

# **Dynamická obrobiteľnosť pryžových materiálov broušením**

Bc. Lukáš Matula

---

Diplomová práce  
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš MATULA**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Dynamická obrobiteľnosť pryžových materiálů  
broušením.**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte teoretickou studii na dané téma
2. Navrhněte a zkonstruujte formu pro vulkanizaci pryžových vzorků
3. Proveďte měření dynamické obrobiteľnosti na brusce BRH 20.03F připravených vzorků
4. Naměřená data vyhodnoťte podle zásad statistiky



Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

- [1] Kocman,K. – Prokop,J.: Technologie obrábění. CERM Brno, 2001
- [2] Kocman,K.: Speciální technologie obrábění. CERM Brno, 2004
- [3] Vasilko,K.: Technológia dokončovania povrchov. COFIN Prešov, 2004
- [4] Vasilko,K. – Bokučava,G.: Brúsenie kovových materiálov. ALFA Bratislava, 1988
- [5] Černý,F. – Trmal,J. – Maršálek,J.: Brusky a broušení. Praha, 1970
- [6] Barquins M.: On a new mechanism of rubber friction,wear. 1984

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**19. února 2010**

Termín odevzdání diplomové práce:

**19. května 2010**

Ve Zlíně dne 21. ledna 2010

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



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

## 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, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 12.5.2010

.....



---

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

(1) Vysoká škola nevýdělečně 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 přihledne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou dynamické obrobiteľnosti pryžových materiálů broušením. Experiment zahrnuje vulkanizaci pryžových vzorků ve formě z duralu. Následné obrábění vzorků broušením s vyhodnocením složek řezných sil a sledování jakosti povrchu. Vyhodnocení získaných dat podle statistických metod. Nezávislými proměnnými jsou hloubka řezu, posuv a brousící materiál.

Klíčová slova: broušení, drsnost povrchu, statistické vyhodnocení, hloubka řezu

## **ABSTRACT**

This Thesis study is concerned with problems of Dynamic machinability of rubber materials by grinding. Experiment includes the cure of rubber samples in mold from dural. Consequently tooling of samples grinding with evaluation component parts cutting force and monitoring surface roughness. The data evaluation according to statistical method. Independent parameters are depth of cut, feed and grinding material.

Keywords: grinding, surface roughness, statistical analysis, depth of cut

## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Ondřejovi Bílkovi, Ph. D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce.

Taktéž by sem chtěl poděkovat panu Ing. Davidovi Maňasovi, Ph. D. a panu doc. Dr. Ing. Vladimírovi Patovi za pomoc při zpracování naměřených dat dle statistických metod. Dále bych chtěl poděkovat také panu Ing. Jiřímu Šálkovi a panu Ing. Vladimíru Šumberovi za jejich pomoc při práci na praktické části mé diplomové práce.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 OBROBITELNOST MATERIÁLU</b> .....	<b>13</b>
1.1 HODNOCENÍ OBROBITELNOSTI.....	13
1.2 OBROBITELNOST PRYŽÍ.....	14
<b>2 TŘENÍ A OPOTŘEBENÍ PRYŽOVÝCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>16</b>
2.1 ROZDĚLENÍ TŘENÍ.....	16
2.2 TŘENÍ PRYŽÍ .....	17
2.2.1 Klasifikace tření pryže.....	17
2.2.2 Složky tření pryže.....	18
2.3 OPOTŘEBENÍ.....	18
2.3.1 Hlavní typy opotřebení .....	19
<b>3 BROUŠENÍ</b> .....	<b>23</b>
3.1 NÁZVOSLOVÍ BĚŽNÝCH BROUSICÍCH ZPŮSOBŮ .....	23
3.2 TVORBA TRÍSKY .....	25
3.3 ŘEZNÉ SÍLY .....	25
3.4 ZÁKLADNÍ METODY BROUŠENÍ .....	26
3.4.1 Radiální a hloubkové broušení.....	27
3.4.2 Broušení vnitřních rotačních ploch .....	29
3.4.3 Bezhraté broušení.....	29
3.4.4 Rovinné broušení .....	31
3.4.5 Rovinné broušení čelem kotouče .....	32
3.4.6 Broušení brusným pásem .....	32
3.4.7 Broušení volným brusivem .....	34
3.4.8 Dokončování brusnými kameny.....	34
3.4.9 Leštění a lapování.....	35
3.5 BROUSÍCÍ NÁSTROJE .....	35
3.5.1 Druhy opotřebení brousícího nástroje .....	37
3.5.2 Odolnost brousících nástrojů proti opotřebení .....	38
3.6 BROUSÍCÍ STROJE.....	39
3.7 DOKONČOVACÍ ZPŮSOBY OBRÁBĚNÍ.....	41
3.7.1 Jemné broušení.....	41
3.8 BROUSÍCÍ LÁTKY .....	42
<b>4 HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU</b> .....	<b>44</b>

4.1	CHARAKTERISTIKY DRSNOSTI POVRCHU A TVARU PROFILU .....	46
4.2	MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU .....	48
4.3	KVANTITATIVNÍ METODY .....	48
4.4	DOTYKOVÝ ZPŮSOB – DOTYKOVÉ PROFILOMETRY.....	49
<b>5</b>	<b>TVRDOST POVRCHU MATERIÁLU.....</b>	<b>51</b>
5.1	TVRDOST.....	51
5.2	TVRDOST SHORE .....	51
5.2.1	Popis zkoušky.....	51
5.2.2	Podstata zkoušky .....	51
5.2.3	Zkušební těleso.....	52
5.2.4	Postup zkoušky.....	52
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>54</b>
<b>6</b>	<b>KONSTRUKCE FORMY PRO VULKANIZACI PRYŽOVÝCH VZORKŮ.....</b>	<b>55</b>
6.1	3D MODEL FORMY .....	55
6.2	VÝROBA FORMY .....	55
<b>7</b>	<b>POUŽITÉ MATERIÁLY A VULKANIZACE SMĚSI.....</b>	<b>58</b>
<b>8</b>	<b>BROUŠENÍ VZORKŮ.....</b>	<b>61</b>
8.1	VODOROVNÁ ROVINNÁ BRUSKA BRH 20.03 F .....	62
8.1.1	Princip použití .....	62
8.1.2	Technické parametry .....	62
8.1.3	Specifikace stroje .....	63
8.2	DRSNOMĚR MITUTOYO SJ – 301 .....	64
8.2.1	Popis přístroje.....	64
8.2.2	Specifikace přístroje.....	65
<b>9</b>	<b>VYHODNOCENÍ SLOŽEK ŘEZNÝCH SIL .....</b>	<b>67</b>
9.1	DYNAMOMETR .....	67
9.2	VLIV POSUVOVÉ RYCHLOSTI NA ŘEZNÉ SÍLY .....	69
9.2.1	Kotouč 99A 30P 8V .....	69
9.2.2	Kotouč 99A 80I 8V .....	72
9.2.3	Kotouč 49C 120J 12V .....	75
9.3	VLIV HLOUBKY ŘEZU NA ŘEZNÉ SÍLY.....	77
9.3.1	Kotouč 99A 30P 8V .....	78
9.3.2	Kotouč 99A 80I 8V .....	81
9.3.3	Kotouč 49C 120J 12V .....	84
9.4	MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU .....	86
9.4.1	Kotouč 99A 30P 8V .....	87
9.4.2	Kotouč 99A 80I 8V .....	88
9.4.3	Kotouč 49C 120J 12V.....	89

9.5	VYHODNOCENÍ.....	90
9.5.1	Vliv posuvové rychlosti na řezné síly .....	90
9.5.2	Vliv hloubky řezu na řezné síly.....	91
9.5.3	Měření drsnosti povrchu materiálu .....	91
9.5.4	Snímání povrchu broušeného materiálu.....	91
<b>10</b>	<b>STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....</b>	<b>93</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>97</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>98</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>100</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>101</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>105</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>106</b>

## ÚVOD

Broušení patří historicky mezi nejstarší metody obrábění. Používá se zejména pro obrábění součástí s vyššími požadavky na přesnost rozměrů, tvarů a jakost povrchu. Dále se broušení uplatňuje při obrábění materiálů, které není možné jinými obráběcími metodami obrobit, nebo je brousící metoda hospodárnější než jiné. S rozvojem výkonných brousících nástrojů a strojů se význam broušení rozšiřuje z původní oblasti dokončovacích operací také na produkční obrábění.

Broušením jednak dosahujeme konečné přesnosti obrobků a upravujeme zároveň jejich povrch, jednak ostříme nástroje. Používáme k tomu brousících látek, a to buď prášků, nebo různých kotoučů a tyčinek.

Oddělování třísek při broušení je podobné jako při frézování. Na rozdíl od frézy jsou břity brousícího kotouče tvořeny zrny brusiva, nepravidelně rozmístěné po obvodu nástroje a mají nestejnou geometrii břitu. Řezný odpor při broušení je větší než při frézování, neboť průřezy odebíraných třísek jsou malé.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**



# 1 OBROBITELNOST MATERIÁLU

Obrobitelnost je technologická vlastnost daného materiálu, která charakterizuje jeho vhodnost k obrábění. Zahrnuje vliv mechanických a fyzikálních vlastností materiálu, chemického složení, tepelného zpracování, struktury a způsobu výroby polotovaru na kvalitativní, kvantitativní a ekonomické výsledky procesu řezání. [1]

Obrobitelnost nelze vztáhnout jen k samotnému obrábění materiálu, protože závisí i na způsobu obrábění a řezných podmínkách. Teoretický pojem obrobitelnosti nelze tedy odloučit od pojmu řezivost nástroje, protože konečný ekonomický, energetický a kvalitativní výsledek obrábění závisí mimo uvedené charakteristiky materiálu obrobku také na fyzikálních vlastnostech břítu nástroje. [1]

## 1.1 Hodnocení obrobitelnosti

Hodnocení obrobitelnosti podle způsobu a rozsahu hodnocení rozlišujeme absolutní, relativní a komplexní vyjádření obrobitelnosti.

Absolutní obrobitelnost je vyjádřena absolutní hodnotou příslušného ukazatele obrobitelnosti. Při relativním hodnocení obrobitelnosti porovnáváme vlastnosti určitého materiálu s vlastnostmi základního nebo etalonového materiálu a vztah vyjádříme převodovým číslem nebo indexem obrobitelnosti. Při komplexním hodnocení obrobitelnosti se snažíme jedním číselným ukazatelem vyjádřit několik technologických vlastností zkoumaného materiálu.

***Materiál je tím lépe obrobitelný:***

- čím vyšší je řezná rychlost při dané trvanlivosti břítu,
- čím větší je trvanlivost břítu při dané řezné rychlosti,
- čím menší je řezný odpor, měrný odpor a řezná práce, tj. čím je větší objemový součinitel odebraných třísek na 1 kW výkonu za 1 minutu,
- čím nižší je teplota řezání a čím je menší řezné teplo,
- čím menší je drsnost obrobeného povrchu,
- čím vyšší je přesnost obrobku. [19]

V praxi se pro jednotlivé metody obrábění nejčastěji používá relativní hodnocení obrobitelnosti. Jako kritérium pro hodnocení obrobitelnosti se používá kritérium kinetické, tj. podle řezné rychlosti. Dalším možným kritériem pro hodnocení relativní obrobitelnosti

může být: dosažená drsnost obrobené plochy, velikost opotřebení břitu nástroje, množství energie potřebné k odřezání dané vrstvy materiálu, teplota řezání, druh a tvar třísek. [1]

Absolutní obrobiteľnosť môžeme rozdeliť na obrobiteľnosť *kinetickou, dynamickou a mikrogeometrickou*. Pri určovaní kinetické obrobiteľnosti materiálov nástrojom z RO sa využíva údaj zvaný katastrofálna opotrebenie, ktoré nastáva po dosahení určitého priemeru pri soustružení. Mierou dynamické obrobiteľnosti sú rezná sila, krútiaci moment alebo výkon potrebný k úberu obrábaného materiálu a teplo. Mikrogeometrická obrobiteľnosť má význam najmä pri dokončovacích operáciách, pretože na ňu závisí kvalita obrábaného materiálu a presnosť lineárnych rozmerov. [2]

