

# Využití různých systémů chlazení pro obrábění materiálů

Bc. Václav Petřík

---

Diplomová práce  
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav PETŘÍK**

Osobní číslo: **T09700**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Využití různých systémů chlazení pro obrábění materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretická studie na dané téma.
2. Výběr technologie a experimentální příprava vzorků s použitím a bez použití procesní kapaliny.
3. Stanovení opotřebení nástroje v závislosti na řezných parametrech a použitých procesních kapalinách.
4. Vyhodnocení vlivu řezného prostředí na výslednou jakost obrobené plochy.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

KOCMAN, K., PROKOP, J.: Technologie obrábění. Brno. Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0

ŘASA, J., GABRIEL, V.: Strojírenská technologie 3, 1. díl, Metody, stroje a nástroje pro obrábění. Praha. Grafikon 2000. ISBN 80-7183-207-3

LIEMERT, G.: Obrábění. SNTL Praha, 1974.

KOCMAN, K.: Speciální technologie. Brno. Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2562-8

GRZESIK, W.: Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. 2008

BEŇO, J.: Teória rezania kovov. Viena, SF-TU Košice, 1999. 255 s. ISBN 80-7099-429-0

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**14. února 2011**

Termín odevzdání diplomové práce:

**13. května 2011**

Ve Zlíně dne 11. ledna 2011

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



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: PETŘÍK VÁCLAV

Obor: KTZ

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek 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 12.5.2011

  
.....

<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 výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá využitím různých systémů chlazení při broušení, především využitím mikromazání MQL firmy Accu-Lube. V práci je obecně popsáno broušení, opotřebení nástrojů, procesní kapaliny a jakost obrobeneho povrchu. Experimentálně je při broušení zkoumána jakost povrchu, složky řezných sil, opotřebení nástroje a vliv procesních kapalin a změn procesních podmínek na tyto veličiny.

Klíčová slova: broušení, procesní kapaliny, MQL, jakost povrchu, řezné síly

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the usage of different cooling systems for grinding, especially usage of micro lubrication MQL, from company Accu-Lube. In the thesis there is generally described grinding, tool wear, cooling fluids and quality of finished surface. The surface quality, components of cutting forces and tool wear is experimentally examined in dependence of cutting conditions and cutting fluids.

Keywords: grinding, process fluids, MQL, surface quality, cutting forces

Děkuji vedoucímu své diplomové práce Ing. Ondřeji Bílkovi Ph. D. za odborné vedení práce, ochotné poskytování rad a materiálových podkladů k práci. Děkuji firmě Rexim spol. s.r.o. za zapůjčení aplikátoru pro mikromazací technologie – MQL a za poskytnutí podkladů a rad pro používání aplikátoru. Dále děkuji prof. Ing. Imrichu Lukovicsovi, CSc. za rady a čas, který mi poskytnul. Taktéž bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Šálkovi a Ing. Vojtěchu Šenkeříkovi za čas, který mi věnovali.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 CHARAKTERISTIKA BROUŠENÍ</b> .....	<b>13</b>
1.1 BROUSICÍ KOTOUČE.....	13
1.2 MATERIÁL BROUSICÍCH ZRN.....	13
1.3 TVARY BROUSICÍCH KOTOUČŮ .....	15
1.4 BROUŠENÍ ROVINNÝCH PLOCH.....	16
<b>2 OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ</b> .....	<b>17</b>
2.1 OTĚR BŘITU.....	17
2.1.1 Brusný otěr .....	18
2.1.2 Adhezní otěr .....	19
2.1.3 Difúzní otěr .....	19
2.1.4 Chemický otěr .....	20
2.2 PORUŠENÍ BŘITU KŘEHKÝMI LOMY .....	20
2.3 FORMY OTUPENÍ BŘITU.....	21
2.4 VLIV PRACOVNÍCH PODMÍNEK NA INTENZITU OTUPOVÁNÍ BŘITU.....	21
2.5 MECHANIZMY OPOTŘEBENÍ BROUSICÍCH ZRN BROUSICÍHO KOTOUČE.....	22
2.5.1 Adhezně-únavové opotřebení.....	23
2.5.2 Abrazivní opotřebení.....	23
2.5.3 Difúzní opotřebení .....	23
2.5.4 Kombinované opotřebení .....	24
2.6 VLIV POJIVA NA OPOTŘEBENÍ BROUSICÍHO KOTOUČE .....	24
<b>3 PROCENÍ KAPALINY A JEJICH VÝZNAM PŘI OBRÁBĚNÍ</b> .....	<b>26</b>
3.1 VÝZNAM A FUNKCE PROCESNÍCH MEDIÍ .....	26
3.2 MECHANIZMUS TVORBY TRÍŠKY.....	27
3.3 VLIVY OVLIVŇUJÍCÍ VOLBU PROCESNÍ KAPALINY .....	28
3.3.1 Řezný nástroj.....	28
3.3.2 Obráběný materiál .....	28
3.3.3 Jakost obrobené plochy .....	29
3.4 CHARAKTERISTIKY A VLASTNOSTI PROCESNÍCH KAPALIN .....	30
3.4.1 Chladicí účinek.....	30
3.4.2 Mazací účinek .....	31
3.4.3 Čisticí účinek.....	31
3.4.4 Provozní stálost .....	32
3.4.5 Ochranný účinek .....	32
3.4.6 Zdravotní nezávadnost .....	32
3.4.7 Přiměřené náklady.....	32
3.5 ROZDĚLENÍ PROCESNÍCH KAPALIN .....	33
3.5.1 Vodní roztoky.....	33



3.5.2	Emulzní kapaliny .....	33
3.5.3	Mastné oleje a tuky .....	34
3.5.4	Minerální oleje .....	34
3.5.5	Řezné oleje .....	34
3.5.6	Syntetické kapaliny .....	35
3.6	MIKROMAZACÍ TECHNOLOGIE – MQL .....	36
<b>4</b>	<b>JAKOST OBROBENÉ PLOCHY .....</b>	<b>40</b>
4.1	METODY HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU .....	40
<b>5</b>	<b>SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>43</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>PODMÍNKY EXPERIMENTU, POUŽITÉ STROJE, NÁSTROJE, PŘÍSTROJE A POMŮCKY .....</b>	<b>45</b>
6.1	VODOROVNÁ ROVINNÁ BRUSKA BRH 20.03 F.....	45
6.2	POUŽITÝ BROUSICÍ KOTOUČ .....	46
6.3	PROCESNÍ KAPALINY A JEJICH APLIKACE .....	47
6.3.1	Accu-Lube LB 2000.....	47
6.3.2	Procesní kapalina Microtrend 217 M.....	49
6.3.3	Procesní kapalina Polybio 420.....	50
6.4	MĚŘENÍ SLOŽEK ŘEZNÝCH SIL.....	52
6.5	URČOVÁNÍ JAKOSTI POVRCHU .....	54
6.6	MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ BROUSICÍHO KOTOUČE.....	55
<b>7</b>	<b>VLIV MQL NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU A SLOŽKY ŘEZNÝCH SIL.....</b>	<b>57</b>
7.1	BROUŠENÉ MATERIÁLY .....	58
7.1.1	Ocel X210Cr12 (ČSN 19 436.4) – kalená .....	58
7.1.2	Ocel X210Cr12 (ČSN 19 436) .....	58
7.1.3	Ocel 100Cr6 (ČSN 14 109.4) - kalená.....	58
7.1.4	Ocel E335 (ČSN 11 600) .....	58
7.1.5	Dural AW 5083 .....	59
7.1.6	PMMA.....	59
7.1.7	PVC .....	59
7.1.8	PE .....	59
7.1.9	Pryž TP 44.....	59
7.1.10	Pryž 9341/75 .....	60
7.2	VÝSLEDKY EXPERIMENTU .....	61
7.3	POROVNÁNÍ SLEDOVANÝCH PARAMETRŮ V ZÁVISLOSTI NA SYSTÉMU CHLAZENÍ .....	72
<b>8</b>	<b>VLIV ŘEZNÝCH PARAMETRŮ A MQL NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU A SLOŽKY ŘEZNÝCH SIL PŘI ROVINNÉM BROUŠENÍ.....</b>	<b>74</b>

8.1	VÝSLEDKY EXPERIMENTU PRO DURAL .....	75
8.2	VÝSLEDKY EXPERIMENTU PRO PMMA .....	77
8.3	VÝSLEDKY EXPERIMENTU PRO PE.....	79
8.4	VÝSLEDKY EXPERIMENTU PRO PVC.....	81
8.5	VÝSLEDKY EXPERIMENTU PRO PRYŽ TP 44.....	83
<b>9</b>	<b>VLIV PROCESNÍCH KAPALIN, MQL A BROUŠENÍ ZA SUCHA NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU .....</b>	<b>85</b>
9.1	VÝSLEDKY EXPERIMENTU .....	86
<b>10</b>	<b>OPOTŘEBENÍ BROUSICÍHO KOTOUČE PŘI BROUŠENÍ ZA SUCHA, S MQL A S PROCESNÍMI KAPALINAMI .....</b>	<b>91</b>
10.1	VÝSLEDKY EXPERIMENTU .....	91
<b>11</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>95</b>
11.1	VLIV MQL NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU A SLOŽKY ŘEZNÝCH SIL.....	95
11.2	VLIV ŘEZNÝCH PARAMETRŮ A MQL NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU A SLOŽKY ŘEZNÝCH SIL PŘI ROVINNÉM BROUŠENÍ.....	95
11.3	VLIV PROCESNÍCH KAPALIN, MQL A BROUŠENÍ ZA SUCHA NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU.....	96
11.4	OPOTŘEBENÍ BROUSICÍHO KOTOUČE PŘI BROUŠENÍ ZA SUCHA, S MQL A S PROCESNÍMI KAPALINAMI .....	97
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>98</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>99</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>100</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>102</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>106</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>107</b>

## ÚVOD

Proces řezání probíhá vždy v určitém prostředí, buď přirozeném - vzduch, nebo umělém - kapaliny, plyny, mlha. Řezné prostředí ovlivňuje podle svých fyzikálních vlastností a chemického složení více nebo méně ekonomické, energetické a kvalitativní parametry řezného procesu. Je proto možno volbou pro daný případ optimálního řezného prostředí zvýšit hospodárny úběr materiálu o 20 až 100 %, v některých případech až 200 %, a současně také zvýšit kvalitu obrobenej plochy.

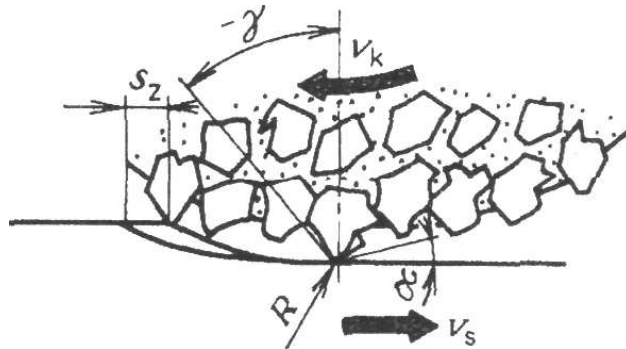
Řezné prostředí ovlivňuje převážně procesy probíhající na stykových plochách břítu, méně působí na proces primárních plastických deformací, tj. na proces tvoření třísky. Na intenzitu sekundárních plastických deformací působí řezné prostředí tím, že ovlivňuje čistotu stykových míst břítu s třískou a plochou řezu a tím, že snižuje jejich teplotu. Působení řezného prostředí se proto promítá především do hodnoty součinitele tření.

Intenzita vlivu řezného prostředí na množství odvedeného tepla a na zmenšení práce tření, popř. i práce deformační, závisí na jeho fyzikálních vlastnostech a jeho chemickém složení. Závisí však také na použitých řezných podmínkách, zejména průřezu třísky a řezné rychlosti. [1]

## I. TEORETICKÁ ČÁST

## 1 CHARAKTERISTIKA BROUŠENÍ

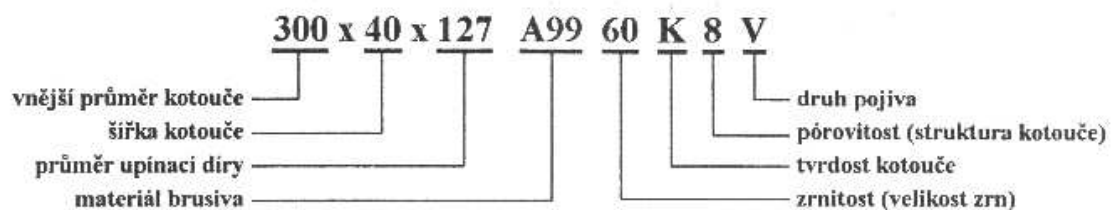
Oddělování třísek při broušení je podobné jako při frézování. Břity broušícího kotouče jsou rozmístěny nepravidelně po obvodě a mají různou geometrii. Velikost zrn se pohybuje v rozsahu 0,003 až 3 mm. Zrna brusiva mají obvykle záporné úhly čela a velké úhly hřbetu. Řezná rychlost se pohybuje od 10 do 80 m.s<sup>-1</sup>, proto je při broušení velký vývin tepla a vysoká teplota třísek (až 1200° C), je nutné vydatné chlazení. [2]



Obr. 1. Broušení [2]

### 1.1 Broušící kotouče

Jsou tvořeny zrna brusiva, která jsou spojena pojivem v tuhé těleso vhodného tvaru, rozměrů tvrdosti a struktury. [2]



Obr. 2. Označení broušících kotoučů dle ČSN [2]

### 1.2 Materiál broušících zrn

**1. Karbid křemíku SiC (Karbonum)** se vyrábí redukcí SiO<sub>2</sub> velmi čistým koksem. Má vyšší tvrdost než korund, větší křehkost. Vyrábí se ve třech druzích C 49 (zelený), C 48 (šedý) a C 47 (černý), čím světlejší barva, tím je čistší a kvalitnější. Používá se pro broušení tvrdých a křehkých materiálů.

**2. Umělý korund** - je to tavený oxid hlinitý  $Al_2O_3$  (Elektrit). Při běžné čistotě (85 - 98 %  $Al_2O_3$ ) má barvu hnědou (A 96) až černou (A 85), čistý  $Al_2O_3$  má barvu bílou (A 99), s přísadou Cr růžovou (A 98).

**3. Karbid boru**  $B_4C$  - vyrábí se z kyseliny borité a velmi čistého koksu. Používá se jako náhrada za diamant, jeho výroba je velmi drahá.

**4. Kubický nitrid boru** (KNB, Borazon) - má podobné vlastnosti jako diamant a jeho cena je vysoká.

**5. Diamant** - používají se diamanty přírodní i syntetické, pro broušení těžkoobrobitelných materiálů, např. SK. [2]

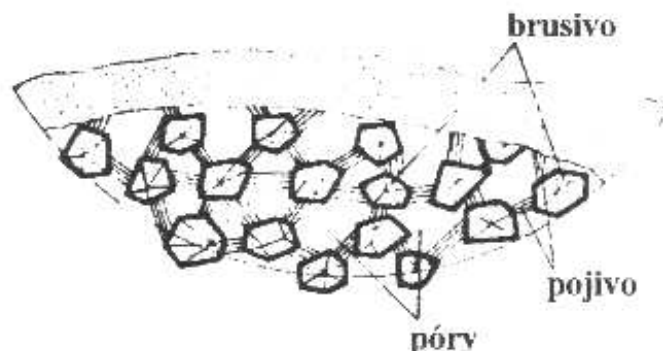
**Zrnitost** číslice v označení udává velikost zrn. Zrna se podle velikosti dělí do několika skupin např. velmi hrubá nebo zvlášť jemná (pro optický průmysl). Pro hrubování volíme hrubší zrno, pro dokončování a pro malé zahřátí obrobku volíme menší zrno.

**Tvrдость** necharakterizuje tvrđost zrn brusiva, ale jejich soudržnost s pojivem. Jedná se v podstatě o odolnost proti vydrolování zrn brusiva. Tvrđost označujeme písmeny E (nejměkčí) až Z (nejtvrđší).

Obecně platí, čím tvrđší materiál obrábíme, tím měkčí kotouč používáme a naopak.

**Struktura** (pórovitost) kotouče vyjadřuje poměr mezi zrny brusiva, pojivem a póry v  $1\text{ cm}^3$  kotouče. Označuje se číslicemi 1 až 15, čím vyšší číslo, tím víc pórů.

**Pojivo** slouží k vázání jednotlivých zrn brusiva. Druh pojiva určuje pevnost kotouče a tím také maximální obvodovou rychlost. Pojiva rozeznáváme organická a anorganická. [2]



Obr. 3. Uspořádaní broušicích zrn v broušicím kotouči [2]

**Anorganická pojiva:**

**keramika** - nejčastěji používané pojivo, má menší pevnost v tahu, používá se pro obvodové rychlosti do  $50 \text{ m.s}^{-1}$ .

**silikáty** - jde o směs křemičitého prachu, vodního skla a hlíny, mají menší pevnost než keramická, ale jsou pružnější.

**magnezit** - používá se na jemné broušení, nasává vodu, proto se používá jen pro broušení za sucha.

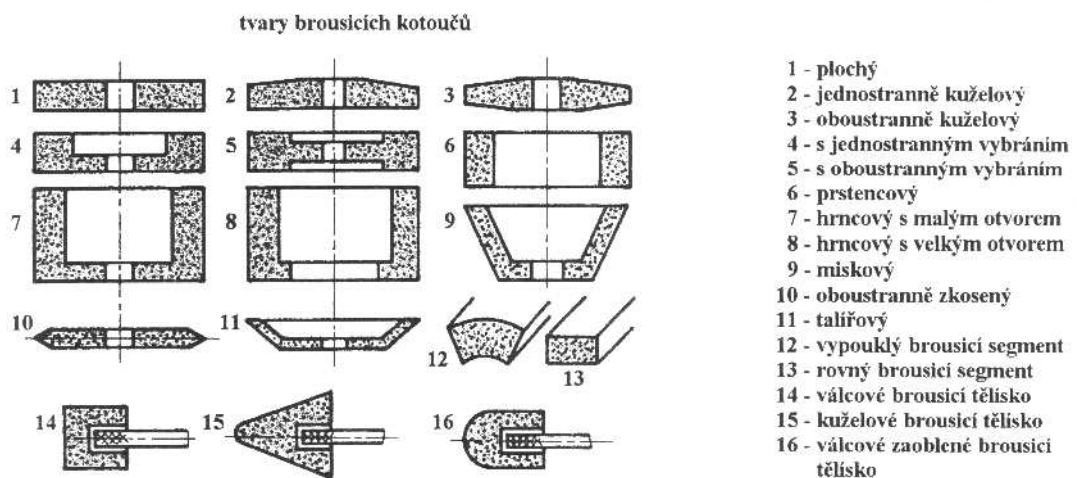
**kovy** - např. ocel se používá pro diamantové kotouče.

**Organická pojiva**

**pryž a šelak** - kotouče jsou velmi pružné, minimální tloušťka kotoučů až 1 mm.

**bakelit** - kotouče jsou velmi pružné a pevné, můžeme pracovat obvodovou rychlostí až  $80 \text{ m.s}^{-1}$ .

**umělé pryskyřice vyztužené textilními vlákny** - můžeme použít pro rychlosti až  $100 \text{ m.s}^{-1}$ , tyto kotouče jsou označovány slovem "Flex".[2]

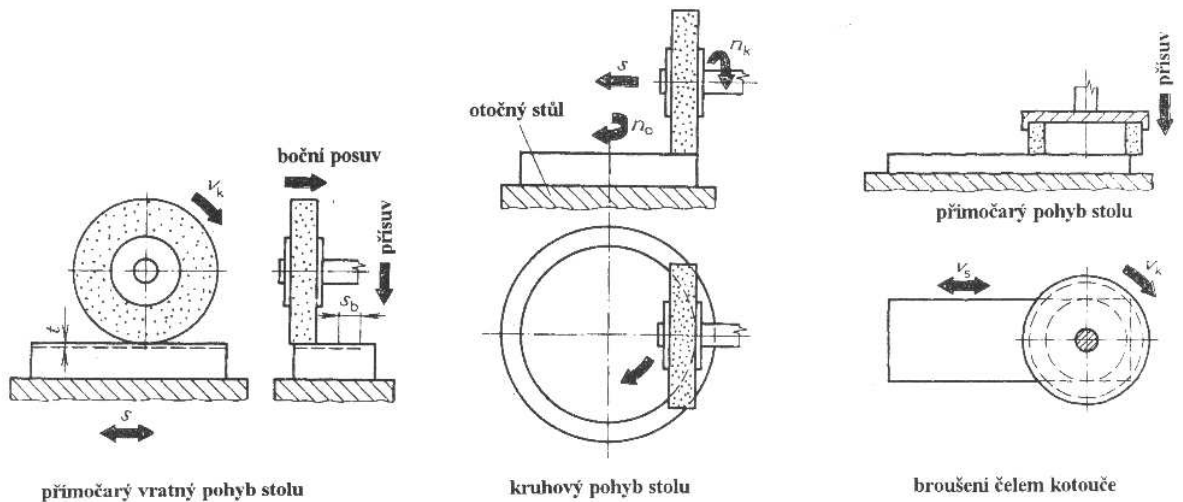
**1.3 Tvary brousících kotoučů**

Obr. 4. Tvary brousících kotoučů [2]

## 1.4 Broušení rovinných ploch

**Obvodem kotouče** - stůl může vykonávat přímočarý vratný nebo kruhový pohyb. Broušení s přímočarým pohybem stolu je nejpřesnější, protože pracujeme úzkým kotoučem a je zde malý vývin tepla.

**Čelem kotouče** - je vhodné pro širší plochy, je výkonnější, ale je méně přesné. [2]



Obr. 5. Broušení rovinných ploch [2]



## 2 OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ

Výchozí tvar a kvalita pracovních ploch břítu se postupně mění s délkou odřezávané vrstvy materiálu, popř. s jeho odřezaným objemem. Zhoršuje se značně drsnost stykových míst břítu s třískou a plochou řezu, mění se geometrie břítu, zvětšuje se poloměr ostří  $\rho$ . Tento kontinuálně probíhající proces nazýváme otupování břítu.

### K otupení břítu dochází:

1. otěrem stykových míst materiálu břítu,
2. plastickou deformací břítu,
3. křehkým porušením materiálu břítu. [1]

### 2.1 Otěr břítu

Otěr břítu je složitý fyzikálně chemický proces, značně odlišný od normálního otěru strojních součástí. Rozdíl je jednak v objemu otřeného materiálu za časovou jednotku, popř. v relativní dráze otírajících se částí, jednak také ve změnách, k nimž dochází v mezních vrstvách materiálů otírajících se ploch.

U strojních součástí bývá hloubka otěru při délce relativní dráhy obou těles řádově  $10^3$  až  $10^4$  m v rozmezí  $10^{-3}$  až  $10^{-4}$  mm, u břítu nástroje je tato hloubka při stejné dráze tření řádově setiny až desetiny mm.

U strojních součástí prakticky nedochází v mezních vrstvách materiálu k žádným změnám jejich mechanických vlastností, ke změnám jejich mikrostruktury a chemického složení, ale při tření břítu a obrobku jsou tyto změny průvodním jevem.

Tato zásadní rozdílnost souvisí se značně odlišným mechanickým a tepelným zatížením otírajících se ploch strojních součástí a stykových míst břítu. U strojních součástí dosahuje měrný tlak řádově  $10^2$  MPa a teplota otírajících se ploch nepřesahuje 60 až 100 °C, břit naproti tomu je na stykových plochách s třískou a plochou řezu zatížen měrným tlakem  $10^3$  až  $10^4$  MPa a teplota zde dosahuje 300 až 1 200 °C.

Intenzita otírání břítu je klíčovým ekonomickým problémem procesu obrábění, a proto se ve všech technicky vyspělých státech věnuje mnoho práce na objasnění problematiky otěru.

Experimentální práce prokazují, že proces otírání břitu je výslednicí komplexu jevů zahrnujících děje fyzikální a chemické. Podle druhu materiálu břitu a obrobku a použitých řezných podmínek probíhají tyto jevy buď současně, přičemž může účinek některého z nich převažovat, anebo je otěr důsledek pouze jednoho, nebo dvou z těchto jevů.

Do skupiny fyzikálních jevů způsobujících otěr patří:

- a) brusný účinek,
- b) adheze.

Do skupiny chemických jevů patří:

- c) difúze,
- d) vytváření chemických sloučenin na stykových místech břitu. [1]

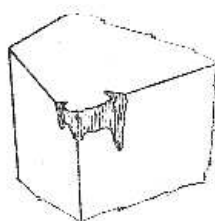
### 2.1.1 Brusný otěr

Dochází k němu nejen u nástrojů z nástrojové a rychlořezné oceli, ale také u nástrojů ze slinitých karbidů. Vzniká tím, že tvrdé částice materiálu třísky, popř. na povrchu plochy řezu, vytvářejí mikrorýhy na stykových místech břitu s třískou a plochou řezu.

Předpokladem ke vzniku brusného otěru je, aby tvrdost některých mikročástic materiálu třísky a obrobku převyšovala tvrdost určitých částic materiálu břitu.

Těmito tvrdými částicemi při obrábění oceli jsou např. částice cementitu, které jsou tvrdší než některé části mikrostruktury břitu, např. kobalt u SK. Otíráním kobaltu se porušuje soudržnost krystalů karbidů a dochází k jejich vylamování.

Sekundárním jevem brusného otírání břitu je, že zvyšuje napětí v mezní vrstvě materiálu břitu, a tím i pravděpodobnost odtržení jeho částic. [1]

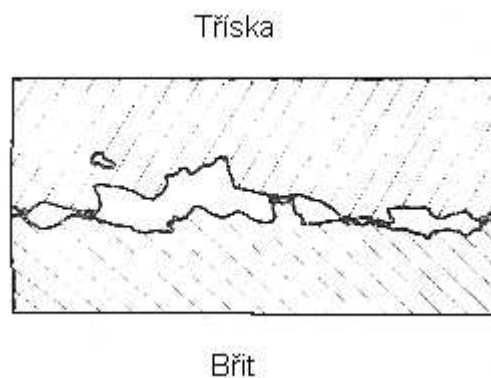


Obr. 6. Vrypy na břitu vytvořené tvrdými částicemi materiálu obrobku[1]

### 2.1.2 Adhezní otěr

Adhezní forma otěru je význačným faktorem působícím při otupování břitu nástrojů z uhlíkových a rychlořezných ocelí. V menší míře se vyskytuje při otupování nástrojů ze slinutých karbidů a keramických materiálů. Adhezní otěr břitu je možno vysvětlit pomocí mikrosvarové teorie kluzného tření (Bowden-Tabor).

Pracovní plochy břitu, stejně jako plochy třísky otírajících se o čelo a plochy řezu otírajících se o hřbet nejsou ideálně hladké, mají určitou drsnost, a dotýkají se proto pouze vrcholky svých nerovností (obr. 7). Důsledkem toho je vysoký měrný tlak, což spolu s poměrně vysokou teplotou vede k intenzivní místní pastické deformaci materiálu obou stýkajících se těles. Protože jde zpravidla o styk kovově čistých povrchů, vedou tyto podmínky k vytváření lokálních spojů - mikrosvarů. [1]



*Obr. 7. Dotyk pracovních ploch břitu  
s třískou[1]*

Svažené částice materiálu nástroje a obrobku zůstanou spolu spojeny do té doby, než smykové napětí v těchto částicích, vznikající relativním pohybem nástrojů proti obrobku, dosáhne pevnosti ve smyku jednoho z obou materiálů. [1]

### 2.1.3 Difúzní otěr

Difúzní otěr patří do kategorie chemického otěru. Dochází k němu při takových řezných podmínkách, při nichž teplota stykových míst břitu dosáhne disociační teploty některého prvku obou materiálů. Prvky tvořící materiál nástroje mají disociační teplotu 680 až 1 200 °C. Z toho je zřejmé, že difúzní otěr se může vyskytnout jen při obrábění nástrojem ze slinutých karbidů, diamantů nebo keramických materiálů.

Dochází zde k difúzi heterogenní - difundující prvek vniká do mřížky látky druhého materiálu a vytváří s ní tuhý roztok, nebo reaktivní - difundující prvek vytváří s látkou druhého materiálu mezikovové sloučeniny.

Nejaktivnějšími prvky v difúzním procesu jsou Fe a Co. Difúze železa do kobaltové fáze a kobaltu do železa začíná v malé míře již při teplotě 680 °C. Se zvyšující se teplotou intenzita vzájemné difúze obou prvků roste. Fe a Co vytvářejí směšové krystaly bez mezer. Až do teploty 900 °C zůstávají Co a Fe nejaktivnějšími prvky difúzního procesu.

U uhlíkových ocelí (0,3 až 0,5 % C) dosahuje difúze maximální hloubky při teplotě 750 až 900 °C. U oceli s větším obsahem uhlíku a u litiny se intenzita difúze zmenšuje. [1]

#### 2.1.4 Chemický otěr

Chemickým otěrem označujeme vytváření defektní vrstvy na pracovních místech břitu v důsledku jejich oxidace působením vzdušného kyslíku, popř. v důsledku vytváření chemických sloučenin z prvků řezného materiálu a řezného prostředí.

K oxidaci dochází již za nejnižších rychlostí, tj. za nízkých teplot řezání. Její intenzita se podstatně zvyšuje, přesáhne-li teplota řezání 700 °C. U slinutých karbidů na bázi WC se oxidace povrchových vrstev s rostoucí teplotou kontinuálně zvětšuje.

U karbidů TiC se zvyšuje pouze do teplot 900 °C, dále již intenzita oxidace klesá. Je to následek vzniku kysličníků pevně lpících na povrchu břitu, které postupu další oxidace zabraňují. [1]

## 2.2 Porušení břitu křehkými lomy

K porušení břitu v oblasti jeho ostří křehkými lomy dochází v mikroobjemech při ostření břitu, v makroobjemech při práci nástroje.

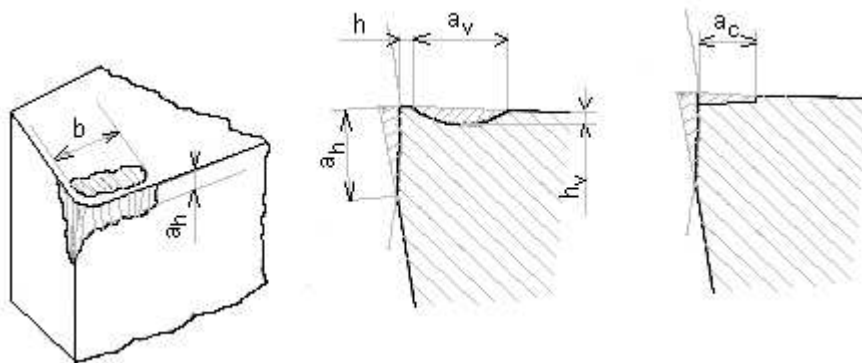
Při ostření břitu se vylamují částičky materiálu břitu na přechodové hraně hřbetu a čela. Tyto lomy zasahují ve větší míře do plochy čela než do plochy hřbetu, na obou plochách do vzdálenosti 10 až 50 μm od ostří. Velikost lomů závisí na druhu broušícího kotouče, kterým je nástroj ostřen, a na použitých řezných podmínkách.

Výrazněji se porušení břitu křehkými lomy projevuje při práci nástroje. Dochází k němu, překročí-li zatížení břitu na některém jeho místě pevnost materiálu v ohybu. Příčinou tohoto přetížení může být neúměrně velký průřez odřezávané vrstvy materiálu, ráz při přerušovaném řezu, okamžité zvýšení řezného odporu následkem tvrdého vměstku v materiálu obrobku, popř. tepelný ráz. [1]

### 2.3 Formy otupení břitu

Forma otupení břitu řezného nástroje, tj. změna jeho tvaru, k níž dochází v průběhu jeho záběru s materiálem obrobku, závisí na materiálu břitu a obrobku a na použitých řezných podmínkách, zejména řezné rychlosti, tloušťce třísky a úhlu řezu  $\delta$ . Výchozí tvar břitu naostřeného nástroje se mění:

- úběrem materiálu břitu na hřbetě, kde se vytváří nepravidelná ploška - obr. 8a,
- úběrem materiálu na čele ve tvaru žlábků - obr. 8b,
- úběrem materiálu ve formě stupínku na čele - obr. 8c,
- křehkým lomem mikročástic v těsné blízkosti ostří,
- zaoblením ostří plastickou deformací. [1]

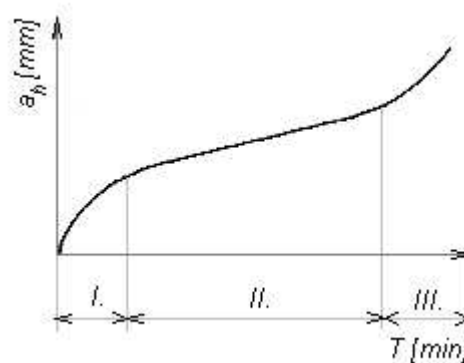


Obr. 8. Formy otupení břitu na čele a hřbetě [1]

### 2.4 Vliv pracovních podmínek na intenzitu otupování břitu

Časový průběh otupování břitu závisí především na tepelném zatížení, tj. na řezné rychlosti, do určité míry také na jeho mechanickém zatížení. Při menších řezných rychlostech a normálním mechanickém zatížení břitu, kdy se otupuje pouze otěrem, je průběh jeho

otupování na hřbetě obdobný klasické křivce závislosti otěru na čase (obr. 9). Jsou zde zřetelné tři fáze. V první dochází vlivem malé stykové plochy k velkému měrnému tlaku a k rychlému růstu otřené plochy. Ve druhé fázi se intenzita otěru zpomalí a jeho závislost na čase je lineární. Ve třetí fázi se intenzita otěru opět zvyšuje a v krátké době se může břit úplně porušit. Třetí fáze nastává v okamžiku, kdy břit je předcházejícím otupením zeslaben (výmol na čele se přiblíží těsně k ostří) a pevnost materiálu povrchové vrstvy břitu na stykových místech je následkem tepelného a mechanického zatěžování snížena. [1]



Obr. 9. Časový průběh otěru při malých řezných rychlostech [1]

## 2.5 Mechanizmy opotřebení brousicích zrn brousicího kotouče

Při broušení se opotřebovávají brousicí zrna různými mechanismy. Při dokončovacím broušení trvanlivost kotouče určuje intenzita opotřebení řezných hran. Mechanismus vylamování brousicích zrn lze vysvětlit tak, že při broušení vznikají na zrnech otěrové plošky, čím stoupají řezné síly. Při dosažení určité velikosti řezných sil se vylomí část zrna. Tento proces se periodicky opakuje. Je možné konstatovat, že čím menší je hustota zrn, tím menší je spotřeba brousicího materiálu. Proto intenzita opotřebení zrn výrazně ovlivňuje spotřebu brousicího materiálu, což potvrzuje důležitost studia opotřebení brousicích materiálů.

