byly také při všech podmínkách změřena jakost povrchu pomocí drsností  $R_a, R_z$ .

### 6.1 Bruska BRH 20.03F

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

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 odměrování 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 elektřiny tvoří samostatné celky umístěné mimo stroj. Bruska také může pracovat s ruční obsluhou v uzavřeném nebo neuzavřeném automatickém cyklu. [12]

Tab. 6. 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



*Obr. 15. Rovinná horizontální bruska BRH 20.03F*

## 6.2 Měření sil

Měření řezných sil  $F_p$ ,  $F_c$  bylo provedeno na dvousložkovém tenzometrickém dynamometru. Do tohoto zařízení byly upnuty všechny použité materiály a tenzometrický dynamometr byl upnut na pracovní stůl brusky BRH 20.03.F. Pomocí kabelů byl dynamometr spojen se s měřícím 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. 16. Tenzometrický dynamometr*

Hodnoty řezných sil byli poté statisticky vyhodnoceny a to pomocí:

1) **Odhad aritmetického průměru** (13):

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n Xi}{n} \quad (13)$$

kde:  $\bar{X}$  - odhad aritmetického průměru Fc, Fp,

$Xi$ - jednotlivá hodnota Fc,Fp z celkového počtu hodnot  $i$

$n$  – počet hodnot výběru

2) **Odhad směrodatné odchylky** (14):

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n Xi - \bar{X}}{n-1} \quad (14)$$

kde:  $\bar{S}$  - odhad směrodatné odchylky

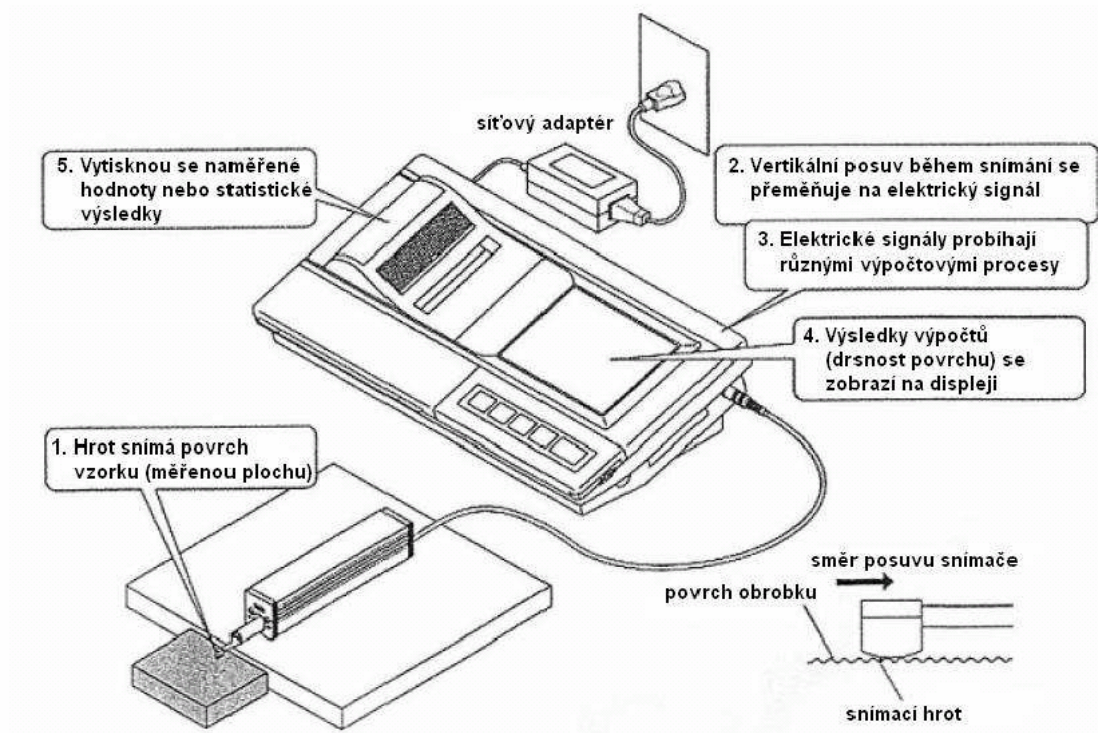
3) **Odhad standardní nejistoty typu A** (15):

$$u_A = \frac{\bar{S}}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

kde:  $u_A$  - odhad standardní nejistoty typu A

### 6.3 Měření jakosti povrchu

Měření jakosti povrchu bylo prováděno na všech materiálech při všech různých technologických podmínkách na přístroji MITUTOYO SJ-301. Tento přístroj je vhodný pro použití měření jakosti povrchu v dílenském prostředí. Snímací hrot přístroje zaznamenává i nejméně nepravdelnosti povrchu vzorku. Jakost se vypočítá z vertikálního posuvu snímacího hrotu, ke kterému dochází, když snímací hrot přejíždí přes nepravdelnosti povrchu. Výsledky měření se zobrazí digitálně i graficky na speciální dotekové ovládací obrazovce a pomocí integrované tiskárny lze tyto výsledky vytisknout [13].



Obr. 17. Schéma přístroje Mitutoyo SJ-301

## 7 CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

Pro vyhodnocení řezných sil a drsností byly použity celkem čtyři materiály. Dva vzorky ocelové a dva plastové.



*Obr. 18. Vzorky použité při broušení*

- Ocelové materiály:
- 14109.4 - konstrukční legovaná ocel, kalená
  - 19436.4 – nástrojová ocel, kalená
- Plastové materiály:
- PMMA – Polymethylmetakrylát
  - PP - Polypropylen

### 7.1 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, 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. Jsou vhodné na valivá ložiska. [14]

### 7.2 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 ke kalení v oleji a na vzduchu. Obsahuje 1,8 až 2,05% C, 0,2 až 0,45Mn, 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 nestejný ohřev, vhodná ke kalení na sekundární tvrdost (možnost nitridování).

Tato ocel se používá na nástroje pro stříhání za studen, 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. [14]

### 7.3 PMMA – Polymetylmetakrylát

Polymetylmetakrylát, známější pod obchodním názvem Plexisklo nebo jako akrylátové sklo je průhledný syntetický polymer s vlastnostmi termoplastu. PMMA se vyrábí blokovou polymerací methylmetakrylátu (lité plexisklo), nebo extruzí methylmetakrylátu (extrudované plexisklo). Oba způsoby vedou k čirým materiálům.

Mezi přednosti PMMA patří vysoká tvrdost, tuhost a pevnost, vysoký lesk, odolnost proti poškrábání, výborné optické vlastnosti a vysoká tepelná odolnost.

PMMA nalézá uplatnění všude tam, kde se využijí jeho přednosti, zejména optické, tedy vysoká průhlednost. Vyrábějí se z něj různé průhledné kryty, kryty svítlen, displejů. Značné rozšíření uplatnění našel v automobilovém průmyslu při výrobě krytu světel, tachometrů apod. [14]

### 7.4 PP – Polypropylen

Vzhledem ke stupni krystalinity dosahující 60% až 75% je polypropylen neprůhledný. Polypropylen má menší odolnost vůči mrazu, oxidaci a povětrnostním podmínkám. Na druhé straně má dobré vlastnosti jako jsou pevnost, tvrdost a odolnost vůči oděru. Je také méně propustný pro plyny a páry.

Polypropylen se zpracovává vstřikováním a vyfukováním na menší a duté předměty, vytlačováním na trubky, desky a profily, výtlačným vyfukováním na fólie. Vzhledem k jeho lepšímu mechanickému vlastnostem se využívá na součásti strojů a přístrojů, např. v automobilovém a spotřebním průmyslu (přístrojové desky, ventilátory, nárazníky, součásti vysavačů, kuchyňských přístrojů aj.) i na trubky a vodní armatury. Odolnost vůči sterilizačním teplotám umožňuje jeho použití na dílce injekčních stříkaček a jiné zdravotnické techniky. [15]



## 8 CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ

Při broušení byly použity následující kotouče:

- 1) A 99B 80 Is(K) 9V
- 2) B 126K 100 8-VII

*Tab. 7. Vybrané parametry brousících kotoučů*

Označení kotouče	typ zrna	zrnitost	Tvrдость
A 99B 80 Is(K) 9V	bílý korund	80 (hrubá)	Is(K) (měkký)
B 126K 100 8-VII	kubický nitrid boru	100 (hrubá)	V (tvrdý)

Z Tab.1. vidíme, že použité brousící kotouče se liší především v typu zrna a tvrdostí kotouče. Oba kotouče mají stejnou hrubou zrnitost. Kotouč A 99B 80 Is(K) 9V má pojivo keramické, kdežto kotouč B 126K 100 8-VII má pojivo pryskyřičné. Před každou změnou řezných podmínek broušení byl kotouč vždy zarovnán diamantovým hrotem a obrobek byl před měřením řezných sil několikrát přebroušen kvůli zarovnání vzorku.