## 1.2 Obrobiteľnosť pryží

Elastomery (prírodná a syntetická pryž) sú zmesou amorfných polymerov a ďalších prísad. Vulkanizáciou sa z týchto materiálov vzniká "pryž, guma, vulkanizát". Tieto materiály nie sú len pružné, ale vďaka svojej viskoelastickej povahe sú schopné pohlcovať kinetickú energiu. V tlaku a smyku vykazujú relatívne vysokú pevnosť. Stejnako ako u iných materiálov môže u nich dôjsť k materiálnej únave a jej následnému porušeniu. Je možné definovať vlastnosti tohto materiálu a využiť numerické systémy na analýzu jeho správania. Pre tieto účely je potrebná dostupnosť materiálových hodnôt ako i okrajové podmienky prípadného výpočtu a analýzy. [12]

Výrobky z pryže sa vyrábajú rôznymi technológiami. V prvej rade sú to technológie diskontinuálne, zahŕňajúce výrobu lisovaním, pri použití polotovarov pripravených niektorou technológiou napr. válcovaním, vytlačovaním apod. z kaučukovej zmesi a vstříkovaním, s následujícím jej dělením na polotovary, ktoré sú vkládané do dutiny formy. Ve druhej rade sa jedná o polotovary, ktoré sú predem pripravené ako kompozit technológiami konfekcionovania. Takto vyrobené konfekčné polotovary sú pak vulkanizované vo forme vo vulkanizačnom lisu, alebo sú vyrábané na modeli, pri výrobe výrobkov technológiami bandážovania a vulkanizované napr. v kotli, alebo autoklávu. [20]

Výrobné technológie kontinuálne zahŕňajú najmä výrobu desiek, fólií, profilov apod. kedy výrobné zariadenie tvorí výrobnú linku zahŕňajúcu výrobu polotovaru s následnou vulkanizáciou vo vulkanizačných linkách, rôzneho provedenia a rôzneho spôsobu dodania tepla

kaučukové směsi, výroba profilů a pásů, dále průběžné vulkanizační lisy rotační, deska a folie a v neposlední řadě se jedná o lisování v krocích, výroba dopravních pásů.

Gumárenské výrobky se dají vyrábět několika základními způsoby, z nichž nejpoužívanější jsou:

- *lisování*
- *přetlačování*
- *vstřikování*
- *vytlačování s následnou vulkanizací*
- *další metody (natírání, máčení, válcování, atd.)*

[20]

## 2 TŘENÍ A OPOTŘEBENÍ PRYŽOVÝCH MATERIÁLŮ

Třením se zabývali lidé pravděpodobně už od nejranější historie lidstva, kdy zkoušeli přemísťovat různá tělesa a snažili se ulehčit si práci tím, že nejrůznějšími postupy a metodami snižovali třecí odpor. [17]

### 2.1 Rozdělení tření

Obecně lze najít několik různých druhů rozdělení tření, nejčastěji se vyskytující základní rozdělení je:

- *dle druhu pohybu*
- *dle stavu kontaktních ploch*
- *dle místa působení třecích mechanismů*

#### ***Dle druhu pohybu***

- kluzné tření (popřípadě smykové), je vyhodnoceno součinitelem tření jako bezrozměrné veličiny, dané poměrem tangenciální třecí síly a zatěžovací normálové síly (podíl energie potřebné na vyrovnání třecích ztrát z celkové energie přivedené do systému)
- valivé tření, jde o tření při rotačním pohybu tělesa se zakřiveným profilem po rovině nebo jiné obecně zakřivené ploše
- tření opásáním – nazýváme též jako tření Eulerovo

#### ***Dle stavu kontaktních ploch***

- tření tuhých těles, dotykové materiálové plochy jsou v tuhém skupenství
- kapalinové tření, kontaktní vrstvy, ve kterých probíhá tření, mají vlastnosti kapaliny
- plynné tření, viz. kapalinové, jen charakteristické vrstvy mají vlastnosti plynu
- plazmatické tření, třecí proces má vlastnosti plazmy, tedy vysoce ionizovaného plynu

#### ***Dle místa působení třecích ploch***

- vnější tření, třecí mechanismy působí mezi dvěma tělesy
- vnitřní tření, třecí mechanismy působí mezi materiálovými vrstvami jednoho tělesa

## 2.2 Tření pryží

Hlavní překážkou v pochopení frikčních vlastností pneumatik je fakt, že neexistuje adekvátní, široce platný a jasně vyjádřený zákon tření pryže. Existují však modely základního frikčního procesu a základního chování pneumatiky.

Dalším problémem je nepřesnost terminologie užívané při popisu frikčních procesů. Tento problém pravděpodobně z obecné tendence označovat všechny poměry záběrové síly k síle normálové jako koeficienty tření, ať dochází ke skluzu, či nikoliv.

Neexistuje pryž, která by vykazovala velké tření na všech površích za všech podmínek. Vliv základního polymeru a přísad na frikční vlastnosti závisí i na řadě dalších faktorů určujících charakter procesu klouzání, a to na materiálu druhého povrchu, typu maziva a zatížení. [13]

### 2.2.1 Klasifikace tření pryže

Definice, které následují, jsou uvedeny ke zpřesnění široce užívaného výrazu „koeficient tření“.

- a) Klasický koeficient tření je definován jako rovný  $F_S/F_W$ , kde  $F_S$  je síla tangenciální ke styčnému povrchu, která při působení na tuhé těleso iniciuje nebo udrží jeho klouzání,  $F_W$  je normálová síla ke styčné ploše, která drží klouzající členy ve styku.
- b) Neobjeví-li se skluz v žádném bodě, lze aplikovat  $F$  v tangenciálním směru ke styčnému povrchu na perfektně tuhé těleso tak, že na rozhraní vzniká uniformní trakční napětí  $\tau$ .
- c) Síla  $F_P$ , tangenciální ke styčnému povrchu, může být aplikována na ohebné těleso, jako nerotující pneumatika, což vyvolává nerovnoměrnou distribuci trakčních napětí na rozhraní.
- d) Pro válení zatížené pneumatiky na rovném povrchu je zapotřebí síly  $F_r$ . Nepůsobí-li další síla, nazývá se tato forma pohybu volné válení.
- e) Kontrolní síla  $F_c$ , ať již brzdná, záběrová nebo boční, může být aplikována na rotující pneumatiku. [13]

### 2.2.2 Složky tření pryže

Tření pryže na běžných površích lze rozdělit na čtyři složky. Názvy těchto složek nejsou dosud pevně zakotveny. Jejich rozlišení je přehlednější ve výrazech třecí síly  $F$  než při použití koeficientu tření:

$$F_{\text{celková}} = F_{\text{ad(hézní)}} + F_{\text{def(ormáční)}} + F_{\text{vis(kózní)}} + F_{\text{tr(hání)}}. \quad (1)$$

Adhezní složka tření je výsledkem silných mezifázových vazeb v malých lokálních místech kontaktu mezi dvěma povrchy. Deformační složka je brzdná síla vznikající při klouzání pryžového vzorku po perfektně namazaném povrchu. Tato složka tření je nevýznamná, dokud nedojde ke skluzu. Viskózní složka třecí síly je vyvolávána přítomností vrstvičky kapaliny mezi pneumatikou a vozovkou. Předpokládá se, že tato vrstva je dostatečně silná, aby význačně snížila přímou vazbu nebo adhezi pryže pneumatiky a materiálu vozovky. Složka trhání je složka tření, která někdy může vznikat, když jsou od pryže odtrhávány tuhé kousky. [13]

### 2.3 Opotřebení

Opotřebení je nežádoucí změna povrchu nebo rozměru tuhých těles, způsobena buď vzájemným působením funkčních povrchů a média, které opotřebování vyvolává a nebo se projevuje jako odstraňování nebo přemísťování částic hmoty z funkčního povrchu mechanickými účinky popřípadě doprovázenými i jinými vlivy, např. chemickými nebo elektrochemickými. [18]

***Velikost opotřebení je určována:***

- druhem a povahou tření
- velikostí měrného tlaku mezi stýkajícími se plochami a povahou, jakou má působící zatížení
- rychlostí, s jakou se po sobě přemísťují třecí dvojce a způsobem jak se rychlost mění v čase
- způsobem přívodu, množstvím a jakostí maziva
- teplotními podmínkami
- korodujícími účinky
- přítomností brusných látek, jejich jakostí a rozměry

- stupněm a způsobem, jak se odstraňují zplodiny opotřebení
- tvarem a rozměry třecích dvojic, jimiž jsou určovány podmínky tření, chlazení, přívodu maziva
- počátečním stavem povrchů
- fyzikálně – mechanickými, chemickými a fyzikálně – chemickými vlastnostmi třecích dvojic

[17]

### 2.3.1 Hlavní typy opotřebení

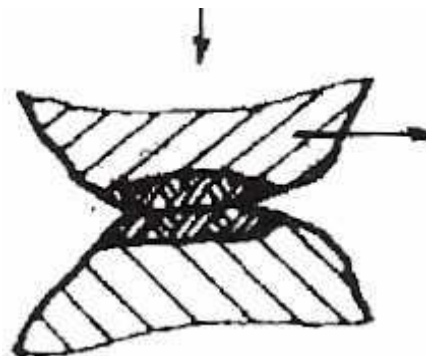
#### *Adhezivní opotřebení*

Adheze způsobuje těsné přilnutí a vznik mikrosvářů, které při pohybu vznikají a vzápětí se porušují. Adhezní síly způsobují vytrhávání částic z funkčního povrchu. Je-li mezi funkčními povrchy mazivo, může dojít k oddělení kovových povrchů, čímž se proces opotřebení zastaví.

Příklad výskytu je například při nízkých teplotách u obrábění. Vyskytuje se na čele břitu nástroje. Může vzniknout jak u obrábění ocelí s tvorbou dlouhé třísky, tak i u materiálů s krátkou třískou.

Charakteristickou vlastností adhezivního opotřebení je přenos materiálu z jednoho povrchu na druhý a naopak. Intenzivní forma adhezivních účinků je nazývána zadírání.

[17]



Obr. 1 Adhezivní opotřebení

#### *Abrazivní opotřebení*

Oddělování částic z funkčního povrchu je způsobeno účinkem tvrdého a drsného druhého tělesa nebo tvrdých částic, které se dostaly mezi funkční povrchy. Typickým poškozením jsou rýhy na povrchu. Mnohdy se volné částice zamáčkou do měkkého povrchu a rýhují tvrdší povrch.

[17]

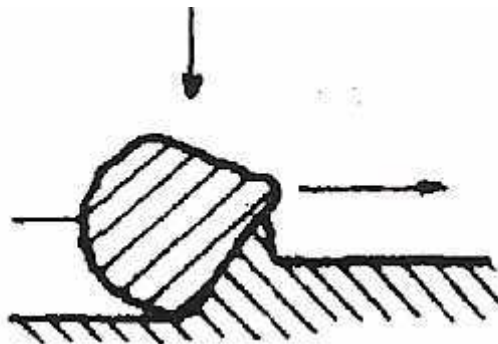
Abrazivní opotřebování se vyskytuje často u zpracovatelských strojů na zpracování polymerů. U těchto strojů dochází vlivem plniv často k silným abrazivním účinkům.

Výskyt je významný především při nízkých řezných rychlostech, kdy se oba materiály stýkají na vrcholcích mikronerovností.

***U abraze rozlišujeme prakticky dva případy:***

- opotřebovávají-li tvrdé částice jeden funkční povrch, jde o interakci dvou těles (částic) a součástí
- abrazivní opotřebování částicemi, které jsou mezi dvěma funkčními povrchy

U druhého bodu jde tedy o interakci tří těles. Dochází k tomu obecně prakticky u všech pohybových mechanismů do nichž vnikají částice z okolí. Tak je tomu i při opotřebování vodících ploch šnekových strojů pracujících s plněnými plasty, kde dochází k výrazné plastické deformaci povrchových vrstev materiálu. [17]



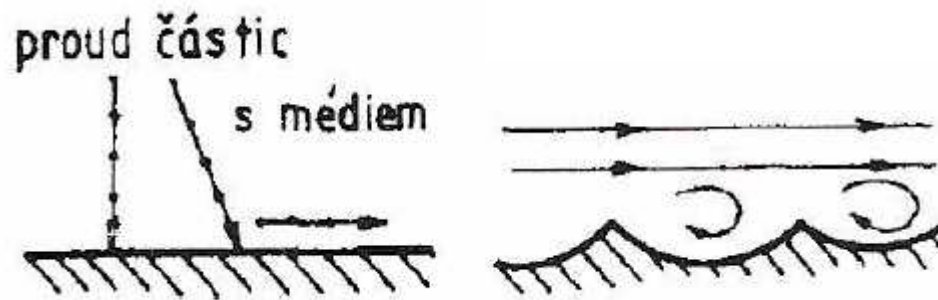
*Obr. 2 Abrazivní opotřebování*

***Erozivní opotřebování***

Poškozování povrchu se děje účinkem částic, které jsou unášeny proudem nějakého média (kapalina, plyn).