Hlubší studium problematiky ukázalo, že v závislosti na podmínkách broušení se brousicí zrna opotřebovávají následujícími mechanismy:

- adhezně-únavový a únavový,
- abrazivní,
- difúzní,

- chemický apod. [14]

### 2.5.1 Adhezně-únavové opotřebení

V současnosti je všeobecně známé, že tření mezi tuhými tělesy je podmíněné adhézními silami. Reálný kontakt těles při broušení je v rozměrech atomů. V kontaktních bodech jsou specifické tlaky dostatečné na vznik plastické deformace.

Fyzikální podstata adheze v současnosti ještě není dostatečně objasněná. Podle některých autorů při ní působí elektrické silové vazby. Jiní vidí příčinu v meziatomových vazbách. Existují teorie, které objasňují adhezi molekulárními vazbami mezi kontaktními tělesy. Řada autorů předpokládá, že adheze má podstatu v difúzi.

Při tření čistých povrchů má velký význam chemická příbuznost troucích se materiálů. S příbuzností materiálů výrazně stoupá adheze a koeficient tření. [14]

### 2.5.2 Abrazivní opotřebení

Při broušení padají do zóny kontaktu zrna s obráběným materiálem částičky, které mají stejnou, a nebo vyšší tvrdost než vrstvy řezného materiálu. Jsou tvrdé částičky obráběného materiálu, a nebo částičky brousicích zrn, které vznikají křehkým lomem zrn. Tyto částičky jsou zatlačeny do povrchu a tam jsou pevně fixovány obráběným materiálem. Vyčnívající části vtlačených částiček působí brousicím účinkem na zrna brousicího kotouče.

Vnější projevem abrazivního opotřebení je vznik drážek na brousicích zrnech, směr drážek se shoduje s vektorem řezné rychlosti. [14]

### 2.5.3 Difúzní opotřebení

Obyčejně se difúze chápe jako pomalu probíhající proces, což na první pohled vyvolává názor, že difúzní procesy nemůžou mít při obrábění rozhodující podíl na opotřebení. Tento názor se týká zejména broušení, kde kontakt nástroje a obrobku je přerušovaný. Jedním z důležitých faktorů, který urychluje proces difúze je vysoká teplota, která dosahuje při broušení teploty tavení obráběného materiálu. Na druhé straně je základním zákonem difúze tzv. parabolický zákon růstu difúzní vrstvy, který vychází z toho, že počáteční fáze difúze má neobyčejně vysokou rychlost rozpouštění.

Při broušení je čas přítomnosti brousícího zrna nad sledovaným bodem obráběného povrchu řádově několik mikrosekund. V důsledku toho je při broušení rychlost rozpouštění v kontaktu neobyčejně vysoká, vlastní spíše počáteční periodě difúze. V souvislosti s tím množství rozpuštěné látky je mnohem vyšší, než by bylo tehdy, když brousící a obráběný materiál je ve stabilním kontaktu, jehož doba určuje součet časů jednotlivých setkání během broušení.

Při broušení se stýkají brousící zrna s novým povrchem obrobku. To ještě více zintenzivňuje proces difúzního rozpouštění, protože na kontaktních plochách nejsou absorpční filmy, které zpomalují proces rozpouštění. Při existenci chemické příbuznosti obráběného a řezného materiálu je ještě intenzivnější rozpouštění atomů řezného materiálu v obráběném materiálu.

Specifičností povrchů, které jsou výsledkem difúzního opotřebení, jsou hladké, až zrcadlové plochy. Je možné to objasnit tím, že v důsledku difúzního rozpouštění, které probíhá více či méně rovnoměrně na celé ploše kontaktu, se kopíruje povrch řezání, který je hladký. [14]

#### **2.5.4 Kombinované opotřebení**

Ve většině praktických případů broušení opotřebení brousících zrn zapříčiňuje současně průběh více mechanismů, přičemž většinou jeden z nich bývá rozhodující. Dále třeba zdůraznit, že opotřebení brousících zrn má malý podíl na celkovém opotřebení brousícího kotouče a probíhá většinou na bázi křehkého lomu zrn. Iniciace lomu zrn probíhá v důsledku procesu otupování řezných hran brousících zrn. Intenzita určitého druhu opotřebení závisí na podmínkách broušení. [14]

### **2.6 Vliv pojiva na opotřebení brousícího kotouče**

Vlastnosti brousících kotoučů kromě použitého řezného materiálu významnou mírou ovlivňují druh a vlastností použitého pojiva. Pojivo má významnou funkci při opotřebení a obnově brousícího nástroje. V praxi se často setkáváme s případem, že použitý brousící materiál má vysokou odolnost proti opotřebení a přesto se brousící kotouč intenzivně opotřebovává.

Je známo, že při broušení mnoha materiálů kotouči z diamantu nebo kubického nitridu boru se v třískách objevuje až 90% zrn výchozí zrnitosti. To znamená, že opotřebe-



ní brousícího kotouče při těchto podmínkách probíhá zejména porušováním pojiva a vytrháváním celých brousících zrn z kotouče.

Studium granulometrické struktury zrn, nalezených v třískách při broušení elektrokorundovými a krabidovo-křemíkovými brousícími nástroji ukazuje, že výrazně závisí na podmínkách broušení. Při dokončovacím broušení je v třískách 10 až 20% neporušených zrn. Zbylou část tvoří úlomky zrn, vzniklé křehkým lomem.

Při hrubovací broušení se zvětšuje podíl brousících zrn výchozí zrnitosti na 30% a také podíl úlomků menších rozměrů. To svědčí o objemovém křehkém lomu brousících zrn při broušení. [14]

### 3 PROCENÍ KAPALINY A JEJICH VÝZNAM PŘI OBRÁBĚNÍ

#### 3.1 Význam a funkce procesních medií

Hlavní funkcí procesní kapaliny je účinný odvod tepla z místa řezání, ať už dokonalým chlazením nebo mazáním, kdy přívodem procesní kapaliny dochází ke zmenšení jak vnitřního, tak i vnějšího tření. Tento požadavek potom předurčil pro obrábění tyto prostředky ve formě kapalné.

Existují i prostředky konzistentní, jako jsou tuky, nebo pevné, jako jsou prášková maziva. Tyto sice snižují tření, ale neumožňují intenzivní odvod tepla z místa řezu. Při obrábění se tyto prostředky uplatňují pouze ojediněle, např. při řezání závitů, nebo při některých speciálních obráběcích operacích. Daleko více jsou tyto prostředky využívány při operacích tvářecích.

Plynné prostředky zatím více nepronikly do výrobní praxe, protože jejich využití je obtížnější, i když vhodně zvolený plyn může nejen odvádět teplo, ale i zmenšovat tření třeba svými chemickými účinky. V poslední době se rozšířilo chlazení vzduchem, v němž je procesní kapalina rozptýlena v drobných kapičkách (chlazení mlhou).

Kapaliny tedy zůstávají stále základními prostředky pracovního prostředí při obrábění kovů. Vedle svého chladicího a mazacího účinku mají i funkci čistící. Navíc nesmí způsobovat korozi strojů nebo obrobků a musí být zdravotně nezávadné. V poslední době se také požaduje, aby procesní kapaliny byly snadno likvidovatelné a nevyvolávaly přitom ekologické problémy.

Praktické zásady pro volbu procesní kapaliny musí vycházet z následujících poznatků:

- z mechanismu tvoření třísky
- z vlastností obráběného materiálu
- z vlastností použitého nástrojového materiálu
- z požadavků na jakost opracování součástí

Na základě těchto poznatků lze určit:

- charakteristiku procesní kapaliny tj. chladicí a mazací účinek
- způsob přívodu procesní kapaliny do místa řezu
- vhodnou koncentraci procesní kapaliny
- zvážit cenu procesní kapaliny a možnost jejího získání na trhu
- způsob likvidace procesní kapaliny [3]

### 3.2 Mechanismus tvorby třísky

Řezání je procesem plastické deformace, kdy její poslední fáze je zakončena oddělením odebírané vrstvy materiálu ve varu třísky. Tento proces řezání je možné chápat jako proces postupného stlačování, deformování a oddělování částic materiálů.

Plastická deformace probíhající před břitem nástroje souvisí také s řezným prostředím, tj. s přívodem procesní kapaliny. Přívod procesní kapaliny může ovlivňovat plastickou deformaci tak, že zmenšuje, usměrňuje nebo zhoršuje její průběh. Velikost deformací se projevuje změnami součinitele pěchování třísky a řezné prostředí jej podstatně ovlivňuje. Tyto změny se projeví i u součinitele tření.

Proces řezání je provázen řadou průvodních jevů. Jedním z nich je tvoření nárůstku. Procesní kapalina ovlivňuje tvorbu nárůstku tím, že působí na velikost teploty řezání, že ovlivňuje velikost plastické deformace a ovlivňuje i velikost tření. Obsahuje-li procesní kapalina přísady, které zmenšují tření, potom je možné počítat s tím, že s přívodem takovéto procesní kapaliny dojde v celém rozsahu řezných podmínek ke zmenšování tvorby nárůstku a tím i ke zlepšení jakosti obrobeneho povrchu.

Vliv procesní kapaliny na proces řezání není omezen řeznými podmínkami. Přívod procesní kapaliny bude působit vždy příznivě, přihlíží-li se pouze k otázkám snižování teploty řezání. Ekonomické využívání všech vlastností procesní kapaliny ale předpokládá, že její účinnost bude hodnocena komplexně, a to z hlediska procesu řezání, z hlediska nástroje, materiálu obrobku a jakosti. [3]

### 3.3 Vlivy ovlivňující volbu procesní kapaliny

#### 3.3.1 Řezný nástroj

Volba nástrojového materiálu se provádí podle prováděné operace, podle objemu výroby, podle použitého stroje, vlastností obráběného materiálu. Procesní kapalina je jedním z činitelů, které volbu nástrojového materiálu mohou ovlivnit.

Z nástrojových materiálů jsou rychlořezné oceli, které se musí vždy chladit, především tehdy, kdy obráběcí operace se uskutečňují za ztížených řezných podmínek. Slinuté karbidy, které jsou nejrozšířenějšími nástrojovými materiály, běžně mohou pracovat bez přívodu procesní kapaliny. Na obráběcích centrech často pracují společně s nástroji rychlořeznými, a tak je nutné využít přívodu procesní kapaliny i při obrábění slinutými karbidy. Keramické nástrojové materiály umožňují pracovat bez chlazení.

Jednou z hlavních příčin poškození řezného nástroje je teplo. Teplo totiž ovlivňuje jeho trvanlivost i pevnost. To se projeví opotřebením nástroje na obou jeho funkčních plochách, tj. na čele a na hřbetě. Řezné prostředí, které ovlivňuje teplotní podmínky řezání, působí proto i na proces opotřebením nástroje.

Významné je chemické působení procesní kapaliny. Toto snižuje adhezní tření, zmenšuje součinitel tření a tím i opotřebením. Snížení teploty řezání ovlivňuje i difúzní formu opotřebením. [3]

#### 3.3.2 Obráběný materiál

Volba procesní kapaliny s ohledem na obráběný materiál se zpravidla řídí následujícími pravidly:

- Zvětšuje-li se pevnost obráběného materiálu, dochází k většímu namáhání nástroje, plastická deformace je větší a proto je nutné volit procesní kapalinu s vysokotlakovými přísadami, nebo o vyšší koncentraci. Tím se zvýší pevnost mazací vrstvy i při vyšších teplotách.
- Křehké materiály, jako např. litina, se obrábí snadno za sucha. I zde je možné využít procesní kapaliny, ale spíše pro zamezení šíření nečistot, než pro zlepšení procesu řezání. Litina sama je velmi náchylná ke korozi.

- U ostatních materiálů je nutné sledovat, aby zvolená procesní kapalina nereagovala s obráběným materiálem.
- Chemické složení materiálu, především oceli, určuje jejich charakteristiky ve velkém rozsahu. Je možné ale provést jakési zevšeobecnění těchto vlastností podle složek, které tvoří základní slitinu.

Nerezavějící oceli se obrábí obtížně. Zvláštní přísady do procesní kapaliny umožňují získat jakostní povrch obrobené plochy a také podstatně zvýšit řeznou rychlost. Hliníkové slitiny se všeobecně obrábí snadno a bez chlazení. Přesto i u těchto materiálů se při některých operacích vyžaduje přívod procesní kapaliny. Jedná se spíše o dosažení vyšší jakosti obrobené plochy.

Hořčíkové slitiny mají velmi dobrou obrobiteľnost a při jejich opracování se dosahuje vysoké jakosti povrchu. Poněvadž se ale jedná o chemicky aktivní kovy, měla by procesní kapalina obsahovat méně než 0,2 váhová procenta volné kyseliny a žádnou vodu.

Slitiny mědi mají dosti značnou proměnlivost ve své obrobiteľnosti. Elektrolytická měď společně se slitinami měď-nikl, fosforovým bronzem, měď-berilium a ostatními slitinami mají špatnou obrobiteľnost a malou tvrdost. Třísky, které se tvoří, jsou dlouhé, stáčí se a nalepují na nástroj. Ty materiály, u kterých se ale tvoří cyklické třísky, které se snáze dělí a porušují, se také lépe obrábí.

Dobrou obrobiteľnost mají všechny materiály, které se obrábí na automatech. Tam je nutné, aby se tříska dobře oddělovala od základního materiálu a nezpůsobila ucpávání prostoru řezání. Proto i na automatech se využívá přívodu procesní kapaliny. [3]

### 3.3.3 Jakost obrobené plochy

Významnou funkcí procesní kapaliny je její vliv na jakost obrobené plochy. Procesní kapalina může ovlivňovat jak rozměrovou a tvarovou přesnost, tak i drsnost povrchu.

Přívod procesní kapaliny způsobuje, že se mění objem plasticky deformované oblasti, odstraní se tvoření nárůstku na čele nástroje, což se projeví i na výsledné drsnosti povrchu.

Zkoušky procesních kapalin potvrdily, že správně zvolená a připravená procesní kapalina může zlepšit drsnost povrchu o 1 až 2 třídy oproti zkouškám za sucha.

Vliv procesních kapalin se projeví i na fyzikálním stavu povrchové vrstvy obrobku. Obvykle se při přívodu procesní kapaliny zmenšuje hloubka zpevněné vrstvy. Podle některých autorů se přívodem emulze zmenšila hloubka zpevněné vrstvy o 34% a při přívodu oleje o 44%.

Jedním z praktických ukazatelů stupně zpevnění povrchové vrstvy je porovnání tvrdosti výchozího materiálu s tvrdostí povrchové vrstvy. Tato tvrdost bývá 2 až 3krát vyšší než u výchozího materiálu. Přívodem procesní kapaliny se tento rozdíl zmenší. [3]

### 3.4 Charakteristiky a vlastnosti procesních kapalin

Procesní kapaliny se obecně rozdělují do dvou hlavních skupin podle účinku na proces řezání, tj. kapaliny s převažujícím chladicím účinkem a kapaliny s převažujícím mazacím účinkem.

Z hlediska technologického a provozního je třeba uvést další požadavky na tyto kapaliny. Jedná se o tyto požadavky:

- chladicí účinek
- mazací účinek
- čisticí účinek
- provozní stálost
- ochranný účinek
- zdravotní nezávadnost
- přiměřené náklady [3]

#### 3.4.1 Chladicí účinek

Chladicím účinkem se rozumí schopnost procesní kapaliny odvádět teplo z místa řezu. Tuto schopnost má každá kapalina, která smáčí povrch kovu a pokud existuje tepelný spád mezi povrchem a kapalinou. Tento účinek nastává při obrábění vždy. Odvod tepla vzniklého při řezání se uskutečňuje tím, že proud procesní kapaliny oplachuje nástroj, třísky i obrobek a přejímá vzniklé teplo.

Chladicí účinek procesních kapalin bude záviset na jejich smáčecí schopnosti, na výparném teple, na rychlosti vypařování za určitých teplot, na tepelné vodivosti a na měr-

ném teple. Čím budou tyto veličiny větší, bude i větší chladicí účinek procesní kapaliny. Stejně důležité je i průtokové množství. Výparné teplo zvětšuje chladicí účinek kapaliny, ale přílišné odpařování kapaliny není žádoucí. Aby byla procesní kapalina využita hospodárně z hlediska čistoty a zdraví, je nutné vznikající páry odsávat. [3]

### 3.4.2 Mazací účinek

Mazací účinek je schopnost kapaliny vytvořit na povrchu kovu vrstvu, která brání přímému styku kovových povrchů a snižuje tření, ke kterému dochází mezi nástrojem a obrobkem. Vzhledem k vysokým tlakům, které vznikají při řezání, nemůže zde dojít ke kapalnému tření. Může ale vzniknout mezní tření. Má-li procesní kapalina velkou afinitu ke kovu, nebo váže-li se s materiálem obrobku chemicky v mikroskopické povrchové mezní vrstvě. Mazací účinek znamená proto zmenšení řezných sil, zmenšení spotřeby energie a také zlepšení jakosti obrobeného povrchu. Mazací účinek procesní kapaliny se proto vyžaduje u dokončovacích operací obrábění a při provádění náročných operací, jako je protahování, výroba závitů, nebo výroba ozubení.

Mazací schopnost procesní kapaliny je závislá na její viskozitě a na pevnosti vytvořené mezní vrstvy. S rostoucí viskozitou se zhoršuje pronikání kapaliny mezi třecí plochy, její proudění a také odvod tepla. Viskóznější kapaliny ulpívají také více na třískách a tím dochází ke značným ztrátám. [3]

### 3.4.3 Čisticí účinek

Čisticí účinek procesní kapaliny znamená, že její přívod odstraňuje třísky z místa řezání a např. u broušení zlepšuje vlastnosti broušícího kotouče tím, že vyplavuje zanesené póry. Procesní kapalina má také bránit slepování částic, které vznikají při řezání, ale má vyvolávat jejich usazování.

Jakost čištění závisí i na čistotě vlastní procesní kapaliny, to znamená na odstraňování nečistot, které kapalina odplavila. Větší nečistoty se sice usadí v nádrži, ale menší mohou být proudem vody odnášeny zpět do místa řezání, kde mohou způsobit i zhoršení jakosti obrobeného povrchu. Velký význam má účinek čištění pro broušení a u těch operací, kdy procesní kapalina musí odnášet třísky z místa řezu např. při řezání závitů nebo vrtání hlubokých děr. [3]

#### 3.4.4 Provozní stálost

Provozní stálost je možné hodnotit dobou výměny procesní kapaliny. Dlouhodobost výměny procesní kapaliny je podmíněna zárukou, že se její vlastnosti nebudou po tuto dobu měnit. Stárnutí procesní kapaliny olejového typu se projevuje tvořením pryskyřičnatých usazenin, které mohou způsobit i poruchu stroje. Produkty stárnutí mají vliv i na zhoršování funkčních vlastností procesní kapaliny, její rozklad, zmenšení mazacího účinku, ztrátě ochranných schopností, korozi a hnilobný rozklad.

Provozní stálost procesní kapaliny závisí na jejích fyzikálních a chemických vlastnostech a na teplotě. [3]

#### 3.4.5 Ochranný účinek

Ochranný účinek procesní kapaliny se projevuje tím, že nenapadá kovy a nepůsobuje korozi. Toto je důležitý požadavek proto, aby nebylo nutné výrobky mezi operacemi konzervovat, aby se také stroje chránily před korozi. Pro vytvoření dokonalého antikorozního účinku jsou do procesní kapaliny přidávány přísady, které pasivují kovy proti nežádoucím účinkům. Dalším důležitým požadavkem je to, aby procesní kapalina nerozpouštěla nátěry obráběcích strojů a nebyla agresivní vůči pryžovým těsněním. [3]

#### 3.4.6 Zdravotní nezávadnost

Zdravotní nezávadnost procesní kapaliny vychází z toho, že při práci na obráběcích strojích obsluha přichází do styku s procesní kapalinou. Proto procesní kapalina nesmí být zdraví škodlivá, nesmí obsahovat látky dráždící sliznici a pokožku a nesmí být jedovaté. Kapaliny také nesmí zamořovat ovzduší nepříjemným zápachem.

Zdravotní nezávadnost procesních kapalin závisí také na jejich provozní stálosti a čistotě. Přitom je nutné v provozu dbát na to, aby byla zajištěna základní hygienická opatření, jako je větrání, umývání, preventivní ochrana pokožky apod.. [3]

#### 3.4.7 Přiměřené náklady

Přiměřené náklady souvisí především se spotřebou procesní kapaliny. Při rozboru nákladů na procesní kapaliny je nutné nejdříve posoudit jejich vliv na proces obrábění, tj. na trvanlivost nástroje, ostření, jakost obrobku a spotřebu energie. Po tomto rozboru musí



následovat hodnocení procesní kapaliny s ohledem na její provozní stálost, spotřebu a výměnu. Je třeba zvážit i náklady na likvidaci procesní kapaliny. [3]

### 3.5 Rozdělení procesních kapalin

Procesní kapaliny se dělí do dvou následujících skupin:

- chladicí kapaliny - s převažujícím chladicím účinkem
- řezné oleje - s převažujícím mazacím účinkem

Do skupiny procesních kapalin s převažujícím chladicím účinkem patří kapaliny na vodní bázi a do skupiny procesních kapalin s převažujícím mazacím účinkem patří kapaliny na bázi oleje.

Procesní kapaliny se obecně dělí do následujících skupin :

- vodní roztoky
- emulzní kapaliny
- mastné oleje
- zušlechtěné řezné oleje
- syntetické kapaliny [3]

#### 3.5.1 Vodní roztoky

Vodní roztoky jsou nejjednodušší procesní kapaliny, ale nejsou příliš výhodné z hlediska aplikace. Voda, jako jejich základ, vyžaduje řadu úprav, jako je její změkčování, přidávání přísad proti korozi, pro zlepšení smáčivosti a proti pěnivosti. Vodní roztok musí být vždy alkalický.

U těchto kapalin vzniká nebezpečí rozmnožování anaerobních bakterií, které způsobují tvorbu kalů a nepříjemný zápach. [3]

#### 3.5.2 Emulzní kapaliny

Emulzní kapaliny jsou disperzní soustavou dvou vzájemně nerozpustných kapalin, z nichž jedna tvoří mikroskopické kapky, rozptýlené v kapalině druhé. Obvykle se jedná o olej ve vodě. Přitom je třeba využít další složky tzv. emulgátory.

Tyto látky zmenšují mezipovrchové napětí emulgovaných kapalin a stabilizují emulzi. Emulzní kapaliny spojují do určité míry přednosti vody a mazacích olejů. Chladicí účinek emulzní kapaliny závisí na koncentraci emulze. Schopnost ochrany proti korozi závisí na hodnotě pH emulze, ale v daleko menší míře než u vodních roztoků. Emulgační prostředky musí splňovat požadavky především na jakost a spolehlivost účinku při vysokých tlacích. Provozní vlastnosti emulzních kapalin závisí na jejich přípravě.

Pro přípravu emulzní kapaliny je třeba zachovat určitý postup:

- pro přípravu použít vhodně upravenou vodu
- emulgační prostředek přidávat pozvolně za stálého míchání
- koncentraci emulze volit podle druhu operace a podle množství ochranných látek; koncentrace se obvykle pohybuje v rozmezí 2 až 10 % [3]

### 3.5.3 Mastné oleje a tuky

Mastné oleje a tuky jsou látky živočišného a rostlinného původu a mají prakticky stejné vlastnosti jako olej minerální. Mají ale menší povrchové napětí a tím i lepší smáčivost, což přispívá k účinnějšímu odvodu tepla.

Velkou nevýhodou těchto mastných látek je značný sklon ke stárnutí, tj. zvyšuje se jejich kyselost a tvoří se pryskyřičné látky. Mezi mastné látky užívané při obrábění patří řepkový olej, ricinový olej, lněný olej a další. [3]

### 3.5.4 Minerální oleje

Minerální oleje jsou výrobky z ropy, s dobrými mazacími vlastnostmi, ale horším chladicím účinkem. Mají dobrý ochranný účinek a dobrou odolnost proti stárnutí.

Minerální oleje mají velmi dobré provozní vlastnosti, a proto se využívají jako základ pro oleje řezné. [3]

### 3.5.5 Řezné oleje

Řezné oleje jsou zušlechtěné minerální oleje. Přísady, které se používají, mají vyšší tlakovou únosnost a také lepší mazací vlastnosti.

Přísady, které zlepšují mazací schopnosti řezných olejů, jsou následující:

- mastné látky
- organické sloučeniny
- pevná maziva

Do první skupiny patří zmýdelnitelné mastné oleje, mastné kapaliny, nebo syntetické estery. Tyto přísady zvětšují přilnavost oleje ke kovu a zlepšují mazací schopnosti, ale ne za extrémních tlaků.

Do druhé skupiny patří organické sloučeniny určitých prvků, jako je síra, chlor, fosfor. Všechny tyto látky se osvědčily jako vysokotlaké přísady. Na povrchu vytvářejí vrstvičku kovových mýdel, která zabraňují kovovým svarům a usnadňují kluzný pohyb troucích se ploch. Sloučeniny s chlórem zmenšují tření, ale jeho účinnost klesá při teplotách nad 400°C. Sloučeniny s fosforem jsou proto ještě účinnější. Jako nejúčinnější se projevily kombinace sloučenin S, Cl, P. [3]

### **3.5.6 Syntetické kapaliny**

Syntetické kapaliny se vyznačují velkou provozní stálostí, ale jejich mazací a chladicí účinky nejsou lepší než u minerálních olejů. Kapaliny tohoto druhu jsou většinou rozpustné ve vodě a mají dobrý chladicí i mazací účinek, stejně jako účinek ochranný.

Tab. 1. Přehled doporučených procesních kapalin pro různé metody obrábění [3]

Metoda obrábění	Ocel			litina	nikl a jeho slitiny	bronz a mosaz	měď a slitiny	hliník a slitiny	hořčík a slitiny
	nízko-uhlíková	s vyšším obsahem uhlíku	nerez oceli						
Soustružení	D 3	D 5	D 10	-	E	D 3	D 3	D 3	B
Vrtání a vystružování	E, D 10	F	J	D 5	E	B	B	B	B
Frézování	D 5	D 5	D 10	D 5	F	B	D 3	D 3	B
Řezání závitů	H	J	J	D 10	J	C	B	C	B
Řezání závitů na automatech	E	H	H	-	H	B	A	C	B
Válcování závitů	F	F	F	-	-	C	A	B	A
Řezání pilou	D 3	D 3	D 3	D 3	D 3	D 3	D 3	D 3	B
Výroba ozubení	E	F	J	D 5	-	B	-	-	-
Protahování	J	J	J	D 10	J	C	B	C	B
Broušení	D 2	D 2	D 2	D 2,5	D 2	D 2	D 2	D 2	B
Broušení závitů	J	J	J	-	-	C	-	C	C

A - minerální oleje

E - minerální oleje s přísadami

B - mastné oleje

F - lehké minerální oleje s přísadami

C - maštěné oleje s přísadami

H - oleje aditivované

D - emulze (číslo značí koncentraci v %)

J - maštěný olej s přísadami [3]

### 3.6 Mikromazací technologie – MQL

Mazadla ACCU-LUBE byla vyvinuta v 80.letech minulého století v USA pro náročné obráběcí operace. Jsou vyrobeny na bázi rostlinných olejů, neškodí zdraví ani životnímu prostředí. Mají vynikající mazací schopnosti. Používají se ve všech oblastech strojírenství, především v leteckém a automobilovém průmyslu, při výrobě nástrojů, ale také v jemné mechanice - optický průmysl.

#### Hlavními přednostmi použití mazadel Accu-Lube:

- snížení tření v místě řezu, na čele a hřbetu řitu
- redukce tření umožňuje zvýšení posuvů
- zvýšení životnosti nástroje
- zvýšení produktivity
- ekologická a zdravotní nezávadnost

**Ekonomické výhody:**

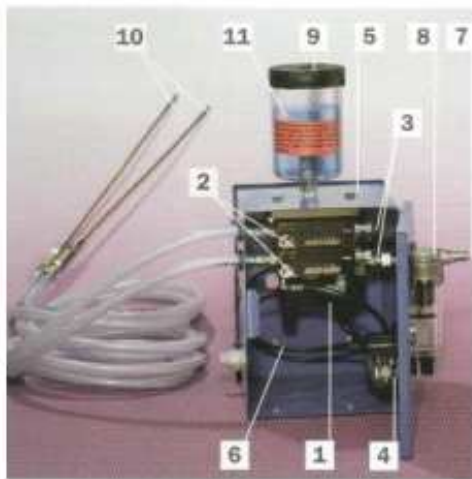
- suché obrobky a třísky – není nutno odmašťovat
- snížení tření a zvýšení řezných výkonů
- zvýšení životnosti nástrojů
- nízká spotřeba
- nízké náklady na čištění a údržbu strojů
- žádné náklady na likvidaci emulzí

**Vliv na životní prostředí a pracovní podmínky operátorů:**

- mazadla ACCU-LUBE jsou biologicky odbouratelná
- neobsahují žádná toxická aditiva, jako jsou EP aditiva, chlór, dusitany, síru, fenol, těžké kovy, silikon a biocidy
- nevyžadují likvidaci
- čisté podlahy na pracovišti
- čisté pracovní prostředí
- nezávadné výpary
- žádné kožní a dýchací problémy

**Mazacího účinku Accu-Lube lze dosáhnout pomocí speciálně vyvinutých dávkovačů:**

- Aplikátory pro vnější mazání nástrojů
- MiniBoostery pro vnitřní mazání nástrojů[6], [7]



1. Elektromagnetický ventil
2. Pístová čerpadla
3. Regulace zdvihučerpadel
4. Pneumatický generátor zdvihů čerpadel
5. Skříňka
6. Rozvod vzduchu
7. Přívod vzduchu
8. Vzduchový filtr
9. Nádobka na kapalinu
10. Trysky
11. Náplň

Obr. 10. Základní části aplikátoru [7]

### Princip aplikátoru:

Kapalina se z nádobky dostává do čerpadla, které jej dopravuje k aplikátoru, tenkou hadičkou, vedenou uvnitř vzduchové hadice ke trysce, kde ji strhává proud stlačeného vzduchu. Množství dávkovaného oleje se reguluje zdvihem čerpadla a frekvencí zdvihu.

Tento systém strhávání kapaliny na konci trysky vytváří jemný aerosol a je hospodárnější proti jiným mikromazacím systémům na principu fixírky.

### Typy aplikátoru:

Podle počtu mazaných nástrojů mohou být aplikátory jedno- nebo více-tryskové, spouštěné samostatně, současně nebo v různých kombinacích. [6], [7]



Obr. 11. Dvanácti čerpadlový aplikátor [7]

MQL (Minimum Quantity Lubrication) - minimální množství lubrikace je metoda rozstříkávání chladicí kapaliny. Procesní kapalina se dopravuje přesně do místa řezu a jen v takovém množství, které je potřeba. Tato technologie potvrzuje, že někdy jen malé množství, precizně vybrané a přesně aplikované, procesní kapaliny nahradí množství běžně aplikované chladicí kapaliny.

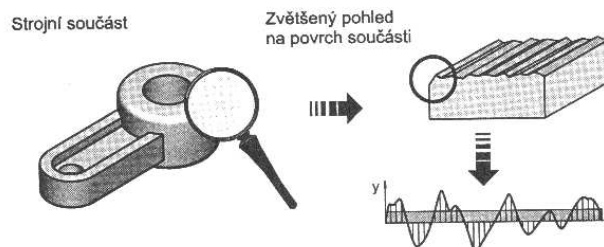
#### **Nevýhody systému MQL:**

- MQL neodvádí teplo z nástroje, nebo obrobku, nebo celého systému obrábění. Pouze redukuje zvýšení teploty tvořené pohybem pilin po hřbetě břitu nástroje.
- Neodvádí piliny z řezné zóny.
- Nezabrání korozi.
- Ústí trysky MQL systému nesmí být více než 5 cm od místa styku nástroje s obrobkem.
- Tryska je citlivá na poškození a musí být přesunuta, když hrozí poškození pilinami nebo třískami. [4] [7]

## 4 JAKOST OBROBENÉ PLOCHY

Při výrobě strojních součástí je nutné vedle jejich přesných rozměrů dbát na vhodnou jakost povrchu. Jednotlivé plochy mohou vznikat buď obráběním (povrch obrobený), nebo zachováním původního povrchu polotovaru (povrch neobrobený). Oba tyto povrchy mohou zůstat dále neupravené, nebo se mohou k dosažení potřebných vlastností upravovat.

Skutečný povrch součásti se ovšem liší od ideálního, který je definován ve výkresové dokumentaci. Na skutečném povrchu jsou zřejmé velmi jemné nerovnosti rozložené přibližně pravidelně po celé ploše. Vlastnosti drsností se mohou lišit v jednotlivých směrech. [5]



Obr. 12. Nepřesnost skutečného povrchu součásti[5]

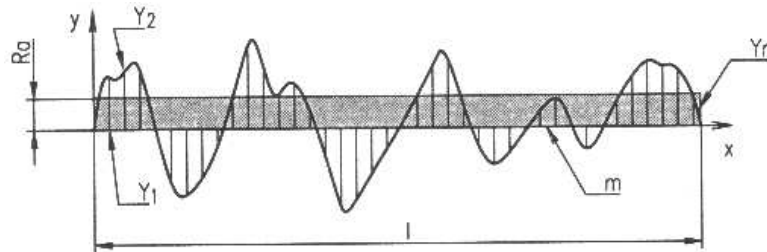
Jakost povrchu volíme především s ohledem na funkční vlastnosti. Na strojních součástech existují dva základní typy ploch z hlediska jejich funkce:

- Plochy stykové (funkční) jsou ve vzájemném styku s jinou součástí a její jakost tedy ovlivňuje funkci celku. Příkladem může být povrch čepu uloženého v kluzném ložisku.
- Plochy volné nejsou ve vzájemném styku s jinou součástí. Příkladem může být vnější povrch víka spalovacího motoru. [5]

### 4.1 Metody hodnocení drsnosti povrchu

- Střední aritmetická úchylka profilu  $R_a$ .
- Maximální výška profilu  $R_z$
- Střední rozteč nerovností profilu  $S_m$ .
- Střední rozteč místních výstupků profilu  $S$ .
- Nosný podíl profilu  $l_p$ . [5]





Obr. 13. Určení střední aritmetické úchlky profilu Ra[5]

Pro výpočet lze využít integrálního počtu, případně statistické metody. Nerovnosti jsou vždy charakterizovány v rozsahu základní délky  $l$ . [5]

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| = \frac{|y_1| + |y_2| + |y_3| + \dots + |y_n|}{n} \qquad R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \qquad (1)$$

Tab. 2. Doporučené hodnoty základní délky  $l$  [5]

Doporučená základní délka $l$ [mm]						
Základní délka	0,08	0,25	0,8	2,5	8	25

V ČR je nejběžnější metodou pro hodnocení drsnosti povrchu stanovení střední aritmetické úchlky profilu  $R_a$ . [5]

Tab. 3. Doporučené hodnoty střední aritmetické úchlky profilu  $R_a$  [5]

Střední aritmetická úchlka povrchu $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]							Typická metoda výroby povrchu
0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	Dokončovací metody (broušení, lapování apod.)
1,6	3,2	6,3	12,5				Běžné obrábění (soustružení, frézování apod.)
25	50	100	200	400			Povrch polotovarů (výkovky, odlitky apod.)