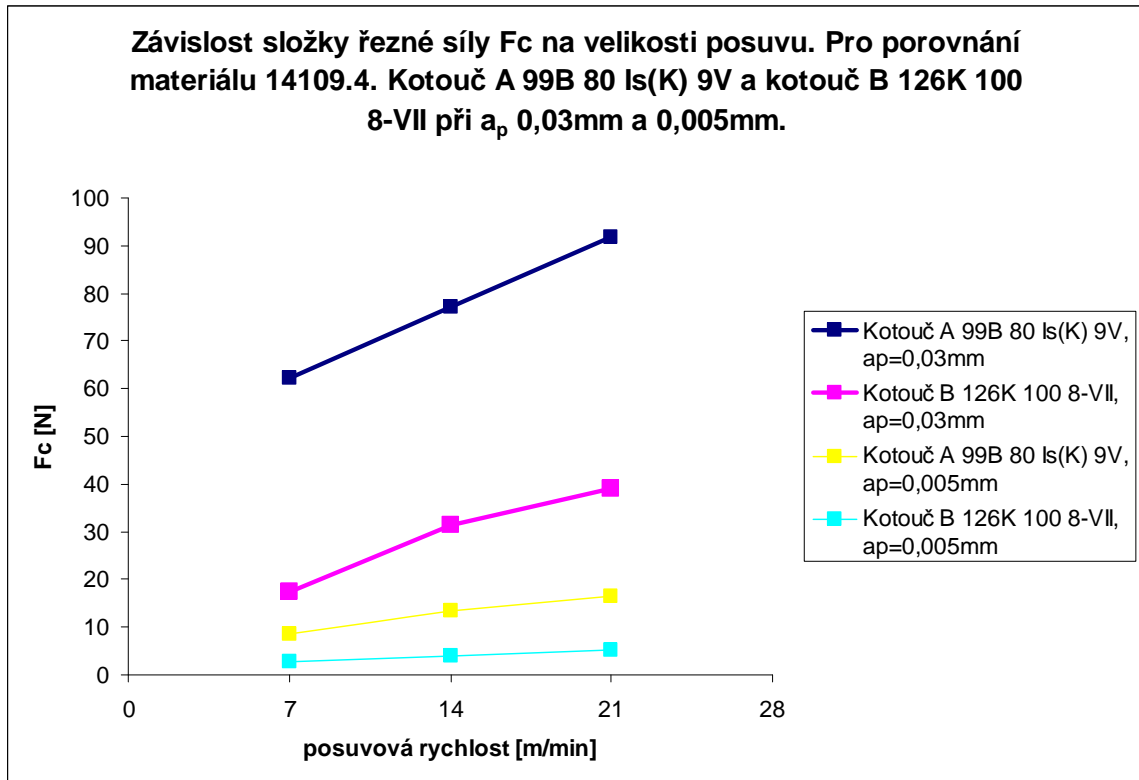
## 9 HODNOCENÍ ŘEZNÝCH SIL PODLE DRUHU KOTOUČE A VELIKOSTI ÚBĚRU

Při broušení se měnila velikost hloubky úběru a rychlost posuvu. Rychlost posuvu byla 7m/min, 14m/min a 21m/min. Tyto rychlosti posuvu byli použity pro hloubku úběru 0,03mm a 0,005mm. Při těchto technologických podmínkách byly všechny čtyři materiály broušeny kotoučem A 99B 80 Is(K) 9V a kotoučem B 126K 100 8-VII. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny přístrojem Spider 8 a pomocí softwaru v PC převedeny do textových souborů s numerickými hodnotami. V programu Excel byly tyto hodnoty statisticky zpracovány. Poté byla zvlášť pro každý vzorek (materiál) graficky vyhodnocena závislost velikosti řezných sil na rychlosti posuvu pro hloubky úběru 0,03mm a 0,005mm.

Následující grafy jsou porovnáními velikosti řezných sil pro brousící kotouče A 99B 80 Is(K) 9V a kotouče B 126K 100 8-VII a to vždy pro jeden materiál.

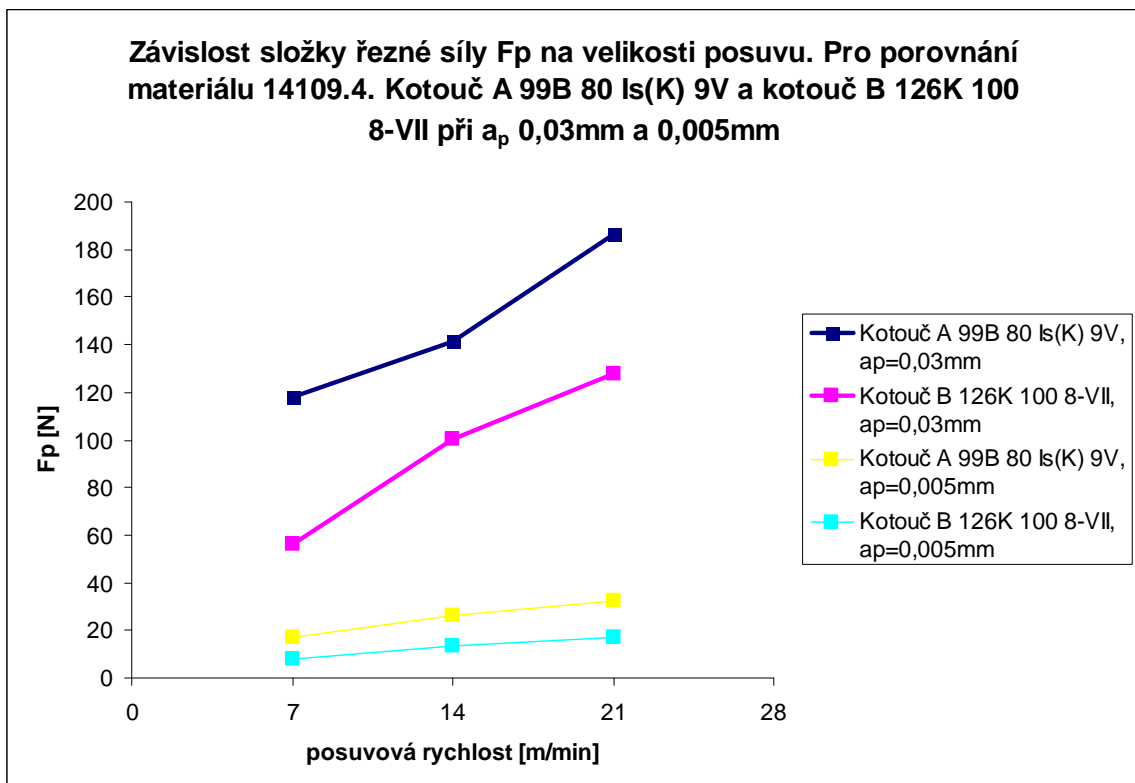
## 9.1 Materiál 14109.4

### 9.1.1 Porovnání velikosti řezné síly $F_c$ pro jednotlivý brousící kotouč při různé $a_p$



Obr. 19. Porovnání velikosti řezných sil  $F_c$  pro materiál 14109.4

Z Obr. 19. vyplývá, že s rostoucí posuvovou rychlostí se řezná síla  $F_c$  zvyšuje, tzn. čím vyšší je posuvová rychlost, tím vyšší je tangenciální řezná síla  $F_c$ . Řezná síla  $F_c$  je větší pro úběr 0,03mm než pro úběr 0,005mm, tzn. čím větší je úběr materiálu, tím vyšší je tangenciální síla  $F_c$ . Při broušení dochází také k rychlému ohřevu broušených ploch což není příznivé pro materiály cementované a kalené (14109.4, 19436.4) 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 zrnny, aby bylo tomuto jevu zabráněno. Řezná síla  $F_c$  je při broušení materiálu 14109.4 vyšší, brousíme –li materiál kotoučem A 99B 80 Is(K) 9V a to při úběru 0,03mm i 0,005mm.

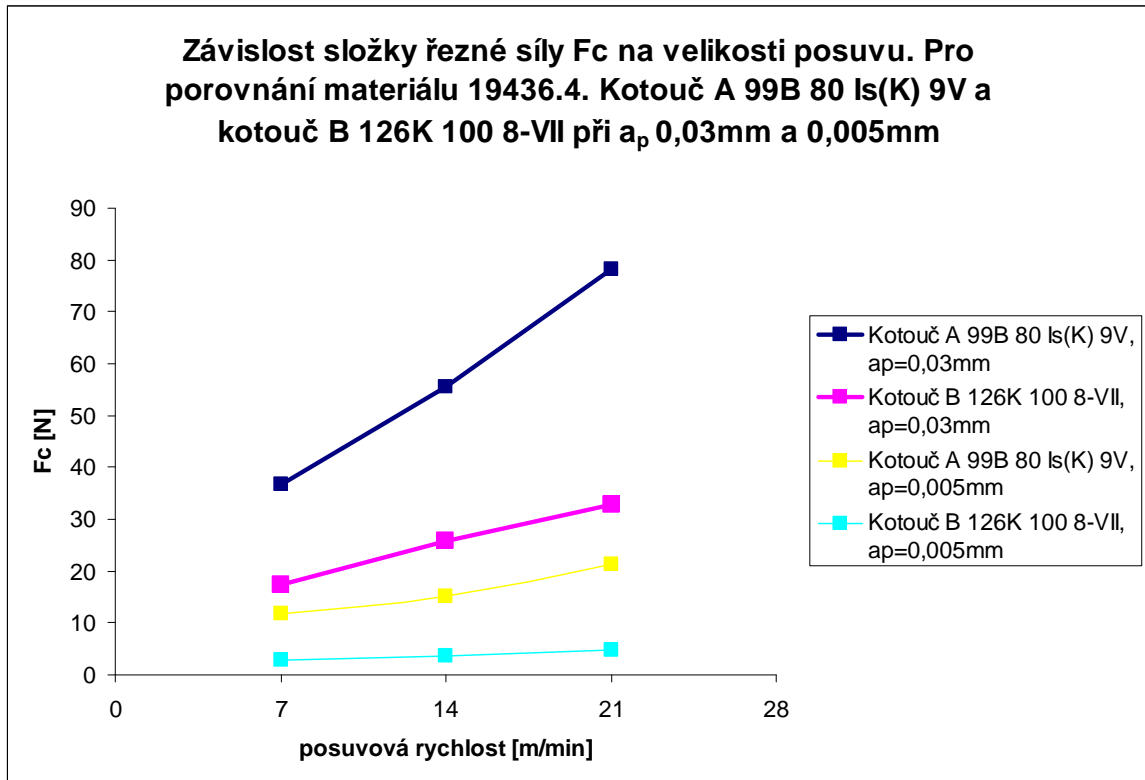
9.1.2 Porovnání velikosti řezné síly  $F_p$  pro jednotlivý brousící kotouč při různé  $a_p$ 

Obr. 20. Porovnání velikosti řezných sil  $F_p$  pro materiál 14109.4

Z Obr. 20. vyplývá, že pro radiální sílu  $F_p$  při broušení materiálu 14109.4 platí totéž, co platí pro tangenciální sílu  $F_c$ . Pro broušení při úběru 0,03mm což je oproti hloubce úběru 0,005mm velký rozdíl úběru by bylo vhodné použít kotouč s hrubším zrnem. Proto byli také naměřeny menší síly u kotouče z kubického nitridu boru jenž má hrubší zrno.