Problémy erozivního opotřebování jsou obvykle vyvolány malými částicemi, které však mohou mít vlivem vlastní rychlosti či rychlosti nosného média velkou nárazovou energii, a tedy i velký účinek v mikroobjemech na funkčním povrchu. Pro erozivní opotřebování je typické obvykle nepravidelné erozivní zvrásnění. Tento druh opotřebování může vzniknout například v tekutinových mechanismech. [17]

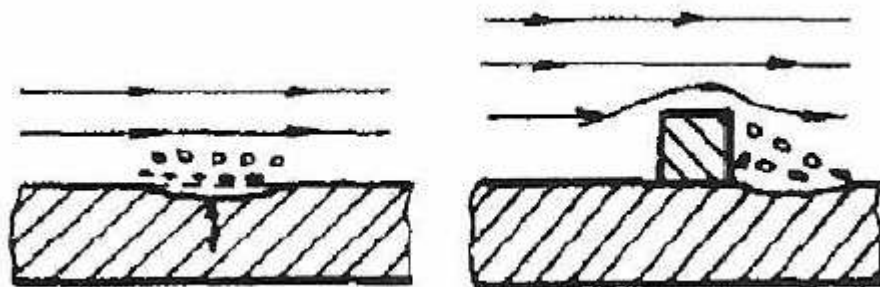




Obr. 3 Erozivní opotřebení

### ***Kavitační opotřebení***

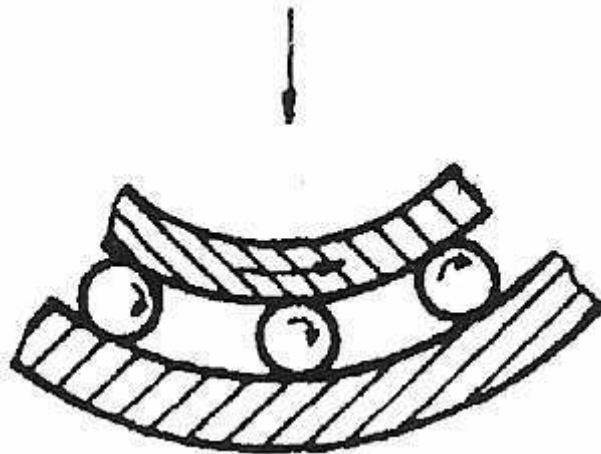
Vzniká rovněž v tekutinových mechanismech a to v místech s náhlou změnou průřezu. V zúženém průřezu vzrůstá rychlost proudění a současně klesá tlak. Pokles tlaku kapaliny má za následek uvolňování bublinek páry a nebo rozpouštěných plynů. Za překážkou ve zvětšeném průřezu tlak opět vzroste a bublinky zanikají, což způsobuje rázy a tím poškozování povrchu. Dané opotřebení je spojeno s vytrháváním částic z povrchu. [17]



Obr. 4 Kavitační opotřebení

### ***Únavové opotřebení***

Vzniká u součástí s cyklickým zatěžováním povrchu velkými tlaky. Jsou to např. funkční plochy valivých ložisek a boků zubů ozubených kol. Proces únavy materiálu v povrchové vrstvě vede ke vzniku trhlin pod povrchem a postupně k oddělování částic materiálu, takže na kontaktní ploše vznikají dolíčky. Tento jev se nazývá pitting. [17]

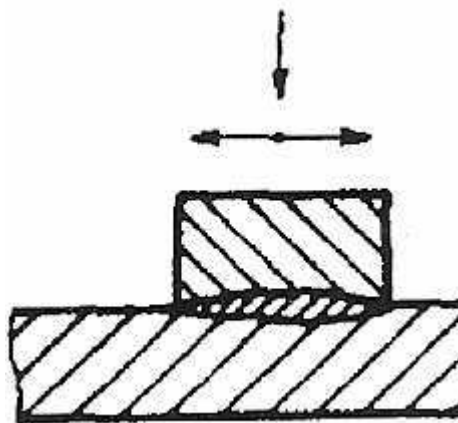


Obr. 5 Únavové opotřebení

### **Vibrační opotřebení**

Je charakterizováno oddělováním částic vzájemnými kmitavými tangenciálními posuny funkčních povrchů s amplitudou několik desítek mikrometru při působení normálního zatížení. Při tak malých posuvech je odstraňování opotřebovaných částic značně ztíženo.

Vibračním opotřebováním tedy vznikají částice, které svým vzhledem připomínají produkty koroze. Tyto částice působí silně abrazivně a jejich působením dochází k poruchám velmi tvrdých povrchových vrstev. [17]



Obr. 6 Vibrační opotřebení

### 3 BROUŠENÍ

#### 3.1 Názvosloví běžných brousicích způsobů

Brousicí proces se uskutečňuje různými metodami, které se definují pro vhodná kritéria. Příslušné technologické charakteristiky se k těmto metodám vztahují.

Podle tvaru obrobeného povrchu a způsobu jeho vytváření se rozlišují:

- *rovinné broušení* (výsledkem je rovinná plocha),
- *broušení do kulata* (výsledkem je rotační povrch),
- *broušení na otáčivém stole* (broušení s rotačním posuvem),
- *tvarovací broušení* (broušení závitů, ozubených kol apod.),
- *kopírovací broušení* (broušení s řízenou změnou posuvu, NC stroje),
- *broušení tvarovými brousicími kotouči* (profil brousicího kotouče určuje konečný profil obrobku).

Podle aktivní části brousicího kotouče se specifikuje:

- *obvodové broušení* (broušení obvodem kotouče),
- *čelní broušení* (broušení čelem kotouče kolmým k jeho ose).

Podle vzájemné polohy brousicího kotouče a obrobku se charakterizuje:

- *vnější broušení* (broušení vnějšího povrchu obrobku),
- *vnitřní broušení* (broušení vnitřního povrchu obrobku).

Podle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k brousicímu kotouči se definuje:

- *axiální broušení* (hlavní posuv stolu je rovnoběžný s osou kotouče),
- *tangenciální broušení* (hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě D (*obr. 7*)),
- *radiální broušení* (hlavní posuv stolu ve zvoleném bodě D (*obr. 7*) je radiální vzhledem ke kotouči),
- *obvodové zápichové broušení* (posuv stolu je plynulý radiální),

- *čelní zápichové broušení* (posuv stolu je plynule axiální).

[1]

Vybrané způsoby obvodového a čelního broušení jsou uvedeny na *obr. 7*.

		Brúsenie					
		obvodové			čelné		
		radiálne	tangenciálne	axiálne	radiálne	tangenciálne	axiálne
rovinné	pramočiarový						
	otáčavý						
Brúsenie do okrúhla	vonkajšie						
	vnútorné						
tvarové	kopirovacie						
	profilové						

Obr. 7 Vybrané způsoby obvodového a čelního broušení

[10]

$n_s$  – frekvence otáčení broušícího broušení

$n_w$  – frekvence otáčení obrobku

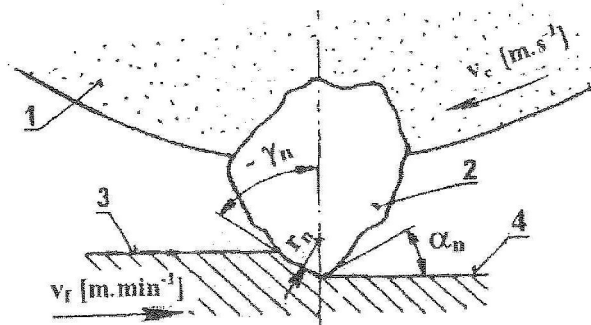
$v_{fa}$  – axiální rychlost posuvu stolu

$v_{fr}$  – radiální rychlost posuvu stolu

$v_{ft}$  – tangenciální rychlost posuvu stolu

### 3.2 Tvorba třísky

Broušení jako obráběcí metoda je charakterizováno specifickými podmínkami tvorby třísky a vzniku obrobeného povrchu. V důsledku velkých plastických deformací a vnějšího i vnitřního tření se určitá část třísky ohřeje natolik, že se roztaví a vytvoří kapky kovu nebo skoří (jiskření). Model záběru vázaného zrna brusiva je na obr. 8. [1]



Obr. 8 Model záběru broušícího zrna

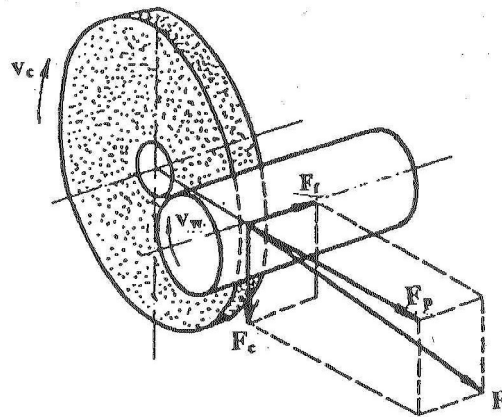
$v_c$  – řezná rychlost,  $v_f$  – posuvová rychlost,  $\gamma_n$  – normální úhel čela,  $\alpha_n$  – normální úhel čela,  $r_n$  – poloměr zaoblání ostří, 1 – broušící kotouč, 2 – broušící zrno, 3 – obráběná plocha, 4 – obrobená plocha

### 3.3 Řezné síly

Celková řezná síla  $F$  působící v obecném směru mezi broušícím kotoučem a obrobkem se rozkládá do tří vzájemně kolmých směrů. Ve směru řezné rychlosti leží řezná síla  $F_c$ , pasivní síla  $F_p$  je kolmá k broušené ploše a posuvová síla  $F_f$  působí ve směru podélného posuvu, tzn. kolmo na rovinu otáčení kotouče.

Při broušení platí, že  $F_p > F_c > F_f$  a  $F_p / F_c = 1,2 - 3$ .

[1]



Obr. 9 Rozložení řezných sil při obvodovém axiálním broušení do kulata

Velikost řezných sil závisí zejména na způsobu broušení a na průřezu třísky, dále na zrnitosti brusiva, druhu a tvrdosti pojiva a struktuře broušícího kotouče. S otupováním broušícího kotouče může vzrůst řezná síla až několikanásobně. [1]

### 3.4 Základní metody broušení

Řezné vlastnosti brusného kotouče závisí od jeho zrnitosti, která je definována jako desetina rozměru zrn hlavní frakce rozměrem zrna.

Obvodová rychlost brusného kotouče má výrazný vliv na drsnost povrchu. V důsledku chaotického rozmístění zrn při druhém přechodu kotouče po broušeném povrchu se zrna stýkají s neodřezanými částicemi kovu, řežou nové drážky a snižují nerovnost povrchu.