Hodnota drsnosti povrchu je závislá především na metodě výroby povrchu. Proto musíme při jejím předepisování vždy zvážit účelnost použití jednotlivých funkčních a volných ploch na součásti. Zbytečná volba vysoce kvalitních povrchů může u strojních součástí výrazně zvýšit jejich cenu. Drsnosti povrchu součástí volíme vždy optimálně s ohledem na jejich funkci. [5]

## 5 SHRNUÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE

V teoretické části diplomové práce bylo obecně popsáno:

- broušení,
- opotřebenění nástrojů,
- procesní kapaliny,
- jakost obrobeného povrchu.

Praktická část diplomové práce se zabývá:

- broušením kovových a polymerních materiálů,
- využitím různých systémů chlazení při broušení,
- měřením jakosti povrchu,
- měřením složek řezných sil,
- měřením opotřebenění broušícího kotouče.

Cílem diplomové práce je, při broušení různých materiálů, určit vliv různých procesních kapalin, hlavně mikromazací technologie MQL (dále jen MQL), a různých procesních podmínek na složky řezných sil  $F_f$  a  $F_p$ , parametry drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$  a opotřebenění broušícího kotouče, které bylo posuzováno pomocí poměrného obrusu  $G$ .

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

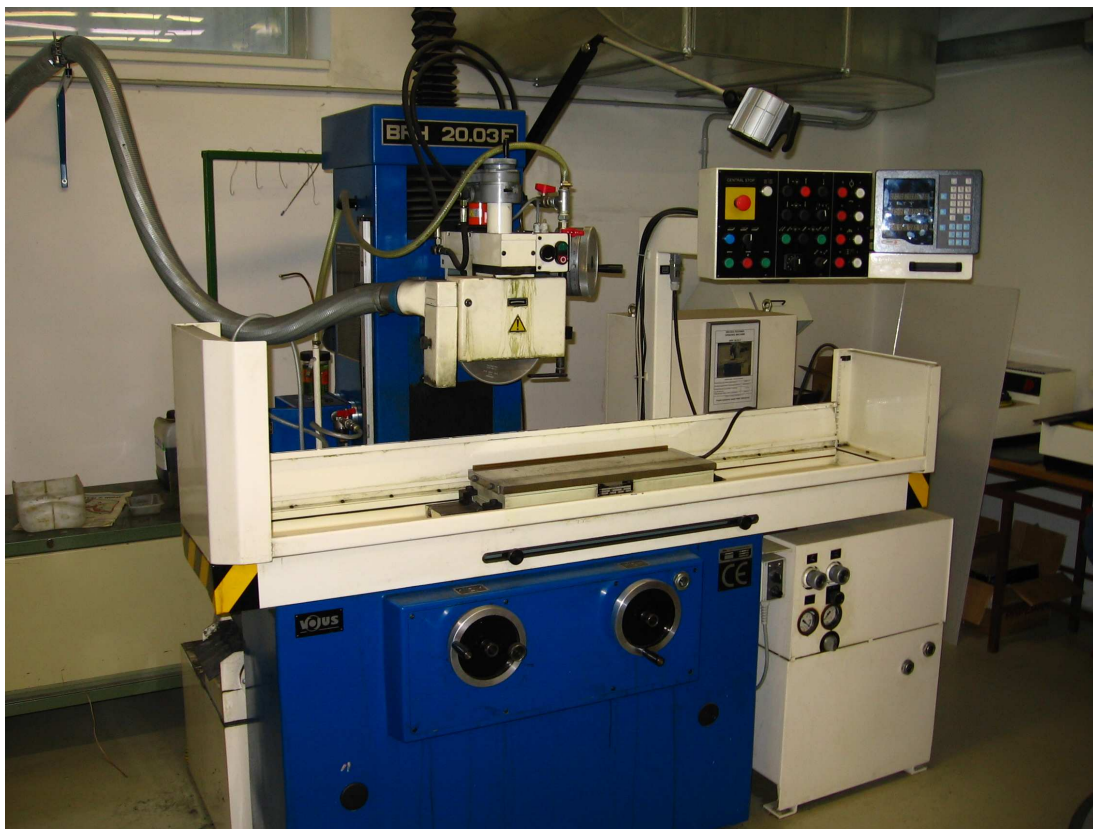
## 6 PODMÍNKY EXPERIMENTU, POUŽITÉ STROJE, NÁSTROJE, PŘÍSTROJE A POMŮCKY

Na rovinné brusce BRH 20.03 F byly broušeny kovové i polymerní materiály. S různými procesními kapalinami a při různých procesních podmínkách. Na dynamometru byly měřeny složky řezných sil, následně byla na drsnoměru měřena jakost povrchu broušených ploch a pomocí 3D drsnoměru byla zjištěna hodnota opotřebení broušícího kotouče.

### 6.1 Vodorovná rovinná bruska BRH 20.03 F

Z hlediska koncepce se brusky BRH 20.03 vyznačují tím, že stůl vykonává podélný pohyb po vedení vyhotoveném na předním lůžku a příčný posuv vykonává vřeteník spolu se stojanem, v kterém je vedení pro jeho svislý posuv. Hydraulický agregát a skříň elektrovýzbroje tvoří samostatné celky umístěné mimo stroj. [13]

Podle čísla vyhotovení můžou brusky pracovat s ruční obsluhou, v uzavřeném nebo neuzavřeném automatickém cyklu. [13]



Obr. 14. Vodorovná rovinná bruska BRH 20.03 F

Tab. 4. Technické údaje rovinné brusky BRH 20.03 F

Pracovní plocha stolu:	200 x 630 mm
Rozměry brousícího kotouče:	250 x 20 – 50 x 76 mm
Rychlost stolu plynule regulovatelná:	1 – 30 m.min <sup>-1</sup>
Otáčky brousícího vřetena:	2550 min <sup>-1</sup>

## 6.2 Použitý brousicí kotouč

Pro celý experiment byl používán jeden brousicí kotouč, s označením A 99 80 I 12 V. Rozměry kotouče byly 234 x 20 x 76 mm.



Obr. 15. Použitý brousicí kotouč

Tab. 5. Vlastnosti použitého broušicího kotouče

Označení	Materiál broušicích zrn	Zrnitost	Tvrdost	Pórovitost	Pojivo
A 99 80 I 12 V	korund	jemná	měkká	otevřená	keramické

## 6.3 Procesní kapaliny a jejich aplikace

### 6.3.1 Accu-Lube LB 2000

Procesní kapalina Accu-Lube LB 2000 byla dodána firmou Rexim spol. s.r.o., zároveň s aplikátorem pro mikromazání MQL.

Accu-Lube LB 2000 je mazivo pro použití ve strojírenství. Mazivo je určené pro mikromazací systémy. Accu-Lube LB 2000 je doporučeno používat pouze v aplikačních systémech Accu-Lube, popsanych v kapitole 3.6. [8]

#### Všeobecné informace:

Forma skupenství: kapalina

Barva: zelená až zelenomodrá

Zápach: neutrální

#### Některé důležité informace:

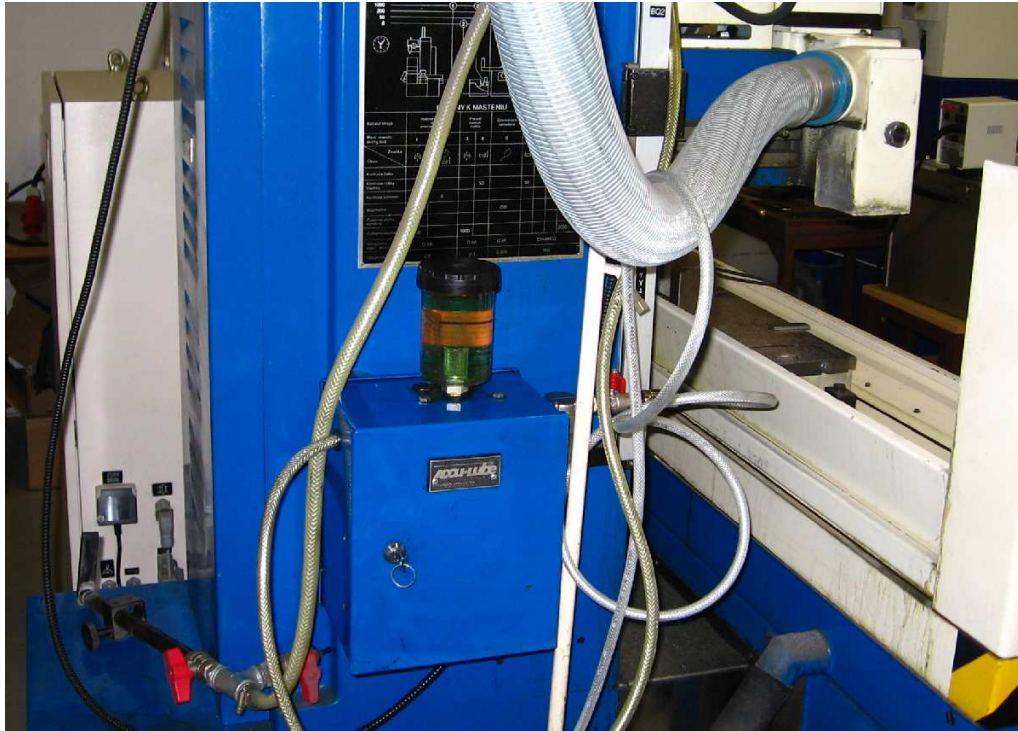
Teplota tuhnutí: - 8 až - 5 °C

Teplota vzplanutí: > 300 °C

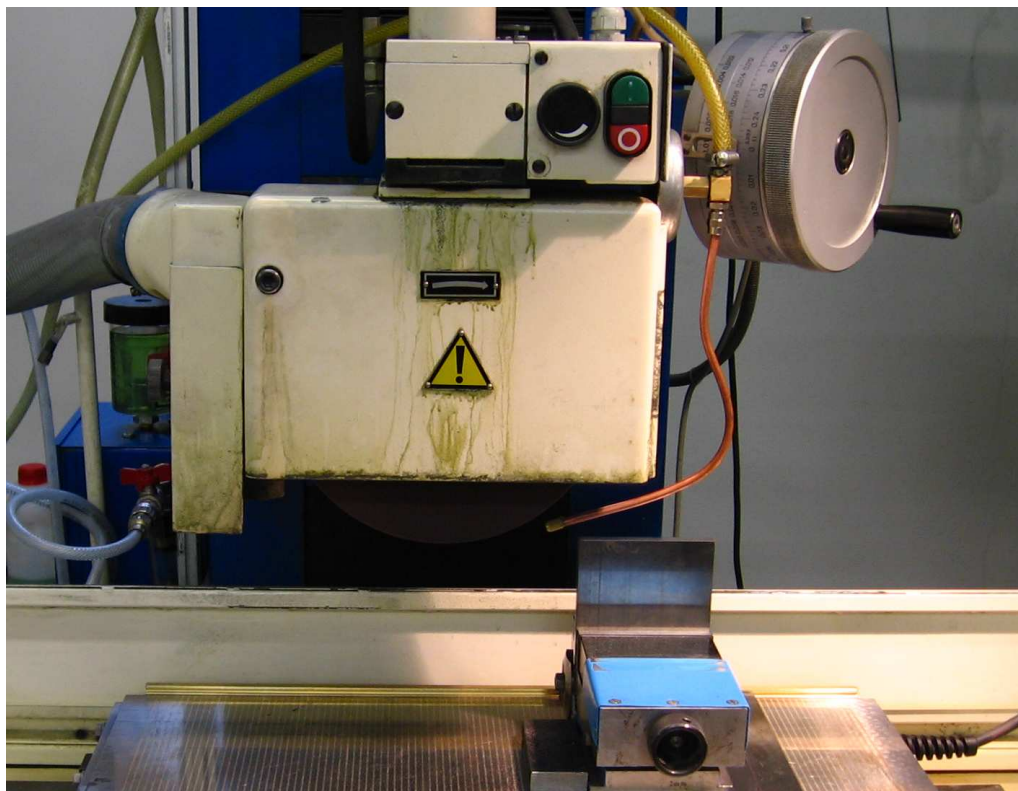
Hustota: 0,92 g/cm<sup>3</sup> při 15 °C

Viskozita kinematická: 35 mm<sup>2</sup>/s [8]

Přenosný aplikátor MQL byl připevněn na brusce pomocí magnetů. Tryska aplikátoru MQL byla připevněna na stroj také pomocí magnetu a nastavena tak, aby mířila na broušený materiál těsně před místo styku materiálu s broušicím kotoučem, její ústí bylo přibližně 25 mm od tohoto místa.



*Obr. 16. Přenosný aplikátor MQL připevněný na brusce pomocí magnetů*



*Obr. 17. Tryska aplikátoru MQL připevněná na stroj pomocí magnetu*





Obr. 18. Detail na trysku aplikátoru MQL během experimentu

### 6.3.2 Procesní kapalina Microtrend 217 M

#### Popis:

Microtrend 217 M je zcela biostabilní s vodou mísitelná koncentrovaná procesní kapalina, která tvoří po smíchání s vodou stabilní, průsvitnou do hněda zbarvenou mikroemulzi. Microtrend 217 M obsahuje velký podíl ropného oleje, který zvyšuje řeznou účinnost a mazání obráběcího nástroje. Složení Microtrendu 217 M, mikroemulzní procesní kapaliny s dlouhou provozní životností, vyhovuje platným bezpečnostním a zdravotním předpisům a doporučením výrobců obráběcích zařízení. Microtrend 217 M neobsahuje formaldehydy ani fenoly. [9]

#### Použití:

Microtrend 217 M je vhodný pro většinu obráběcích operací středně tažných ocelí, neželezných kovů a litin. V závislosti na koncentraci může být Microtrend 217 M použit i pro náročnější obrábění nebo běžné broušení. Zředovací poměry se mění podle způsobu použití a podle náročnosti provozních podmínek. [9]

Zředovací poměr byl 5% rozmíchané kapaliny ve vodě.

Procesní kapalina Microtrend 217 M byla aplikována pomocí chladicího systému brusky BRH 20.03 F.



*Obr. 19. Aplikace procesní kapaliny Microtrend 217 M*

### **6.3.3 Procesní kapalina Polybio 420**

Procesní kapalina POLYBIO 420 byla dodána firmou Rexim spol. s.r.o..

#### **Popis:**

POLYBIO 420 je vodouředitelný biostabilní emulgační obráběc olej určený pro běžné obráběcí operace železných kovů. [10]

#### **Použití:**

Běžné obráběcí operace zejména litiny a oceli včetně broušení. [10]

**Výhody:**

- **Ekonomický aspekt:** minimální vynášivost maziva na šponách
- **Výkon:** POLYBIO 420 je produkt vyvinutý zejména pro obrábění litiny a oceli s dobrým kompromisem mazivost vs. chladicí kapacita
- **Mikroorganismy:** biostabilní kapalina vysoce odolná proti působení mikroorganismů
- **Antikorozní ochrana:** ochrana proti korozi železných i neželezných materiálů
- **Pěnivost:** Vysoká odolnost proti mechanickému pění a pění v měkké vodě
- **Životní prostředí:** Produkt není klasifikován jako dráždivý/senzitizující ani ve formě koncentrátu
- **Příznivé provozní vlastnosti:**
  - bez zápachu
  - nevytváří gumovité povlaky
- **Odmaštění materiálů:** CONDACLEAN LC 1547 [10]

**Některé vlastnosti:**

Vzhled:	čirá žlutá kapalina
Hustota při 15°C:	1,038 g.cm <sup>-3</sup>
Kinematická viskozita při 40°C:	16 mm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
Koncentrace pro broušení:	3 až 5 % [10]

Zředovací poměr byl 5% rozmíchané kapaliny ve vodě.

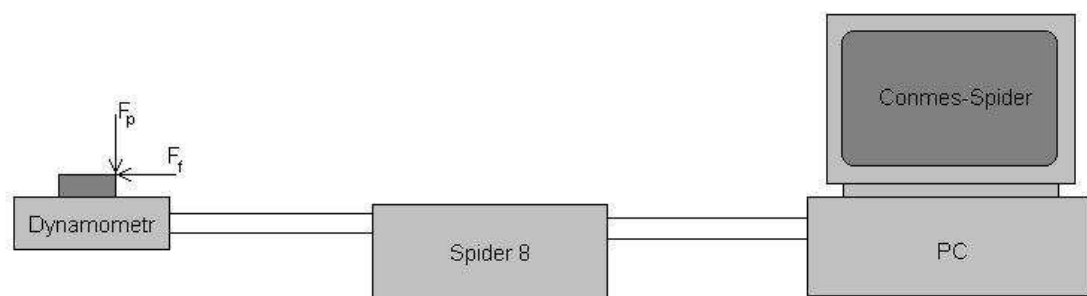
Procesní kapalina POLYBIO 420 byla aplikována pomocí chladicího systému brusky BRH 20.03 F.



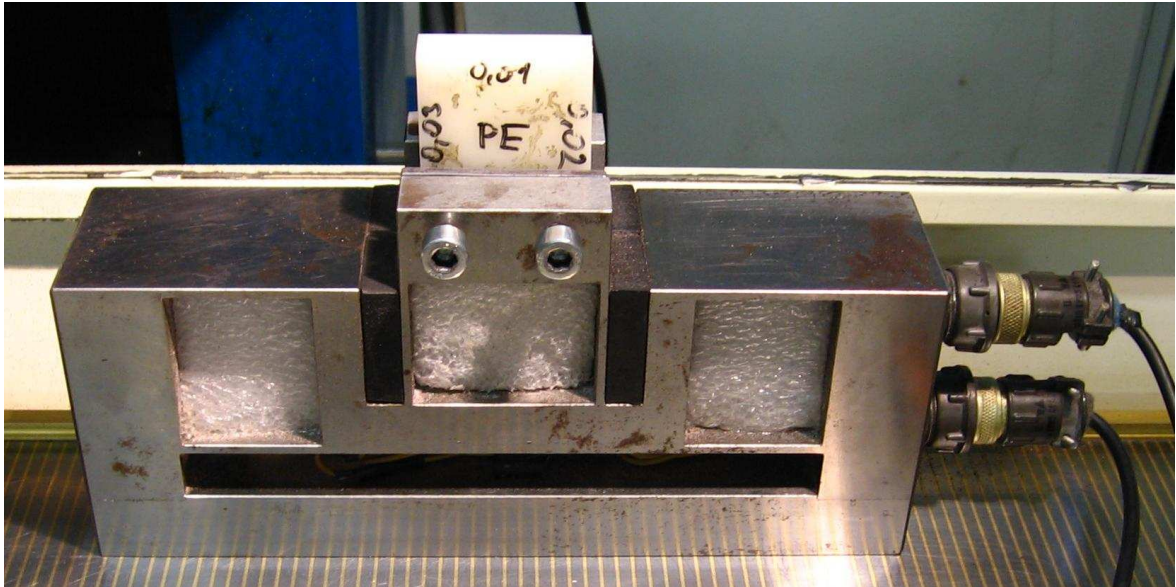
Obr. 20. Aplikace procesní kapaliny POLYBIO 420

#### 6.4 Měření složek řezných sil

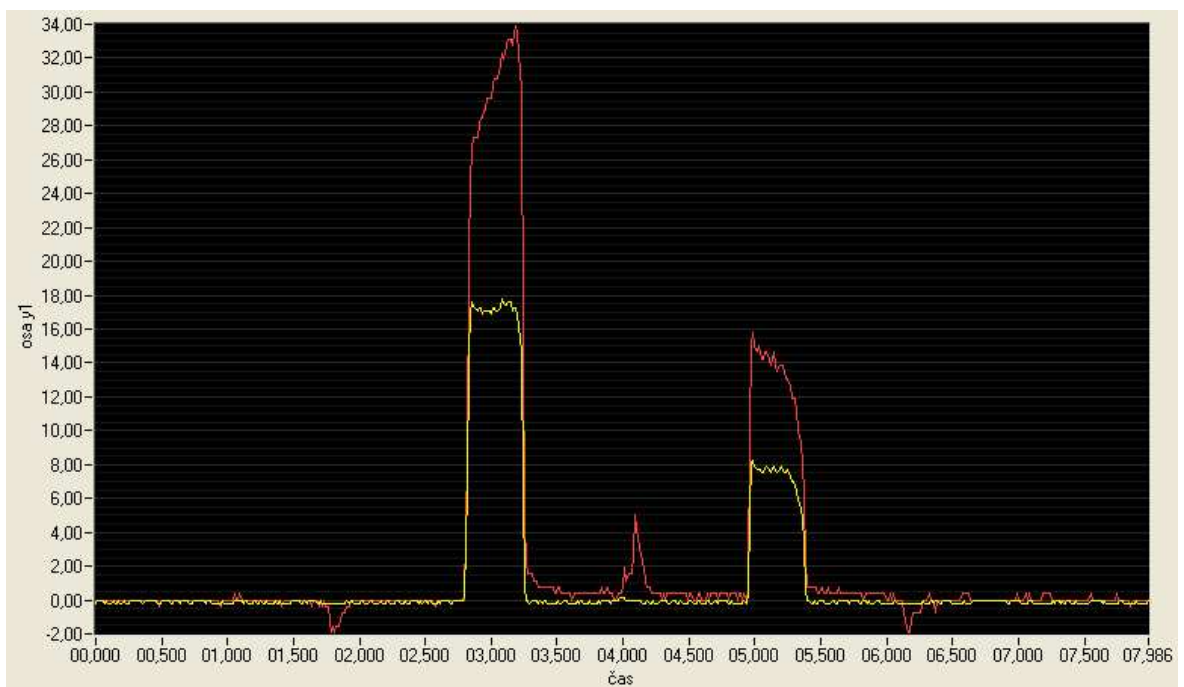
Měření vodorovné  $F_f$  a svislé  $F_p$  složky řezných sil bylo měřeno na tenzometrickém dynamometru, který byl propojen s přístrojem Spider 8 a počítačem, ve kterém byl nainstalován program Conmes-Spider. Na obrázku 23 můžeme vidět graf získaný pomocí programu Conmes-Spider, červená čára vyjadřuje vodorovnou (posuvovou) složku řezných sil  $F_f$  a žlutá čára představuje svislou složku řezných sil  $F_p$ .



Obr. 21. Propojení dynamometru s PC



Obr. 22. Tenzometrický dynamometr



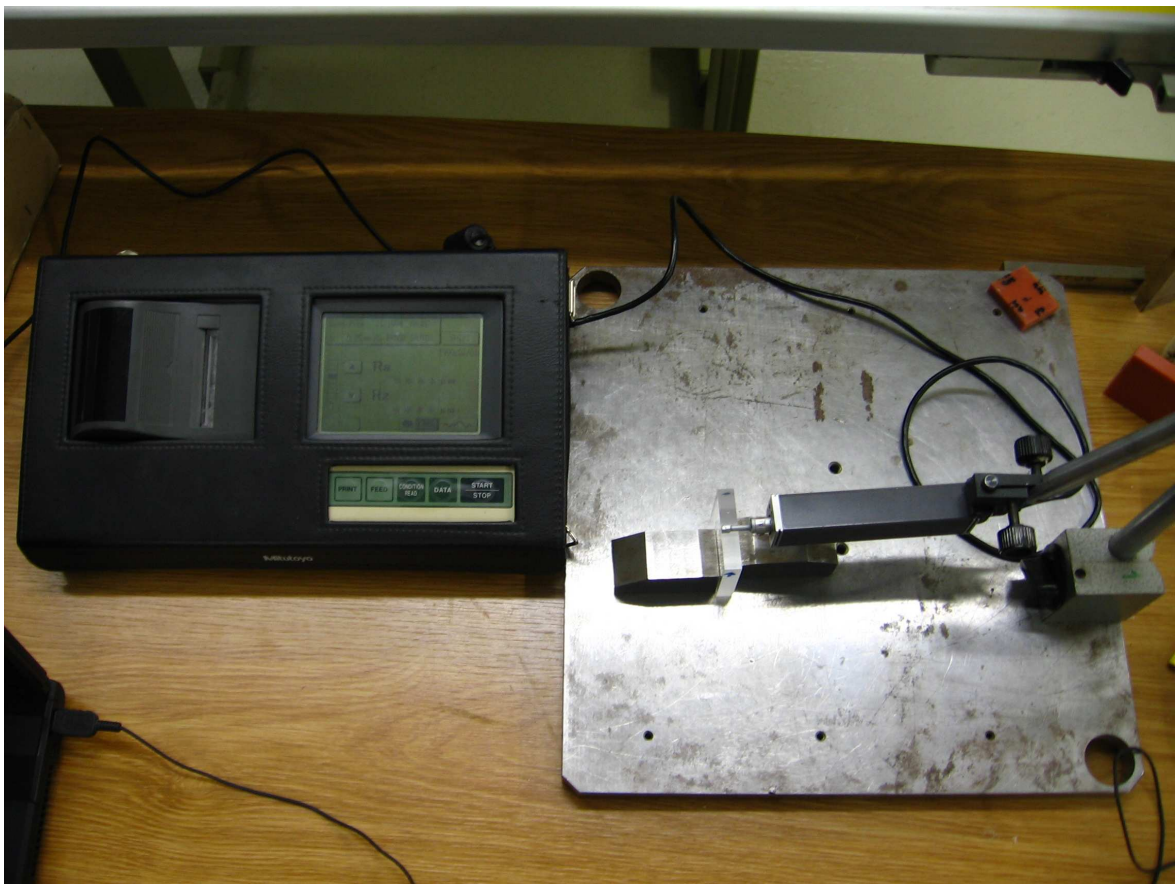
Obr. 23. Graf získaný pomocí programu Connes-Spider

## 6.5 Určování jakosti povrchu

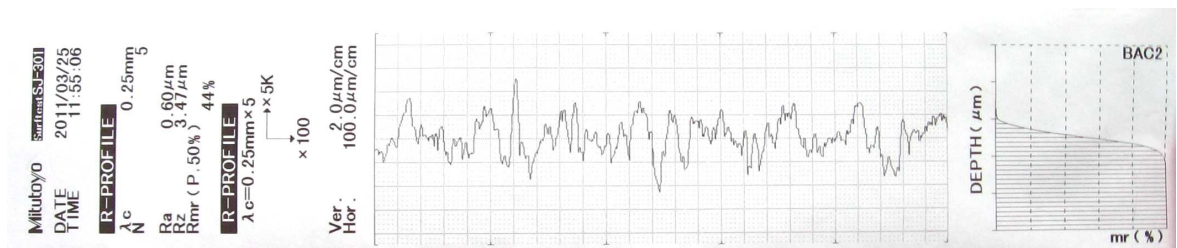
Jako činitelé, popisující jakost broušeného povrchu, byly voleny parametry drsnosti  $R_a$  a  $R_z$ , byly měřeny pomocí dotykového drsnoměru Mitutoyo SJ – 301.

Hrot drsnoměru Mitutoyo SJ – 301 snímá povrch vzorku, vertikální pohyb hrotu se přemění na elektrický signál, signály proběhnou různými výpočtovými procesy a výsledky výpočtů se zobrazí na displeji přístroje. [13]

Drsnost povrchu vzorků byla měřena vždy kolmo na vektor pohybu brousicích zrn brousicího kotouče na deseti různých místech broušené plochy.



Obr. 24. Měření drsnosti daného vzorku drsnoměrem Mitutoyo SJ – 301



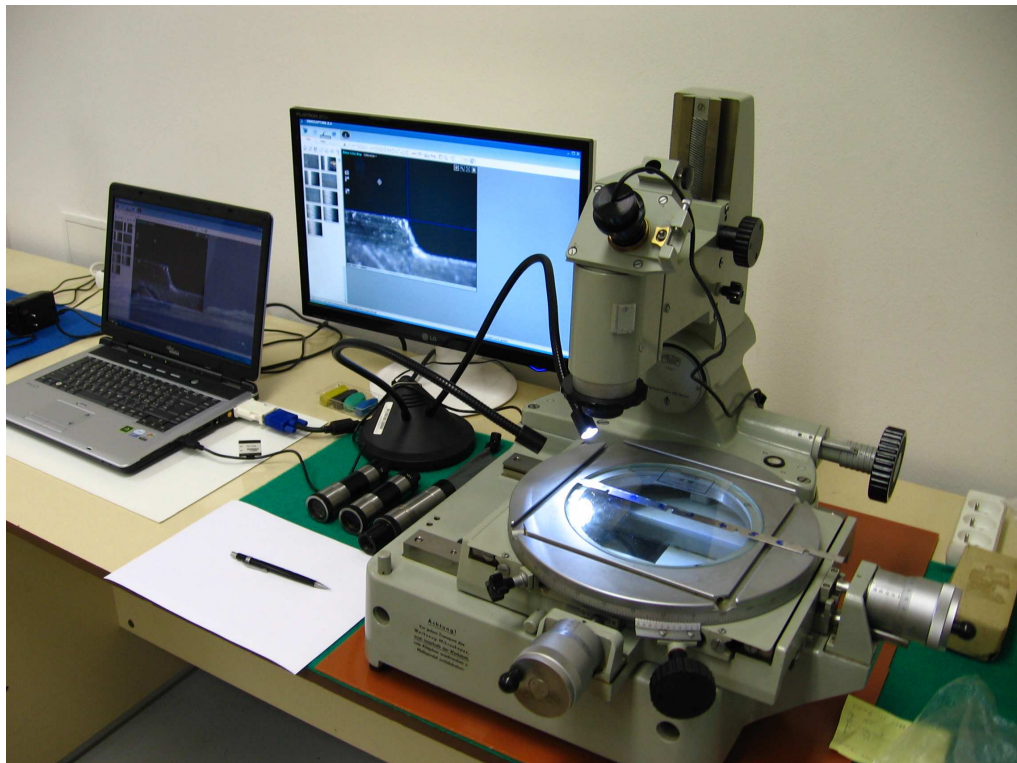
Obr. 25. Vytištěná naměřená data z drsnoměru Mitutoyo SJ - 301

## 6.6 Měření opotřebení broušícího kotouče

Při měření opotřebení broušícího kotouče bylo postupováno tak, že po zbrošení kalené oceli 19 436.4. Postupně o 10 a o 20 mm s hloubkou řezu  $a_e = 0,01$  mm a posuvovou rychlostí  $v_f = 14$  m.min<sup>-1</sup>. Byl profil broušícího kotouče okopírován (vybroušen) na planžetu a profil na planžetě byl následně digitálně změřen pomocí 3D drsnoměru Talysurf CLI 500. Fotografie profilu otištěného na planžetě byla získána pomocí mikroskopu Carl Zeiss.



*Obr. 26. 3D drsnoměr Talysurf CLI 500 s počítačem*



*Obr. 27. Mikroskop Carl Zeiss s počítačem*



## 7 VLIV MQL NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU A SLOŽKY ŘEZNÝCH SIL

V experimentu byly dané jednotné řezné podmínky. Posuvová rychlost  $v_f = 7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a hloubka řezu  $a_e = 0,01 \text{ mm}$ . Na deseti různých materiálech (5 kovových, 5 polymerních) byly porovnávány složky řezných sil a parametry drsnosti povrchu, při použití MQL a při broušení za sucha. Dle výsledků prvního měření byl následně zúžen výběr broušených materiálu z deseti na pět.

Tab. 6. Podmínky experimentu fáze 1

Broušené materiály	Řezné podmínky $v_f$ [m/min] / $a_e$ [mm]	Systém chlazení	Měřené veličiny
Ocel X210Cr12 kalená	7 / 0,01	za sucha	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
Ocel X210Cr12		s MQL	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
Ocel 100Cr6 kalená			$F_f$ [N]
Ocel E335			$F_p$ [N]
Dural AW 5083			
PMMA			
PVC			
PE			
Pryž TP 44			
Pryž 9341/75			

## 7.1 Broušené materiály

### 7.1.1 Ocel X210Cr12 (ČSN 19 436.4) – kalená

Oceli třídy 19 jsou speciální nástrojové oceli. Rozdělujeme je na:

- a) Oceli uhlíkové – Používají se na výrobu ručních nástrojů např. nástroje na zpracování potravin, papíru, pilníky.
- b) Oceli slitinové – Používají se na většinu řezných, střížných a tvářecích nástrojů. Tyto oceli se vyznačují snadným tepelným zpracováním (např. vrtáky, závitníky, střížníky, střížnice).
- c) Oceli rychlořezné – Jedná se o vysokolegované oceli. Používají se na vysoce výkonné řezné a tvářecí stroje. [11]

Ocel 19 436.4 je ocel slitinová, kalená. Jedná se o nejčastěji používanou ocel na výrobu tvarových dutin forem pro vstřikování plastů.

### 7.1.2 Ocel X210Cr12 (ČSN 19 436)

Ocel 19 436.4 je ocel slitinová, nezakalená.

### 7.1.3 Ocel 100Cr6 (ČSN 14 109.4) - kalená

Oceli třídy 14 jsou ušlechtilé oceli legované chromem, případně ještě manganem a křemíkem. Používají se na ozubená kola a značně namáhané části strojních zařízení. Jsou rozděleny na oceli na valivá ložiska, k cementování a k zušlechťování. [11]

### 7.1.4 Ocel E335 (ČSN 11 600)

Oceli třídy 11 jsou nelegované konstrukční oceli s předepsaným obsahem uhlíku, fosforu a síry, zaručenou pevností, tažností a mezí kluzu. Jejich pevnost se pohybuje od 280 až do 900 MPa a závisí na obsahu uhlíku. Patří mezi nejpoužívanější oceli pro strojní součásti. Oceli s nízkým obsahem uhlíku se používají na ohýbané a tažené součásti (např. karoserie). Oceli s vyšším obsahem uhlíku se používají např. na hřídele, čepy, méně namáhaná ozubená kola. Zvláštní skupinu tvoří tzv. automatové oceli, které jsou snadno obrobitelné. [11]

Ocel 11 600 je ocel s nejmenší pevností v tahu 600 MPa.