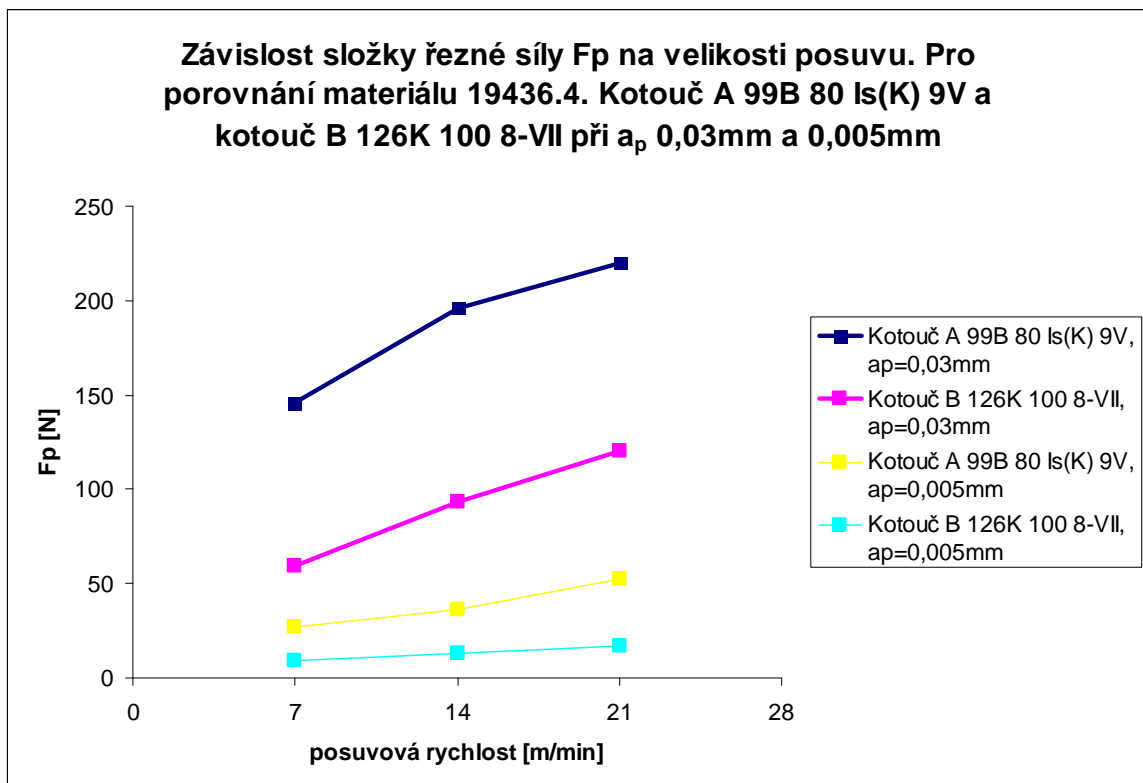
## 9.2 Materiál 19436.4

### 9.2.1 Porovnání velikosti řezné síly $F_c$ pro jednotlivý brousící kotouč při různé $a_p$



Obr. 21. Porovnání velikosti řezných sil  $F_c$  pro materiál 19436.4

Z Obr. 21. lze vidět, že s rostoucí posuvovou rychlostí se řezná síla  $F_c$  zvyšuje, tzn. čím vyšší je posuvová rychlost, tím vyšší je tangenciální řezná síla  $F_c$ . Řezná síla  $F_c$  je větší pro úběr 0,03mm než pro úběr 0,005mm. Ke snížení hodnot řezných sil pro velké úběry je možno použít brousících kotoučů s hrubším zrnem. Materiál 19436.4 je velmi tvrdý a vzorek jenž byl broušen měl malou stykovou plochu, proto by bylo lépe použít pro tento vzorek kotouč s menší pórovitostí. Řezná síla  $F_c$  je při broušení materiálu 19436.4 vyšší, brousíme –li materiál kotoučem A 99B 80 Is(K) 9V a to při úběru 0,03mm i 0,005mm, což zapříčiňuje jeho jemnější zrno oproti kotouči z kubického nitridu boru.

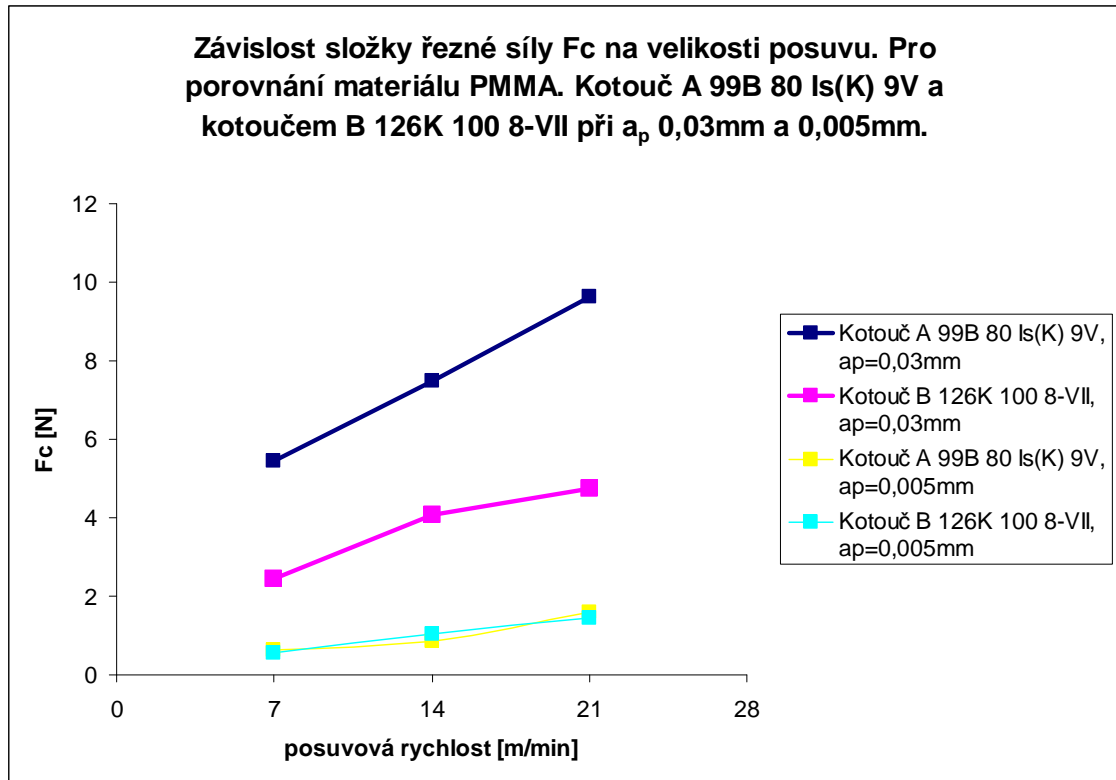
9.2.2 Porovnání velikosti řezné síly  $F_p$  pro jednotlivý brousící kotouč při různé  $a_p$ 

Obr. 22. Porovnání velikosti řezných sil  $F_p$  pro materiál 19436.4

Na Obr. 22. můžeme vidět, že pro materiál 19436.4 platí pro sílu radiální  $F_p$  totéž jako pro tangenciální sílu  $F_c$ . Jelikož je materiál 19436.4 velice tvrdý je lépe na jeho broušení použít měkčích kotoučů. Nejvyšší posuvová rychlost při broušení byla 21m/min. Pro tuto a vyšší rychlosti je lépe použít kotouče s hrubším zrnem a to především pro materiály s velkou stykovou plochou. Materiál 19436.4 je také materiál 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.

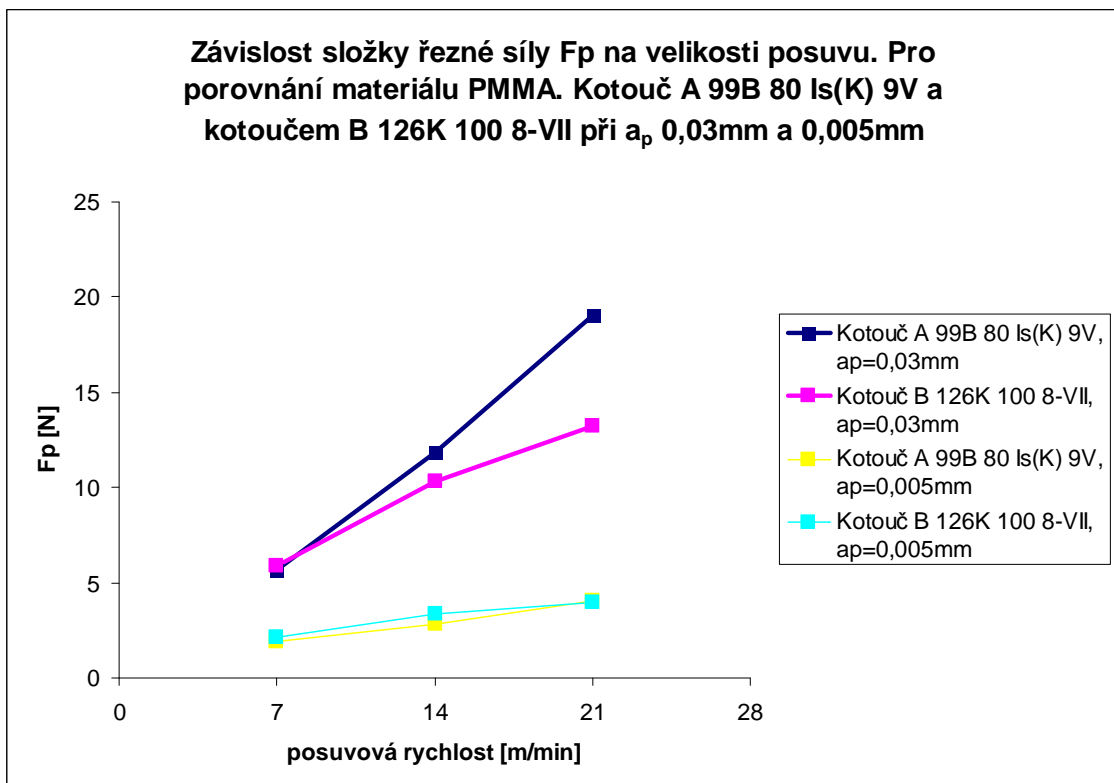
### 9.3 Materiál PMMA

#### 9.3.1 Porovnání velikosti řezné síly $F_c$ pro jednotlivý brousící kotouč při různé $a_p$



Obr. 23. Porovnání velikosti řezných sil  $F_c$  pro materiál PMMA

Z Obr. 23. vyplývá, že i u materiálu PMMA se s rostoucí posuvovou rychlostí řezná síla  $F_c$  zvyšuje, tzn. čím vyšší je posuvová rychlost, tím vyšší je tangenciální řezná síla  $F_c$ . I zde platí, že čím vyšší je hloubka úběru, tím vyšší je řezná síla  $F_c$ . Pro materiál PMMA jsou hodnoty řezných sil u hloubky úběru 0,005mm pro oba kotouče velice podobné, jelikož mají oba kotouče hrubou zrnitost a pro takto malý odběr již nelze (u tohoto materiálu s mnohonásobně menší tvrdostí a pevností než ocelové vzorky) poznat mezi nimi rozdíl.