Drsnost povrchu při broušení závisí výrazně na hloubce řezu. Při zvětšující se hloubce řezu výrazně roste nerovnost povrchu. [3]

Hloubka řezu při broušení se nachází v následovních mezích:

	<b>Hrubování</b>	<b>Dokončování</b>
- žíhaná ocel:	0,015 – 0,07 mm	0,005 – 0,015 mm
- kalená ocel:	0,01 – 0,06	0,005 – 0,06
- litina:	0,02 – 0,08	0,005 – 0,018

Řezná rychlost ( $v_c$ ) má následovný vliv. Při zvětšování  $v_c$  se posuv na zrno zmenšuje. Jestliže označíme  $f_z$  posuv na zrno, mm,  $z$  – počet zubů na obvodě kotouče,  $v_o$  = ob-

vodová (resp. lineární) rychlost obrobku a  $n_k$  – frekvence otáčení kotouče,  $\text{min}^{-1}$ , dostaneme:

$$f_z = \frac{1000 \cdot v_o}{n_k \cdot z} \quad \text{platí též:} \quad (2)$$

$$n_k = \frac{1000 \cdot v_{CK} \cdot 60}{\pi \cdot D_K} \quad \text{po dosazení dostaneme:} \quad (3)$$

$$f_z = \frac{D_K}{19 \cdot z} \cdot \frac{v_o}{v_{CK}} \quad (4)$$

Ze vztahu plyne, že se zvětšování obvodové rychlosti brusného kotouče klesá posuv na zrno. Proto na zabezpečení dobré kvality broušeného povrchu je potřeba zvětšovat obvodovou rychlost kotouče. Běžné obvodové rychlosti brusných kotoučů jsou v *tab. 1*. [3]

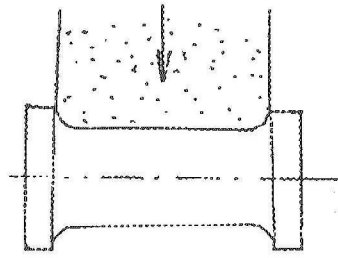
*Tab. 1 Obvodové rychlosti běžných brusných kotoučů*

Obráběný mat.	$v_{ck}$	$v_{ck}$
	hrubovací broušení	dokončovací broušení
Litina	18 – 23 $\text{m.s}^{-1}$	20 – 25
Nekalená ocel	25 – 30	30 – 40
Kalená ocel	25 – 30	30 – 40

[6]

### 3.4.1 Radiální a hloubkové broušení

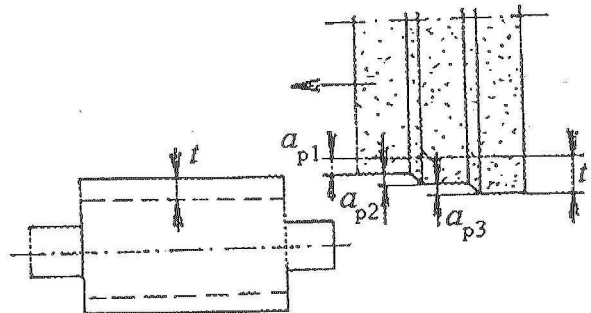
Radiální broušení se používá při broušení krátkých součástek s dostatečně velikým průměrem a tuhostí. Broušení se realizuje bez podélného posuvu, přičemž šířka kotouče odpovídá délce obrobku. [3]



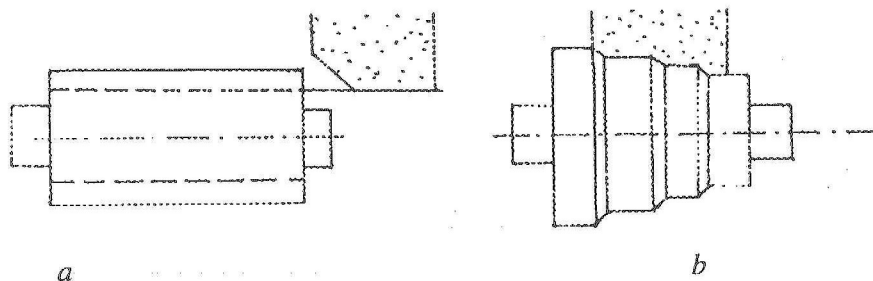
Obr. 10 Princip radiálního (zapichovacího) broušení

Kotouč má jen radiální posuv, který závisí na stabilitě obrobku a požadované kvalitě povrchu. Tak se brousí např. čepy zalomených hřídelů. Je potřeba poznamenat, že při „vřezávacím“ broušení je nebezpečností modifikace povrchové vrstvy, protože dochází k intenzivnějšímu ohřevu, jako při podélném broušení. [3]

Hlubkové broušení značně zvyšuje produktivitu broušení. Jeho podstata spočívá v tom, že brusný kotouč má stupínky (obr. 11), nebo zešikmení (obr. 12a). Je možná i kombinace obou způsobů (obr. 12b). [3]



Obr. 11 Hlubkové broušení odstupňovaným kotoučem



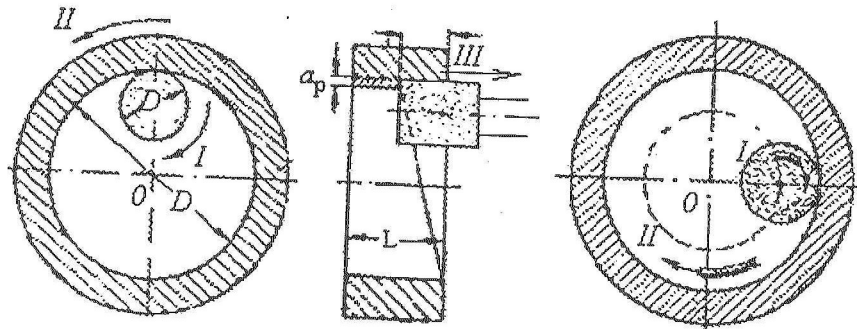
Obr. 12 Hlubkové broušení zešikmeným kotoučem (a) a kombinovaným kotoučem (b)



### 3.4.2 Broušení vnitřních rotačních ploch

Broušení vnitřních rotačních ploch je znázorněno na *obr. 13*. Obrobek A rotuje ve směru II a současně posouvá ve směru III. Brusný kotouč rotuje okolo své osy ve směru I.

[3]



*Obr. 13* Vnitřní broušení. a – s rotací obrobku, b – s planetovou rotací brusného kotouče

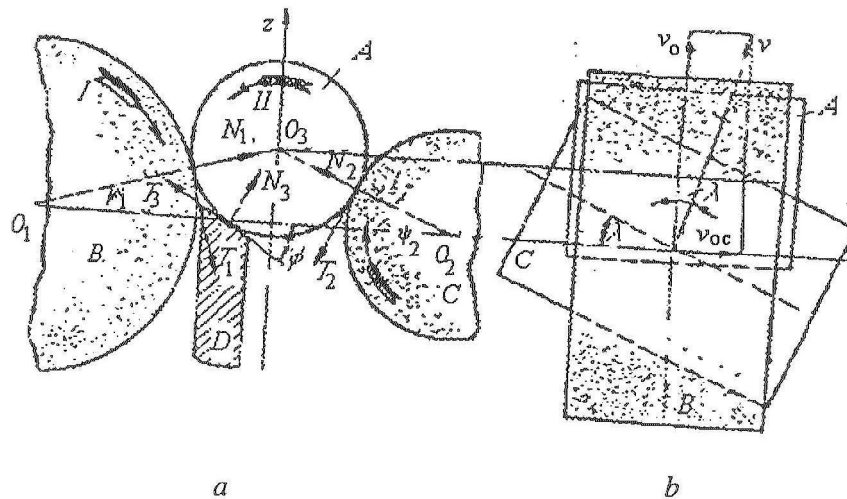
Pohyby nástroje a obrobku jsou charakterizované veličinami:  $v_o$ ,  $v_k$ ,  $a_p$ ,  $f$ . Jejich úloha je stejná jak při vnějším broušení. Podmínky při vnitřním broušení jsou náročnější, jak při vnějším (větší délka styku kotouče s obráběnou plochou, malá stabilita brusného vřetena v důsledku jeho malého průměru). Obvodová rychlost brusného kotouče  $v_k$  se volí v mezích  $10 - 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  v závislosti na průměru kotouče.

[3]

### 3.4.3 Bezhroté broušení

Myšlenka bezhrotého broušení spočívá v tom, že obrobek je uložený mezi dvěma kotouči, z kterých jeden je brusný a druhý je vodící. Os unášecího kotouče je umístěna mimoběžně k osy brusného kotouče. Má tvar rotačního hyperboloidu (vzniká horizontálním orovnááním šikmo umístěného kotouče). Obrobek se opírá o opěrku, které horní plocha je skloněná pod úhlem horizontu. Princip je na *obr. 14*.

[3]



Obr. 14 Bezhruté broušení

Na obrázku je:

- A je obrobek, kterého střed je umístěn vyšší od spojnice středů kotoučů,
- B brusný kotouč, rotující ve směru I rychlostí  $v_k = 30 - 40 \text{ m.s}^{-1}$ ,
- C vodící kotouč, který rotuje rychlostí  $v_k = 10 - 80 \text{ m.min}^{-1}$  v stejném směru, jako brusný kotouč. Os unášecího kotouče je skloněna k osy brusného kotouče pod úhlem  $\lambda$ . Tento úhel se může měnit v mezích  $1,5 - 6^\circ$  v závislosti na velikosti podélného posuvu,
- D lišta, které horní plocha je skloněná pod úhlem  $\varnothing = 30 - 60^\circ$ . Základní myšlenka tohoto uspořádání je v tom, že unášecí úhel dává obrobku rotační a translační pohyb ve směru osy brusného kotouče. [3]

Z obr. 14b je vidět, že při uhle sklonu vodícího kotouče  $\lambda$ , obvodová a osová rychlost obrobku se určí vztahy:

$$\begin{aligned} v_o &= v \cdot \cos \lambda \\ v_{oc} &= v \cdot \sin \lambda \end{aligned} \quad (5, 6)$$

nebo:

$$v_o = \frac{\pi \cdot D_V \cdot n_V}{1000} \cdot \cos \lambda, \text{ m. min}^{-1} \quad (7)$$

a osová rychlost:

$$v_{oc} = \pi \cdot D_V \cdot n_V \cdot \sin \lambda, \text{ m. min}^{-1}. \quad (8)$$

Počet otáček za min:

$$n_0 = \frac{1000 \cdot v_v \cdot \cos \lambda}{\pi \cdot d_0} \quad (9)$$

Podélný posuv na otáčku obrobku:

$$f = \frac{v_{os}}{n_0} = \pi \cdot d_0 \cdot \operatorname{tg} \lambda, \text{ mm.} \quad (10)$$

[3]

### 3.4.4 Rovinné broušení

Schéma rovinného broušení je na *obr. 15*. Je to analogický případ broušení rotační plochy. Prvky, které charakterizují proces obrábění jsou:

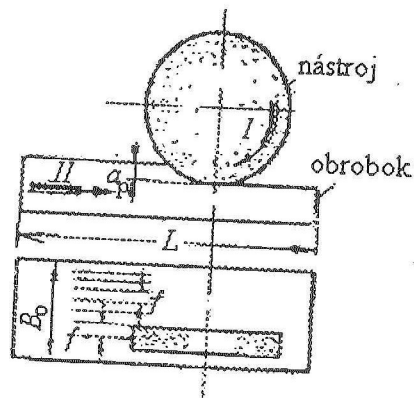
$v_k$  – obvodová rychlost kotouče

$a_p$  – hloubka řezu

$v_o$  – obvodová rychlost obrobku

$f$  – podélný posuv, mm (na otáčku a chod)

[3]



*Obr. 15 Schéma rovinného broušení*

Strojový čas se určí z *obr. 9* následovně:

$$\tau_s = \frac{B_0 \cdot L \cdot a_p \cdot k}{1000 \cdot v_o \cdot f} [\text{min}] \quad (11)$$

[3]

### 3.4.5 Rovinné broušení čelem kotouče

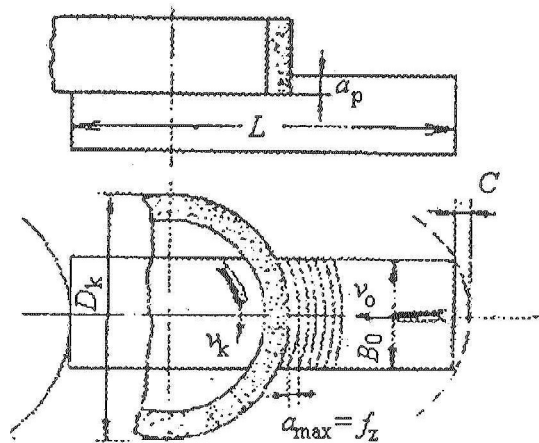
Schéma je na *obr. 16*. Činnost brusného kotouče je analogická čelní frézy. Parametry, které charakterizují proces broušení jsou:

$v_k$  – obvodová rychlost brusného kotouče

$a_p$  – hloubka řezu

$v_o$  – obvodová rychlost obrobku

[3]