### 7.1.5 Dural AW 5083

Název dural je zkrácenina duraluminium, latinsky „tvrdý hliník“. Jedná se o tvářené slitiny Al – Cu – Mg, jsou tvárné, mají tažnost až 20%, pevnost až 200 MPa, po vytvrzení až 420 MPa. Použití např. na kované písty spalovacích motorů, části letadel a lodí, dopravní zařízení a nádrže. [11]

### 7.1.6 PMMA

PMMA - Polymethylmetakrylát je tvrdý, sklovitě čirý, částečně propouští UV, velmi odolný proti povětrnostním vlivům, tvarovatelný při 130-140°C, dobře se mechanicky obrábí.

$\rho = 1,18 \text{ g/cm}^3$ ,  $\sigma = 67-70 \text{ MPa}$ ,  $E = 1400 \text{ MPa}$ ,  $T_g = 100^\circ\text{C}$ . [12]

### 7.1.7 PVC

PVC - Polyvinylchlorid tvrdý typ: vynikající odolnost vůči vodě i organickým chemikáliím, nízká permeabilita vodní páry, kyslíku, vysoká tvrdost, odolnost proti oděru a mechanická pevnost, dobré elektroizolační vlastnosti, vysoký lesk, samozhášivost.

$\rho = 1,36 \text{ g/cm}^3$ ,  $\sigma = 35 \text{ MPa}$ ,  $E = 2500 \text{ MPa}$ ,  $T_g = 82^\circ\text{C}$ . [12]

### 7.1.8 PE

Polyethylén má dobré tokové vlastnosti, výborné dielektrické vlastnosti houževnatý do  $-70^\circ\text{C}$ ,  $T_m = 105 - 136^\circ\text{C}$ , krystalinita 50 – 95%,

$\rho = 0,915 - 0,970 \text{ g/cm}^3$ ,  $\sigma = 9-33 \text{ MPa}$ ,  $E = 200 - 1400 \text{ MPa}$ . [12]

### 7.1.9 Pryž TP 44

Tab. 7. Složení a vlastnosti pryže TP 44 [13]

Kaučuková směs	Druh kaučuku	Dsk	Podmínky lisování [°C/min]	Tvrdost SHORE
TP 44	SBR+IIR+BR	70+15+15	160/16	52,38

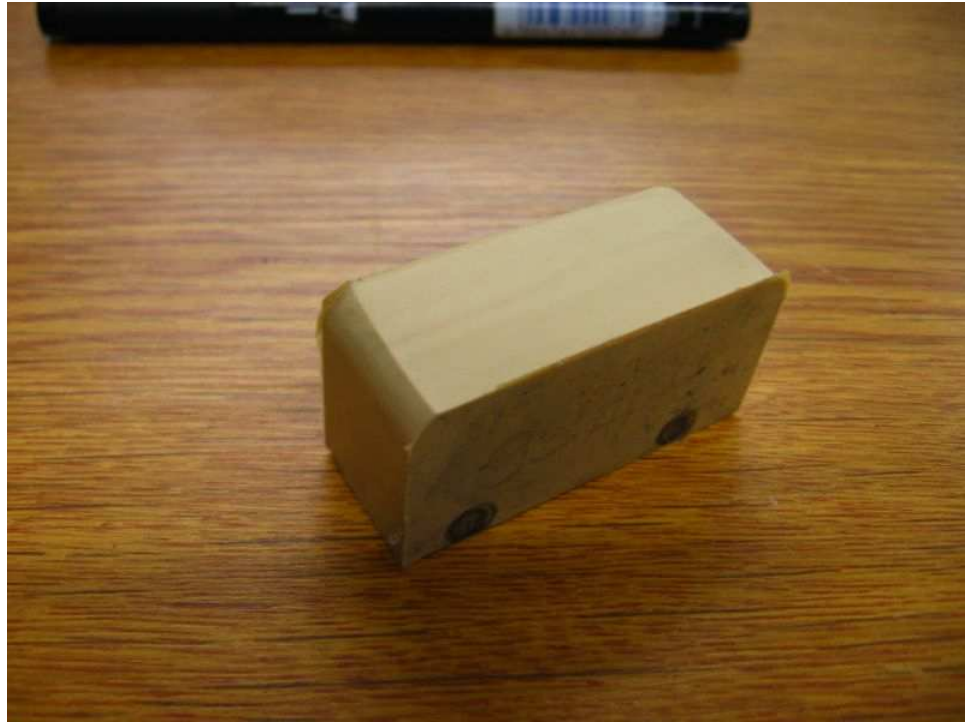


Obr. 28. Pryž TP 44

#### 7.1.10 Pryž 9341/75

Tab. 8. Složení a vlastnosti pryže 9341/75 [13]

Kaučuková směs	Druh kaučuku	Dsk	Podmínky lisování [°C/min]	Tvrdość SHORE
9341/75	NBR+CIS+BR	75+15+10	160/10	59,04

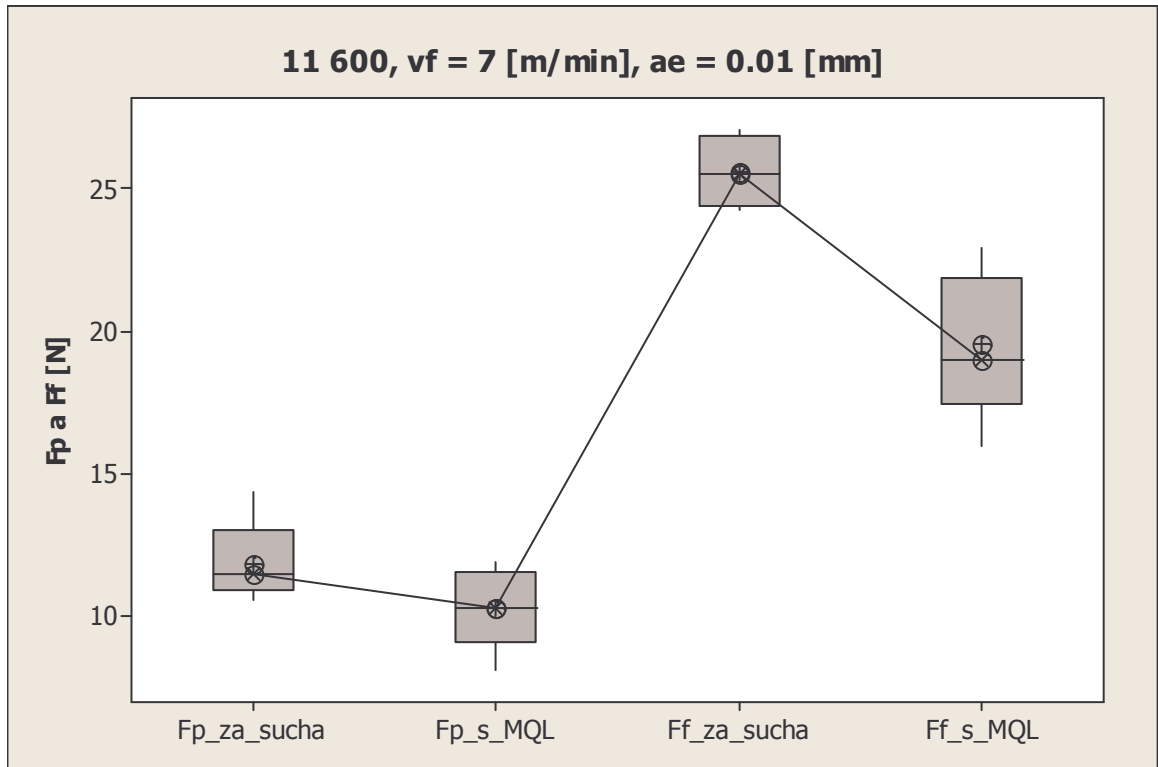


*Obr. 29. Pryž 9341/75*

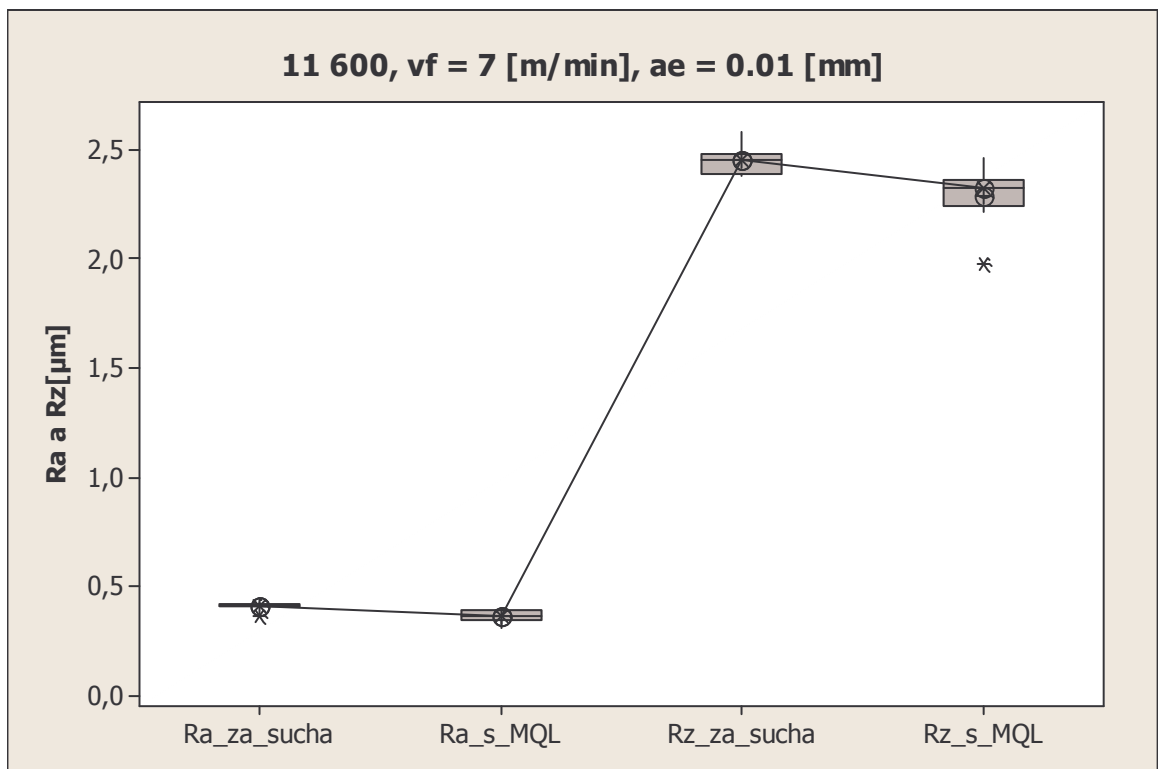
## 7.2 Výsledky experimentu

Na následujících grafech je porovnáno, u všech deseti materiálů, broušení na sucho s broušením s MQL. Nejprve srovnání obou složek řezných sil a poté srovnání parametrů drsnosti povrchu. Byly stanoveny jednotné řezné podmínky pro celý experiment a to posuvová rychlost  $v_f = 7 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a hloubka řezu  $a_e = 0,01 \text{ mm}$ .

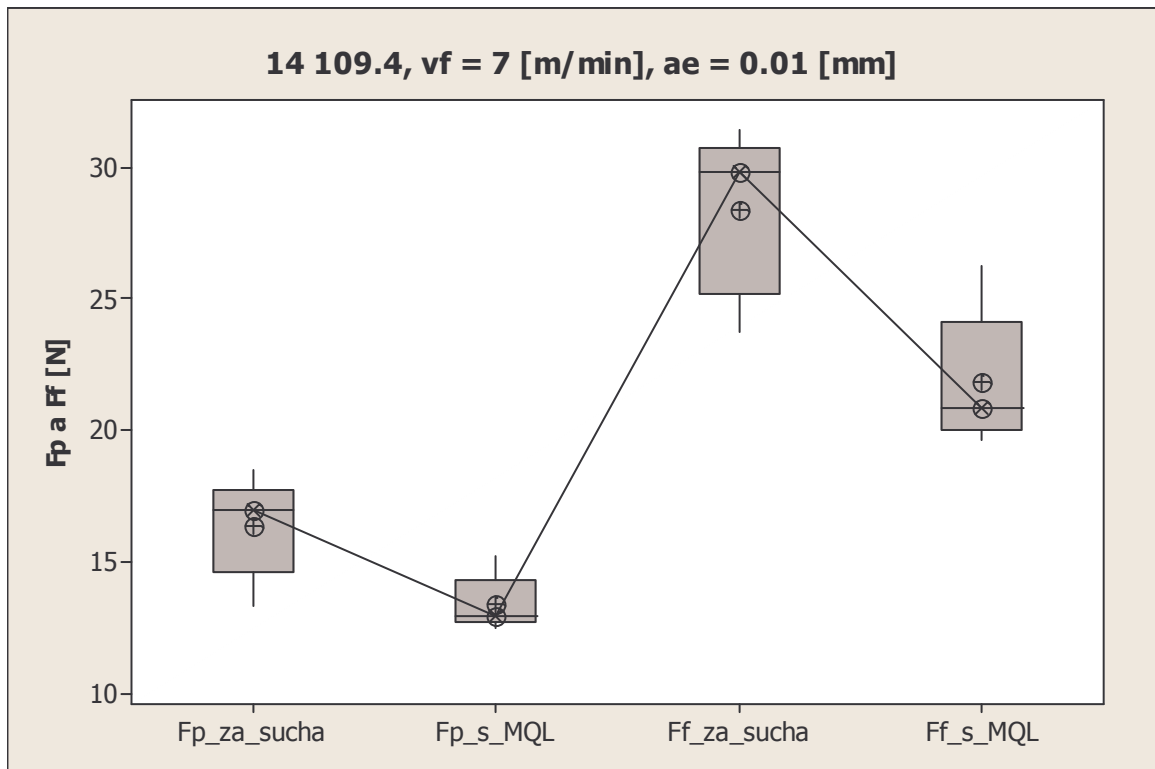
Na následujících obrázcích jsou krabicové grafy z programu Minitab. Šedé kvádry představují kvartily, křížky v kolečku představují mediány, ty spojuje spojnicová čára, symboly plus v kolečku představují průměrné hodnoty a hvězdičky jsou odlehlé hodnoty.



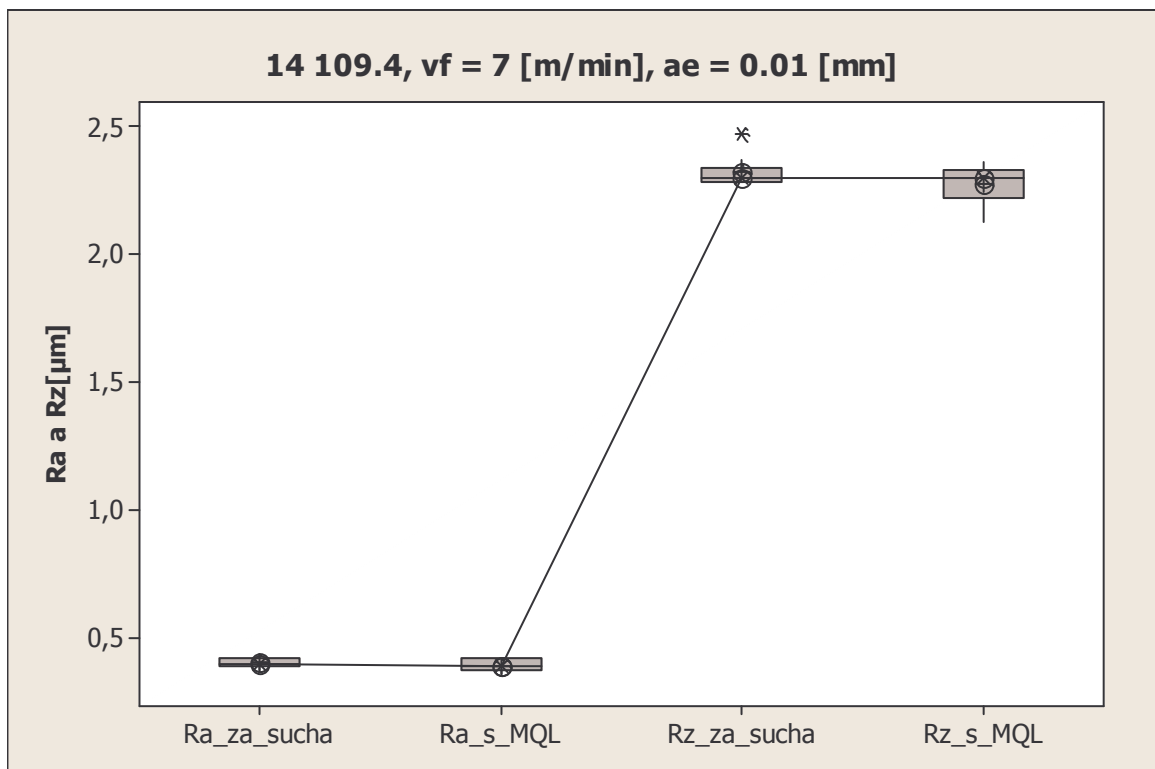
Obr. 30. Ocel 11 600 – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL



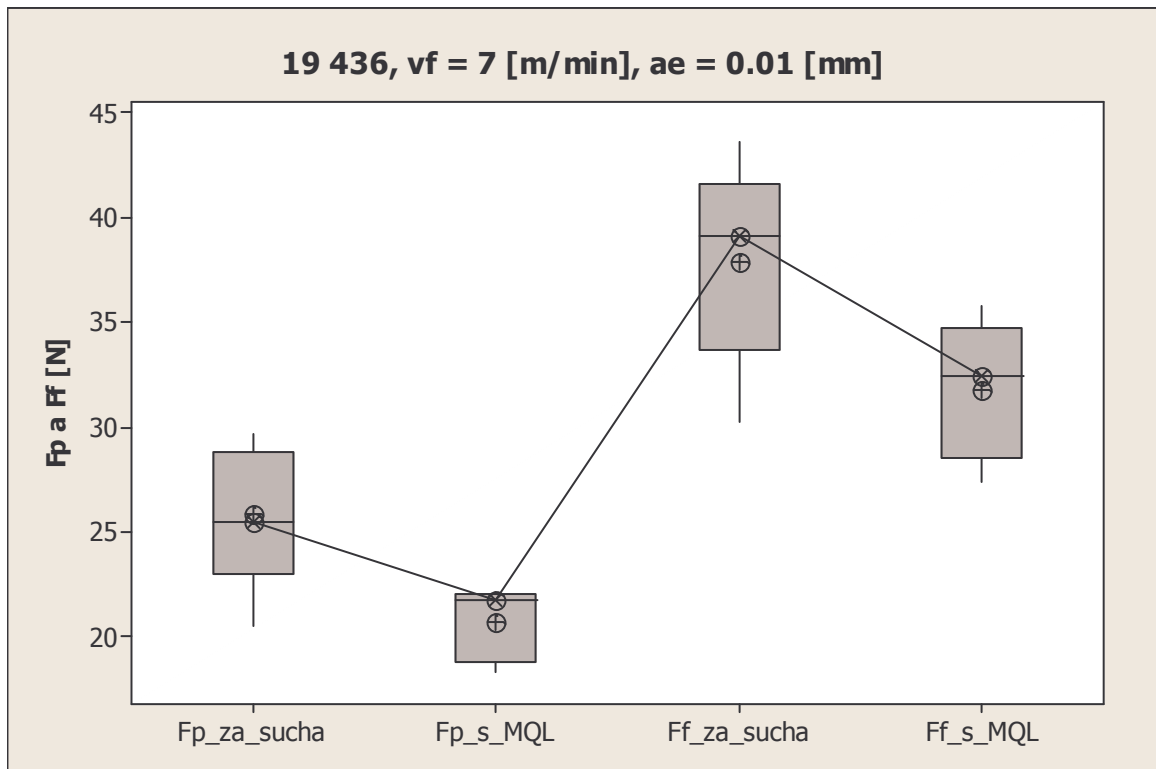
Obr. 31. Ocel 11 600 – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL



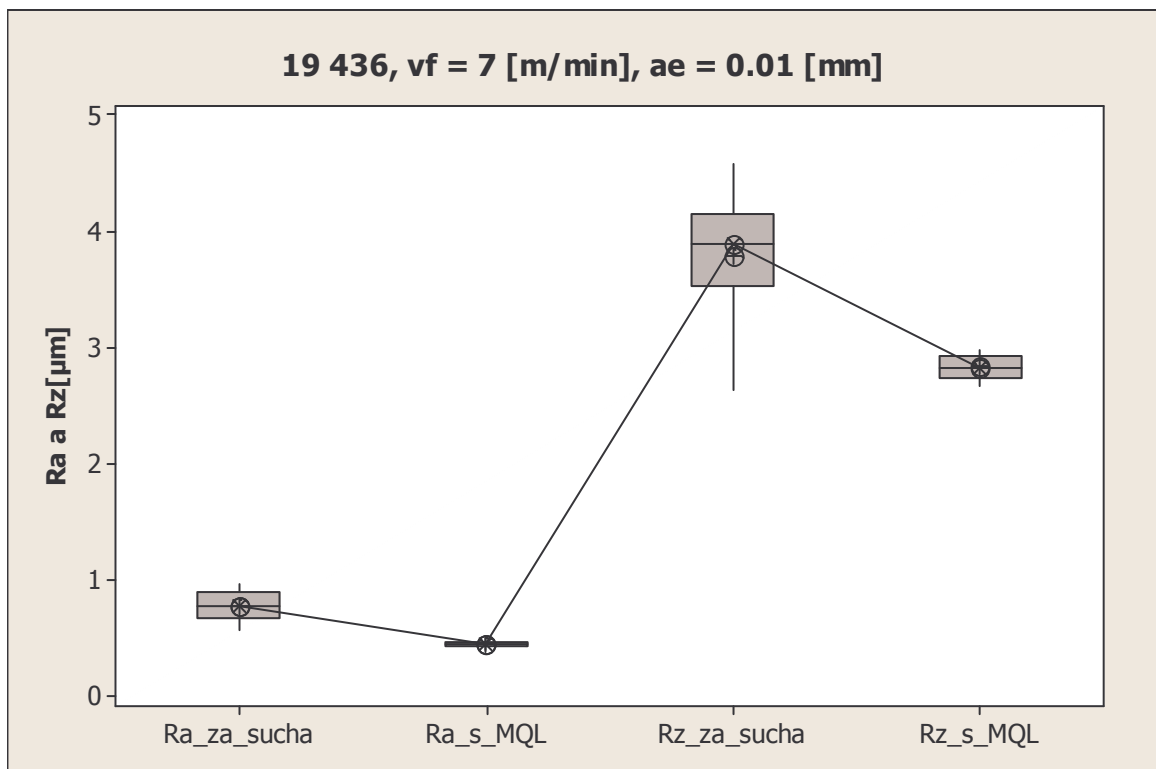
Obr. 32. Ocel 14 109.4 – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL



Obr. 33. Ocel 14 109.4 – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL

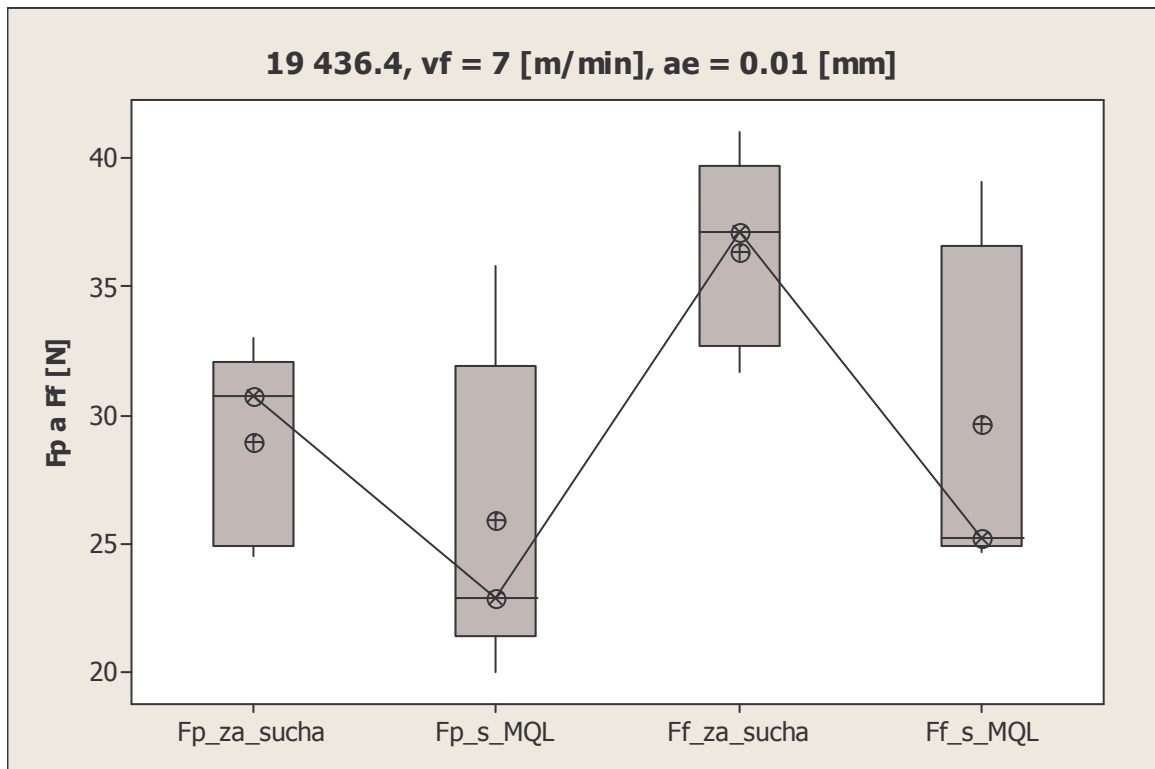


Obr. 34. Ocel 19 436 – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL

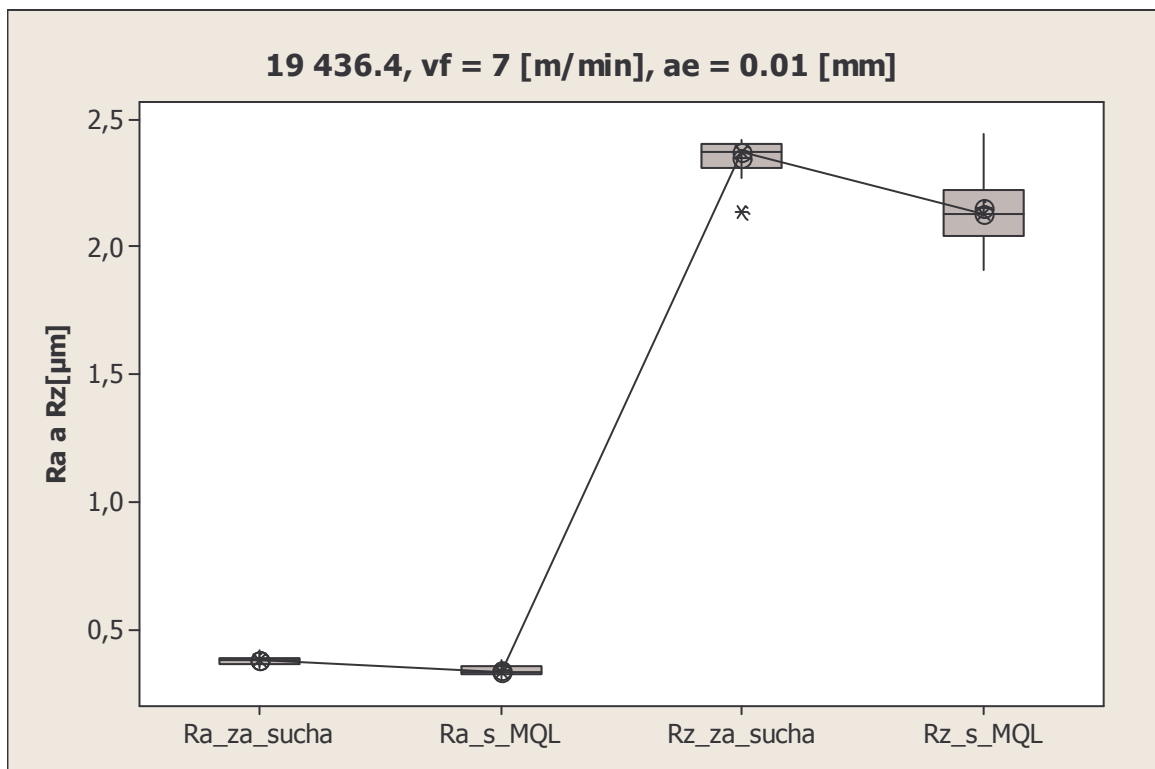


Obr. 35. Ocel 19 436 – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL

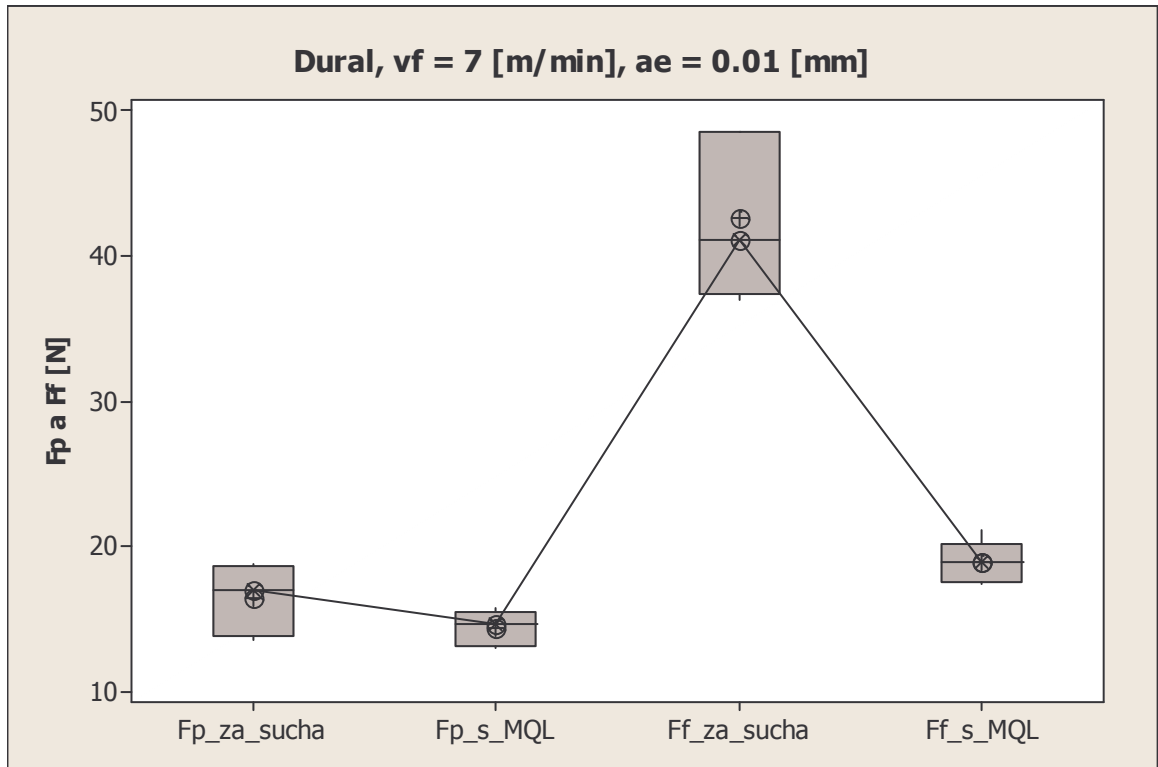




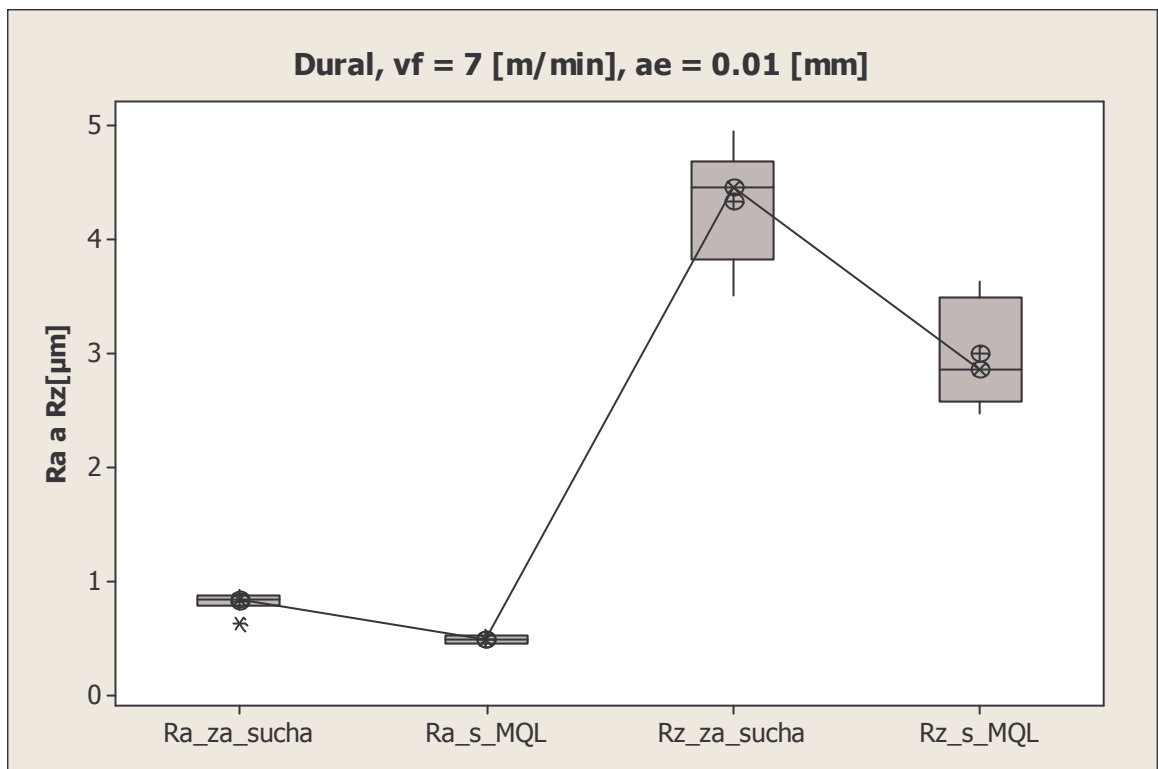
Obr. 36. Ocel 19 436.4 – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL



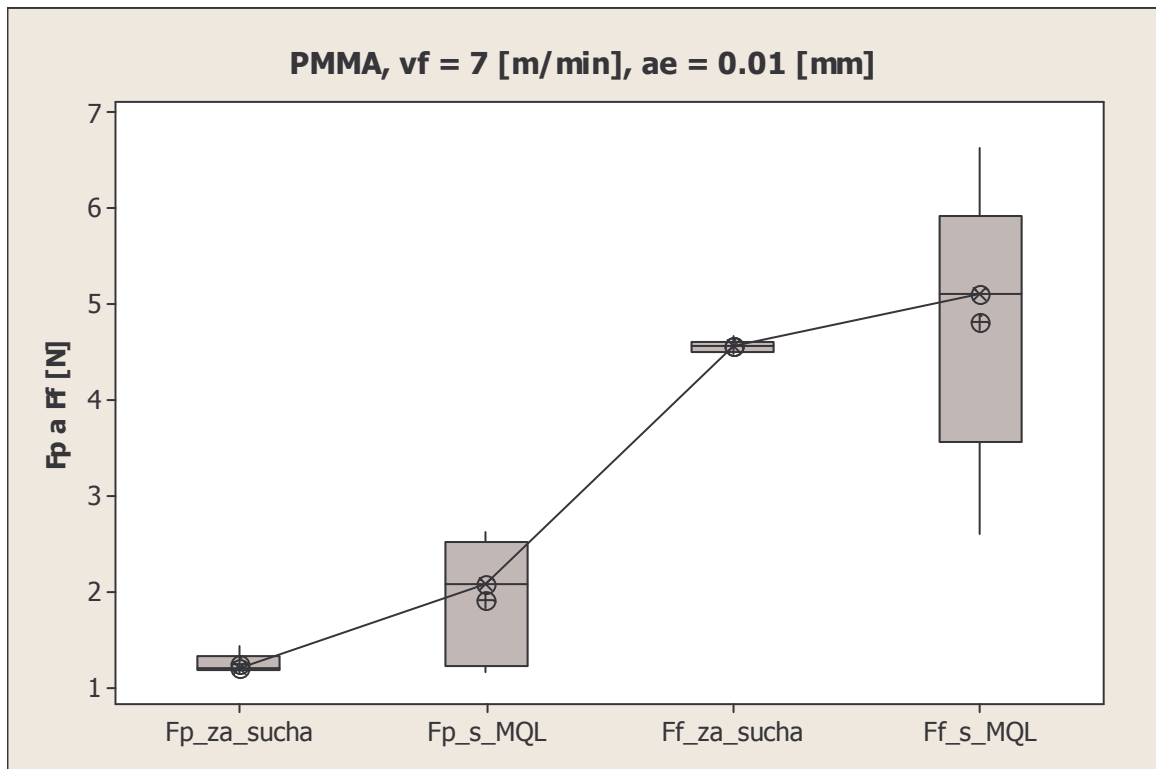
Obr. 37. Ocel 19 436.4 – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL



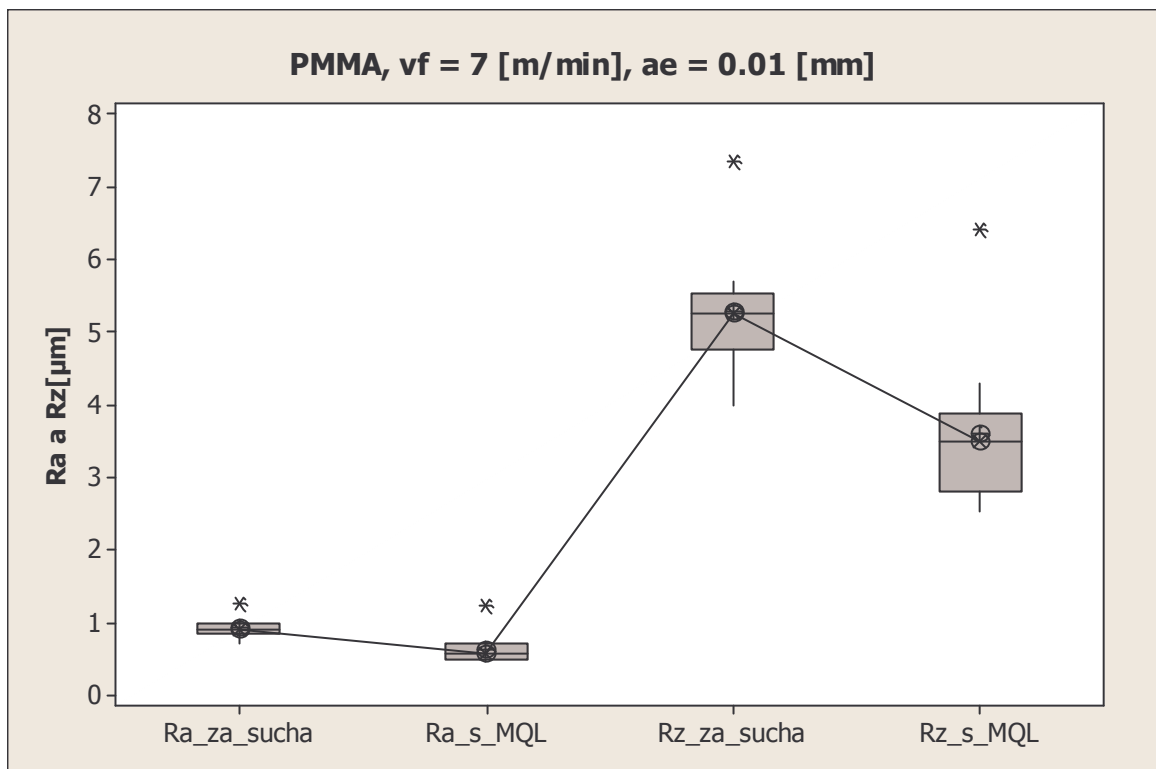
Obr. 38. Dural - porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL



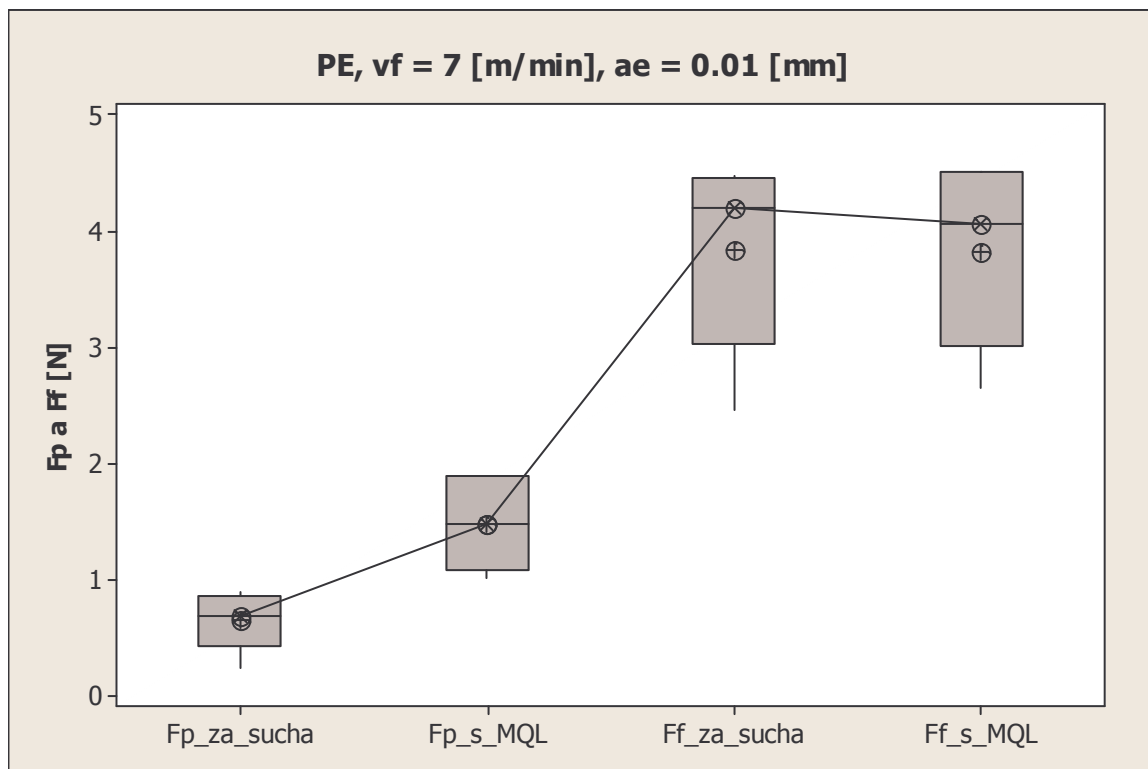
Obr. 39. Dural – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL



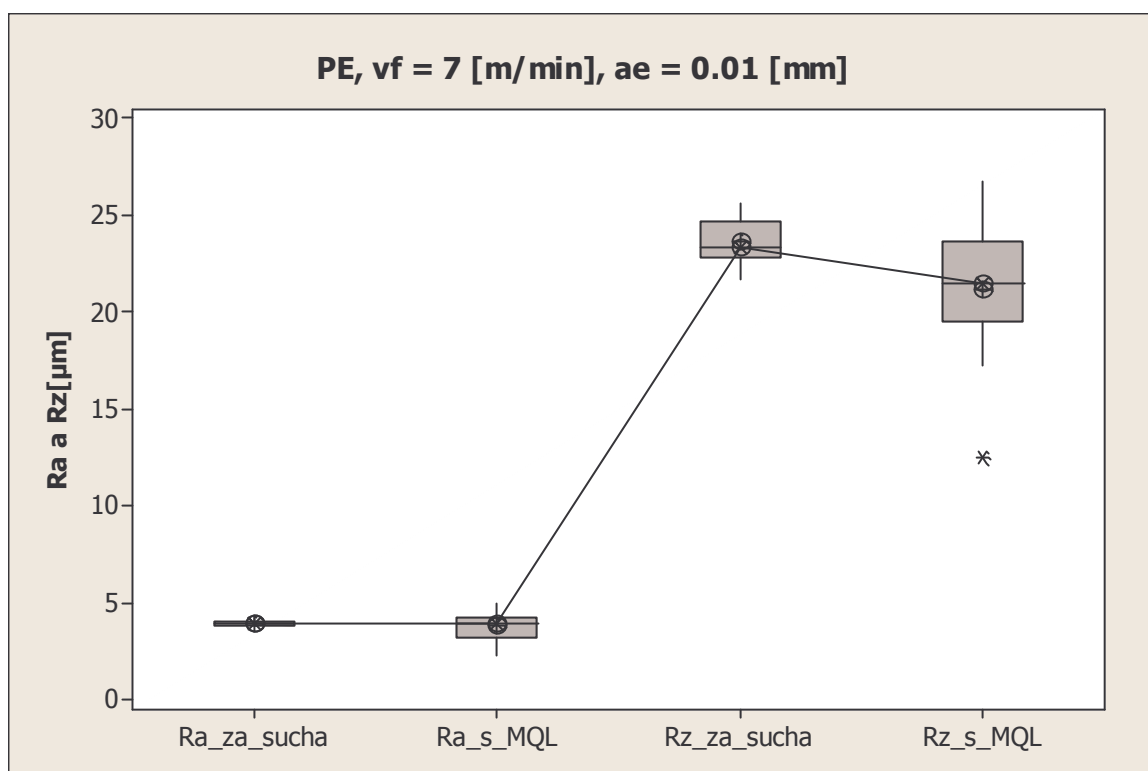
Obr. 40. PMMA – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL



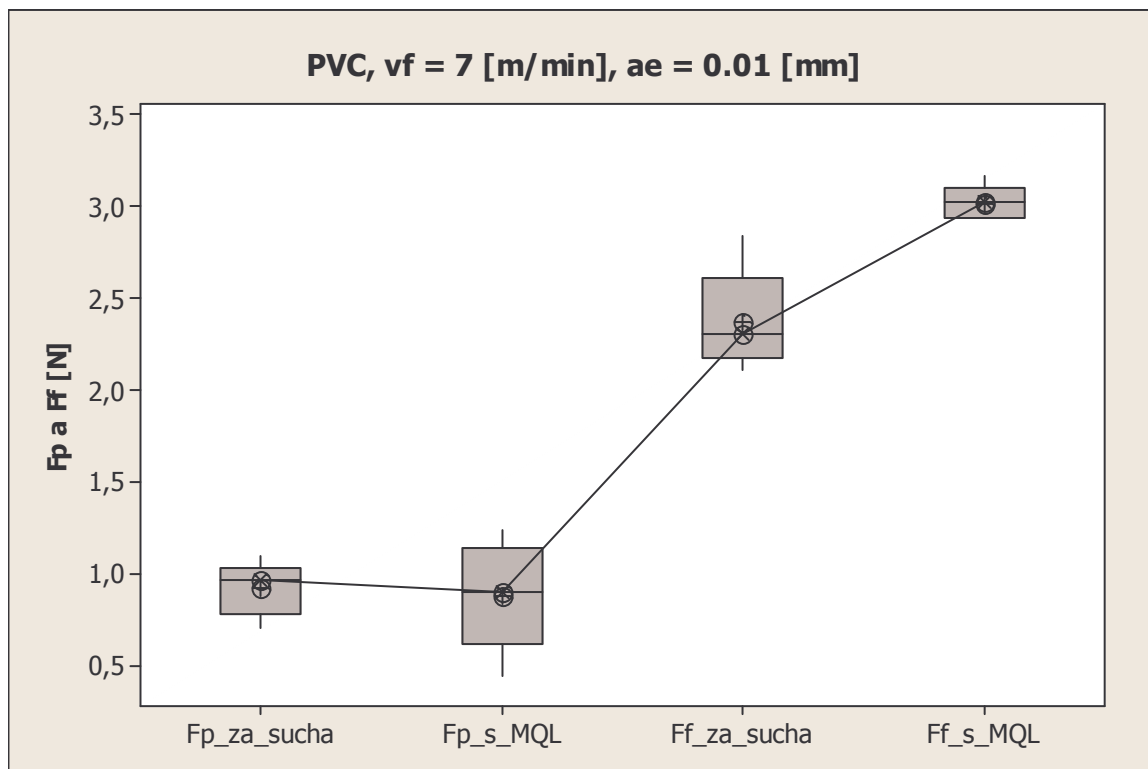
Obr. 41. PMMA – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL



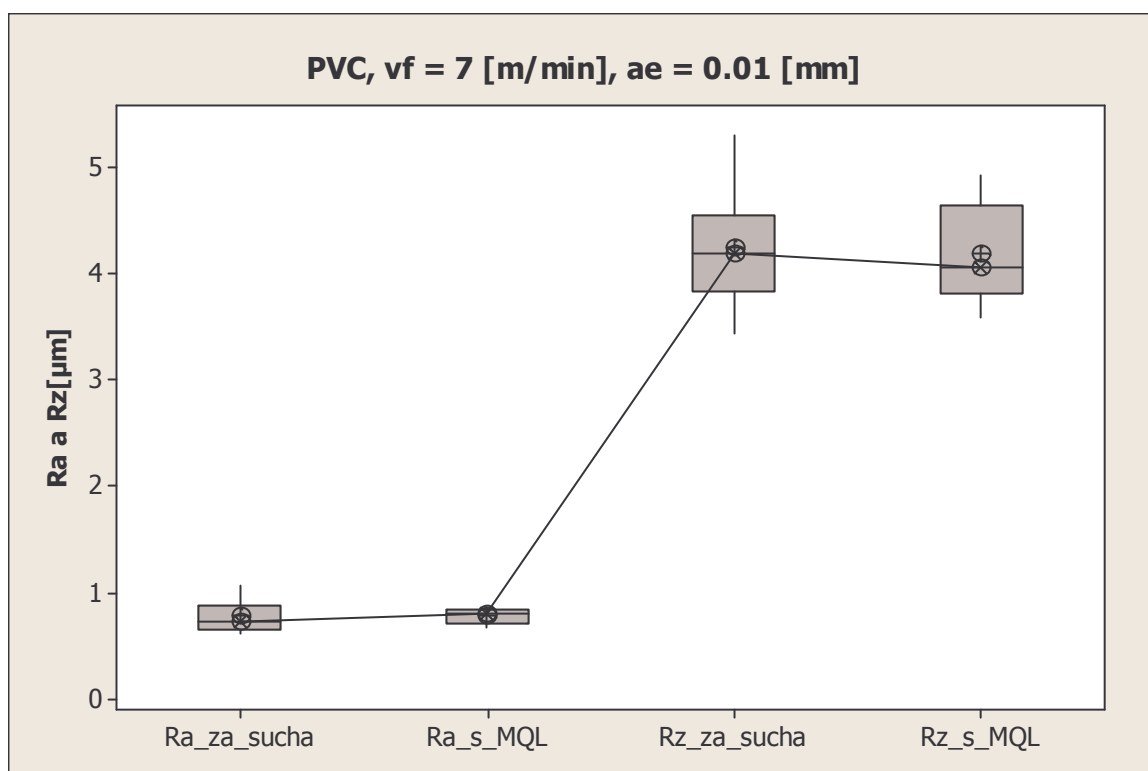
Obr. 42. PE – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL



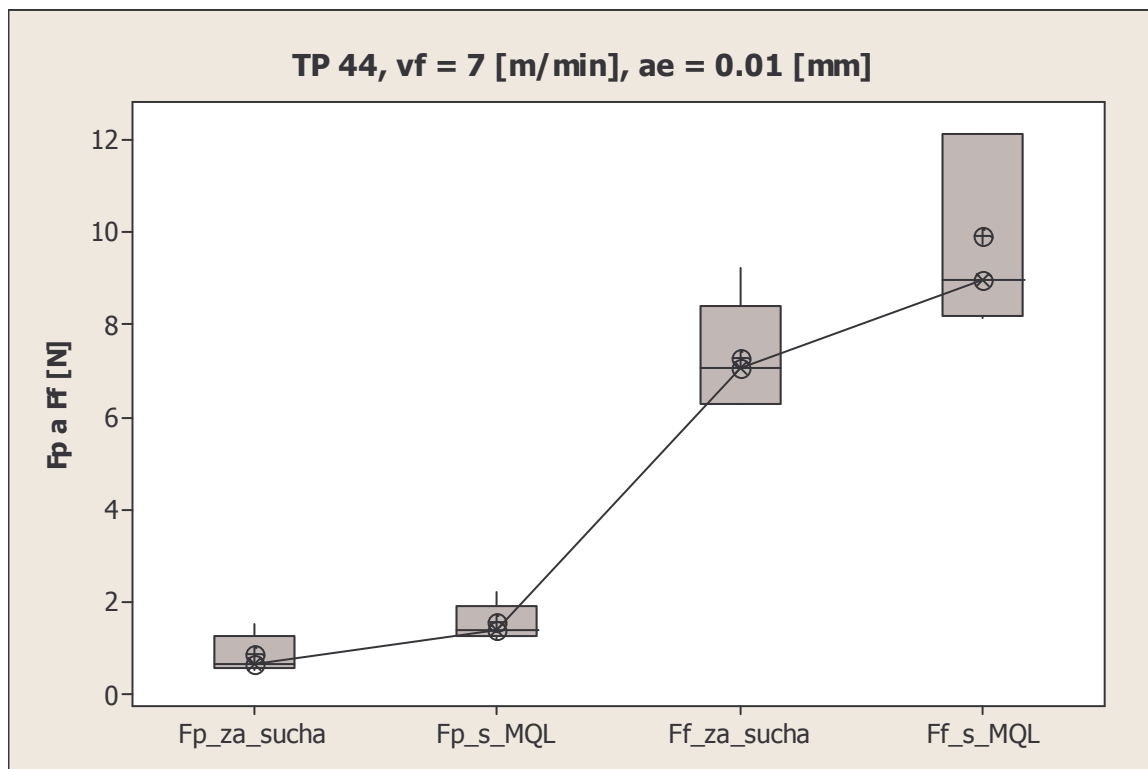
Obr. 43. PE – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL



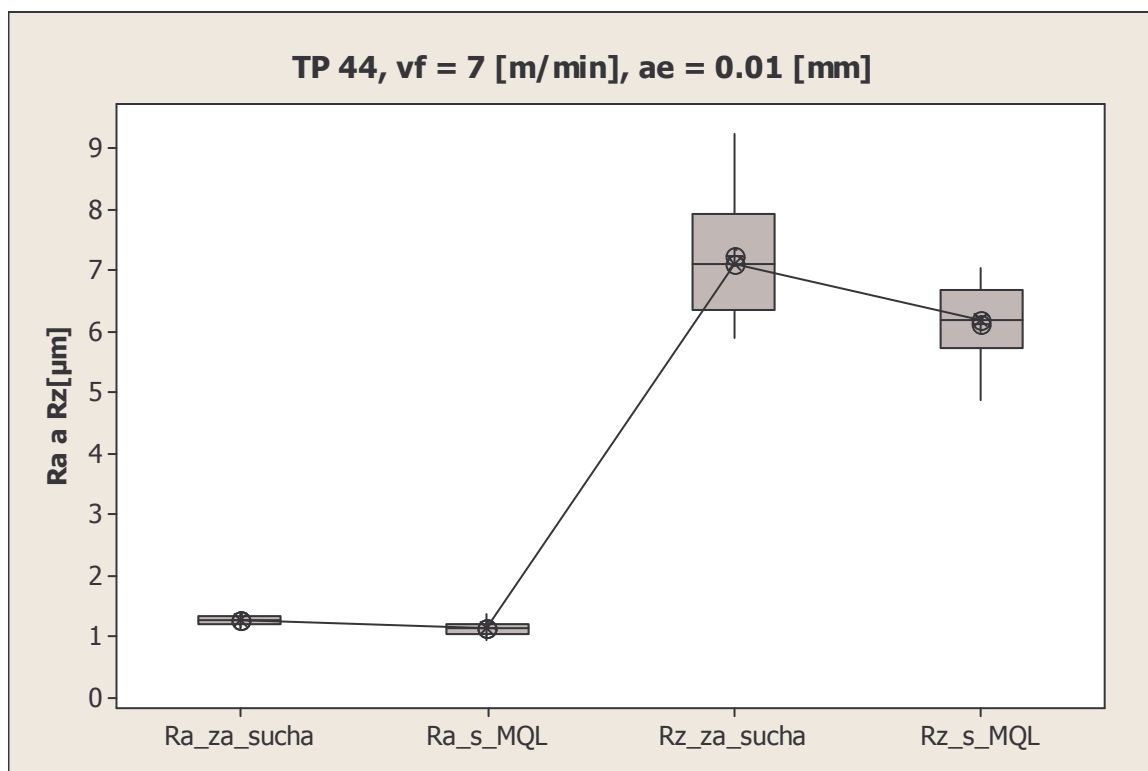
Obr. 44. PVC – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL



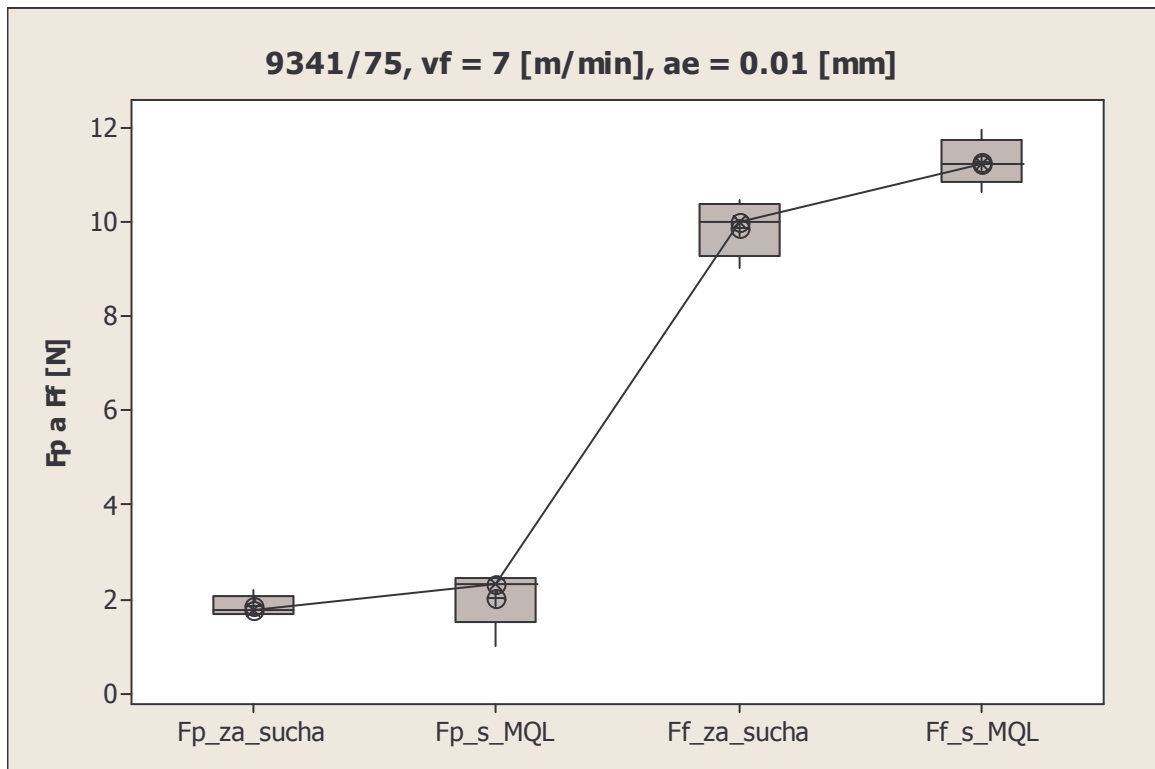
Obr. 45. PVC – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL



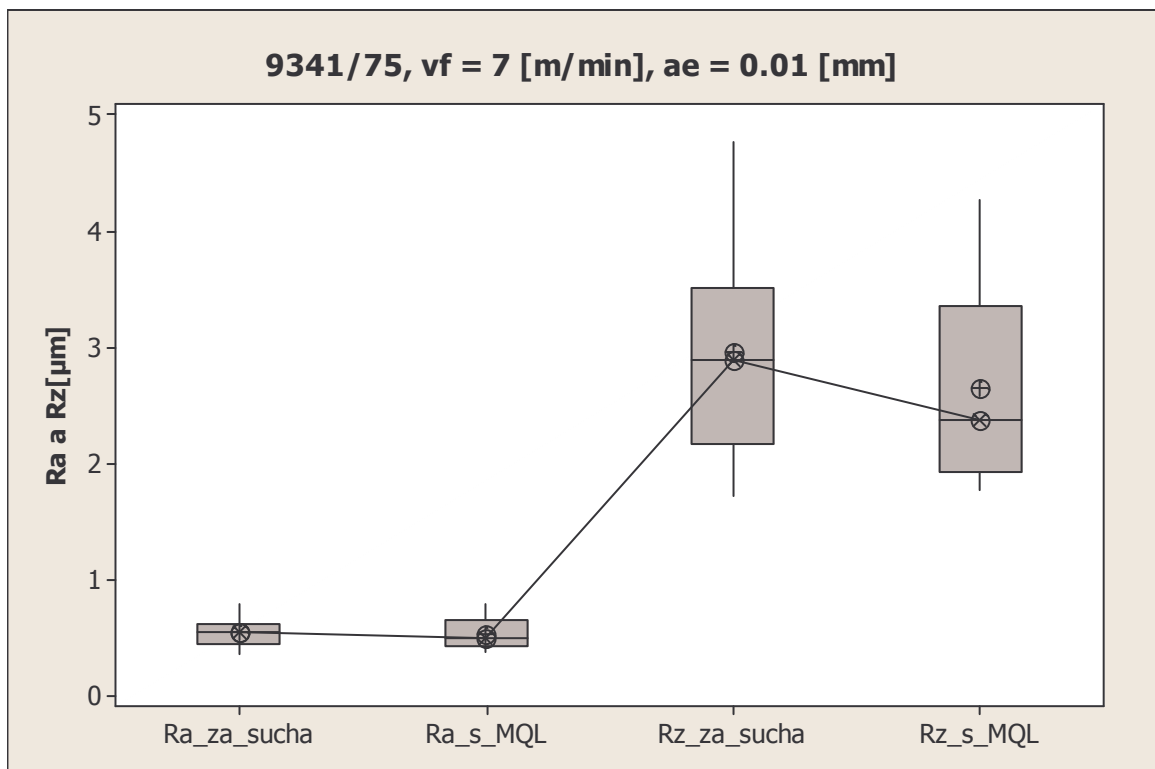
Obr. 46. Pryž TP 44 – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL



Obr. 47. Pryž TP 44 – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL

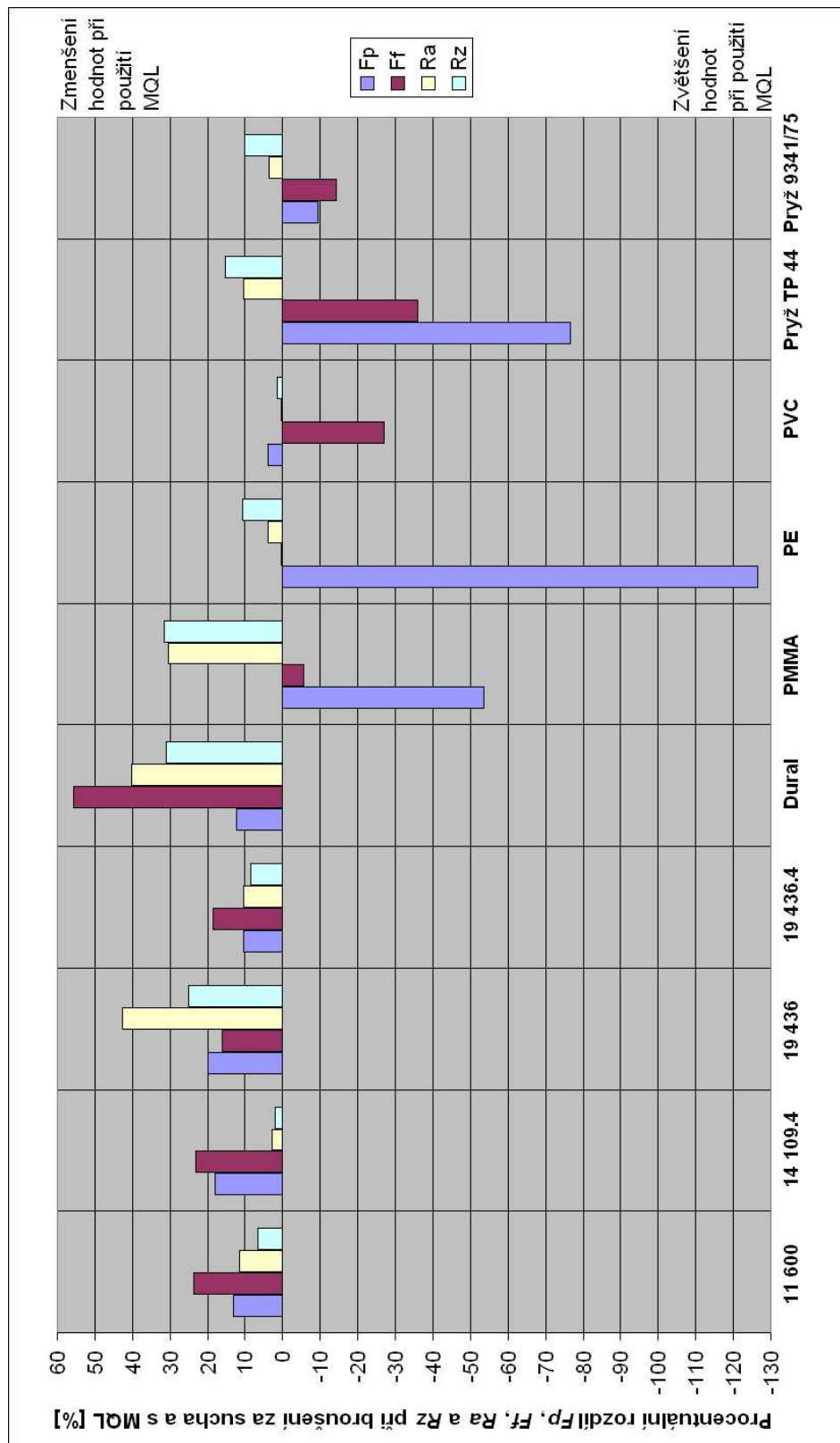


Obr. 48. Pryž 9341/75 – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL



Obr. 49. Pryž 9341/75 – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL

### 7.3 Porovnání sledovaných parametrů v závislosti na systému chlazení



Obr. 50. Procentuální rozdíl složek řezných sil a parametrů drsnosti povrchu, při broušení za sucha a s použitím MQL



Z grafu procentuálního rozdílu složek řezných sil (*Obr. 50*) a parametrů drsnosti povrchu, při broušení za sucha a s použitím MQL bylo vybráno 5 materiálů, které byly broušeny v následujících experimentech. Materiály byly vybrány z důvodu velikého procentuálního zvětšení či zmenšení sledovaných hodnot při použití MQL. Do zúženého výběru byly zařazeny tyto materiály: Dural, PMMA, PE, PVC a pryž TP 44.

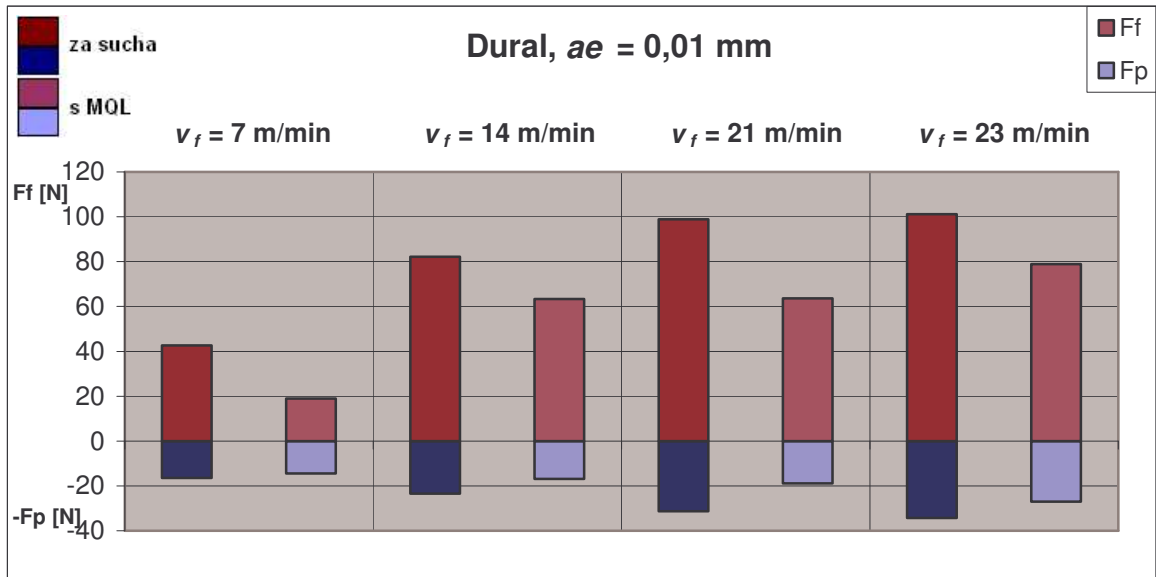
## 8 VLIV ŘEZNÝCH PARAMETRŮ A MQL NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU A SLOŽKY ŘEZNÝCH SIL PŘI ROVINNÉM BROUŠENÍ

Ve druhém experimentu byl zkoumán vliv změny řezných podmínek na parametry drsnosti povrchu a složky řezných sil při broušení za sucha a s MQL. Experiment byl prováděn pouze na pěti materiálech vybraných z předchozího experimentu: dural, PMMA, PE, PVC a pryž TP 44.