9.3.2 Porovnání velikosti řezné síly  $F_p$  pro jednotlivý brousící kotouč při různé  $a_p$ 

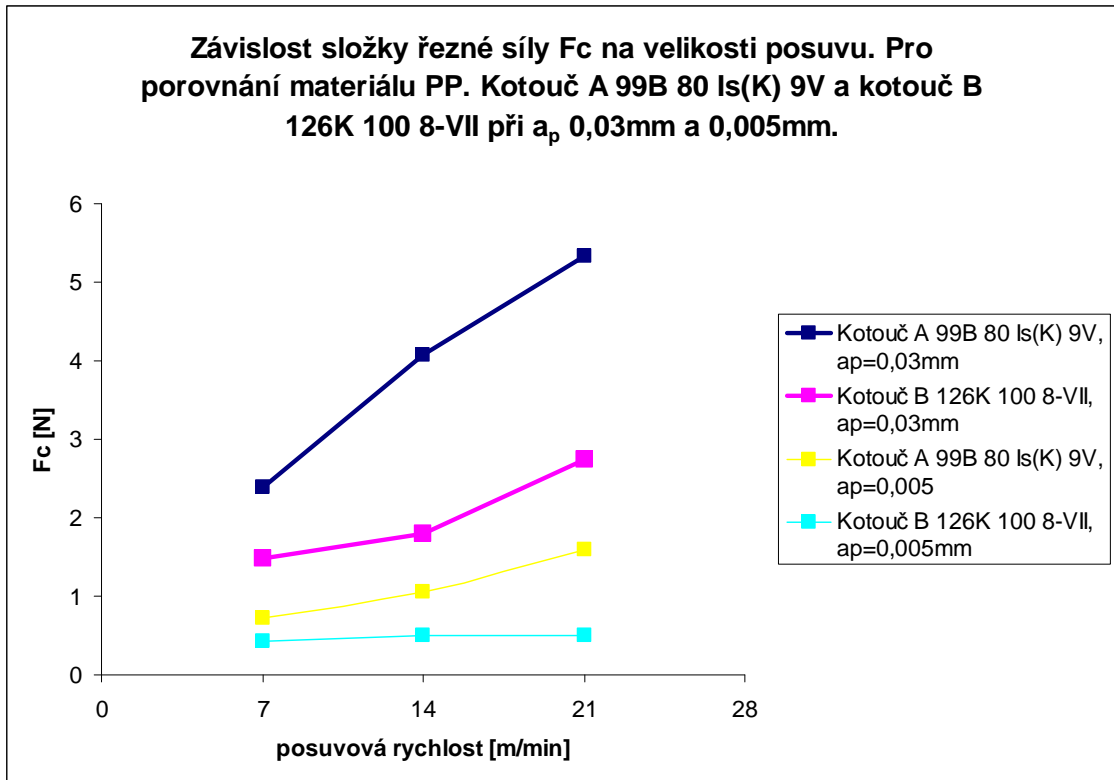
Obr. 24. Porovnání velikosti řezných sil  $F_p$  pro materiál PMMA

Pro radiální řezné síly  $F_p$  při broušení materiálu PMMA platí z Obr. 24. totéž, co platí pro tangenciální řezné síly  $F_c$  při stejných řezných podmínkách. Nejvyšších hodnot řezné síly  $F_p$  je dosažena při broušení s hloubkou úběru 0,03mm a to kotoučem A 99B 80 Is(K) 9V. Kotouč z kubického nitridu boru se ovšem hodnotám tohoto kotouče silně přibližuje a to v případě hloubky úběru 0,03mm i 0,005mm.



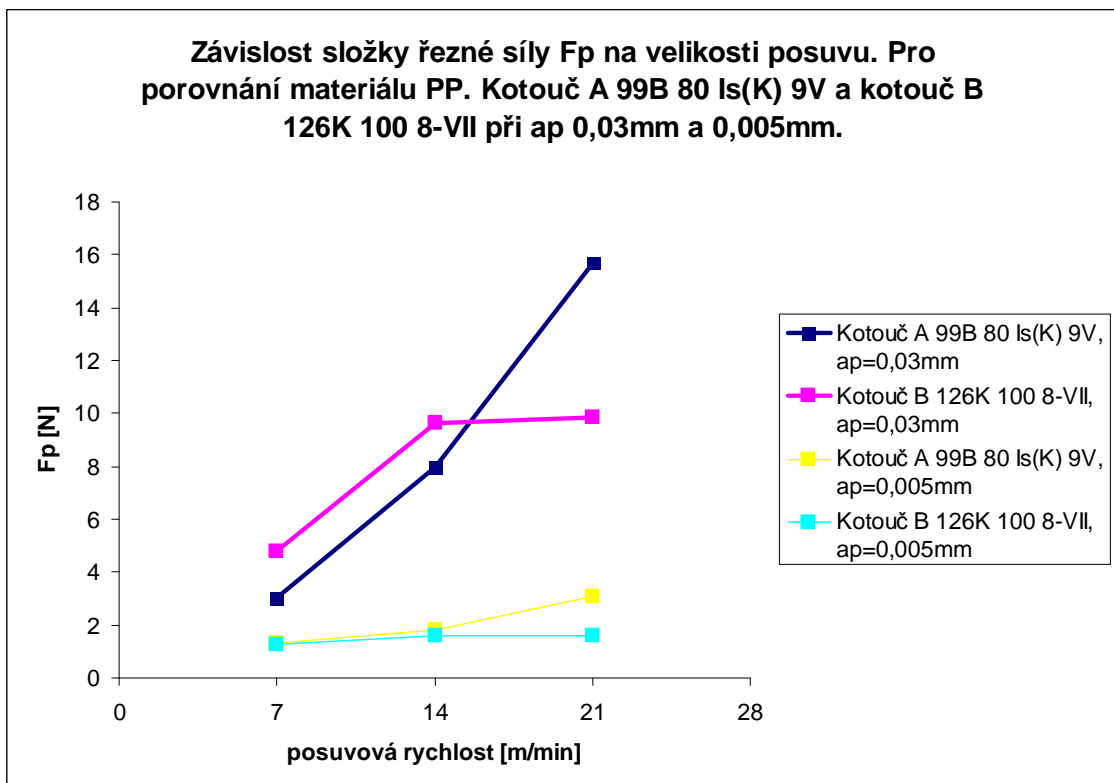
## 9.4 Materiál PP

### 9.4.1 Porovnání velikosti řezné síly $F_c$ pro jednotlivý brousící kotouč při různé $a_p$



Obr. 25. Porovnání velikosti řezných sil  $F_c$  pro materiál PP

Na Obr. 25. lze jako u všech předchozích materiálů vidět, že s rostoucí posuvovou rychlostí a při vyšším úběru roste i velikost řezné síly  $F_c$ . Tento materiál je oproti materiálům ocelovým mnohem měkčí a proto by bylo vhodné použít kotouč s vyšší tvrdostí. Řezná síla  $F_c$  je při broušení materiálu PP vyšší, brousíme-li materiál kotoučem A 99B 80 Is(K) 9V a to jak při úběru 0,03mm tak i 0,005mm.

9.4.2 Porovnání velikosti řezné síly  $F_p$  pro jednotlivý brousící kotouč při různé  $a_p$ 

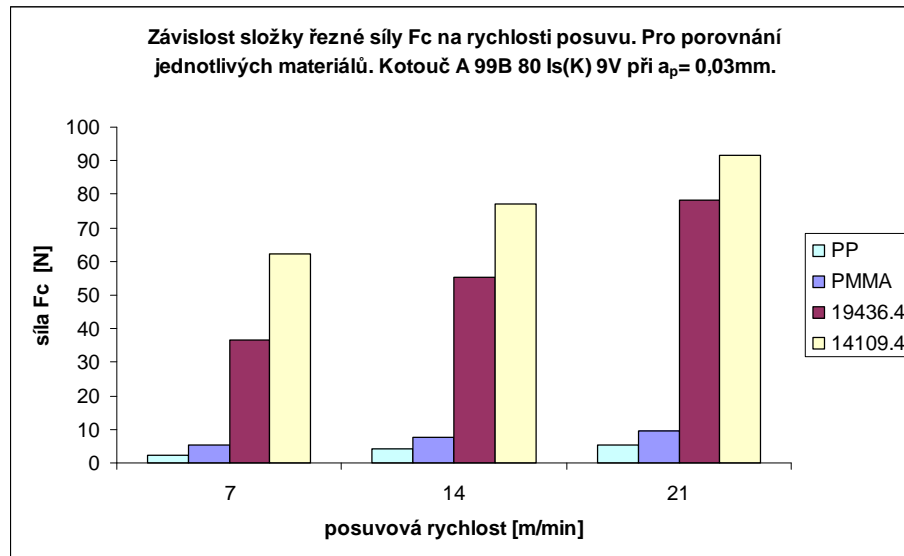
Obr. 26. Porovnání velikosti řezných sil  $F_p$  pro materiál PP

Nejmenších sil dosahuje jako u většiny materiálu kotouč B 126K 100 8-VII při úběru 0,005mm. Naopak při největší posuvové rychlosti 21m/min je radiální síla  $F_p$  nejvyšší pro kotouč A 99B 80 Is(K) 9V. Hodnoty radiální síly  $F_p$  při úběru 0,03mm lze snížit použitím kotouče s hrubším zrnem než má kotouč A 99B 80 Is(K) 9V. Také lze broušení materiálu PP zlepšit použitím kotouče s vyšší pórovitostí.

## 10 VYHODNOCENÍ ŘEZNÝCH SIL MEZI JEDNOTLIVÝMI MATERIÁLY

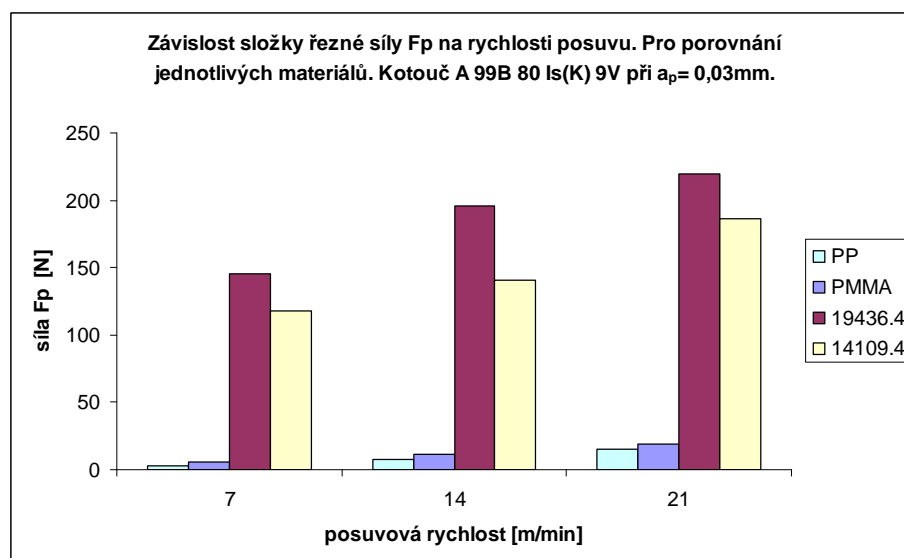
### 10.1 Kotouč A 99B 80 Is(K) 9V

#### 10.1.1 Porovnání velikosti řezné síly $F_c$ pro $a_p=0,03\text{mm}$



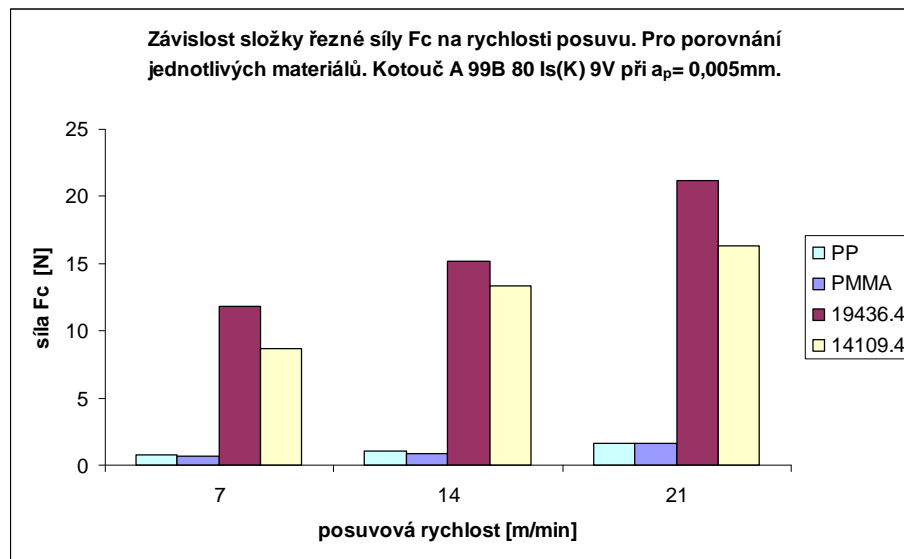
Obr. 27. Porovnání řezné síly  $F_c$  při úběru  $0,03\text{mm}$  pro kotouč A99 B 80 Is(K) 9V