*Obr. 16 Schéma rovinného broušení čelem kotouče*

Strojový čas se určí ze vztahu:

$$\tau_o = \frac{(L + C) \cdot a_p \cdot k}{1000 \cdot v_o \cdot f} \quad (12)$$

### 3.4.6 Broušení brusným pásem

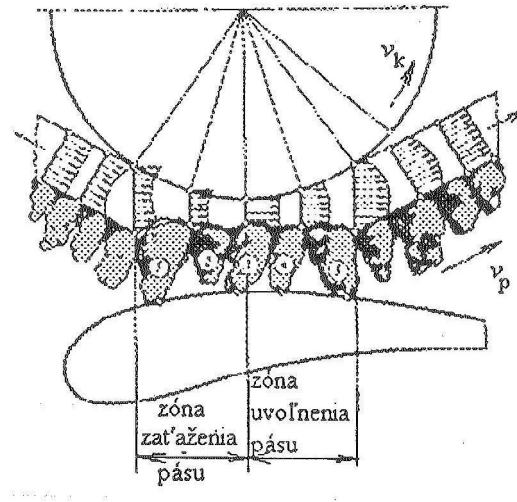
Rozvoj broušení pásem byl motivován snahou o zvýšení produktivity dokončování povrchů hlavně tvarových součástí. Brusný pás má oproti kotouči výhodu, že se pružně přizpůsobí tvaru obráběné plochy. [3]

Výhody broušení pásem v porovnání s brusným kotoučem možno formulovat následovně:

- větší objem odebraného kovu za stejný čas broušení
- možnost obrábění tenkostěnných součástek složitého tvaru
- použití jednoduchých upínacích přípravků

- minimální ohřev povrchové vrstvy
- rychlá výměna nástroje
- dobrá stabilita procesu broušení

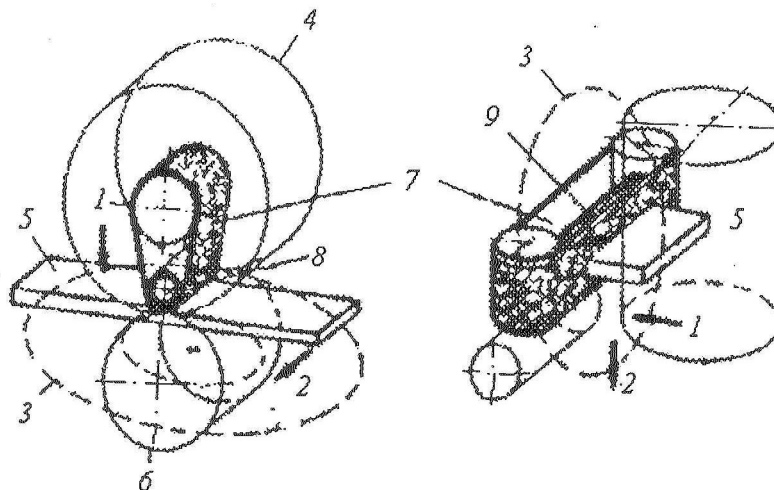
[3]



Obr. 17 Schéma nerovnomerní deformací abrazivního pásu při broušení lopatky plynové turbíny. 1-5 jednotlivé zrna pásu

Při broušení pásem s obrobkem kontaktuje volný pás, pás s opěrkou tvaru válečka nebo smýkadlo (obr. 18).

[3]

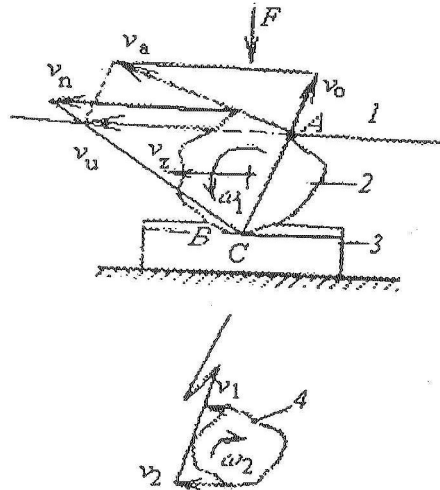


Obr. 18 Způsoby broušení pásem

1 – radiální, 2 – podélné, 3 – s kruhovým posuvem, 4 – vnitřní broušení, 5 – broušení na plocho, 6 – vnější broušení, 7 – brusný pás, 8 – kontaktní váleček, 9 – kontaktní smýkadlo

### 3.4.7 Broušení volným brusivem

Proces dokončovacího obrábění volným brusivem je fyzikálně složitý proces, který obsahuje odřezání třísky a deformaci povrchu. Volné brusné zrnko vykonává složitý rotační pohyb okolo horizontální a vertikální osy. [3]

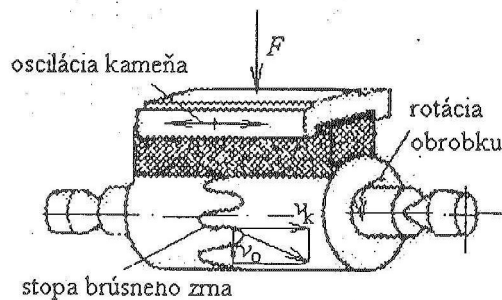


Obr. 19 Schéma práce volného brusného zrna při dokončování povrchu

Hloubka zpevnění povrchu roste se zmenšováním tvrdosti obráběného materiálu a se zvětšováním přítláčné síly. Drsnost broušeného povrchu roste se snižováním pevnosti materiálu, protože zrna pronikají hlouběji do povrchu obrobku. [3]

### 3.4.8 Dokončování brusnými kameny

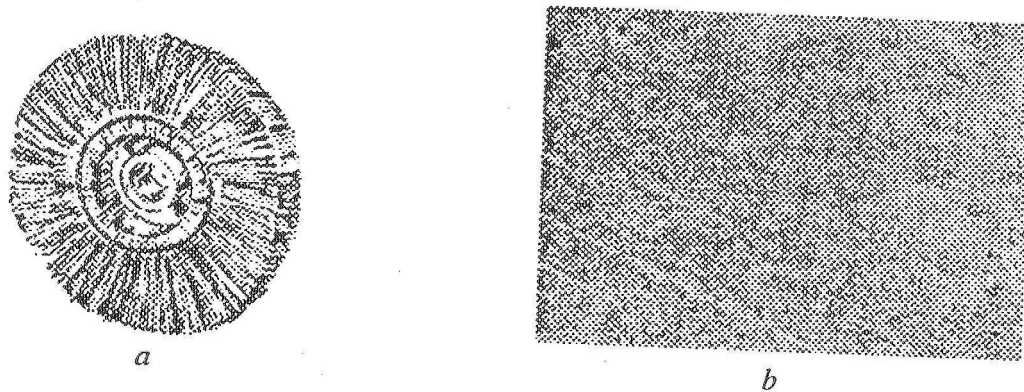
Jsou to technologické procesy, které by bylo možné nazvat mikrobroušení malou řeznou rychlostí. Patří sem hlavně superfinišování a honování. Základní schéma superfinišování je na obr. 20. [3]



Obr. 20 Schéma superfinišování vnější válcové plochy

### 3.4.9 Leštění a lapování

Jsou to způsoby jemného broušení, realizované za přítomnosti brusiva, nebo bez nich. Při leštění se používají rotující leštící kotouče, které umožňují zasahovat aj nerovné povrchy součástek. Na rozdíl od brusných a plstěných kotoučů vynikají vysokou pružností a umožňují brousit zaoblení, rohy a povrchy složitých obtížně přístupných tvarů. [3]



Obr. 21 Lístkový leštící kotouč (a) a pohled na vyleštěný povrch (b)

### 3.5 Brousící nástroje

Nástroje na broušení jsou brousící kotouče, segmenty, kameny a pásy (stále častěji v některých případech nahrazují broušení brousícími kotouči), obsahující zrna brusiva ve vhodném pojivu. [4]

#### **Zrna brusiva jsou:**

- volná (brousící a leštící pasty a prášky)
- vázaná
  - a) v tuhých nebo pružných tělesech (brousící kotouče, brousící tělíska, superfinišovací a honovací kameny, brousící a obtahovací kameny a segmenty, apod.)
  - b) nanesená a zakotvená na brousících páslech a brousících a leštících plátnech a papírech.

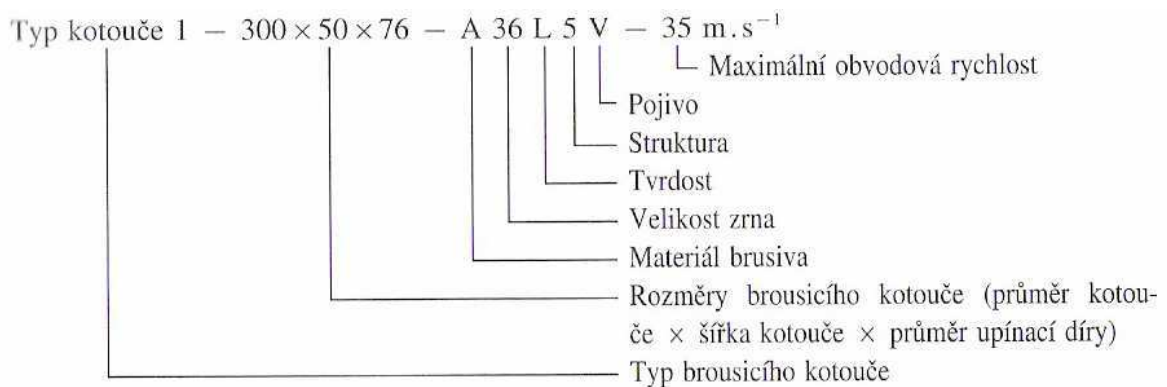
Výhodou vlastností brousících nástrojů je tzv. samoostření. Při vhodně zvoleném nástroji a řezných podmínkách dochází vlivem otupování zrn k růstu řezné síly a k vylamování opotřebených zrn nástroje. Tím se odkryjí nová, ostrá zrna brusiva.

Nejčastěji používanými brousícími nástroji jsou brousící kotouče nejrůznějších tvarů a velikostí.

*Charakteristické vlastnosti kotouče jsou dány jeho označením, které obsahuje:*

- *typ brousícího kotouče* (tvar a rozměry),
- *druh brousícího materiálu*,
- *zrnitost* – velikost zrna je dána číslem, které odpovídá počtu ok na délku jednoho anglického palce toho síta, jímž při třídění ještě zrno propadne. Velikost zrna se označuje čísly od nejhrubšího po nejjemnější:  
 hrubá 4, 5, 6, ..., 24                      střední 30, 36, 40, ..., 60  
 jemná 70, 80, ..., 180                      velmi jemná 220, 240, ..., 1200.
- *tvrdost* – stupeň tvrdosti je definován jako odpor, který klade zrno proti vylomení z brousícího nástroje. Tvrdost kotouče je označována písmeny A až Z, přičemž A je nejměkčí a Z nejtvrdší.
- *strukturu* – označuje se čísly od 1 do 14, čím je číslo vyšší, tím je vzdálenost mezi zrny větší, velmi hutná (1-2), hutná (3-4), polo hutná (5-6), pórovitá (7-8), velmi pórovitá (9-10), zvlášť pórovitá (11-13).
- *druh pojiva* – keramická (označení V), pryžová (R), z umělé pryskyřice (B), atd.
- *maximální pracovní rychlost kotouče.*

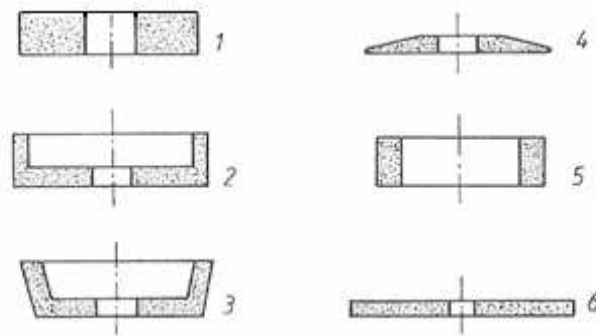
[5]



*Obr. 22 Příklad označení brousícího kotouče*

Příklady tvaru brousících kotoučů jsou na *obr. 23*.





Obr. 23 Označování tvarů brousících kotoučů

1 – plochý, 2 – hrncový, 3 – miskový, 4 – kuželový, 5 – prstencový, 6 - řezací [5]

### 3.5.1 Druhy opotřebení brousícího nástroje

Vlastnosti brousících kotoučů kromě použitého řezného materiálu významnou mírou ovlivňuje druh a vlastnosti použitého pojiva. Pojivo má významnou funkci při opotřebení a obnovení brousícího nástroje. V praxi se často střetáváme s případem, že použitý brousící materiál má vysokou odolnost proti opotřebení a navzdory tomu se brousící kotouč intenzivně opotřebuje.