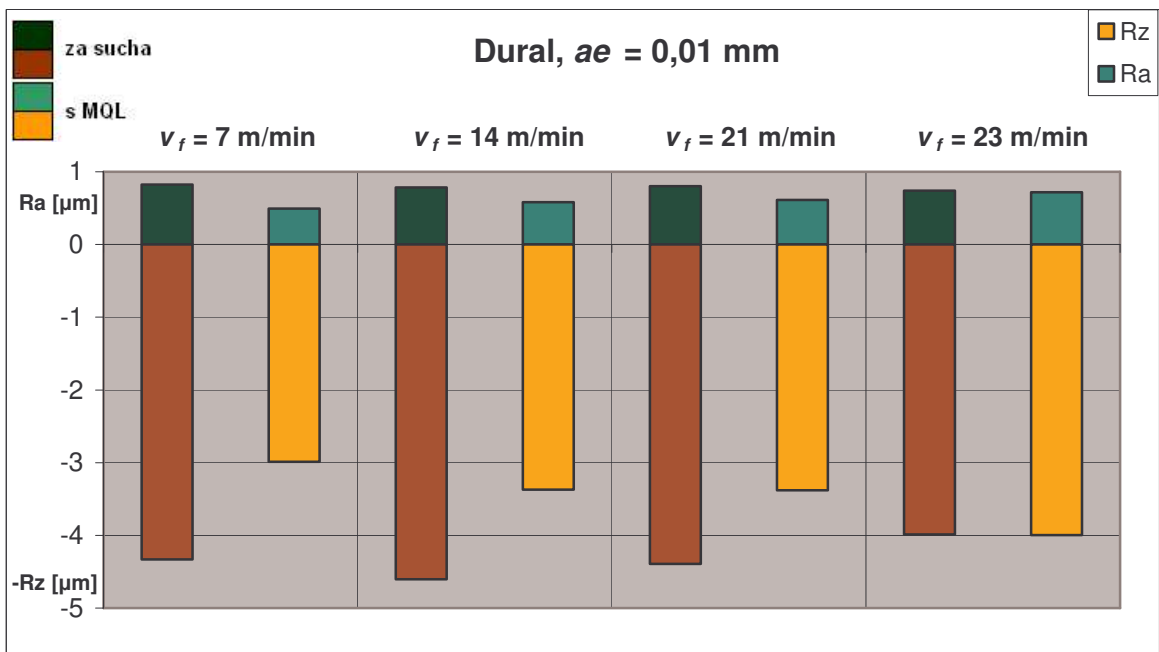
Tab. 9. Podmínky experimentu fáze 2

Broušené materiály	Řezné podmínky $v_f$ [m/min] / $a_e$ [mm]	Systém chlazení	Měřené veličiny
Dural AW 5083	7 / 0,01	za sucha	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
PMMA	7 / 0,02	s MQL	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
PVC	7 / 0,03		$F_f$ [N]
PE	7 / 0,04		$F_p$ [N]
Pryž TP 44	14 / 0,01		
	21 / 0,01		
	23 / 0,01		

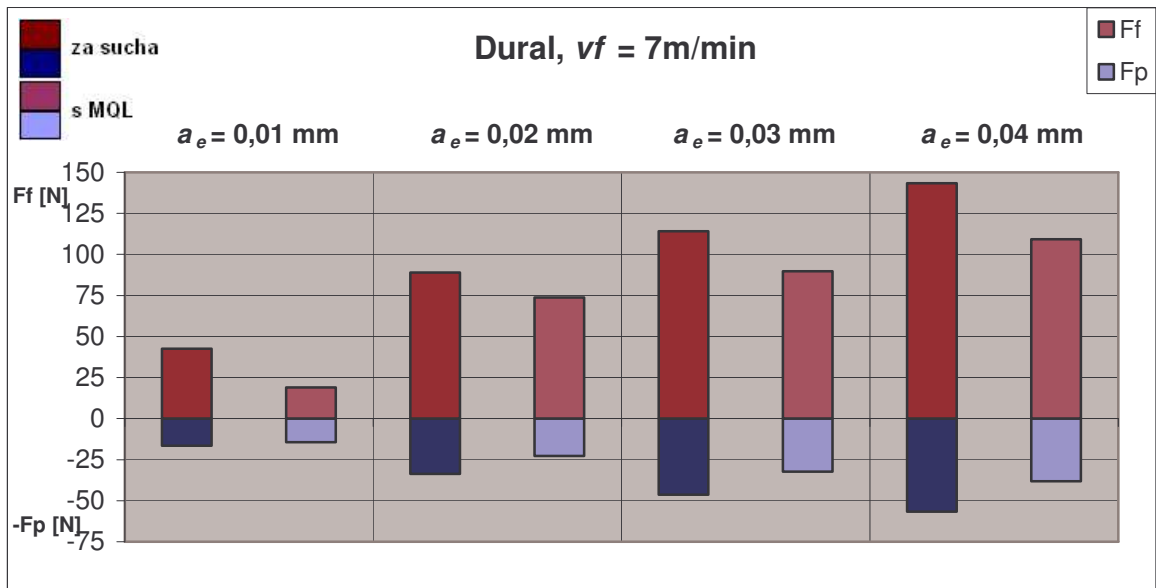
### 8.1 Výsledky experimentu pro dural



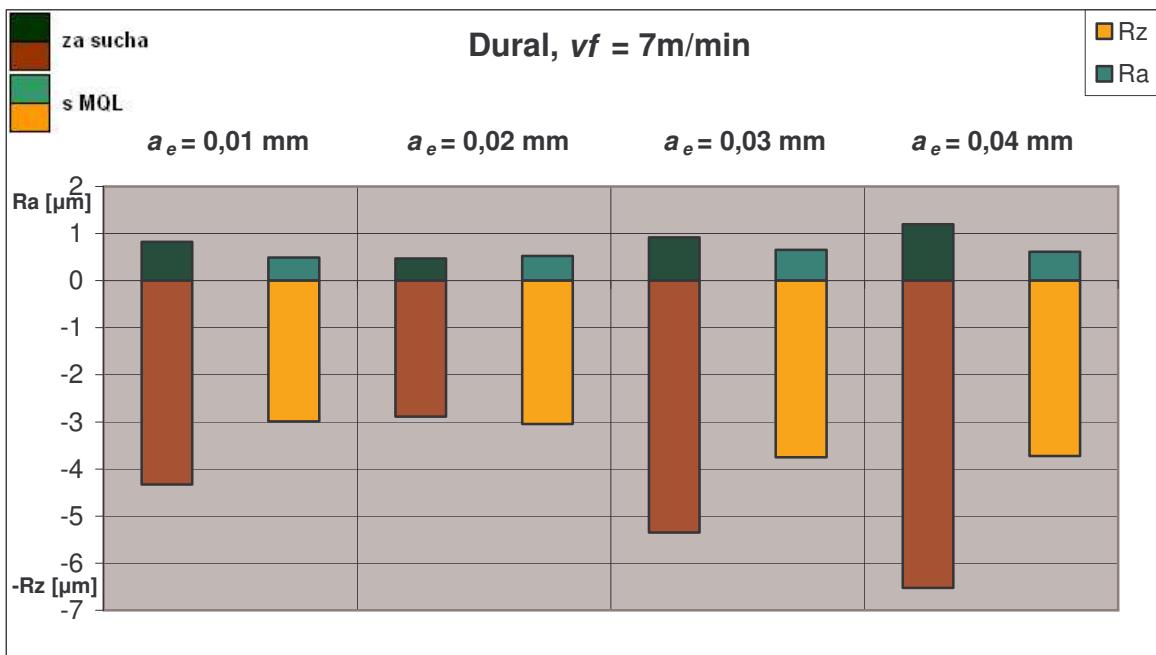
Obr. 51. Dural - Vliv posuvové rychlosti  $v_f$  a MQL na složky řezných sil



Obr. 52. Dural - Vliv posuvové rychlosti  $v_f$  a MQL na parametry drsnosti povrchu

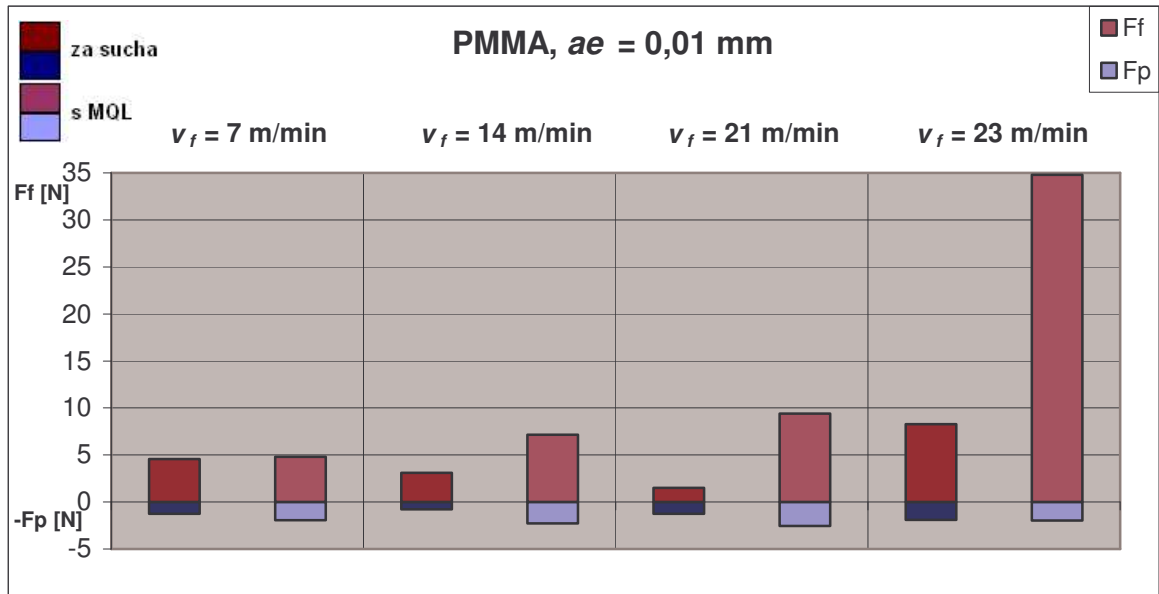


Obr. 53. Dural - Vliv hloubky řezu  $a_e$  a MQL na složky řezných sil

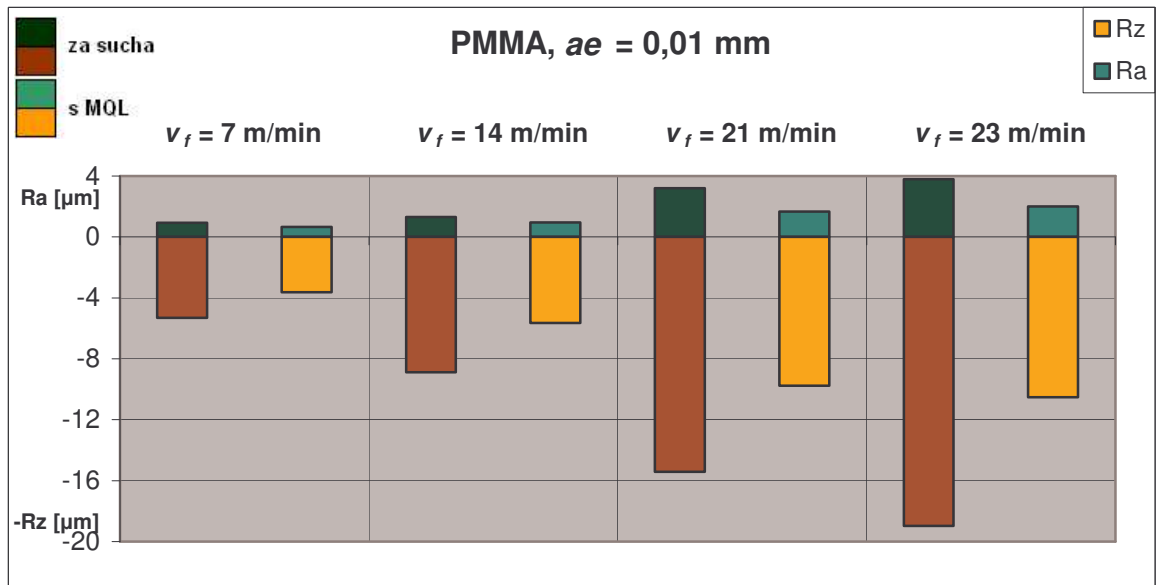


Obr. 54. Dural - Vliv hloubky řezu  $a_e$  a MQL na parametry drsnosti povrchu

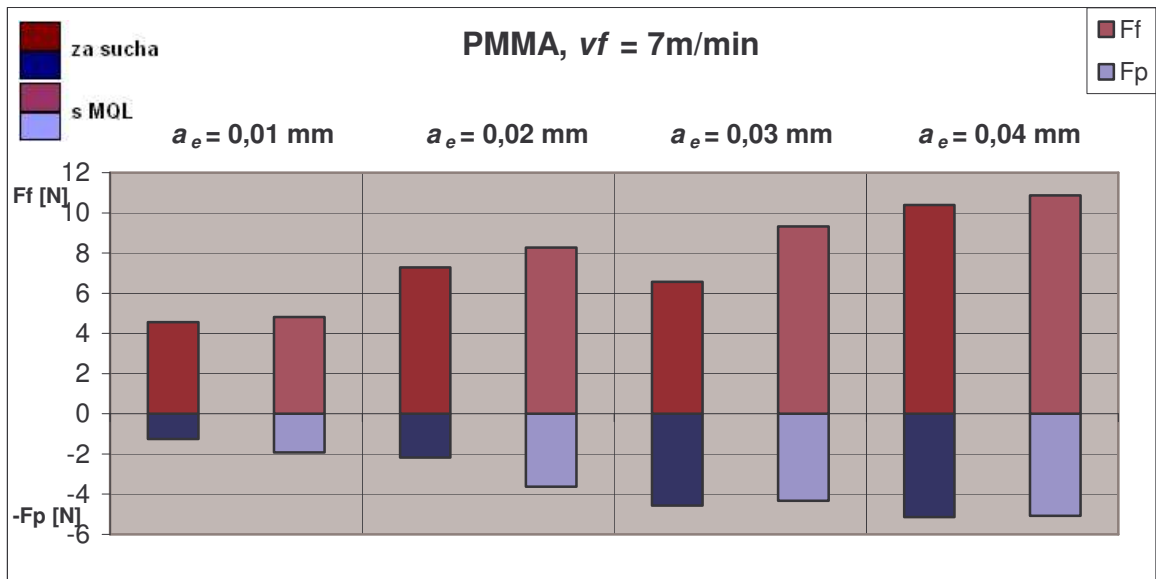
### 8.2 Výsledky experimentu pro PMMA



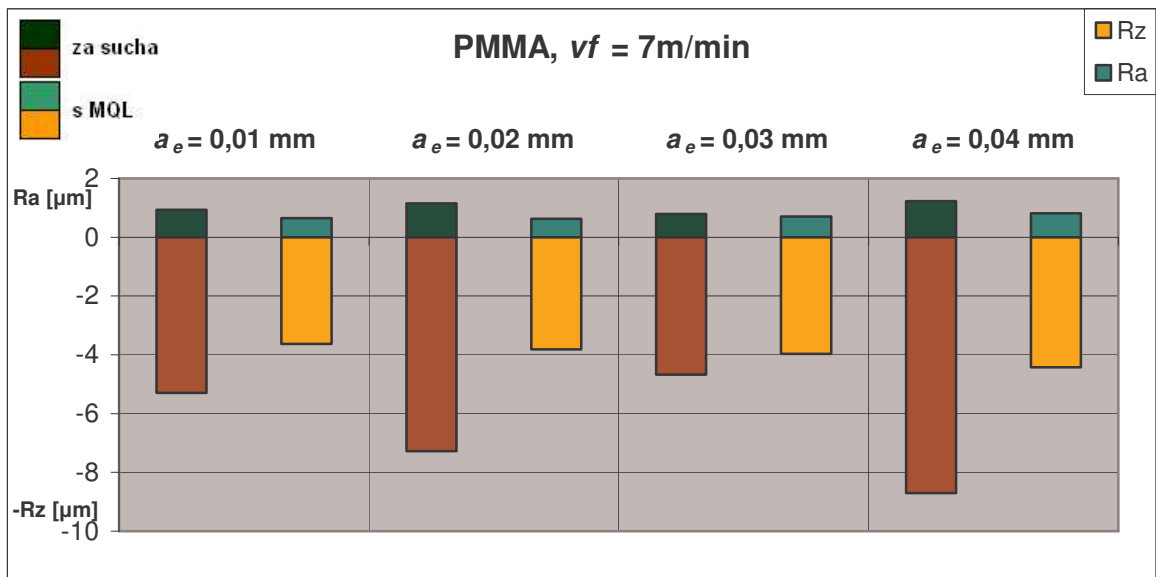
Obr. 55. PMMA - Vliv posuvové rychlosti  $v_f$  a MQL na složky řezných sil



Obr. 56. PMMA - Vliv posuvové rychlosti  $v_f$  a MQL na parametry drsnosti povrchu

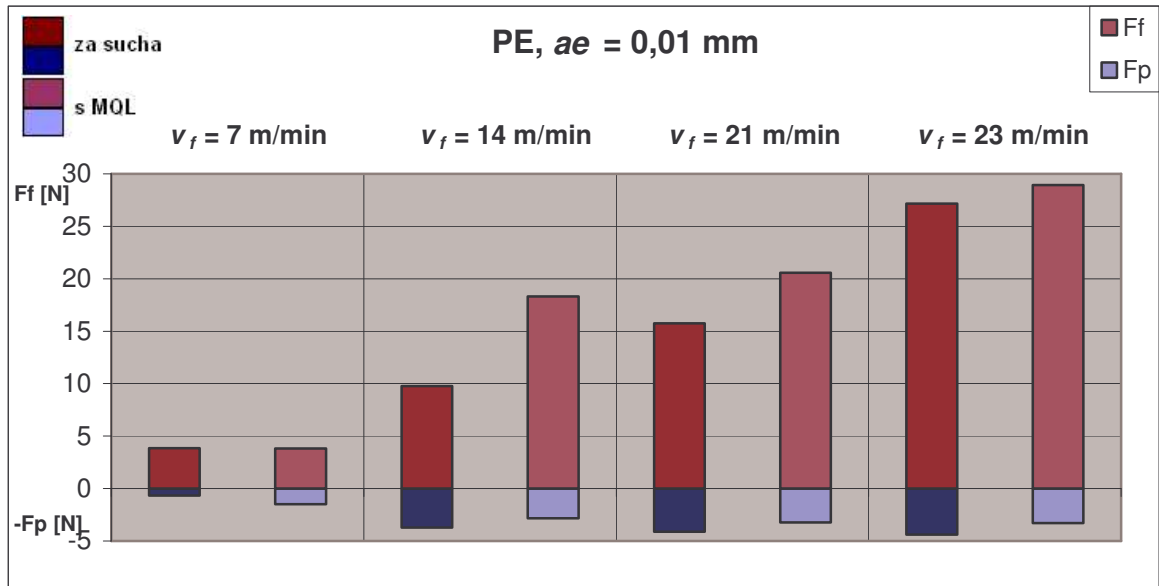


Obr. 57. PMMA - Vliv hloubky řezu  $a_e$  a MQL na složky řezných sil

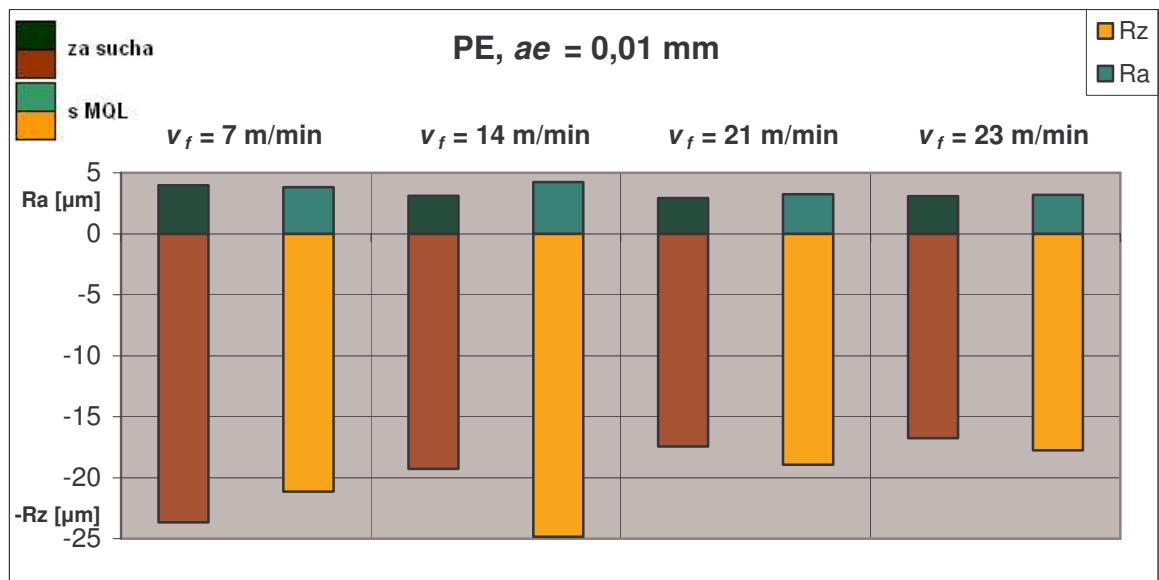


Obr. 58. PMMA - Vliv hloubky řezu  $a_e$  a MQL na parametry drsnosti povrchu

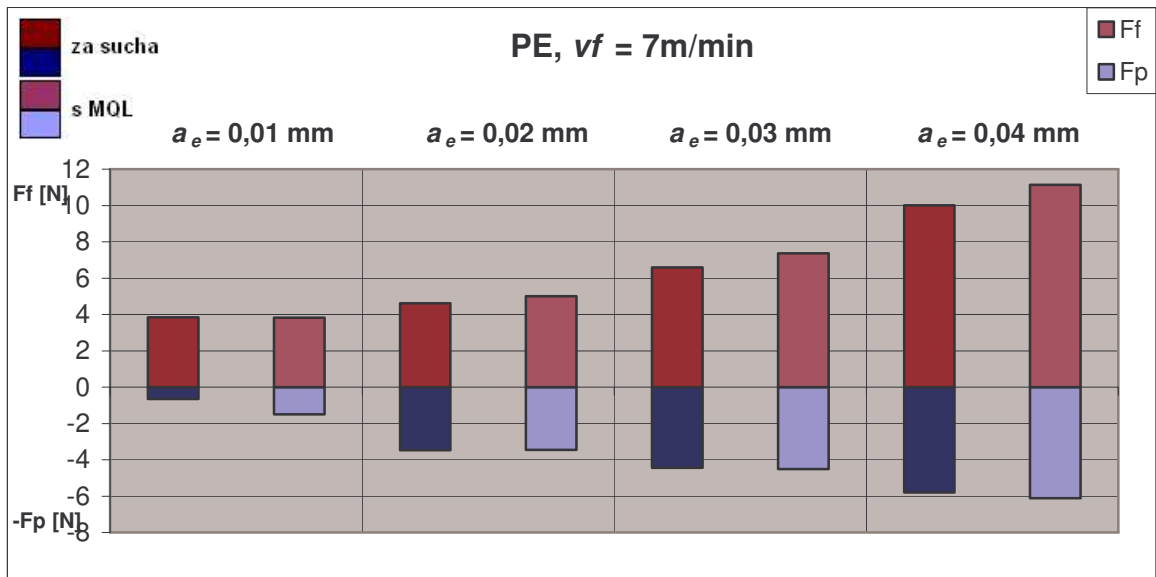
### 8.3 Výsledky experimentu pro PE



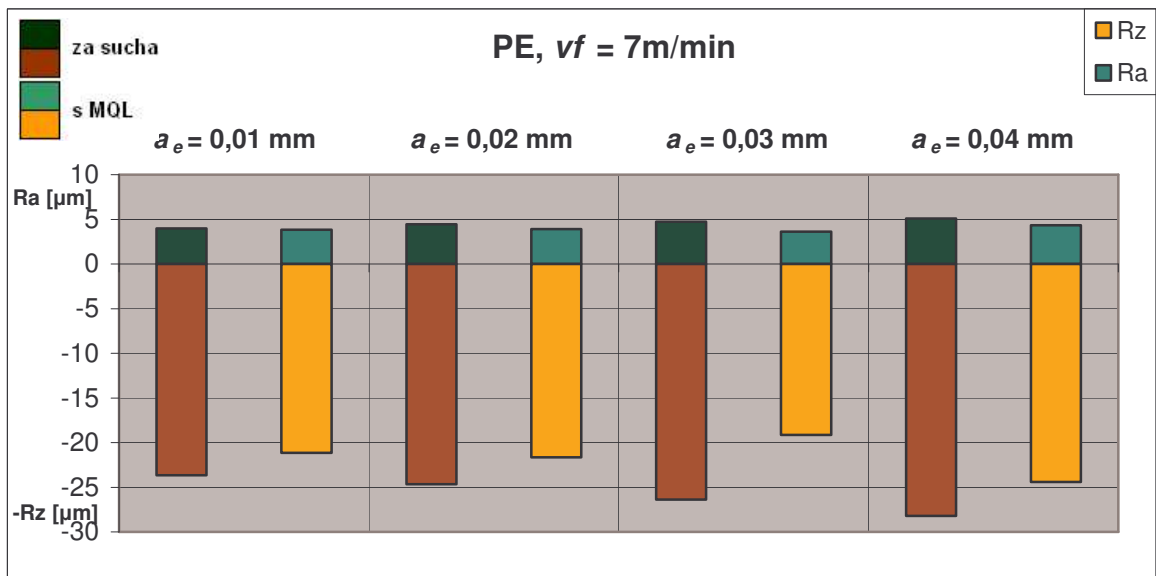
Obr. 59. PE - Vliv posuvové rychlosti  $v_f$  a MQL na složky řezných sil



Obr. 60. PE - Vliv posuvové rychlosti  $v_f$  a MQL na parametry drsnosti povrchu



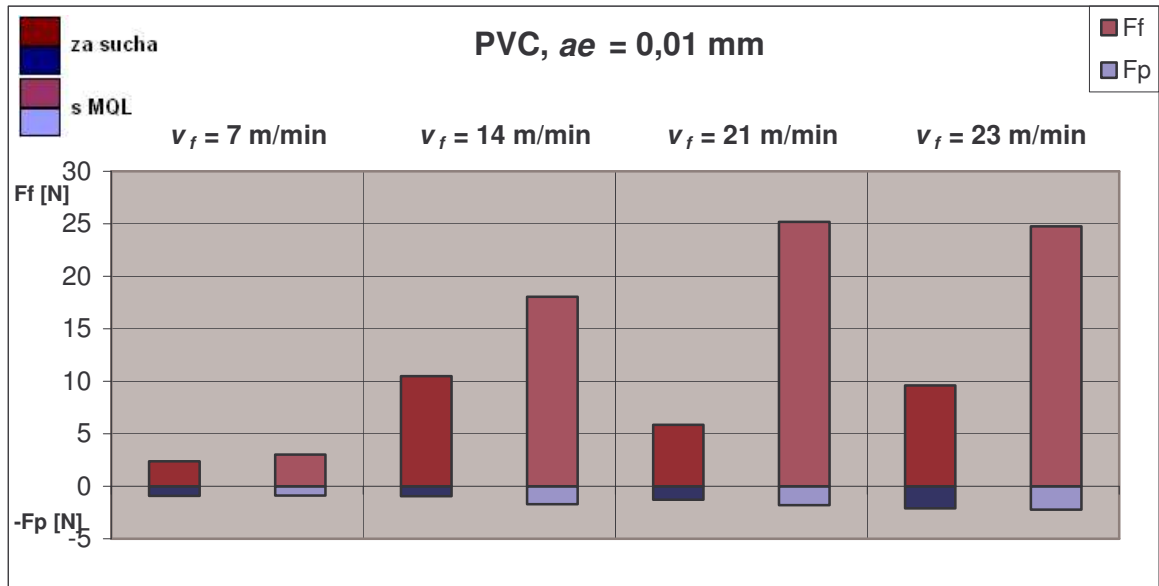
Obr. 61. PE - Vliv hloubky řezu  $a_e$  a MQL na složky řezných sil



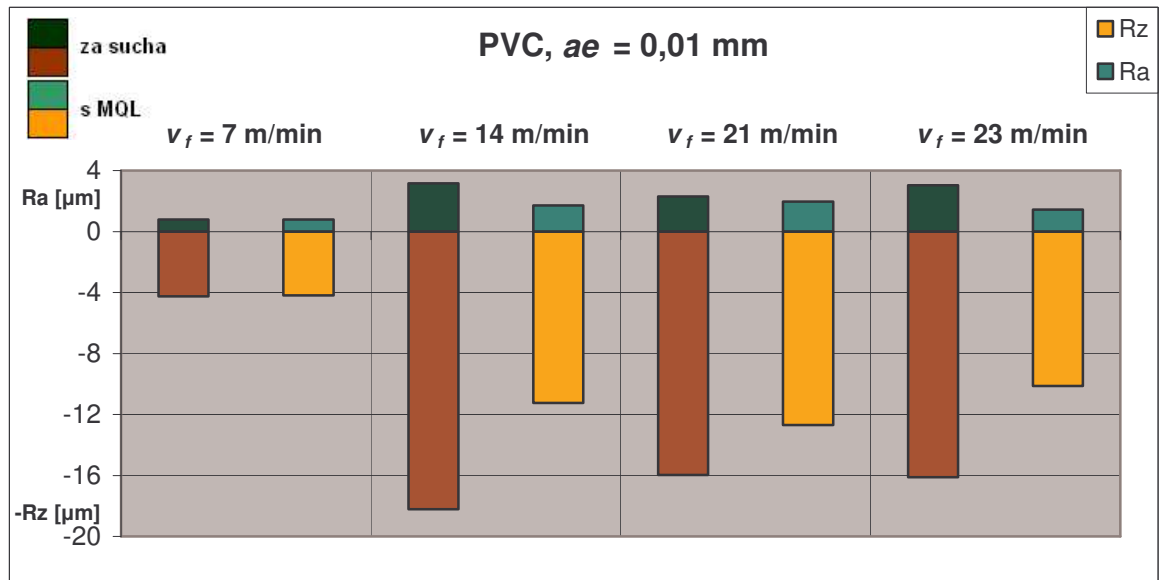
Obr. 62. PE - Vliv hloubky řezu  $a_e$  a MQL na parametry drsnosti povrchu



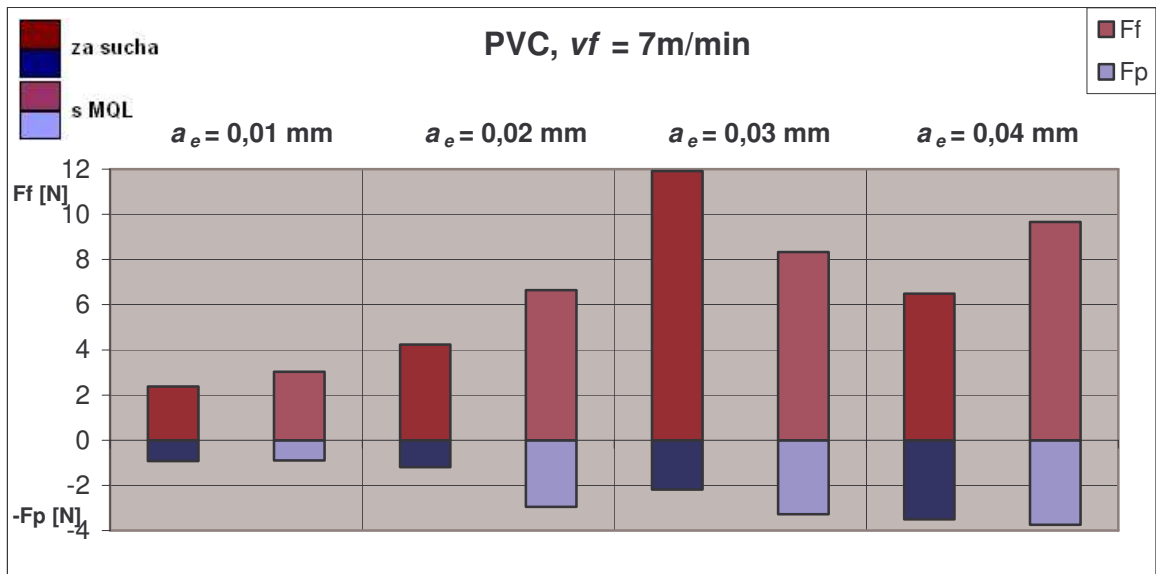
### 8.4 Výsledky experimentu pro PVC



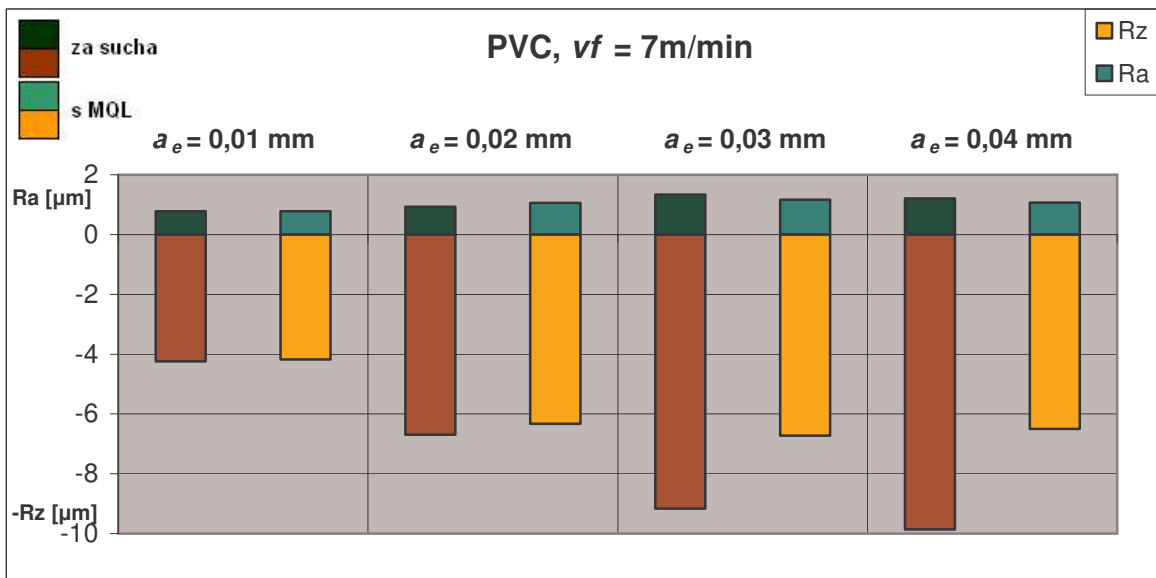
Obr. 63. PVC - Vliv posuvové rychlosti  $v_f$  a MQL na složky řezných sil