#### 10.1.2 Porovnání velikosti řezné síly $F_p$ pro $a_p=0,03\text{mm}$



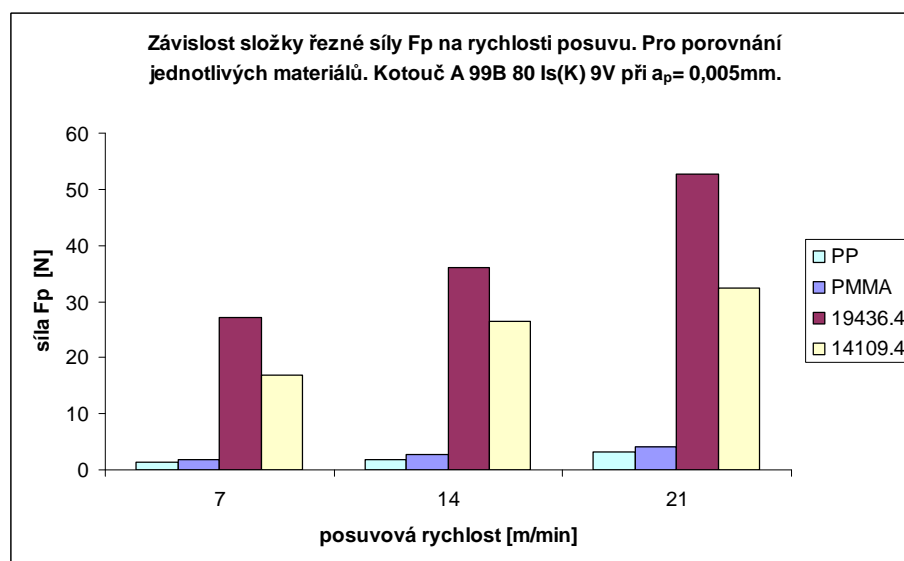
Obr. 28. Porovnání řezné síly  $F_p$  při úběru  $0,03\text{mm}$  pro kotouč A99 B 80 Is(K) 9V

### 10.1.3 Porovnání velikosti řezné síly $F_c$ pro $a_p=0,005\text{mm}$



Obr. 29. Porovnání řezné síly  $F_c$  při úběru  $0,005\text{mm}$  pro kotouč A99 B 80 Is(K) 9V

### 10.1.4 Porovnání velikosti řezné síly $F_p$ pro $a_p=0,005\text{mm}$



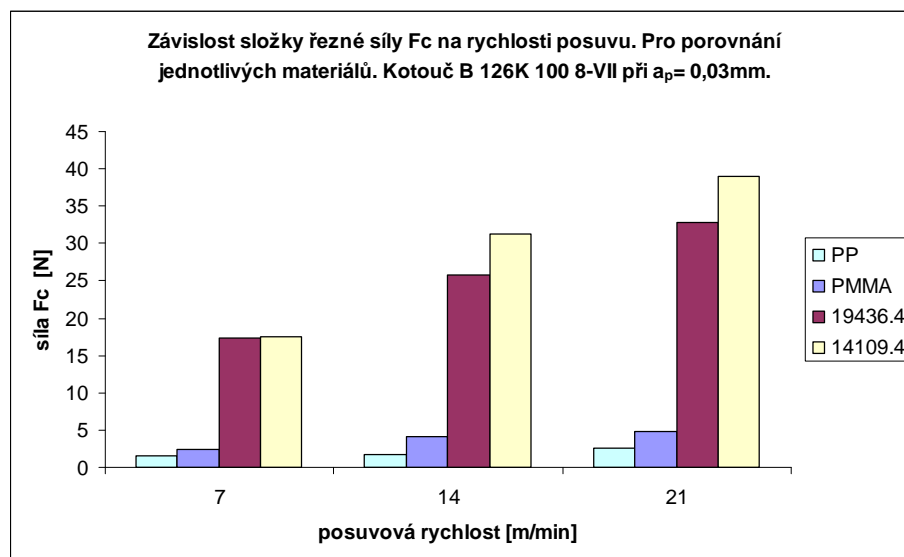
Obr. 30. Porovnání řezné síly  $F_p$  při úběru  $0,005\text{mm}$  pro kotouč A99 B 80 Is(K) 9V

Z Obr. 27., Obr. 28., Obr. 29. a Obr. 30. vyplývá, že největších řezných sil při broušení kotoučem A99 B 80 Is (K) 9V dosahuje materiál 19436.4. Porovnáme-li materiál 19436.4 a 14109.4 můžeme vidět, že řezné síly materiálu 19436.4 jsou pro všechny hodnoty úběru při všech rychlostech posuvu větší až na velikost úběru  $0,03\text{mm}$  kde materiál 14109.4 vykazuje větších tangenciálních sil. Nejmenší hodnoty byly naměřeny u materiálu PP. U materiálu PMMA bylo naměřeno vyšších hodnot řezných sil než pro druhý plastový materiál

PP, ovšem jeho hodnoty se při některých technologických podmínkách silně přibližují hodnotám materiálu PP. Z obrázku lze jasně vidět, že velikosti řezných sil pro ocelové materiály jsou mnohonásobně vyšší pro materiály ocelové než pro materiály plastové. Kotouč A 99B 80 Is(K) 9V má hrubé zrna s nízkou tvrdostí a je lépe ho použít spíše pro materiály plastové nežli pro materiály ocelové a to také z důvodu vzniku vysokých teplot jež mají u ocelových vzorků za příčinu zvýšení tahových pnutí a vznik trhlinek.

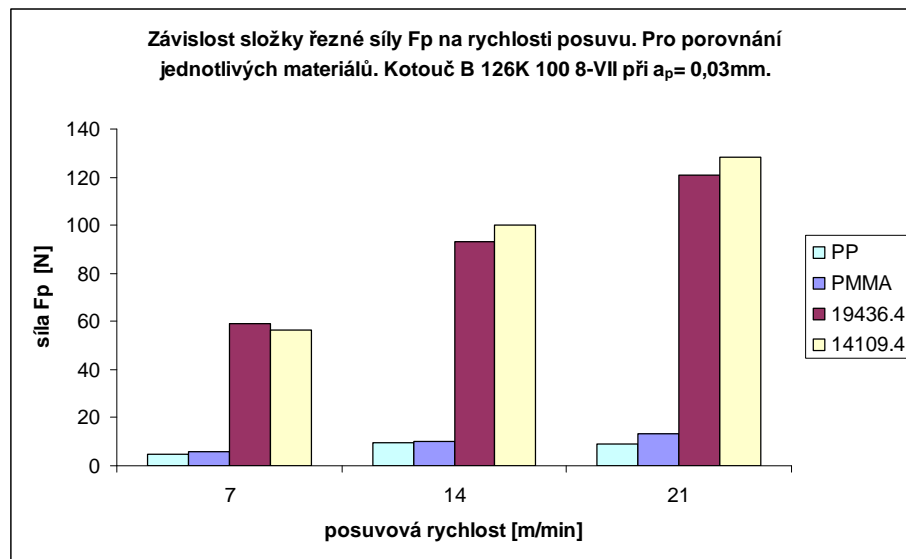
## 10.2 Kotouč B 126K 100 8-VII

### 10.2.1 Porovnání velikosti řezné síly $F_c$ pro $a_p=0,03\text{mm}$



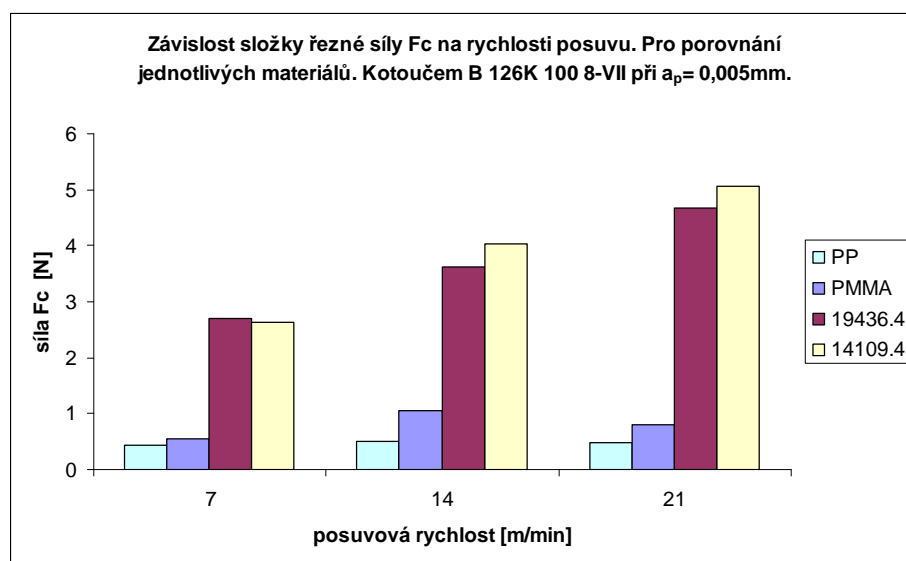
Obr. 31. Porovnání řezné síly  $F_c$  při úběru  $0,03\text{mm}$  pro kotouč B 126K 100 8-VII