Je známé, že při broušení mnohých materiálů kotouči z diamantů nebo kubického nitridu bóru se v třískách objevuje až 90 % zrn východiskové zrnitosti. To znamená, že opotřebení brousícího kotouče při těchto podmínkách probíhá zejména porušováním pojiva a vytrháváním celých brousících zrn z kotouče. [8]

V závislosti na vlastnosti obráběného materiálu, technických charakteristik brousícího nástroje, řezných podmínek, způsobu ostření, probíhá opotřebení brousícího kotouče v důsledku:

- převládajícího otupování brousících hran zrn
- opotřebení řezných hran s částečným samoostřením
- převládající samoostření
- adhezní zářezy a nalepování obráběného materiálu na pracovní povrch brousícího kotouče

### 3.5.2 Odolnost brousících nástrojů proti opotřebení

Na hodnocení efektivnosti pojiva a jeho kvality je třeba mít především údaje o odolnosti brousících materiálů proti opotřebení při definovaných řezných podmínkách. Obvykle se s tímto cílem vykonávají zkoušky mikrořezání jednotlivými brousícími zrn. Experimenty umožňují samostatně, bez přítomnosti pojiva hodnotit řezné vlastnosti brousících zrn. Třeba upozornit, že podmínky zkoušek nejsou v plné míře identické reálným podmínkám broušení.

Při mikrořezání se brousící zrno obvykle upevňuje v držáku z plastického kovu. Při mikrořezání se interakce mezi zrnem a obráběným materiálem uskutečňuje se značně menšími pružnými deformacemi, jak při broušení konkrétním brousícím kotoučem. To dává vhodnější podmínky pro práci brousících zrn, rozložených na pracovním povrchu brousícího kotouče. Porovnání odolnosti proti opotřebení jednotlivých brousících zrn a zrn vázaných v kotouči ukázalo, že při vázaných zrnech je odolnost o 10 až 30 % vyšší.

Při experimentech mikrořezání se řezná rychlost měnila v rozsahu 1 až 45 m.s<sup>-1</sup>, a to v podstatě zahrnuje všechny operace opotřebení, začínající dokončovacemi a končící broušením. Zkoušelo se na bruskách a frézkách s možností změny řezné rychlosti v potřebném rozsahu, přičemž změnou posuvu je možné dosáhnout konstantní tloušťky odřezávané vrstvy.

Jako brousící materiál se použil diamant, elektrokorund, karbid křemíku, kubický nitrid bóru, spékaný korund, spékané karbidy, karbidy a silicidy a řadu těžko tavitelných kovů. Po upevnění zrna se brousily do kužele s vrcholovým úhlem 100°, co odpovídá středním hodnotám tohoto úhlu, měřeném na reálném kotouči. Protože zrna měly pravidelný geometrický tvar, bylo možné měřit opotřebený objem hmotnost brousícího materiálu s velkou přesností. Velikost radiálního opotřebení zrna byla identifikována na profil projektor s 20 a 50 násobným zvětšením. [9]

*Uražená dráha zrnem se určila ze závislosti:*

$$L_p = n_k \cdot L_k \cdot \tau \quad (13)$$

Kde:  $n_k$  - je frekvence rotace

$L_k$  - délka kontaktu brousícího zrna s obráběným materiálem

$\tau$  - čas řezání

Maximální tloušťka odřezávané vrstvy byla 6 až 10  $\mu\text{m}$  a délka kontaktu 3,5 mm. Nástrojem byla broušena drážka, z jeho profilu se identifikoval objem odřezávaného materiálu. [10]

Na hodnocení odolnosti proti opotřebení brousícího materiálu se určil **koeficient broušení**:

$$K_b = \frac{V_m}{V_b} \quad (14)$$

Kde:  $V_m$  a  $V_b$  jsou objemy úderu obráběného a broušeného materiálu. [11]

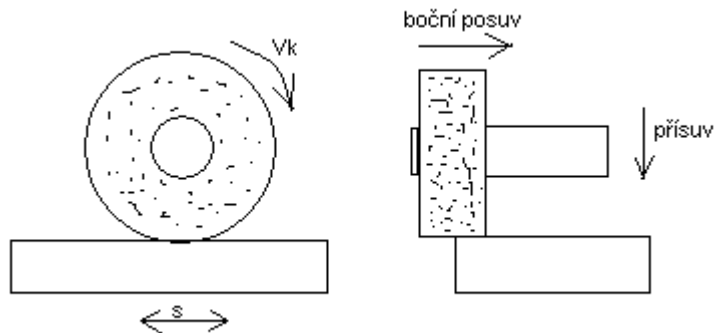
### 3.6 Brousící stroje

Brousící stroje slouží jednak k obrábění předmětů, jednak k ostření nástrojů. Podle způsobu práce rozeznáváme brousící stroje obráběcí:

- k broušení ploch rovinných,
- k broušení ploch rotačních,
- univerzální,
- speciální.

Při broušení koná hlavní pohyb do řezu nástroj (brus), posuv do záběru koná zpravidla obrobek, někdy též nástroj. [6]

Stroje k broušení rovinných ploch mají vřetenou vodorovnou nebo svislou a brousí buď obvodem, nebo čelem brusného kotouče. Princip rovinného broušení je na obr. 24. [6]

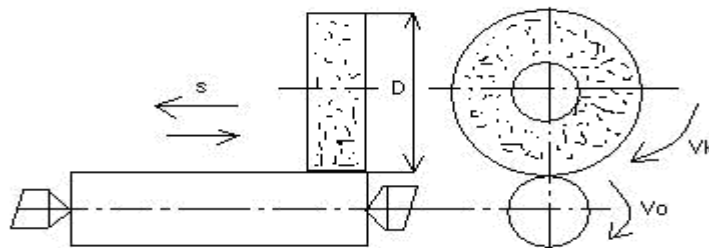


Obr. 24 Broušení rovinných ploch obvodem kotouče

$v_k$  – obvodová rychlost kotouče,  $s$  – přímočarý posuv stolu

**Vodorovná rovinná bruska** brousí obvodem brusného kotouče. Vřeteník je výškově hrubě přestavitelný a jemně nastavitelný k zabránění další třísky. Obrobek koná podélné i příčné podávací pohyby se stolem uloženým na příčných saních. Podávací pohyby jsou omezeny a řízeny narážkami. Menší ploché předměty upínáme prostřednictvím magnetické desky připevněné ke stolu, větší obrobky upínáme přímo na stůl upínkami a upínacími šrouby. [6]

**Stroje k broušení rotačních ploch** jsou buď **hrotové** nebo **bezhruté**, sloužící k vnějšímu broušení, nebo jsou to **stroje k vnitřnímu broušení**. Vnitřní plochy brousíme dvojím způsobem. Malé obrobky přitom konají rotační podávací pohyb a brusný kotouč koná hlavní pohyb, podávací pohyb ve směru své osy a přísuvný pohyb. Velké obrobky upínáme nehybně a brusný kotouč koná všechny potřebné pohyby pomocí **planetového vřetena**. Princip broušení vnějších a vnitřních válcových ploch je na *obr. 25* a *26*, na *obr. 27* je princip bezhrutého broušení. [6]



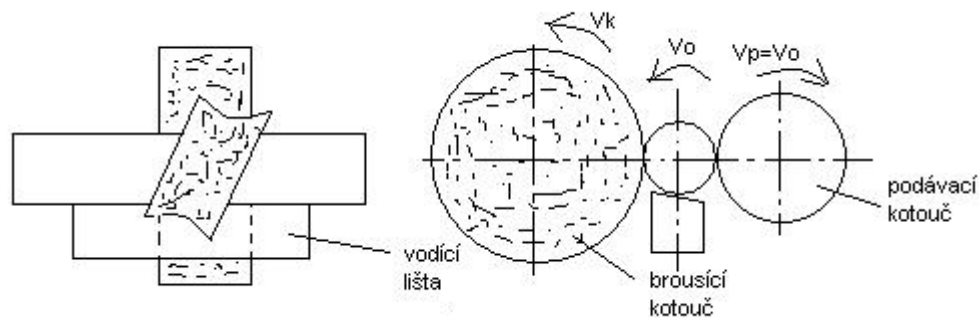
*Obr. 25 Podélné broušení válcových ploch*

$v_k$  – obvodová rychlost kotouče,  $v_o$  – obvodová rychlost obrobku,  $s$  – přímočarý posuv stolu,  $D$  – průměr brousícího kotouče



*Obr. 26 Planetové broušení*

$v_k$  – obvodová rychlost kotouče,  $v_o$  – obvodová rychlost obrobku



Obr. 27 Bezhroté broušení

$v_k$  – obvodová rychlost kotouče,  $v_o$  – obvodová rychlost obrobku,  $v_k$  – obvodová rychlost podávacího kotouče

**Univerzální hrotová bruska** se liší od jednoduché tím, že její stůl lze pootočit ve vodorovné poloze o  $10^\circ$  na obě strany k broušení táhlých kuželů a vřeteníky můžeme natočit až o  $90^\circ$  k broušení krátkých a strmých kuželů. Stroj je vybaven též zařízením pro vnitřní broušení. [6]

**Speciální brousící obráběcí stroje** jsou především **brusky na závity**, na **ozubená kola** a podobně. [6]

### 3.7 Dokončovací způsoby obrábění

#### 3.7.1 Jemné broušení

Opatřebení součástí, které se po sobě třou je zaviněno daleko více drsností třecích ploch, než jejich malou tvrdostí. Proto se snažíme dosáhnout co největší hladkosti těchto ploch, a to různými způsoby jemného broušení jako dokončovacího způsobu obrábění.

**Leštění** je nejjednodušším způsobem jemného broušení, při němž záleží jen na dosažení velké hladkosti, popřípadě vysokého lesku povrchu obrobku, bez zřetele na dodržení přesného tvaru a rozměru. Zpravidla leštíme kotouči nebo bezkonečnými pásy, jejichž povrch je polepen vrstvou jemného brusného prášku nebo pro nejjemnější leštění plstí. Leštíme buď nasucho, nebo s použitím leštící pasty.

**Lapování** je vyhlazování povrchu předmětu volnými, velmi jemnými brusnými zrnky, rozptýlenými v oleji nebo petroleji, popřípadě obsaženými v lapovací pastě. Brusná

zrnka přitlačujeme k lapovanému povrchu měděnými nebo litinovými lapovacími trny, kroužky, objímkami, deskami apod., které se otáčejí, popřípadě i kmitají. Lapujeme plochy obrobků, u nichž vedle hladkosti povrchu záleží i na přesnosti tvaru a rozměru.

**Honování** slouží k jemnému broušení válcových děr. Nástrojem jsou velmi jemné brusné kameny vložené do drážek honovací hlavice, která se při honování otáčí a zároveň koná vratný pohyb ve směru své osy.

**Superfinišování** je velmi jemné hlazení povrchu předem již jemně obrobeného. Nástrojem jsou velmi jemné brusné kameny, které konají rychlé kmitavé pohyby a jsou mírně přitlačovány k povrchu obrobku, který při tom koná zpravidla rotační pohyb. Tímto způsobem můžeme dokončovat plochy válcové, kuželové i rovinné. Pracovní cyklus trvá jen asi 20 až 60 vteřin. [6]

### 3.8 Brousící látky

**Přírodních brusů** zhotovených z pískovce používáme již jen málokdy. K strojnímu broušení používáme výhradně **brusů umělých**, zhotovených z brusných látek buď přírodních (smírek, korund), nebo umělých (umělý korund, karbid křemíku – karborundum, karbid bóru). Tvrdost těchto brusných látek, zejména umělých, je velká (blíží se tvrdosti diamantu).

**Brousící látky** se třídí podle velikosti zrna a označují se čísly 4 až 600. Menšímu číslu odpovídá hrubší zrno. Těmito čísly se také označuje hrubost brousících látek nebo brusů z nich zhotovených.

Zrněného brusného materiálu používáme buď přímo k ručnímu broušení a zabrušování, nebo k výrobě brusného plátna a hlavně k výrobě brusů. K tomuto účelu mísíme brusný materiál se spojovací látkou v těsto, z něhož lisujeme brusy různých tvarů. Ty pak sušíme a vypalujeme.