Obr. 64. PVC - Vliv posuvové rychlosti  $v_f$  a MQL na parametry drsnosti povrchu

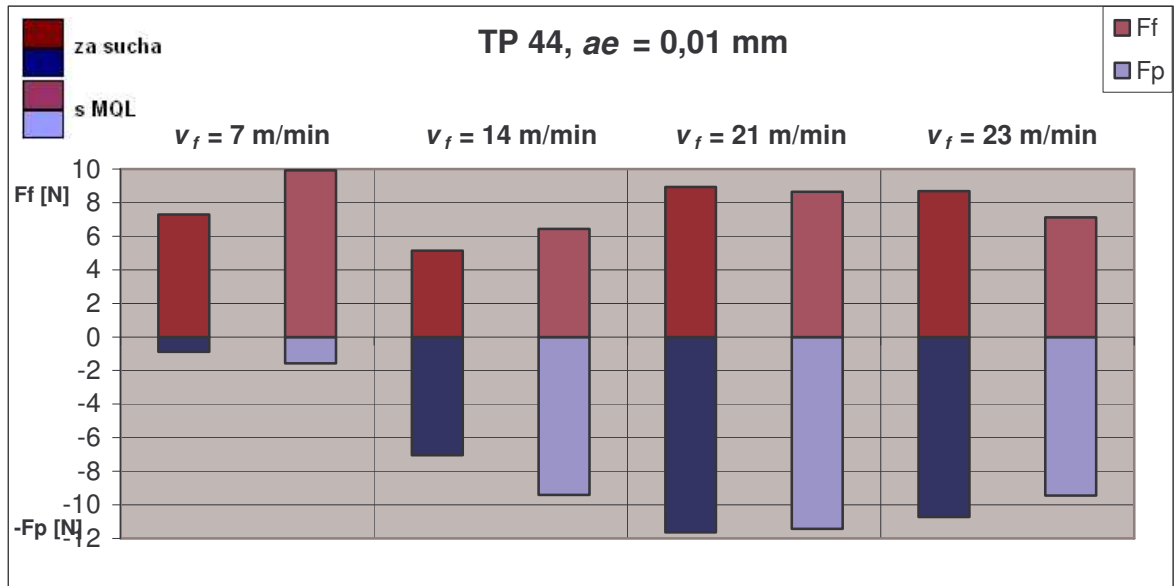


Obr. 65. PVC - Vliv hloubky řezu  $a_e$  a MQL na složky řezných sil

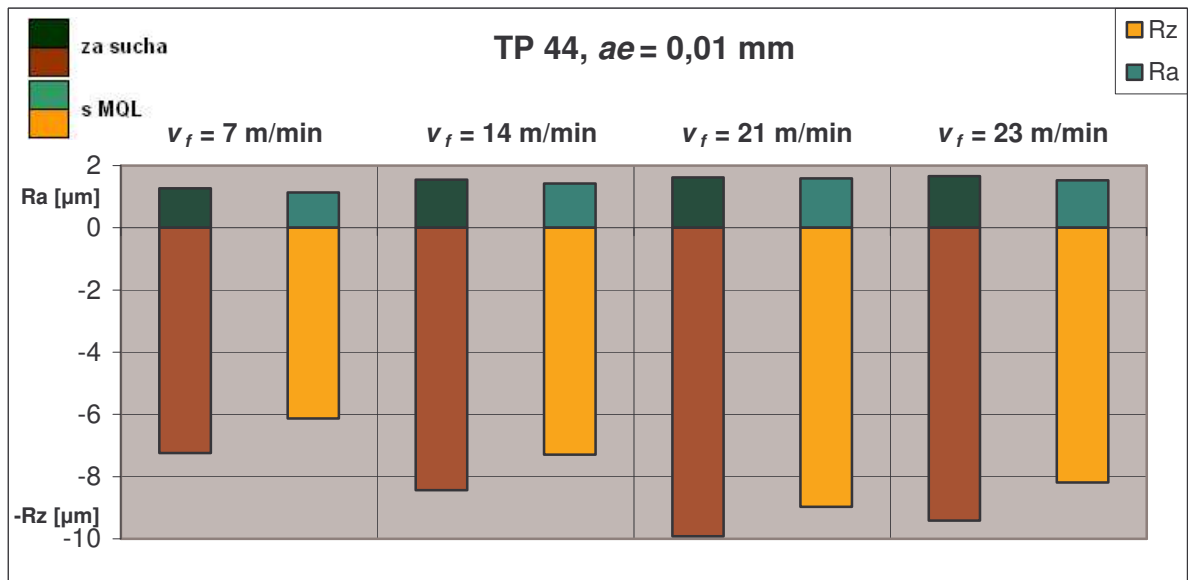


Obr. 66. PVC - Vliv hloubky řezu  $a_e$  a MQL na parametry drsnosti povrchu

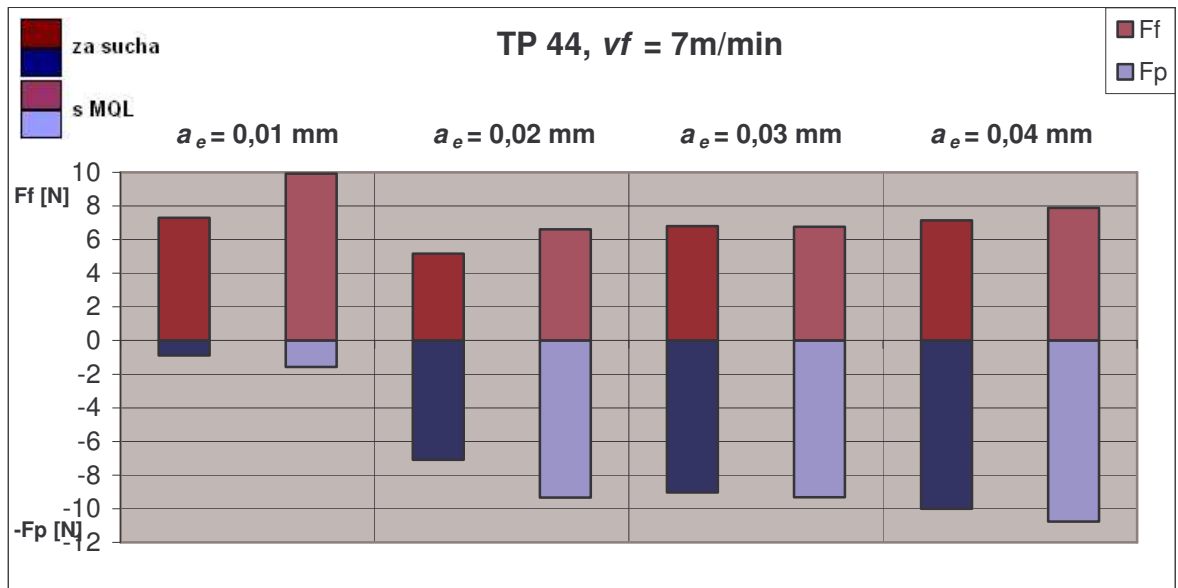
### 8.5 Výsledky experimentu pro pryž TP 44



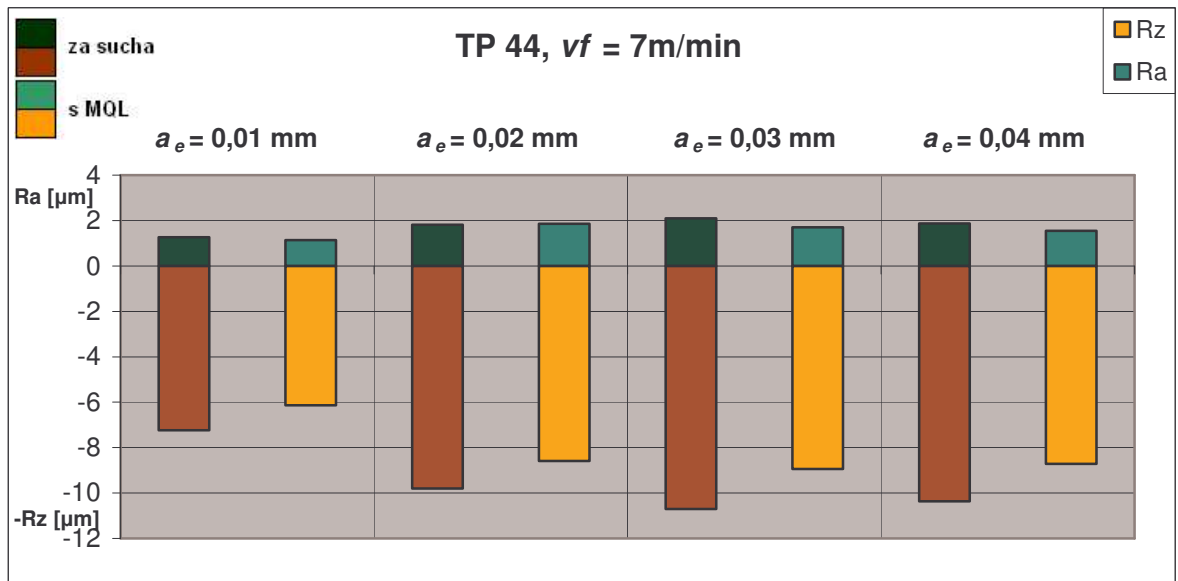
Obr. 67. TP 44 - Vliv posuvové rychlosti  $v_f$  a MQL na složky řezných sil



Obr. 68. TP 44 - Vliv posuvové rychlosti  $v_f$  a MQL na parametry drsnosti povrchu



Obr. 69. TP 44 - Vliv hloubky řezu  $a_e$  a MQL na složky řezných sil



Obr. 70. TP 44 - Vliv hloubky řezu  $a_e$  a MQL na parametry drsnosti povrchu

## 9 VLIV PROCESNÍCH KAPALIN, MQL A BROUŠENÍ ZA SUCHA NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU

Ve třetím experimentu byl zkoumán vliv procesních kapalin, MQL a broušení za sucha na parametry drsnosti povrchu. Opět bylo broušeno stejných pět materiálů jako u experimentu druhého (dural, PMMA, PE, PVC a pryž TP 44). Řezné podmínky byly jednotné pro celý třetí experiment posuvová rychlost  $v_f = 7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a hloubka řezu  $a_e = 0,01 \text{ mm}$ .

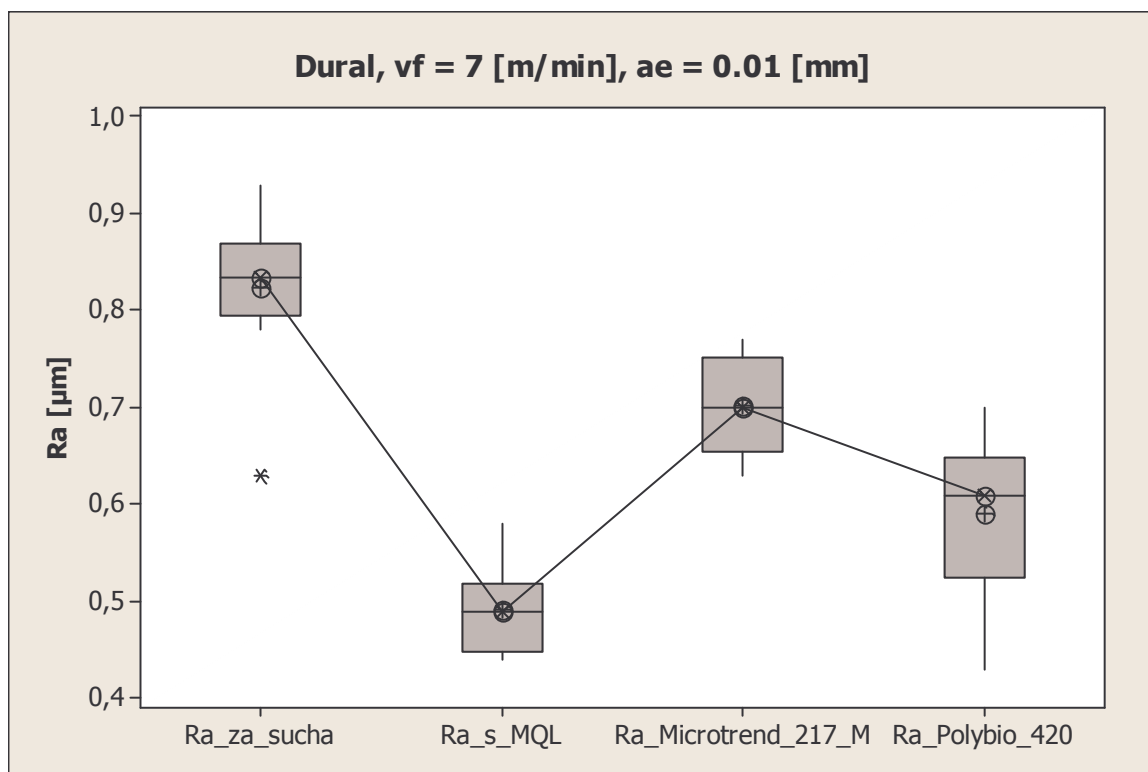
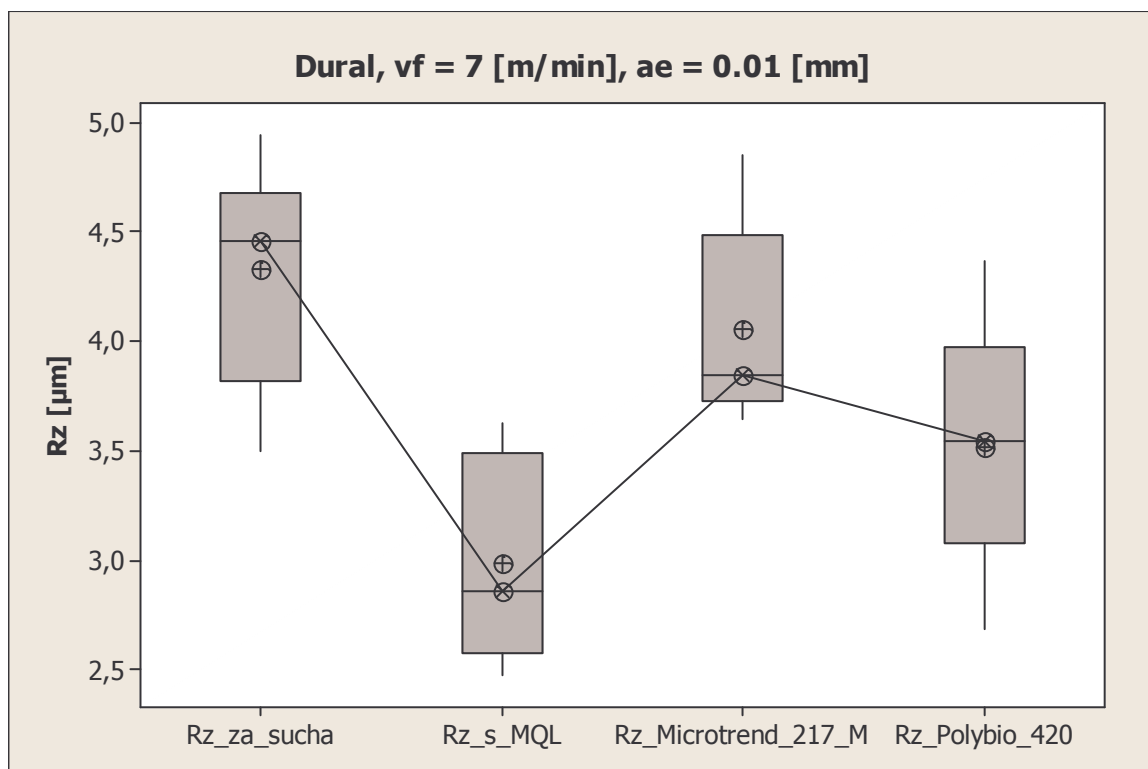
Bylo broušeno ve čtyřech typech řezného prostředí:

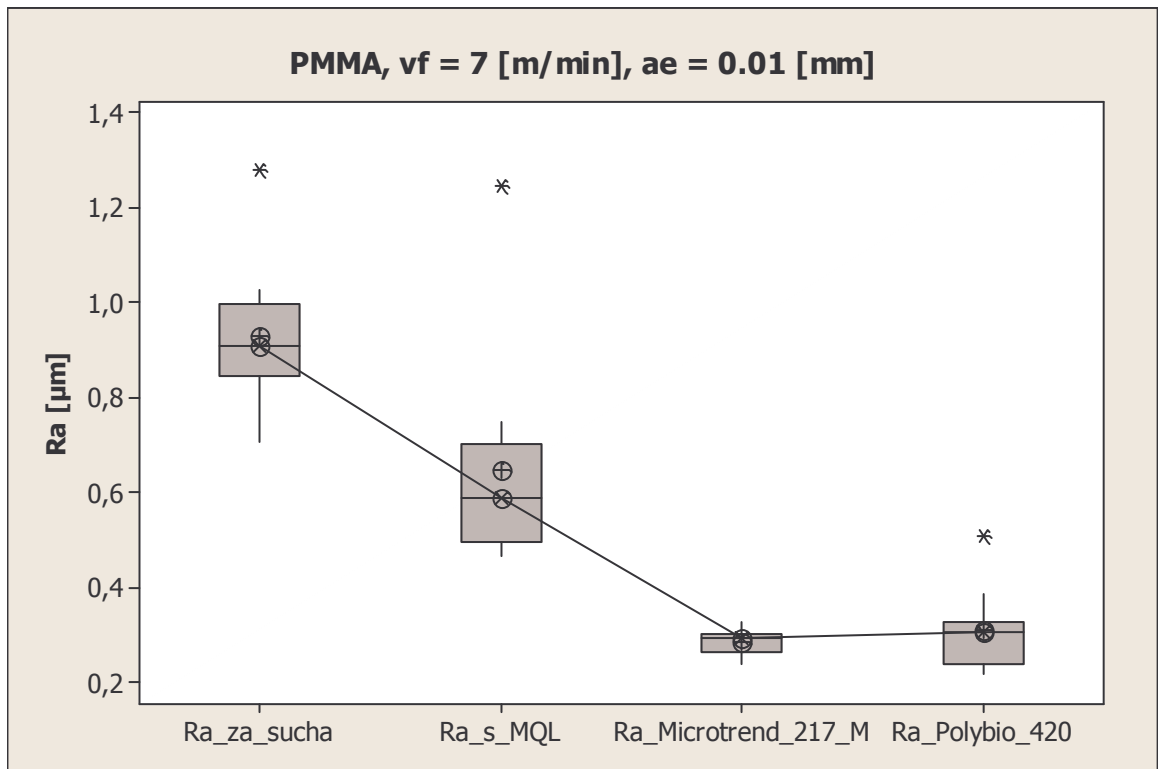
- broušení za sucha (bez použití jakéhokoliv chladicího či mazacího media),
- broušení s MQL,
- broušení s chlazením kapalinou Microtrend 217 M
- broušení s chlazením kapalinou Polybio 420

Tab. 10. Podmínky experimentu fáze 3

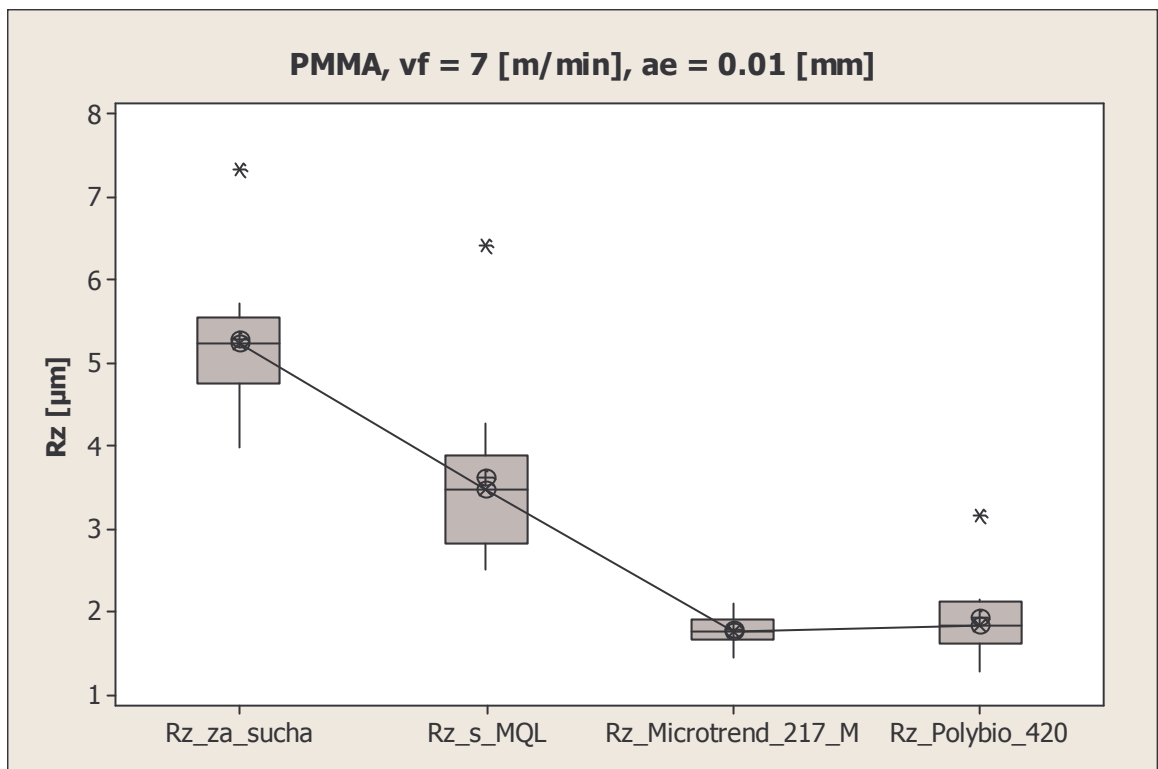
Broušené materiály	Řezné podmínky $v_f$ [m/min] / $a_e$ [mm]	Systém chlazení	Měřené veličiny
Dural AW 5083	7 / 0,01	za sucha	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
PMMA		s MQL	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
PVC		Microtrend 217 M	
PE		Polybio 420	
Pryž TP 44			

## 9.1 Výsledky experimentu

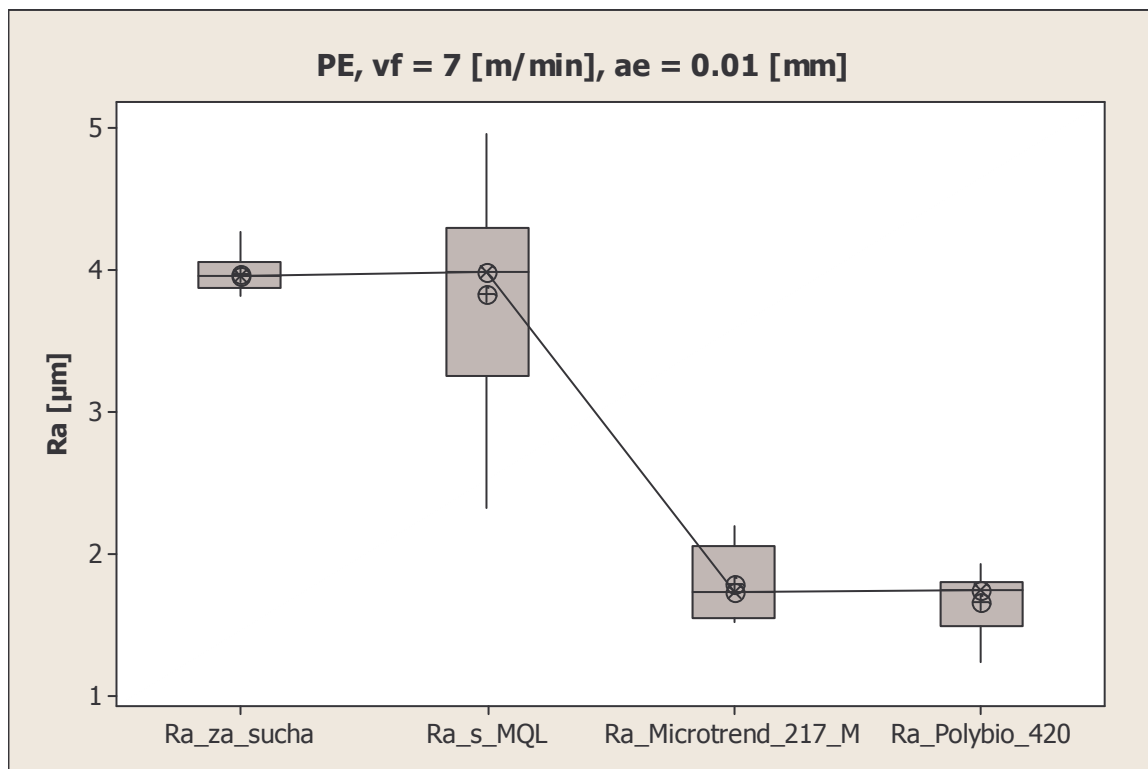
Obr. 71. Dural – porovnání drsnosti  $R_a$  při použití různých procesních kapalinObr. 72. Dural – porovnání drsnosti  $R_z$  při použití různých procesních kapalin



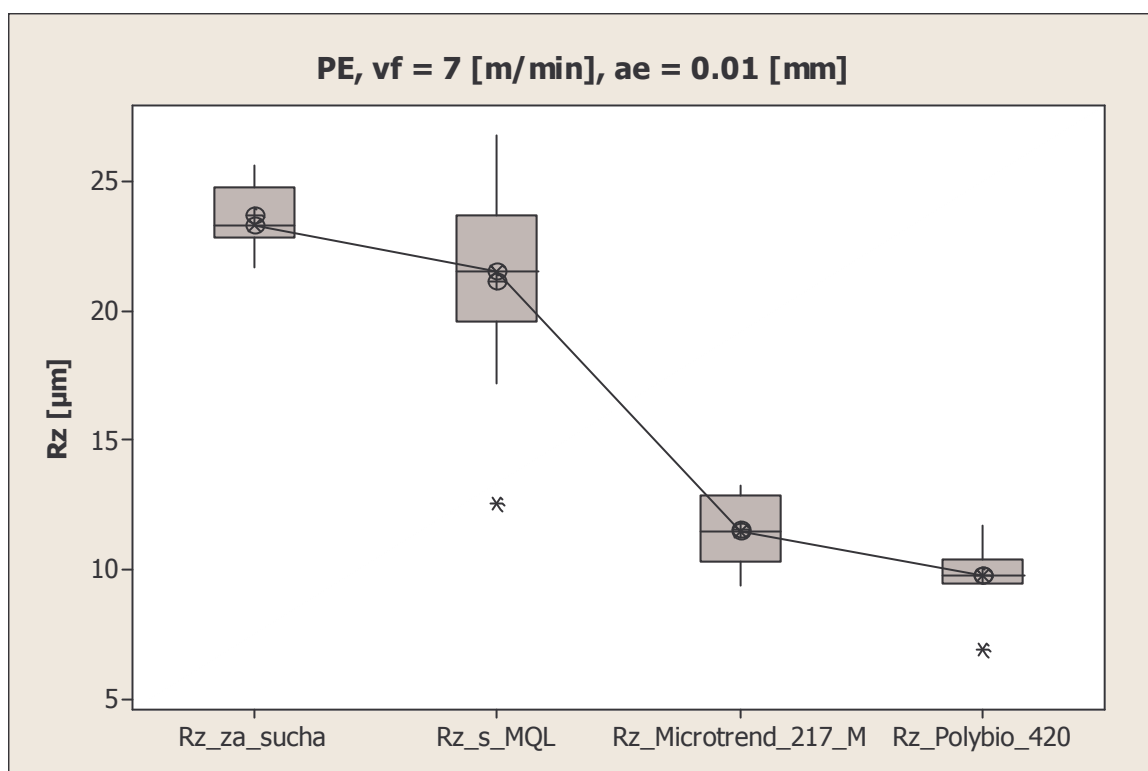
Obr. 73. PMMA – porovnání drsnosti  $R_a$  při použití různých procesních kapalin



Obr. 74. PMMA – porovnání drsnosti  $R_z$  při použití různých procesních kapalin