### 10.2.2 Porovnání velikosti řezné síly $F_p$ pro $a_p=0,03\text{mm}$



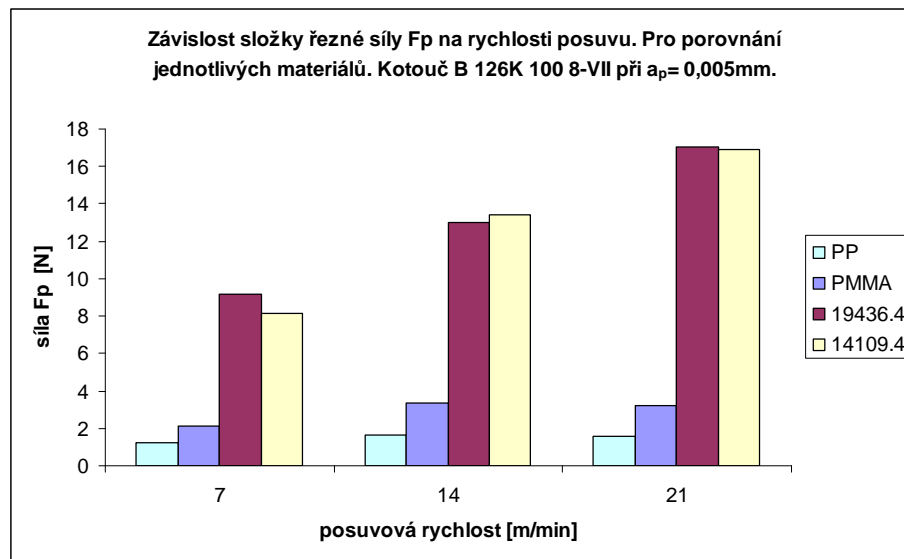
Obr. 32. Porovnání řezné síly  $F_p$  při úběru  $0,03\text{mm}$  pro kotouč B 126K 100 8-VII

### 10.2.3 Porovnání velikosti řezné síly $F_c$ pro $a_p=0,005\text{mm}$



Obr. 33. Porovnání řezné síly  $F_c$  při úběru  $0,005\text{mm}$  pro kotouč B 126K 100 8-VII

#### 10.2.4 Porovnání velikosti řezné síly $F_p$ pro $a_p=0,005\text{mm}$



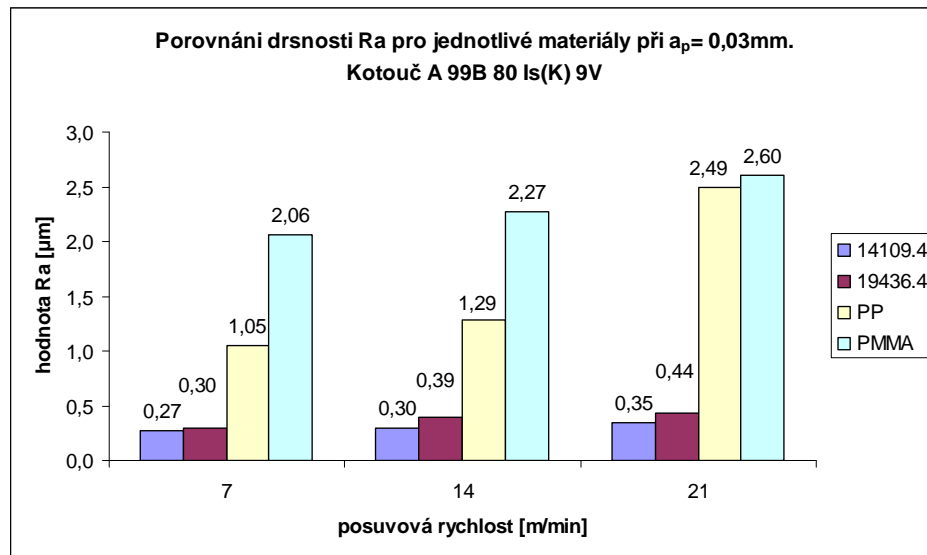
Obr. 34. Porovnání řezné síly  $F_p$  při úběru  $0,005\text{mm}$  pro kotouč B 126K 100 8-VII

Z Obr. 31., Obr. 32., Obr. 33. a Obr. 34. vyplývá, že radiální síly  $F_p$  i tangenciální síly  $F_c$  jsou při broušení kotoučem B 126K 100 8-VII pro ocelové materiály mnohonásobně vyšší než pro materiály plastové. Největších řezných sil vykazuje především materiál 14109.4. Materiál 19436.4 se ovšem k velikostem řezných sil materiálu 14109.4 velmi přibližuje a při některých úběrech a posuvových rychlostech je dokonce o malou hodnotu vyšší. Naopak nejmenších řezných sil  $F_c$  i  $F_p$  dosahuje materiál PP. Materiál PMMA má u většiny úběru a posuvových rychlosti vyšší hodnoty řezných sil než PP, ale v některých případech je zřejmé, že se k hodnotám PP silně přibližuje. Kotouč B 126K 100 8-VII není stejně jako předchozí kotouč kvůli vzniku vysokých teplot příliš vhodný pro broušení kalených materiálů. Jeho tvrdost ovšem vyniká nad jinými kotouči a proto se používá, při dostatečném chlazení či odvodu tepla z materiálu, pro broušení nástrojových ocelí jako je právě 19436.4.

## 11 VYHODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU

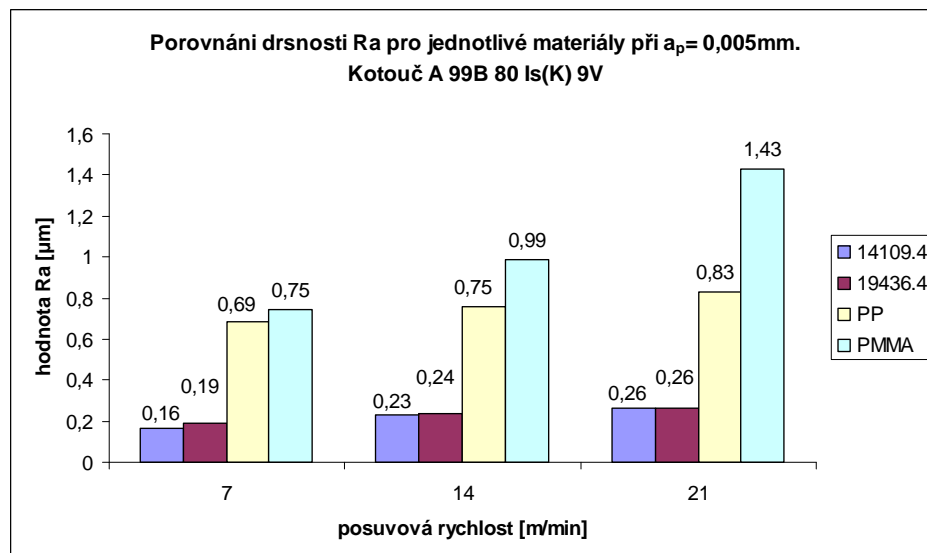
### 11.1 Kotouče A 99B 80 Is(K) 9V

#### 11.1.1 Vyhodnocení drsnosti Ra pro $a_p = 0,03\text{mm}$



Obr. 35. Porovnání drsnosti Ra –  $a_p = 0,03\text{mm}$ , kotouč A 99B 80 Is(K) 9V

#### 11.1.2 Vyhodnocení drsnosti Ra pro $a_p = 0,005\text{mm}$



Obr. 36. Porovnání drsnosti Ra –  $a_p = 0,005\text{mm}$ , kotouč A 99B 80 Is(K) 9V

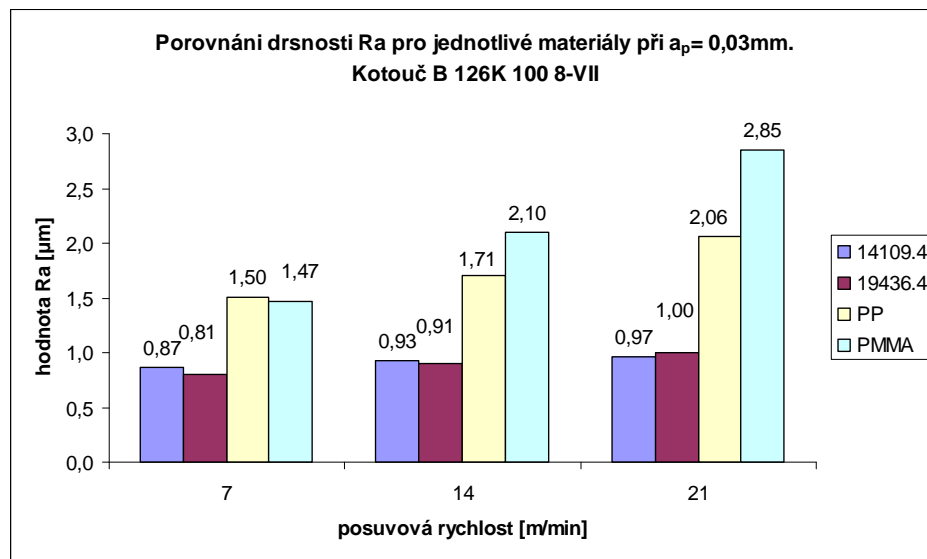
Z Obr. 35., Obr. 36. lze vidět, že brousícím kotoučem A 99B 80 Is(K) 9V je lépe (z hlediska drsnosti Ra) brousit materiály ocelové než materiály plastové. Materiály ocelové dosa-



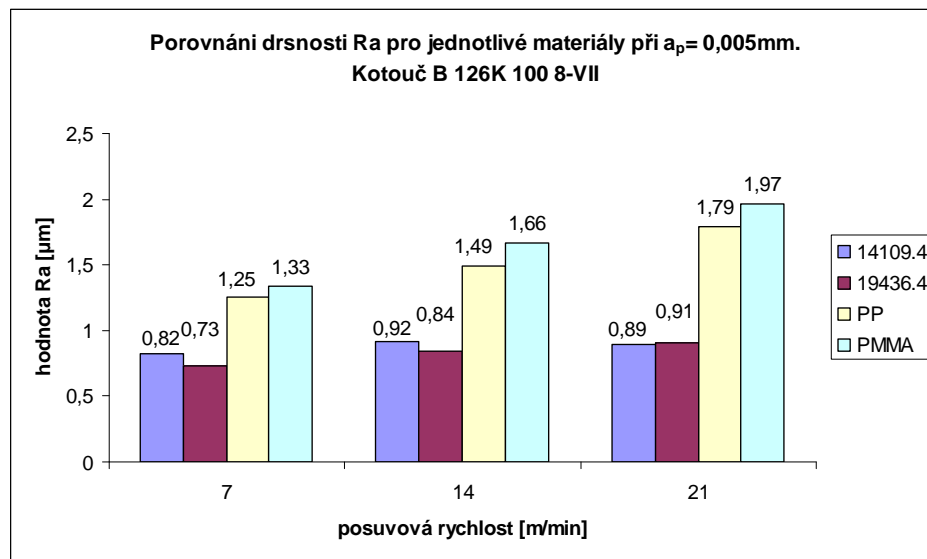
hují řádově 3-5x lepších drsností Ra oproti drsnostem materiálů plastových. Dále si lze jasně povšimnout, že při zvyšující se rychlosti posuvu se drsnost všech materiálů zhoršuje, tzn. čím vyšší je posuvová rychlost, tím vyšší je hodnota drsnosti Ra. Z těchto dvou obrázků můžeme také porovnat, že čím větší je hloubka úběru, tím horších drsností povrchu všech materiálu dosahujeme. Nejhorší drsnost povrchu dosáhl materiál PMMA a to při broušení 21m/min s hloubkou úběru 0,03mm, naopak nejlepšího povrchu bylo dosaženo u materiálu 14109.4, kdy byl materiál broušen 7m/min s hloubkou úběru 0,005mm, což jen potvrzuje předešlé dvě tvrzení o rostoucí hodnotě drsnosti Ra při zvýšení posuvové rychlosti a úběru materiálu.