Spojovací látka je buď **minerální** (vodní sklo apod.), **rostlinná** (olej, šelak, pryž, celuloid apod.), nebo **keramická** (žáruvzdorné látky hlinité s přídavkem skla a porcelánu). Nejvíce používáme brusů vázaných keramickou spojovací látkou, neboť jsou velmi pórovité a dobře vzdorují vodě, oleji a teplu. Na tvrdosti a pevnosti spojovací látky záleží tvrdost brusů, kterou označujeme písmeny velké abecedy F až Z. Písmeno Z označuje největší tvrdost.

**Jakost brusu** je určena **druhem brusné látky, velikostí jejího zrna a tvrdostí.**

K jemnému broušení používáme brusů s jemnějším zrnem než k broušení hrubému. Tvrdost brusu volíme podle tvrdosti broušeného materiálu, podle velikosti styčné plochy, v níž se brus stýká s broušeným materiálem, a podle velikosti obvodové rychlosti brusů. Měkkých brusů použijeme k broušení tvrdých materiálů, nebo když jde o velké styčné plochy a velké obvodové rychlosti. V opačných případech použijeme brusů tvrdších.

Na povrchu brusů jsou ostrými hranami brusných zrn vytvořeny břity, které při broušení odbírají z materiálu jemné třísky. Zrnka s otupenými břity se vylamují a místo nich nastupují nová s ostrými břity (opotrebování – ubývání brusů). Z měkkých brusů se vylamují otupená zrnka snáze než z tvrdých.

Broušením můžeme opracovat všechny druhy materiálů, i kalené oceli, sklo, porcelán aj. Dosahujeme jím velmi přesných rozměrů a hladkých povrchů obrobků. Účinnost a přesnost broušení zvýšíme orovnááním zalepených nebo nestejně opotřebovaných brusů **diamantovými, ocelovými nebo karborundovými orovnávači.**

Před nepříznivým účinkem tepla, vzniklého při broušení, chráníme obrobek i brusný kotouč **chlazením**. Používáme k tomu zpravidla asi 5% směsi vrtacího oleje s vodou. Proud chladící tekutiny zároveň splachuje vzniklý brusný prach.

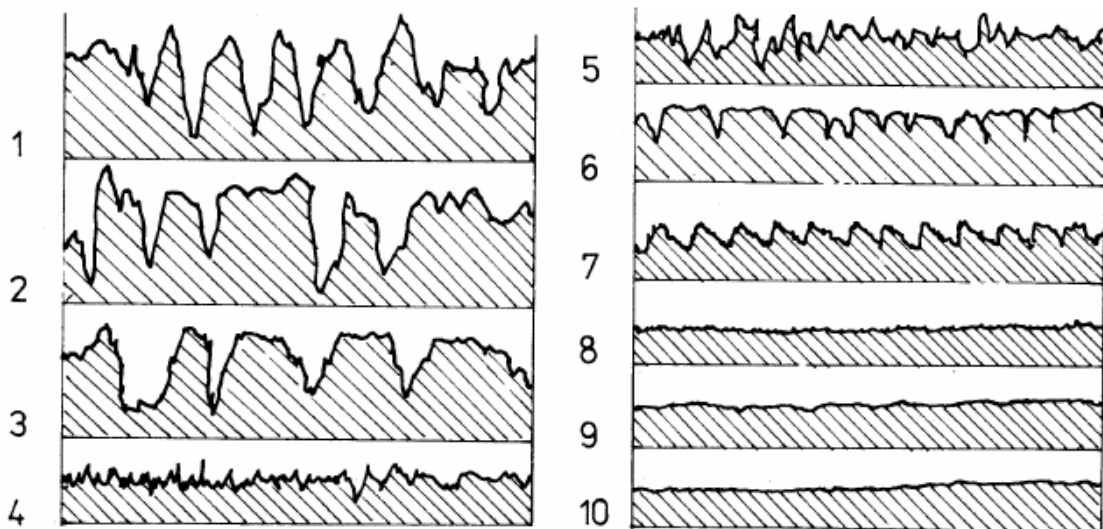
Aby se zabránilo úrazům, způsobeným roztrženým kotoučem, jsou kotouče opatřeny **ochrannými kryty**, které jsou u malých kotoučů litinové nebo plechové, u velkých kotoučů z **vlnitého plechu**.

[6]

## 4 HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU

Drsnost povrchu definovanou na výkrese, můžeme považovat za limitní hodnotu, která se má v technologickém procesu obrábění dosáhnout. Jednoduchý geometrický přístup k identifikaci makrogeometrie obrobeneho povrchu vychází z kopírování tvaru řezného klínu na obrobeneý povrch. [7]

Při obrábění nástroji, které mají více řezných klínů, je výsledná drsnost povrchu určena dalšími vlivy jako je házení frézy a přesazení jednotlivých zubů při frézování, velikost a poloha jednotlivých zrn na brousícím kotouči. U některých druhů obrábění např. při zapichovacím soustružení tvarovými noži, je výsledná drsnost daná kopírováním nerovností řezné hrany nástroje. [7]



Obr. 28 Profil obrobeneho povrchu při různých metodách obrábění

1 – soustružení, 2 – vrtání, 3 – frézování, 4 – broušení, 5 – vystružování, 6 – protahování, 7 – soustružení diamantem, 8 – honování, 9 – lapování, 10 – superfinišování

Obrobeneý povrch se vždy odchyluje od ideální drsnosti a ideálního geometrického tvaru.

**Při posuzování jakosti povrchu součástí rozlišujeme:**

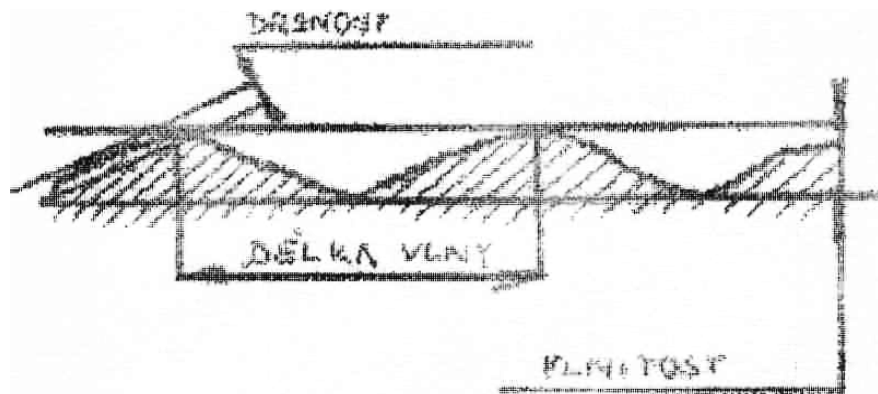
- druh povrchu
- vlnitost (rovinnost) povrchu
- drsnost povrchu



**Drsnost povrchu** může být neopracovaný (odlitý, kovaný, lisovaný, válcovaný apod.), opracovaný (soustružený, frézovaný, broušený aj.), popř. jinak upravený.

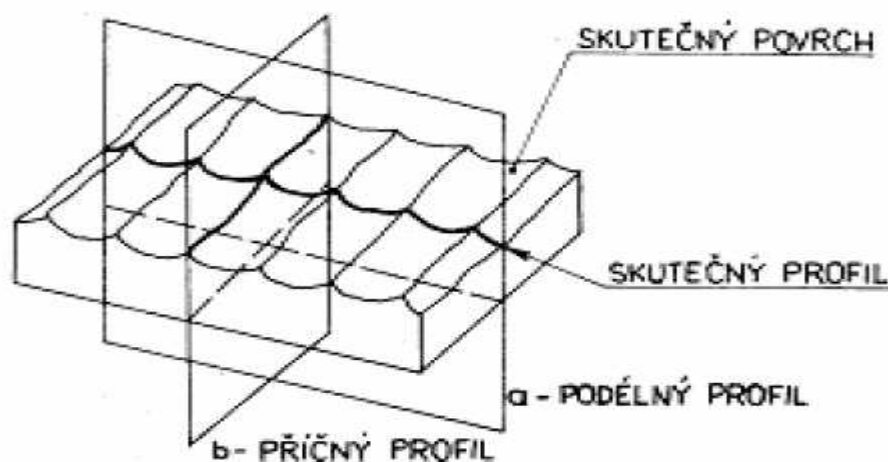
**Vlnitost povrchu** je nepravidelnost povrchu, která není způsobená jen obráběcím nástrojem nebo strojem, ale společným působením soustavy stroj – nástroj – obrobek. Posuzujeme ji podle toho, jak byl dodržen předepsaný geometrický tvar plochy v celém jejím rozsahu.

**Drsností povrchu** se nazývají rozměrově nepatrné nepravidelnosti povrchu (vyvýšeniny, prohlubně, důlky, rýhy apod.). Drsnost povrchu posuzujeme podle druhu, vzhledu a hloubky stop, které zůstanou na povrchu součásti po nástroji při obrábění. [7]



Obr. 29 Nerovnosti povrchu

Při praktickém hodnocení drsnosti povrchu je nutno rozlišovat drsnost podélnou a drsnost příčnou. [7]



Obr. 30 Příčná a podélná drsnost

Při sledování skutečného procesu vytváření obrobeného povrchu můžeme zjistit, že nejde o jednoduché kopírování tvaru řezného klínu. Při sledování stop po nástroji vznikají důsledkem jeho posuvu vlivem plastické deformace třísky výrobku, které jsou orientované podél obou řezných hran. Toto vytlačení materiálu souvisí se specifickou formou opotřebení nože, při kterém se na vedlejší řezné hraně a hrotě vytváří jeden nebo více žlábků.

***Existuje několik teorií, které vysvětlují vznik těchto žlábků:***

- a) zvýšení tvrdosti materiálu na obrobené ploše v důsledku zpevnění, čímž se zvětšuje abrazivní účinek na nůž při další otáčce obrobku
- b) přetrhnutí žlábků opotřebením na čele směrem k vedlejší řezné hraně
- c) oxidace povrchu v zóně dotyku ohřátého výrobku a nástroje s atmosférou
- d) zvětšení výšky stop po hrotě v důsledku vytlačení kovu v procesu tvoření třísky.

Při vytváření žlábků na vedlejší hraně nože jeho hloubka roste na určitou hodnotu a potom se stabilizuje. Žlábků jsou navzájem vzdálené o posuv. Při vytvoření prvního žlábků na noži drsnost obrobené plochy prudce poklesne a stabilizuje se v okamžiku, kdy žlábek dosáhne maxima. Zvětšování počtu žlábků se na drsnosti povrchu projevuje málo. [7]

## **4.1 Charakteristiky drsnosti povrchu a tvaru profilu**

***Charakteristiky drsnosti povrchu se volí z následujících veličin:***

*Rz* – největší výška profilu

*Ra* – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu

*RSm* – průměrná šířka prvků profilu

*Rmr* – materiálový poměr profilu (nosný podíl)

[7]

Tab. 2 Drsnost povrchů obroběných rovinných ploch

Výrobní metoda	Drsnost povrchu Ra [ $\mu\text{m}$ ]
<b>HOBLOVÁNÍ</b>	
hrubování	25 - 100
načisto	3,2 - 12,5
jemné	0,8 - 1,6
<b>FRÉZOVÁNÍ</b>	
<b>válcovou frézou</b>	
hrubování	12,5 - 50
načisto	1,6 - 6,3
<b>frézovací hlavou</b>	
hrubování	12,5 - 50
načisto	0,8 - 6,3
<b>jemné frézování</b>	
nástroj SK	0,4 - 1,6
<b>BROUŠENÍ</b>	
nahrubo	1,6 - 3,2
načisto	0,4 - 1,6
jemné	0,025 - 0,4
<b>LAPOVÁNÍ</b>	
načisto	0,1 - 0,4
jemné	0,012 - 0,05
<b>LEŠTĚNÍ</b>	
	0,012 - 0,2
<b>ZAŠKRABÁVÁNÍ</b>	
	0,2 - 0,8
<b>PROTAHOVÁNÍ</b>	
hrubování	0,8 - 3,2
načisto	0,1 - 0,8

## 4.2 Měření drsnosti povrchu

Drsnost povrchu se určuje přímým nebo nepřímým měřením profilu přístroji různé konstrukce i různé přesnosti.