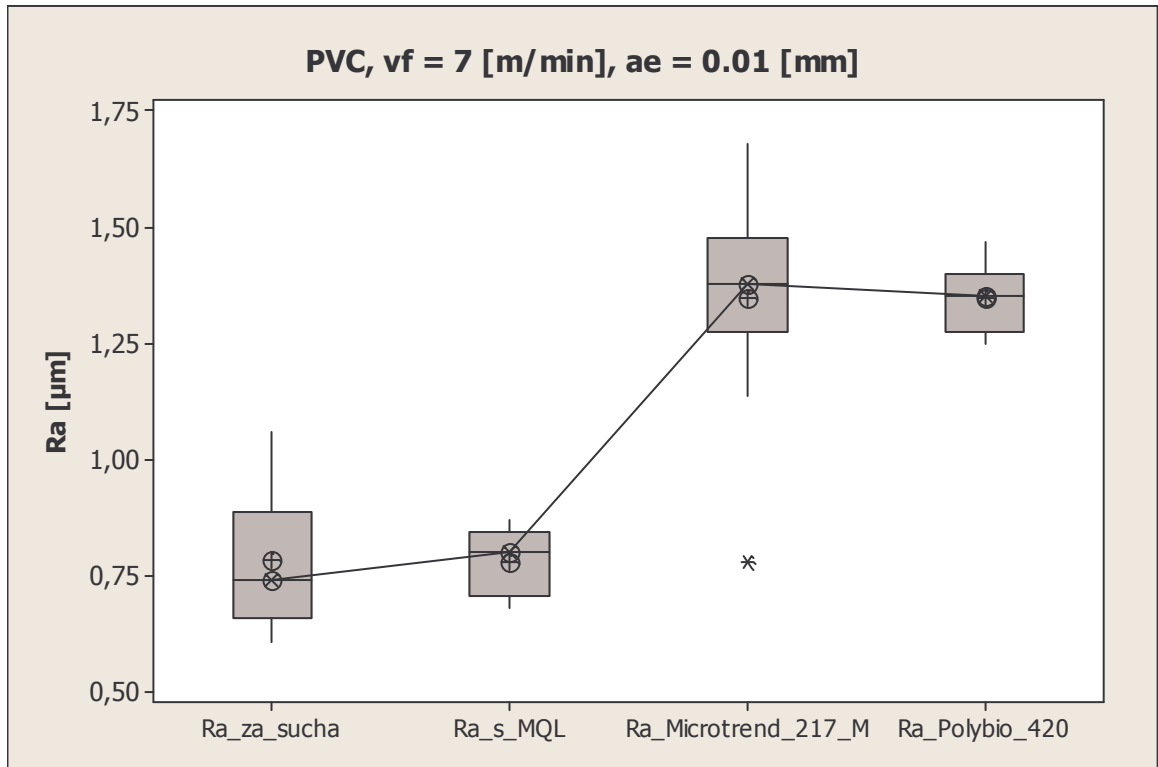


Obr. 75. PE – porovnání drsnosti  $R_a$  při použití různých procesních kapalin

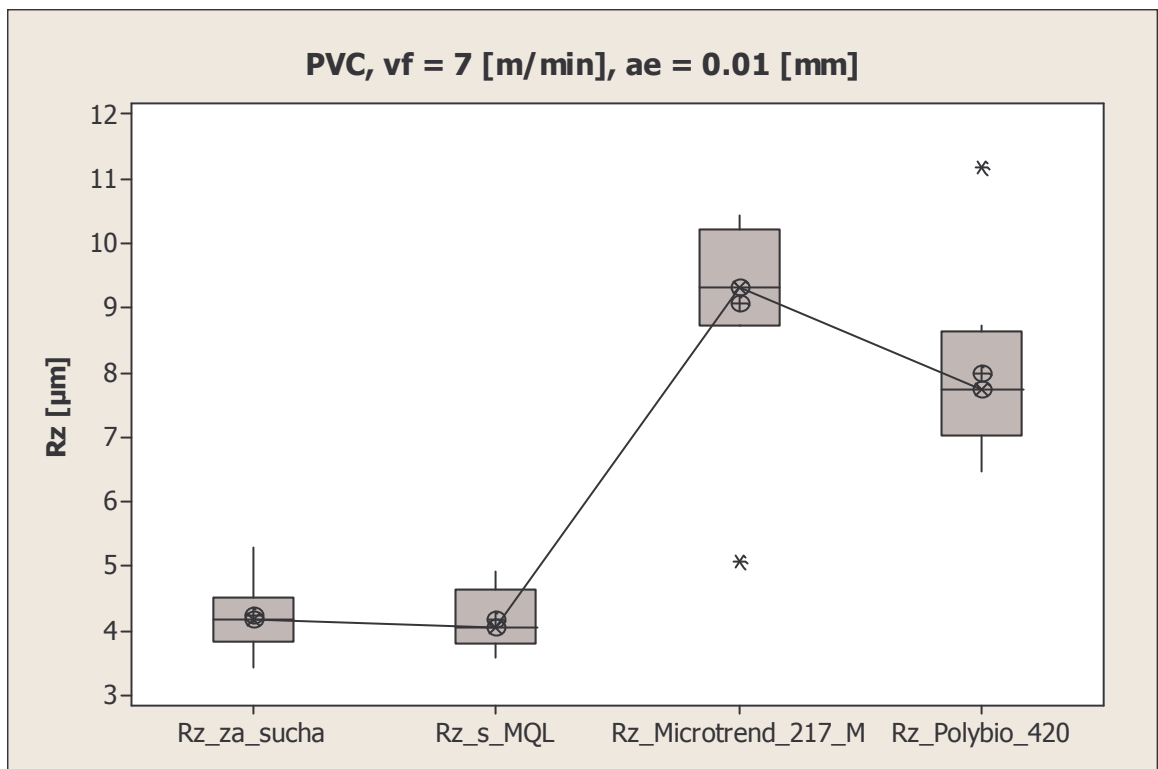


Obr. 76. PE – porovnání drsnosti  $R_z$  při použití různých procesních kapalin

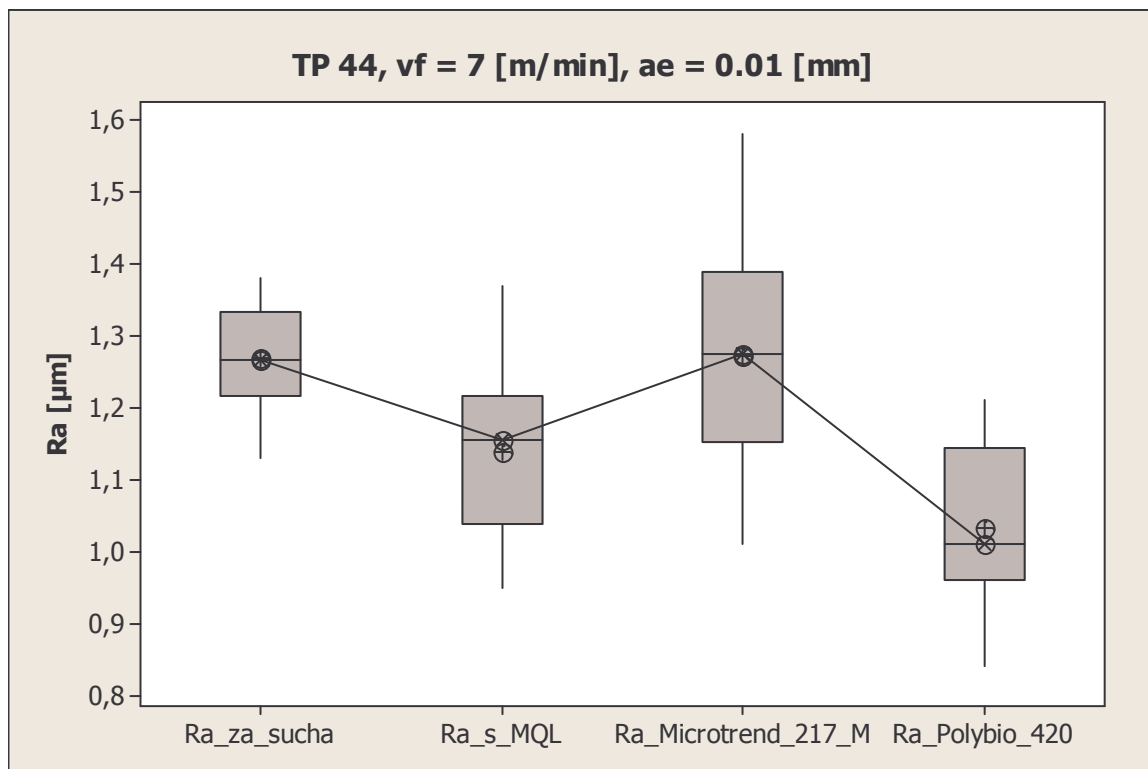




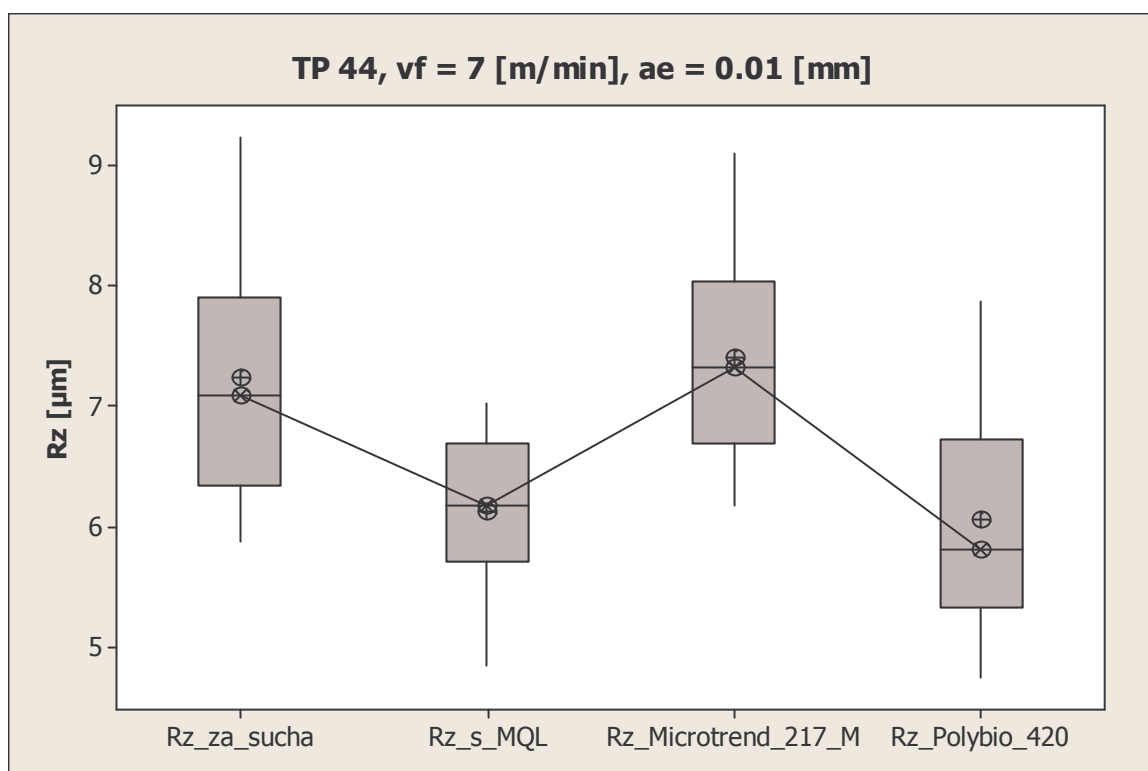
Obr. 77. PVC – porovnání drsnosti  $R_a$  při použití různých procesních kapalin



Obr. 78. PVC – porovnání drsnosti  $R_z$  při použití různých procesních kapalin



Obr. 79. Pryž TP 44 – porovnání drsnosti  $R_a$  při použití různých procesních kapalin



Obr. 80. Pryž TP 44 – porovnání drsnosti  $R_z$  při použití různých procesních kapalin

## 10 OPOTŘEBENÍ BROUSICÍHO KOTOUČE PŘI BROUŠENÍ ZA SUCHA, S MQL A S PROCESNÍMI KAPALINAMI

Ve čtvrtém experimentu byl zkoumán vliv procesních kapalin na opotřebení brousicího kotouče. Byla broušena kalená ocel ČSN 19 436.4. Posuvová rychlost byla zvolena  $v_f = 14 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a hloubka řezu  $a_e = 0,01 \text{ mm}$ . Opotřebení brousicího kotouče bylo měřeno po zbroušení 10 mm a 20 mm materiálu.

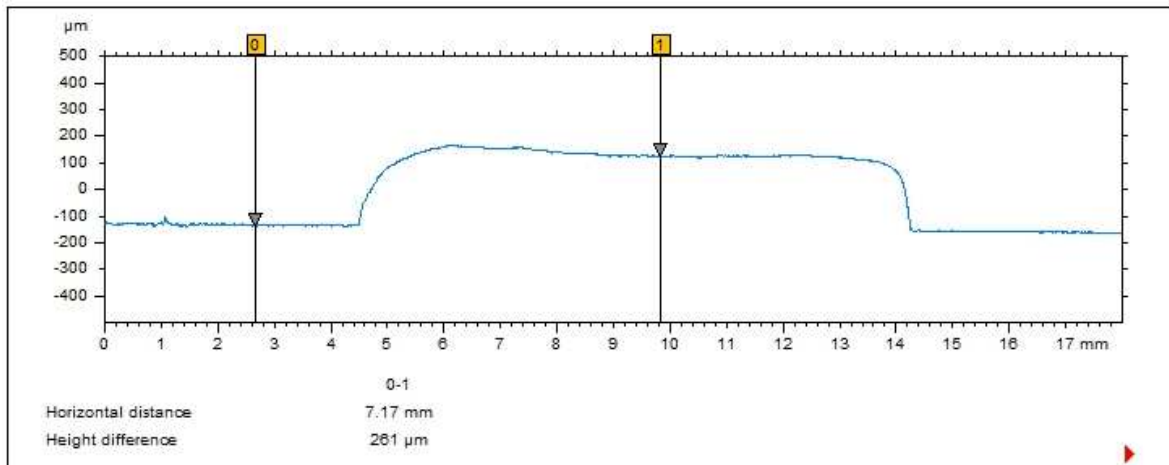
Tab. 11. Podmínky experimentu fáze 4

Broušené materiály	Řezné podmínky $v_f$ [m/min] / $a_e$ [mm]	Systém chlazení	Měřené veličiny
Ocel X210Cr12 kalená	14 / 0,01	za sucha s MQL Microtrend 217 M Polybio 420	$\Delta r_s$ [mm]

### 10.1 Výsledky experimentu

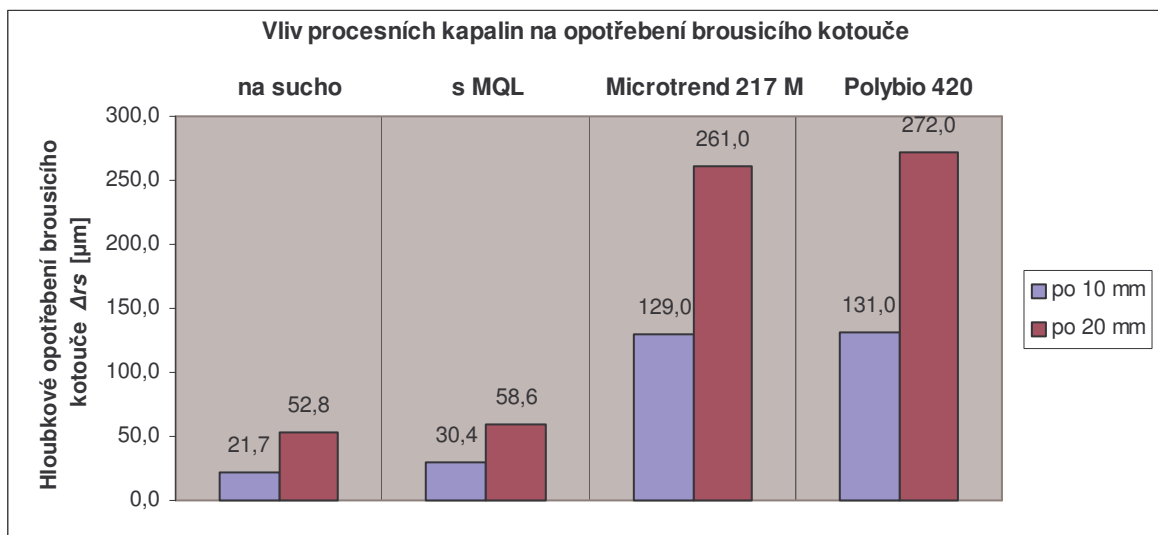


Obr. 81. Profil opotřebovaného brousicího kotouče vybroušený na planžetě – obrázek získaný z mikroskopu Carl Zeiss



Obr. 82. Profil opotřebovaného brousicího kotouče vybroušený na planžetě – obrázek získaný z 3D drsnoměru Talysurf CLI 500

Pomocí 3D drsnoměru byly získány hodnoty hloubkového opotřevení brousicího kotouče  $\Delta r_s$ . Na obrázku 82 dole je vidět naměřená hodnota  $\Delta r_s = 261 \mu\text{m}$ .



Obr. 83. Hloubkové opotřevení brousicího kotouče  $\Delta r_s$  při použití různých procesních kapalin

Úkolem experimentu bylo zjistit **poměrný obrus**  $G$  [-], ten se vypočítá pomocí vzorce:

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (2)$$

$V_w$ , ze vzorce pro výpočet poměrného obrusu, je **odebraný materiál** [ $\text{mm}^3$ ], vypočítá se pomocí vzorce:

$$V_w = b.l.h \quad (3)$$

$V_s$ , ze vzorce pro výpočet poměrného obrusu, je **opotřebení broušícího kotouče** [ $\text{mm}^3$ ], vypočítá se pomocí vzorce:

$$V_s = \pi.d_s.\Delta r_s.b \quad (4)$$

$b$  – Šířka broušeného materiálu [mm]

$l$  – Délka broušeného materiálu [mm]

$h$  – Celková odebraná hloubka broušeného materiálu [mm]

$d_s$  – Průměr broušícího kotouče [mm]

$\Delta r_s$  - Hloubkové opotřebení broušícího kotouče [mm]

Tab. 12. Poměrný obrus  $G$  při použití různých procesních kapalin

$G$ [-]	$h = 10$ mm	$h = 20$ mm
za sucha	62,687	51,526
s MQL	44,747	46,427
Microtrend 217 M	10,545	10,424
Polybio 420	10,384	10,002

Poměrný obrus  $G$  vyjadřuje poměr mezi odebraným materiálem a objemovým opotřebením brousícího kotouče. Čím větší je hloubkové opotřebenění brousícího kotouče  $\Delta r_s$ , tím menší je poměrný obrus  $G$ .

## 11 DISKUZE VÝSLEDKŮ

### 11.1 Vliv MQL na parametry drsnosti povrchu a složky řezných sil

První experiment probíhal za konstantních řezných podmínek posuvová rychlost  $v_f = 7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a hloubka řezu  $a_e = 0,01 \text{ mm}$ . Bylo úkolem zjistit vliv MQL na jakost broušeného povrchu a složky řezných sil při broušení. Bylo broušeno pět kovových a pět polymerních materiálů.

Z grafu (Obr. 50) lze vyčíst, že materiály PMMA, PE a pryž TP 44 mají veliký procentuální nárůst složek řezných sil při použití MQL. Ale tento rozdíl ve složkách řezných sil se pohybuje v jednotkách N. Tyto hodnoty v jednotkách N mohly být trochu ovlivněny vzduchem, který proudí vysokou rychlostí z trysky aplikátoru MQL, přímo na broušený materiál upevněný v dynamometru.

U všech kovových materiálů došlo ke zlepšení jakosti povrchu a ke snížení složek řezných sil při použití MQL, u duralu došlo ke snížení posuvové složky řezných sil  $F_f$  dokonce o 55 %, ze 43 N při obrábění za sucha na 19 N při použití MQL.

### 11.2 Vliv řezných parametrů a MQL na parametry drsnosti povrchu a složky řezných sil při rovinném broušení

Ve druhém experimentu byl zjišťován vliv změn řezných podmínek na parametry drsnosti povrchu a složky řezných sil při broušení za sucha a při broušení s MQL. Nejprve byla hloubka řezu konstantní  $a_e = 0,01 \text{ mm}$  a byla měněna posuvová rychlost  $v_f = (7; 14; 21; 23) \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . A poté byla posuvová rychlost konstantní  $v_f = 7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a byla měněna hloubka řezu  $a_e = (0,01; 0,02; 0,03; 0,04) \text{ mm}$ . V obou případech byly hodnoty naměřené při broušení za sucha porovnávány s hodnotami naměřenými při broušení s použitím MQL.

Z hlediska zmenšení složek řezných sil a zlepšení jakosti povrchu při použití MQL, vyšel nejlépe dural, u kterého se prokázalo, jak zlepšení jakosti povrchu, tak zmenšení složek řezných sil. U ostatních materiálů docházelo ke zlepšení jakosti povrchu, ale ke zvětšení složek řezných sil při použití MQL.

Při konstantní hloubce řezu a zvyšování posuvové rychlosti docházelo u všech materiálů k plynulému narůstání složek řezných sil, ale na jakost povrchu zvýšení posuvové rychlosti vliv nemělo. Výjimkou byl materiál PMMA, u kterého došlo k plynulému narůs-

tání parametrů drsnosti povrchu a pryž TP 44, kde hodnoty složek řezných sil, při zvyšování posuvové rychlosti, kolísaly.

Při konstantní posuvové rychlosti a zvyšování hloubky řezu se složky řezných sil u všech materiálů plynule zvyšovaly a na jakost povrchu zvyšování hloubky řezu vliv nemělo. Výjimkou byl materiál PVC, u kterého došlo při zvyšování hloubky řezu k plynulému narůstání parametrů drsnosti povrchu.

Extrémní vychýlení hodnot od očekávání mohlo být způsobeno tím, že měření bylo časově náročné, bylo prováděno v horizontu několika dnů a mohlo být ovlivněno nedostatečnou provozní teplotou stroje na začátku každého dne. Zvětšení složek řezných sil v jednotkách N, při použití MQL, mohlo být ovlivněné vzduchem, který proudí vysokou rychlostí z trysky aplikátoru MQL přímo na broušený materiál upevněný v dynamometru.

### **11.3 Vliv procesních kapalin, MQL a broušení za sucha na parametry drsnosti povrchu**

Ve třetím experimentu byl zkoumán vliv použití různých systémů chlazení na jakost povrchu. Řezné podmínky byly jednotné pro celý třetí experiment posuvová rychlost  $v_f = 7 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a hloubka řezu  $a_e = 0,01 \text{ mm}$ . Bylo broušeno za sucha, s použitím MQL a s použitím procesních kapalin Microtrend 217 M a Polybio 420.

Při broušení duralu, byla nejlepší jakost povrchu naměřena při použití MQL, dále pak s kapalinami Polybio 420 a Microtrend 217 M a nejhorší jakost povrchu byla naměřena při broušení za sucha. U materiálů PMMA a PE měly na jakost povrchu nejlepší vliv kapaliny Polybio 420 a Microtrend 217 M, dále MQL a nejhorší jakost povrchu byla opět naměřena při broušení za sucha. U PVC hodnoty parametrů drsnosti povrchu, při použití MQL a při broušení za sucha, byly téměř stejné a při použití procesních kapalin Polybio 420 a Microtrend 217 M byly naměřeny parametry drsnosti povrchu nejvyšší. U pryže TP 44 se nejlépe projevila na parametry drsnosti povrchu kapalina Polybio 420, dále broušení s MQL, následovalo broušení za sucha a nejhorší jakost povrchu byla naměřena při použití kapaliny Microtrend 217 M.



## 11.4 Opotřebení brousicího kotouče při broušení za sucha, s MQL a s procesními kapalinami

V posledním experimentu byl zkoumán vliv různých systémů chlazení na opotřebení brousicího kotouče. Byla broušena kalená ocel ČSN 19 436.4. Posuvová rychlost byla zvolena  $v_f = 14 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a hloubka řezu  $a_e = 0,01 \text{ mm}$ . Opotřebení brousicího kotouče bylo měřeno po zbroušení 10 mm a 20 mm materiálu.

K nejmenšímu opotřebení brousicího kotouče došlo při broušení za sucha. Při broušení s MQL došlo k malému nárůstu opotřebení brousicího kotouče, oproti broušení za sucha. K největšímu opotřebení brousicího kotouče došlo při broušení s klasickými procesními kapalinami Microtrend 217 M a Polybio 420.

Z mého experimentu vyplývá že na opotřebení brousicího kotouče má použití procesních kapalin negativní vliv. Pro jednoznačné určení, zda mají jakékoliv systémy chlazení či mazání negativní vliv na opotřebení brousicího kotouče, by bylo potřeba udělat více měření. V mém experimentu bylo měřeno opotřebení kotouče u každého systému chlazení pouze dvakrát, po 10 mm a po 20 mm odebraného materiálu. Broušení se nejčastěji používá jako dokončovací metoda a procesní kapaliny u broušení se používají hlavně z důvodu odvodu tepla, mazání místa řezu, tedy snížení tření a k vyplavování třísek z místa řezu.

## ZÁVĚR

Praktická část se zabývala broušením materiálů za použití různých procesních kapalin, především mikromazání MQL a jejich vlivem na parametry drsnosti povrchu, složky řezných sil a opotřebení broušicího kotouče. Zároveň byl pozorován vliv změn procesních podmínek na parametry drsnosti povrchu a složky řezných sil.

Experiment byl rozdělen do čtyř částí. V první části byl zkoumán vliv mikromazání MQL na složky řezných sil a parametry drsnosti povrchu, pěti kovových a pěti polymerních materiálů, při konstantních řezných podmínkách. Výsledky byly vyhodnoceny pomocí krabicových grafů z programu Minitab.

Ve druhé části byl zjišťován vliv změn řezných podmínek na parametry drsnosti povrchu a složky řezných sil při broušení za sucha a při broušení s MQL. Výsledky byly vyhodnoceny pomocí grafů z programu Microsoft Excel.

Ve třetí části experimentu byl zkoumán vliv použití různých systémů chlazení na jakost povrchu, za konstantních řezných podmínek. Výsledky byly vyhodnoceny pomocí krabicových grafů z programu Minitab.

Čtvrtá část experimentu se zabývala vlivem různých systémů chlazení na opotřebení broušicího kotouče, za konstantních řezných podmínek. Výsledky byly zpracovány pomocí programu Microsoft Excel.

Při broušení kovových materiálů mělo mikromazání MQL pozitivní vliv jak na jakost broušeného povrchu tak na složky řezných sil. U broušení polymerních materiálů se použitím mikromazání MQL zlepšila jakost broušeného povrchu, ale mírně se zvětšily složky řezných sil oproti broušení za sucha.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PŘÍKRYL, Zdeněk; MUSÍLKOVÁ, Rosa. *Teorie obrábění*. 3., opravné vydání. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982. 240 s.
- [2] NEDBAL, R. *Strojírenská technologie : pracovní sešit pro 3. ročník SPŠ*. Zlín, 104 p.
- [3] KOČMAN, Karel. *Speciální technologie : Obrábění*. 3., přeprac. a dopl. vyd. Brno : CERM, 2004. 227 s.
- [4] *Fluid Application - MQL (Minimum Quantity Lubrication)* [online]. Perrysburg : Master Chemical Corporation, 2006 [cit. 2011-05-05]. Dostupné z WWW: <[http://www.masterchemical.com/db-docs/technical-bulletins/Fluid\\_MQL.pdf](http://www.masterchemical.com/db-docs/technical-bulletins/Fluid_MQL.pdf)>.
- [5] KLETEČKA, Jaroslav; FOŘT, Petr. *Technické kreslení : Učebnice pro střední průmyslové školy*. 1. vydání. Brno : Computer press, 1999. 193 s. ISBN 80-7226-192-4.
- [6] Mikromazací technologie - MQL, 2011. Rexim. [http://rexim.cz/cs/produkty?page=shop.browse&category\\_id=3](http://rexim.cz/cs/produkty?page=shop.browse&category_id=3) .
- [7] Prezentace. *Mikromazací systémy Accu-Lube*. Praha: Rexim spol. s.r.o., 5 s.
- [8] Bezpečnostní list. *Accu-Lube LB 2000*. Praha: Rexim spol. s.r.o., 2008. 8 s.
- [9] *Microtrend 217M : Mikroemulzní řezná kapalina* [online]. Praha : BP ČR, s.r.o., 2002 [cit. 2011-05-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.vastoil.cz/oleje/technicaldatasheets/Microtrend%20217M.pdf>>.
- [10] Prospekt. *POLYBIO 420 Emulgační obráběcí olej*. Malešovice: V.I.P., s.r.o., 2011.
- [11] *Strojírenská technologie : Pracovní sešit pro 1. ročník*. Zlín : [s.n.], [200?]. 44 s.
- [12] Konstrukční polymery 2. *Polymerní materiály (Studijní texty)*. Zlín: UTB Zlín, 2007. 20 p.
- [13] MATULA, L. *Dynamická obrobiteľnosť pryžových materiálov broušením: Diplomová práca*. UTB Zlín, 2010.
- [14] VASILKO, K., BOKUČAVA, G. *Brúsenie kovových materiálov*. 1st ed. Bratislava: Alfa, 1988.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

MQL	Minimum Quantity Lubrication (Minimální množství lubrikace)
SK	Slinutý karbid
$R_a$	Střední aritmetická úchylka profilu [ $\mu\text{m}$ ]
$R_z$	Maximální výška profilu [ $\mu\text{m}$ ]
$F_f$	Vodorovná (posuvová) složka řezných sil [N]
$F_p$	Svislá (pasivní) složka řezných sil [N]
$G$	Poměrný obrus [-]
$a_e$	Hloubka řezu [mm]
$v_f$	Posuvová rychlost [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]
PMMA	Polymethylmetakrylát
PVC	Polyvinylchlorid
PE	Polyethylén
$T_m$	Teplota tání [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_g$	Teplota skelného přechodu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\rho$	Hustota [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]
$\sigma$	Dovolené napětí v tahu [MPa]
$E$	Modul pružnosti v tahu [MPa]
SBR	Styrene Butadiene Rubber
IIR	Isobutylene Isoprene Rubber
BR	Butadiene Rubber
NBR	Nitrile Butadiene Rubber
$\Delta r_s$	Hloubkové opotřebení brousicího kotouče [mm]
$V_w$	odebraný materiál [ $\text{mm}^3$ ]
$V_s$	opotřebení brousicího kotouče [ $\text{mm}^3$ ]

- $b$  Šířka broušeného materiálu [mm]
- $l$  Délka broušeného materiálu [mm]
- $h$  Celková odebraná hloubka broušeného materiálu [mm]
- $d_s$  Průměr broušicího kotouče [mm]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Broušení [2] .....	13
Obr. 2. Označení brousicích kotoučů dle ČSN [2] .....	13
Obr. 3. Uspořádání brousicích zrn v brousicím kotouči [2] .....	14
Obr. 4. Tvary brousicích kotoučů [2] .....	15
Obr. 5. Broušení rovinných ploch [2] .....	16
Obr. 6. Vrypy na břitu vytvořené tvrdými částicemi materiálu obrobku[1].....	18
Obr. 7. Dotyk pracovních ploch břitu s třískou[1].....	19
Obr. 8. Formy otupení břitu na čele a hřbetě[1] .....	21
Obr. 9. Časový průběh otěru při malých řezných rychlostech [1].....	22
Obr. 10. Základní části aplikátoru [7].....	38
Obr. 11. Dvanácti čerpadlový aplikátor [7] .....	38
Obr. 12. Nepřesnost skutečného povrchu součásti[5] .....	40
Obr. 13. Určení střední aritmetické úchylky profilu Ra[5] .....	41
Obr. 14. Vodorovná rovinná bruska BRH 20.03 F .....	45
Obr. 15. Použitý brousicí kotouč .....	46
Obr. 16. Přenosný aplikátor MQL připevněný na brusce pomocí magnetů .....	48
Obr. 17. Tryska aplikátoru MQL připevněná na stroj pomocí magnetu .....	48
Obr. 18. Detail na trysku aplikátoru MQL během experimentu.....	49
Obr. 19. Aplikace procesní kapaliny Microtrend 217 M.....	50
Obr. 20. Aplikace procesní kapaliny POLYBIO 420 .....	52
Obr. 21. Propojení dynamometru s PC .....	52
Obr. 22. Tenzometrický dynamometr .....	53
Obr. 23. Graf získaný pomocí programu Conmes-Spider .....	53
Obr. 24. Měření drsnosti daného vzorku drsnoměrem Mitutoyo SJ – 301.....	54
Obr. 25. Vytisknutá naměřená data z drsnoměru Mitutoyo SJ - 301 .....	54
Obr. 26. 3D drsnoměr Talysurf CLI 500 s počítačem .....	55
Obr. 27. Mikroskop Carl Zeiss s počítačem .....	56
Obr. 28. Pryž TP 44 .....	60
Obr. 29. Pryž 9341/75.....	61
Obr. 30. Ocel 11 600 – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL .....	62

Obr. 31. Ocel 11 600 – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL .....	62
Obr. 32. Ocel 14 109.4 – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL .....	63
Obr. 33. Ocel 14 109.4 – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL.....	63
Obr. 34. Ocel 19 436 – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL .....	64
Obr. 35. Ocel 19 436 – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL .....	64
Obr. 36. Ocel 19 436.4 – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL .....	65
Obr. 37. Ocel 19 436.4 – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL.....	65
Obr. 38. Dural - porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL .....	66
Obr. 39. Dural – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL .....	66
Obr. 40. PMMA – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL .....	67
Obr. 41. PMMA – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL .....	67
Obr. 42. PE – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL .....	68
Obr. 43. PE – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL .....	68
Obr. 44. PVC – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL .....	69
Obr. 45. PVC – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL .....	69
Obr. 46. Pryž TP 44 – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL .....	70
Obr. 47. Pryž TP 44 – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL .....	70

Obr. 48. Pryž 9341/75 – porovnání složek řezných sil při broušení za sucha a s použitím MQL .....	71
Obr. 49. Pryž 9341/75 – porovnání parametrů drsnosti povrchu při broušení za sucha a s použitím MQL.....	71
Obr. 50. Procentuální rozdíl složek řezných sil a parametrů drsnosti povrchu, při broušení za sucha a s použitím MQL .....	72
Obr. 51. Dural - Vliv posuvové rychlosti $v_f$ a MQL na složky řezných sil.....	75
Obr. 52. Dural - Vliv posuvové rychlosti $v_f$ a MQL na parametry drsnosti povrchu.....	75
Obr. 53. Dural - Vliv hloubky řezu $a_e$ a MQL na složky řezných sil .....	76
Obr. 54. Dural - Vliv hloubky řezu $a_e$ a MQL na parametry drsnosti povrchu .....	76
Obr. 55. PMMA - Vliv posuvové rychlosti $v_f$ a MQL na složky řezných sil.....	77
Obr. 56. PMMA - Vliv posuvové rychlosti $v_f$ a MQL na parametry drsnosti povrchu.....	77
Obr. 57. PMMA - Vliv hloubky řezu $a_e$ a MQL na složky řezných sil .....	78
Obr. 58. PMMA - Vliv hloubky řezu $a_e$ a MQL na parametry drsnosti povrchu .....	78
Obr. 59. PE - Vliv posuvové rychlosti $v_f$ a MQL na složky řezných sil .....	79
Obr. 60. PE - Vliv posuvové rychlosti $v_f$ a MQL na parametry drsnosti povrchu .....	79
Obr. 61. PE - Vliv hloubky řezu $a_e$ a MQL na složky řezných sil.....	80
Obr. 62. PE - Vliv hloubky řezu $a_e$ a MQL na parametry drsnosti povrchu.....	80
Obr. 63. PVC - Vliv posuvové rychlosti $v_f$ a MQL na složky řezných sil .....	81
Obr. 64. PVC - Vliv posuvové rychlosti $v_f$ a MQL na parametry drsnosti povrchu .....	81
Obr. 65. PVC - Vliv hloubky řezu $a_e$ a MQL na složky řezných sil.....	82
Obr. 66. PVC - Vliv hloubky řezu $a_e$ a MQL na parametry drsnosti povrchu.....	82
Obr. 67. TP 44 - Vliv posuvové rychlosti $v_f$ a MQL na složky řezných sil .....	83
Obr. 68. TP 44 - Vliv posuvové rychlosti $v_f$ a MQL na parametry drsnosti povrchu .....	83
Obr. 69. TP 44 - Vliv hloubky řezu $a_e$ a MQL na složky řezných sil.....	84
Obr. 70. TP 44 - Vliv hloubky řezu $a_e$ a MQL na parametry drsnosti povrchu.....	84
Obr. 71. Dural – porovnání drsnosti $R_a$ při použití různých procesních kapalin.....	86
Obr. 72. Dural – porovnání drsnosti $R_z$ při použití různých procesních kapalin.....	86
Obr. 73. PMMA – porovnání drsnosti $R_a$ při použití různých procesních kapalin.....	87
Obr. 74. PMMA – porovnání drsnosti $R_z$ při použití různých procesních kapalin.....	87
Obr. 75. PE – porovnání drsnosti $R_a$ při použití různých procesních kapalin .....	88
Obr. 76. PE – porovnání drsnosti $R_z$ při použití různých procesních kapalin .....	88
Obr. 77 . PVC – porovnání drsnosti $R_a$ při použití různých procesních kapalin .....	89



Obr. 78. PVC – porovnání drsnosti $R_z$ při použití různých procesních kapalin .....	89
Obr. 79. Pryž TP 44 – porovnání drsnosti $R_a$ při použití různých procesních kapalin.....	90
Obr. 80. Pryž TP 44 – porovnání drsnosti $R_z$ při použití různých procesních kapalin.....	90
Obr. 81. Profil opotřebovaného broušícího kotouče vybroušený na planžetě – obrázek získaný z mikroskopu Carl Zeiss.....	91
Obr. 82. Profil opotřebovaného broušícího kotouče vybroušený na planžetě – obrázek získaný z 3D drsnoměru Talysurf CLI 500 .....	92
Obr. 83. Hloubkové opotřebení broušícího kotouče $\Delta r_s$ při použití různých procesních kapalin.....	92

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Přehled doporučených procesních kapalin pro různé metody obrábění [3].....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 2. Doporučené hodnoty základní délky <math>l</math> [5] .....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 3. Doporučené hodnoty střední aritmetické úchytky profilu <math>Ra</math> [5].....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4. Technické údaje rovinné brusky BRH 20.03 F .....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 5. Vlastnosti použitého broušicího kotouče .....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 6. Podmínky experimentu fáze 1 .....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 7. Složení a vlastnosti pryže TP 44 [13].....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 8. Složení a vlastnosti pryže 9341/75 [13] .....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 9. Podmínky experimentu fáze 2 .....</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 10. Podmínky experimentu fáze 3 .....</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 11. Podmínky experimentu fáze 4 .....</i>	<i>91</i>
<i>Tab. 12. Poměrný obrus <math>G</math> při použití různých procesních kapalin.....</i>	<i>94</i>

## SEZNAM PŘÍLOH

PI CD disk obsahující:

- naměřené hodnoty složek řezných sil z dynamometru, pomocí programu Conmes-Spider (267 souborů),
- zpracované výsledky pomocí programu Minitab (30 souborů),
- soubory programu Microsoft Excel s tabulkami naměřených hodnot z celého experimentu,
- textovou část diplomové práce.