## 11.2 Kotouče B 126K 100 8-VII

### 11.2.1 Vyhodnocení drsnosti Ra pro $a_p=0,03\text{mm}$



Obr. 37. Porovnání drsnosti Ra –  $a_p=0,03\text{mm}$ , kotouč B 126K 100 8-VI

11.2.2 Vyhodnocení drsnosti Ra pro  $a_p=0,005\text{mm}$ 

Obr. 38. Porovnání drsnosti Ra –  $a_p=0,005\text{mm}$ , kotouč B 126K 100 8-VI

Kotouč B 126K 100 8-VII dosahuje nejhorších drsností u materiálu PMMA. Naopak nejlepších drsností u materiálu 19436.4 což je příznivé jelikož se tento kotouč používá právě pro broušení nástrojových ocelí, tvrdých materiálů a těžkoobrobitelných materiálů. Hodnoty při jednotlivých řezných podmínkách zcela jasně ukazují, že čím vyšší je posuvová rychlost a čím nižší je hloubka úběru, tím nižších a tedy i lepších hodnot drsnosti Ra bylo dosaženo. Hodnoty drsnosti Ra při broušení tímto kotoučem jsou poněkud zkreslené a oproti kotouči A 99B 80 Is(K) 9V jsou 3x až 4x vyšší. Tyto zkreslené výsledky drsností byli zapříčiněny házivostí kotouče, jenž byla zřejmě způsobena chybou v konstrukci tělesa kotouče. Tyto vysoké odchylky se vykazovali i po přebroušení brusné plochy kotouče diamantem. Tato skutečnost zapříčinila, že hodnoty naměřené drsnostměrem byli až 4x vyšší než hodnoty, jenž by při použití tohoto kotouče měli vycházet.

## ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo určit vliv technologických podmínek na výstupní parametry při broušení. A to u materiálů kovových a plastových. Broušeny byly materiály 14109.4, 19436.4, PMMA a PP. Tyto materiály byli broušeny dvěma kotouči, z nichž jeden měl zrna z kubického nitridu boru (B 126K 100 8-VII) a druhý zrna z bílého korundu (A 99B 80 Is(K) 9V). Těmito kotouči se materiály brousili při různých řezných podmínkách, kde se kombinovala hloubka úběru 0,005mm a 0,03mm s rychlostmi posuvu 7m/min, 14m/min a 21m/min. Při broušení byli měřeny řezné síly a následně hodnoty drsnosti Ra,Rz.

Provedené měření a následné statistické vyhodnocení řezných sil, jenž byli přiloženy na CD, dokazuje, že s vyšší posuvovou rychlostí roste jak radiální složka řezné síly  $F_p$ , tak i tangenciální složka řezné síly  $F_c$ . Hodnoty obou těchto složek rostou také při větší hloubce úběru.

Při porovnání velikosti obou složek řezných sil lze z vyhodnocení jasně vidět, že vyšších hodnot těchto složek řezných sil dosahuje kotouč A 99B 80 Is(K) 9v než kotouč B 126K 100 8-VII. Toto způsobuje především větší tvrdost a hrubší zrno kotouče z kubického nitridu boru. Kotouč B 126K 100 8-VII je tedy vhodnější, ať už kvůli snížení velikosti řezných sil, tak i kvůli nižším hodnotám teplot, které při nižších řezných silách vznikají.

Při porovnání vhodnosti materiálu na jednotlivý kotouč vidíme, že nejvyšších řezných sil dosahuje především materiál 19436.4. K jeho hodnotám se ovšem silně přibližuje materiál 14109.4 a při některých řezných podmínkách jsou tyto hodnoty i vyšší. Několikanásobně menších řezných sil dosahují materiály PMMA a PP. Jejich hodnoty jsou si také velice podobné, ovšem materiál PP vykazuje u většiny řezných podmínek menší řezné síly než materiál PMMA.

Hodnoty drsností Ra,Rz byli měřeny taktéž při všech kombinacích řezných sil. Kotouč A 99B 80Is(K) 9V vykazoval dobré a kvalitní jakosti povrchu, kde nejlepších hodnot dosahovali materiály ocelové 14109.4 a 19436.4, jejichž hodnoty se velice podobali. Materiály plastové vykazovali zhruba 3x až 5x vyšších hodnot než ocelové materiály. Při měření drsností od Ra, Rz u kotouče B 126K 100 8-VII ovšem docházelo k naměření vyšších hodnot pro všechny materiály oproti předchozímu kotouči. Tyto výsledky u kotouče z kubického nitridu boru byli ovlivněny házivostí kotouče, tato byla zřejmě zapříčiněna chybou v konstrukci tělesa kotouče.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Maslov, J.N. Teorie broušení kovů. 1st ed. Praha:SNTL,1979.
- [2] Vasilko, K.; Bokučava, G. Brúsenie kovových materiálov. 1st ed. Bratislava:Alfa,1988.
- [3] Bumbálek, B.; Obvody, V.; Ošřádal, B. Drsnost povrchu. Praha:SNTL,1989
- [4] Gašpárek, J. Dokončovacie spôsoby obrábania. 1.vydání Bratislava:ALFA,1980
- [5] Kolektiv autorů. Supertvrde materiály. Ostrava:ČSVTS,1989
- [6] Kocman, K.; Prokop, J. Technologie obrábění. 2nd ed. Brno:Cerm,2005
- [7] Katedra strojírenské technologie, FS, TU v Liberci [online]. [cit. 2009-12-01].  
Dostupný z WWW:  
<[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/spt/povrchy%20povlaku.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/povrchy%20povlaku.pdf)>
- [8] Bach-brusivo [online]. [cit. 2009-12-01]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.bach-brusivo.cz/index51.htm>>
- [9] Ateam – Integrita povrchu [online]. [cit. 2009-12-01]. Dostupný z WWW:  
< [http://www.ateam.zcu.cz/download/Integrita\\_Urban1.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/Integrita_Urban1.pdf)>
- [10] Vintr, J. Bakalářská práce - Supertvrde řezné materiály a jejich efektivní využití. Zlín:  
UTB,2006
- [11] Vasilko, K. Analytická teória trieskového obrábania. Prešov:COFIN, 2007
- [12] BRH 20.03F, Rovinná horizontální bruska, Návod k použití.
- [13] Mitutoyo SJ-301, Přístroj na měření drsnosti. Návod k použití
- [14] Vojvodík, P. Diplomová práce – Aplikace nekonvenčních brousících materiálů při dokončování dílů forem. Zlín:UTB,2009
- [15] Ducháček, V. Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 2.vydání Praha:  
VŠCHT,2006

**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
$Q_O$	Teplo přecházející do obrobku
$Q_K$	Teplo přecházející do kotouče
$Q_T$	Teplo odcházející třískami
$Q_{CH}$	Teplo odebírané chladící kapalinou
$Q_V$	Teplo vyzářené
$Q_C$	Teplo celkové
$Q_0$	Okamžitá teplota
$Q_d$	Styková teplota
$Q_s$	Střední teplota

---

$\varepsilon$	Poměrná deformace
CBN	Cubic boron nitride (kubický nitrid boru)
KNB	Kubický nitrid boru
Cr	Chrom
Ni	Nikl
Mn	Mangan
Si	Křemík
Al	Hliník
Ti	Titan
C	Uhlík
PMMA	Polymethylmetakrylát
PP	Polypropylen
$a_p$	Hloubka úběru

## 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. Struktura broušícího nástroje</i> .....	17
<i>Obr. 5. Tvar krystalů přírodního diamantu</i> .....	18
<i>Obr. 6. Schématické znázornění geometrie povrchu v řezu</i> .....	24
<i>Obr. 7. Vyjádření hodnoty Ra</i> .....	25
<i>Obr. 8. Vyjádření hodnoty Rz</i> .....	26
<i>Obr. 9. Vyjádření hodnoty Rm</i> .....	27
<i>Obr. 10. Vyjádření hodnoty Sm</i> .....	28
<i>Obr. 11. Vyjádření hodnoty S</i> .....	28
<i>Obr. 12. Vyjádření hodnoty tp</i> .....	29
<i>Obr. 13. Kompletní značení drsnosti povrchu podle ČSN EN ISO 1302</i> .....	30
<i>Obr. 14. Základní způsoby opotřebení broušícího kotouče</i> .....	37
<i>Obr. 15. Rovinná horizontální bruska BRH 20.03F</i> .....	44
<i>Obr. 16. Tenzometrický dynamometr</i> .....	44
<i>Obr. 17. Schéma přístroje Mitutoyo SJ-301</i> .....	46
<i>Obr. 18. Vzorky použité při broušení</i> .....	47
<i>Obr. 19. Porovnání velikosti řezných sil <math>F_c</math> pro materiál 14109.4</i> .....	51
<i>Obr. 20. Porovnání velikosti řezných sil <math>F_p</math> pro materiál 14109.4</i> .....	52
<i>Obr. 21. Porovnání velikosti řezných sil <math>F_c</math> pro materiál 19436.4</i> .....	53
<i>Obr. 22. Porovnání velikosti řezných sil <math>F_p</math> pro materiál 19436.4</i> .....	54
<i>Obr. 23. Porovnání velikosti řezných sil <math>F_c</math> pro materiál PMMA</i> .....	55
<i>Obr. 24. Porovnání velikosti řezných sil <math>F_p</math> pro materiál PMMA</i> .....	56
<i>Obr. 25. Porovnání velikosti řezných sil <math>F_c</math> pro materiál PP</i> .....	57
<i>Obr. 26. Porovnání velikosti řezných sil <math>F_p</math> pro materiál PP</i> .....	58
<i>Obr. 27. Porovnání řezné síly <math>F_c</math> při úběru 0,03mm pro kotouč A99 B 80 Is(K) 9V</i> .....	59
<i>Obr. 28. Porovnání řezné síly <math>F_p</math> při úběru 0,03mm pro kotouč A99 B 80 Is(K) 9V</i> .....	59
<i>Obr. 29. Porovnání řezné síly <math>F_c</math> při úběru 0,005mm pro kotouč A99 B 80 Is(K) 9V</i> .....	60
<i>Obr. 30. Porovnání řezné síly <math>F_p</math> při úběru 0,005mm pro kotouč A99 B 80 Is(K) 9V</i> .....	60
<i>Obr. 31. Porovnání řezné síly <math>F_c</math> při úběru 0,03mm pro kotouč B 126K 100 8-VII</i> .....	61

---

<i>Obr. 32. Porovnání řezné síly <math>F_p</math> při úběru 0,03mm pro kotouč B 126K 100 8-VII .....</i>	62
<i>Obr. 33. Porovnání řezné síly <math>F_c</math> při úběru 0,005mm pro kotouč B 126K 100 8-VII .....</i>	62
<i>Obr. 34. Porovnání řezné síly <math>F_p</math> při úběru 0,005mm pro kotouč B 126K 100 8-VII .....</i>	63
<i>Obr. 35. Porovnání drsnosti <math>R_a</math> – <math>a_p= 0,03mm</math>, kotouč A 99B 80 Is(K) 9V .....</i>	64
<i>Obr. 36. Porovnání drsnosti <math>R_a</math> – <math>a_p= 0,005mm</math>, kotouč A 99B 80 Is(K) 9V .....</i>	64
<i>Obr. 37. Porovnání drsnosti <math>R_a</math> – <math>a_p= 0,03mm</math>, kotouč B 126K 100 8-VI .....</i>	65
<i>Obr. 38. Porovnání drsnosti <math>R_a</math> – <math>a_p= 0,005mm</math>, kotouč B 126K 100 8-VI .....</i>	66



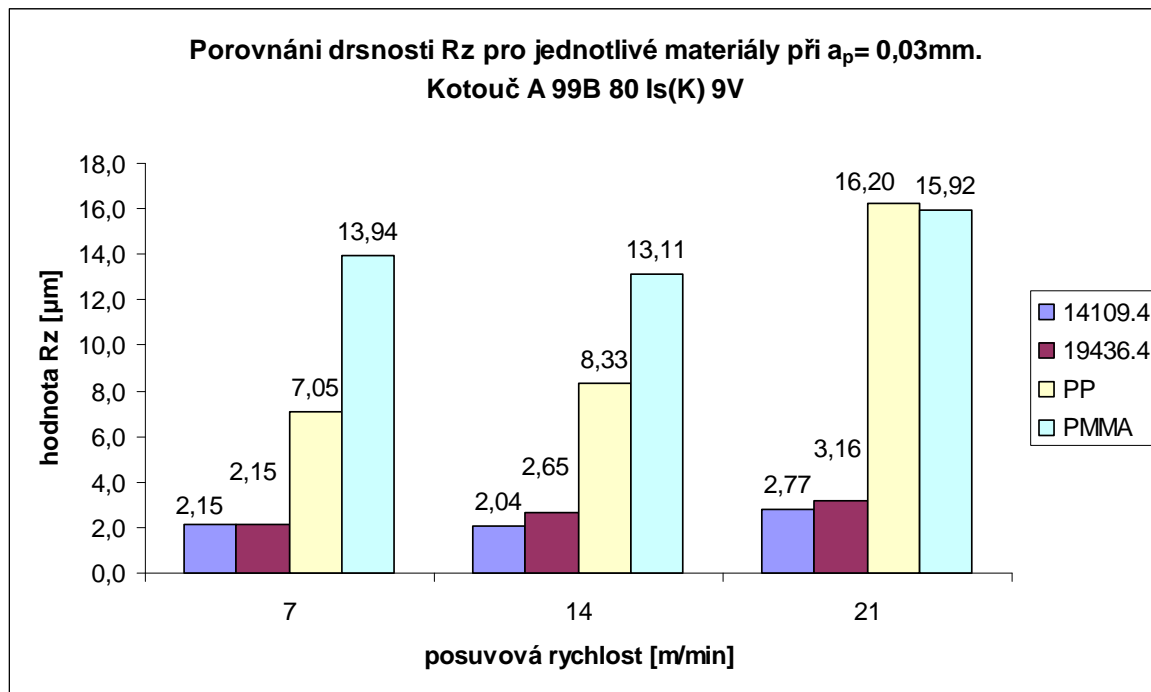
**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab.1. Značení zrnitosti .....</i>	20
<i>Tab.2. Značení tvrdosti .....</i>	21
<i>Tab.3. Rozdělení struktur brousicích zrn.....</i>	21
<i>Tab. 4. Dosahovaná přesnost a drsnost povrchu při broušení.....</i>	31
<i>Tab. 5. Základní vlastnosti CNB.....</i>	38
<i>Tab. 6. Některé technické parametry brusky BRH 20.03F .....</i>	43
<i>Tab. 7. Vybrané parametry brousicích kotoučů.....</i>	49

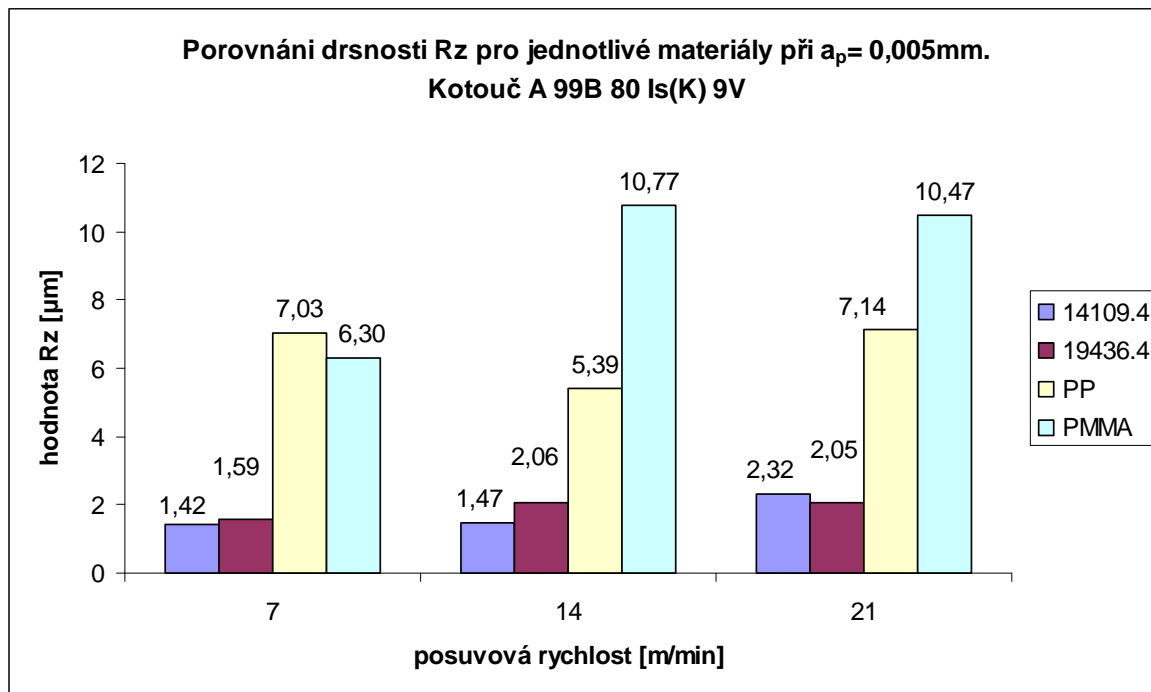
**SEZNAM PŘÍLOH**

- PI: Porovnání drsnosti Rz – hloubka úběru 0,03mm, při broušení kotoučem A99 B 80  
Is(K) 9V
- PII: Porovnání drsnosti Rz – hloubka úběru 0,005mm, při broušení kotoučem A99 B 80  
Is(K) 9V
- PIII: Porovnání drsnosti Rz – hloubka úběru 0,03mm, při broušení kotoučem B 126K  
100 8-VII
- PIV: Porovnání drsnosti Rz – hloubka úběru 0,005mm, při broušení kotoučem B 126K  
100 8-VII

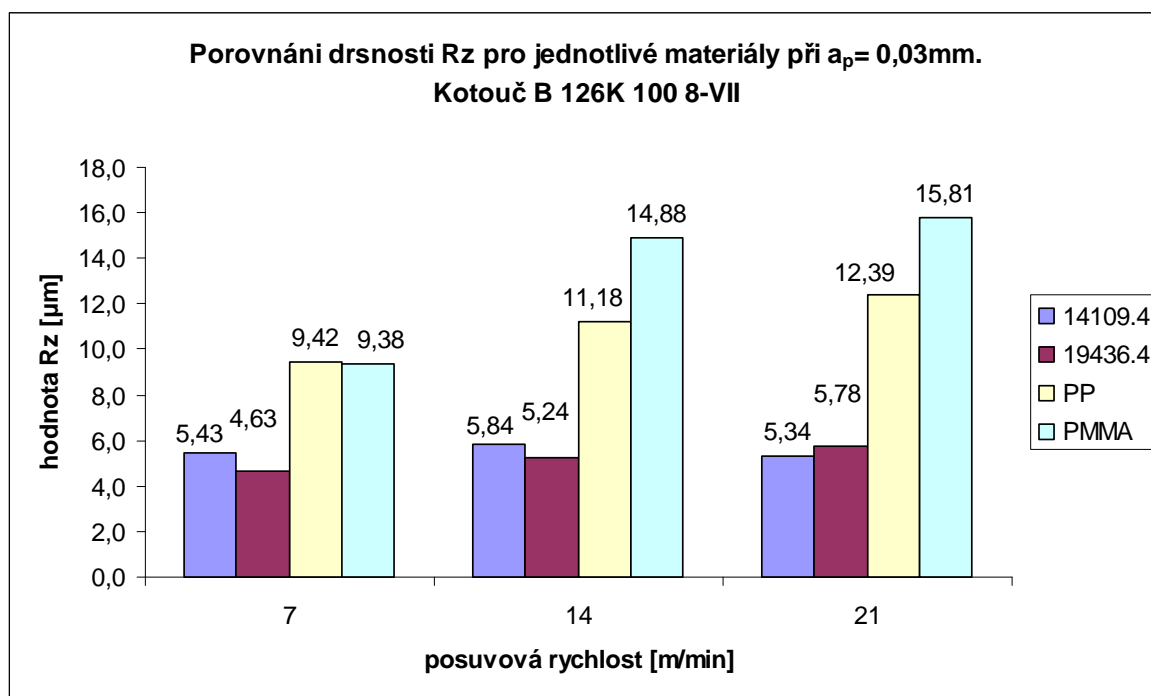
**PŘÍLOHA PI: POROVNÁNÍ DRSNOSTI  $R_z$  – HLOUBKA ÚBĚRU  
0,03MM, PŘI BROUŠENÍ KOTOUČEM A99 B 80 IS(K) 9V**



**PŘÍLOHA PII: POROVNÁNÍ DRSNOSTI  $R_z$  – HLOUBKA ÚBĚRU  
0,005MM, PŘI BROUŠENÍ KOTOUČEM A99 B 80 IS(K) 9V**



**PŘÍLOHA PIII: POROVNÁNÍ DRSNOSTI  $R_z$  – HLOUBKA ÚBĚRU  
0,03MM, PŘI BROUŠENÍ KOTOUČEM B 126K 100 8-VII**



**PŘÍLOHA PIV: POROVNÁNÍ DRSNOSTI  $R_z$  – HLOUBKA ÚBĚRU  
0,005MM, PŘI BROUŠENÍ KOTOUČEM B 126K 100 8-VII**