*Metody měření jsou:*

- kvalitativní a subjektivní porovnání drsnosti povrchu se vzorky povrchů nebo etalony vzorkovnic
- kvantitativní, tj. určení číselných hodnot drsnosti v parametrech podle norem ( $R_a$ ,  $R_z$ )
- souhrnná kontrola povrchu, kdy hodnoty drsnosti se určují z profilové křivky [7]

## 4.3 Kvantitativní metody

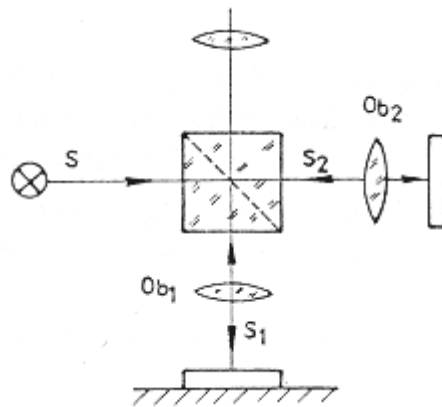
*Používané přístroje pracují způsobem:*

- bezdotykovým (optické bezdotykové přístroje)
- dotykovým (elektronické dotykové přístroje)

*Bezdotykovým způsobem měří zejména přístroje:*

- založené na metodě světelného (šikmého) řezu
- využívající interference světla [7]

Pro velmi jemně obrobené povrchy se používá metoda interferenční a přístroje se nazývají **interferenční mikroskopy**. Paprsek jde ze zdroje světla na polo průchodné zrcadlo vytvořené ve skleněném hranolu, kdy se rozděluje ve dva dílčí paprsky. Jeden paprsek  $S_1$  jde na povrch měřené součásti a zpět. Druhý dílčí paprsek  $S_2$  jde na odrazné zrcadlo, kde se odrazí zpět. Oba dílčí paprsky se spojují v dělicí ploše a jdou do okuláru mikroskopu. [7]



Obr. 31 Interferenční mikroskop

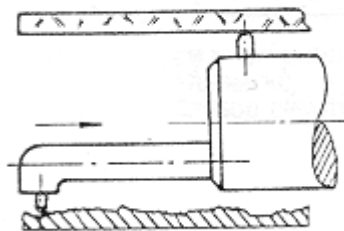
#### 4.4 Dotykový způsob – dotykové profilometry

Skládají se z mechanické a elektronické části. Mechanickou část tvoří stolek pro uložení měřené součásti a stojan se zařízením, v němž je uchyceno rameno se snímačem. Základním prvkem přístroje je snímač s diamantovým hrotem, který se motoricky posunuje po kontrolovaném povrchu a snímá jeho nepravidelnosti. Pohyby hrotu se přeměňují na elektrický signál, který se zapisuje a vyhodnocuje v integračním a zesilovacím přístroji, který ukazuje posunutí diamantového hrotu na určité délce, v zapisovacím zařízení, které provádí grafický záznam profilu povrchu v určitém měřítku.

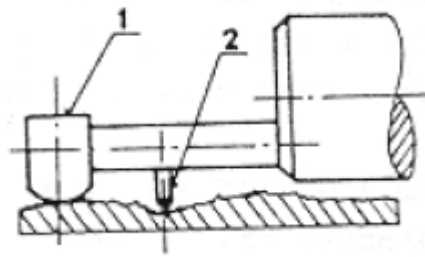
**Používají se dva typy snímačů:**

- absolutní
- relativní

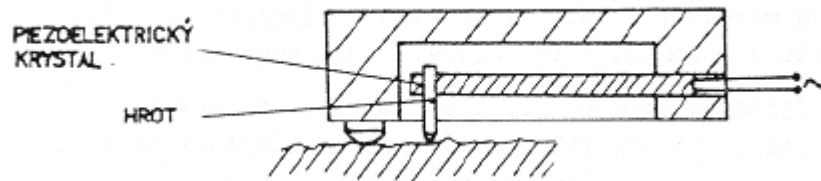
Při absolutním měření se do měřené hodnoty promítají drsnost i vlnitost povrchu, popř. i úchyly přímosti. [7]



Obr. 32 Schéma absolutního snímače



Obr. 33 Schéma relativního snímače



Obr. 34 Princip piezoelektrického snímače

## 5 TVRDOST POVRCHU MATERIÁLU

### 5.1 Tvrdost

Tvrdost lze definovat jako odolnost materiálu (povrchu materiálu v měřené lokalitě) proti místní deformaci vyvozené konkrétním zatěžovacím tělesem (vnikajícím tělesem - indentorem) přesného geometrického tvaru působením přesně definovaného zatížení. Mírou tvrdosti je konkrétní velikost trvalé plastické deformace.

Tvrdost však není žádnou fyzikálně definovatelnou vlastností, nýbrž je výslednicí celé řady vlastností hmoty, a to zejména vlastností povrchu. [14]

Zkoušky tvrdosti rozdělujeme na zkoušky vrypové, vnikací a odrazové. Dále na statické (Brinell, Vickers, Rockwell) a dynamické (Poldi kladívko, Baumannovo kladívko, Shoreho skleroskop, duroskop, ...). [15]

### 5.2 Tvrdost Shore

#### 5.2.1 Popis zkoušky

Existuje celá řada přístrojů tohoto typu lišících se rozsahy. V ČR se nejvíce používá přístroje typu A a D. Tyto tvrdoměry jsou založeny na zatěžování pomocí pružin, které je nutné před měřením kontrolovat a cejchovat.

Měření tvrdosti Shore D se podle normy ISO ČSN používá v případech, kdy tvrdost daného materiálu překračuje 85 jednotek stupnice Shore A. [16]

#### 5.2.2 Podstata zkoušky

Podstatou zkoušky je měření odporu proti vlačování hrotu předepsaného tvaru do zkoušeného materiálu. Odpor, který pryž klade se zajišťuje pomocí pružiny. Tvrdost je nepřímo úměrná vniku ocelového hrotu do zkoušeného materiálu a závisí na modulu pružnosti a viskoelastickém stavu vulkanizátu. Vyjadřuje se v jednotkách Shore A. [16]

### 5.2.3 Zkušební těleso

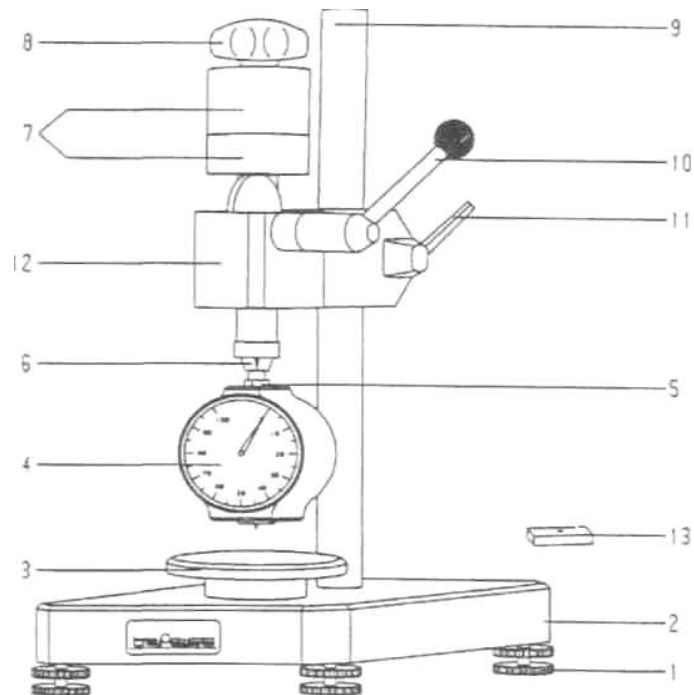
Zkušební těleso musí být hladké, rovné a bez viditelných defektů. Velikost se musí volit tak, aby jednotlivá měření byla v místech vzdálených nejméně 12 mm od okraje a od sebe vzdálených nejméně 5 mm. Tloušťka musí být nejméně 6 mm, při tvrdosti nad 50 Shore D může být 3 mm. Zkušební těleso je možné složit z několika tenčích vrstev, aby se požadované tloušťky dosáhlo. Vzhledem k tomu, že nelze vždy dosáhnout dokonalého kontaktu mezi jednotlivými vrstvami, nemusí se výsledky měření na vícevrstvých zkušebních tělesech shodovat s výsledky na zkušebních tělesech z jednoho kusu.

Přítlačná síla tvrdoměru je vyvozována ocelovou pružinou, která se unavuje a považuje se v měřicí technice za nespolehlivý prvek. Při častém používání dochází také k obroušování hrany čidla a k jeho poškození při manipulaci. Výhoda tvaru čidla spočívá v tom, že vztah mezi hloubkou deformace  $h$  a  $\log E$  je lineární. [16]

### 5.2.4 Postup zkoušky

Při měření se postupuje tím způsobem, že se tvrdoměr přiloží na zkušební těleso tak, aby patka pevně přisedla po celé ploše. Zkušební těleso se položí na opěrnou podložku, přitlačí na měřicí hlavu a po stanoveném času působení přítlačné síly se odečte údaj o tvrdosti. Tvrdost se odečítá na stupnici tvrdoměru za  $15 \pm 1$  sekunda, výsledná hodnota je aritmetický průměr pěti naměřených hodnot. Zatížení je vyvozováno pomocí závaží. U některých přístrojů jsou zamontovány vibrátory, které během 3 sekund urychlují dosažení rovnovážné hodnoty. Zkušební tělesa mají mít tloušťku minimálně 6 mm. Měření se provádí 12 mm od kraje a nejméně 5 mm od sebe. Tloušťka při tvrdosti nad 50 Shore D může být i 3 mm. Hodnota tvrdosti se odečítá za 15 sekund po přiložení tvrdoměru. Výsledkem zkoušky je aritmetický průměr z 5 měření. [16]





Obr. 35 Schéma měřícího přístroje Shore

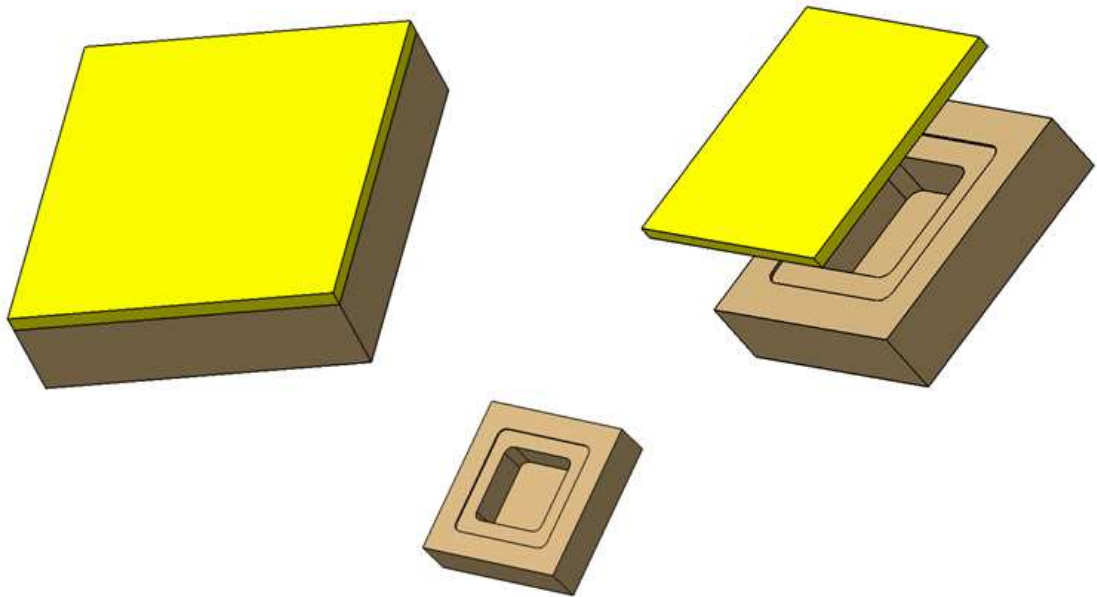
1 – rýhovaná patka, 2 – hliníkový podstavec, 3 – měřicí stůl, 4 – číselníkový úchylkoměr, 5 – kloubová upínka, 6 – svírací kleština, 7 – závaží, 8 – matice, 9 – vodící sloupek, 10 – spouštěcí páka, 11 – zajišťovací páka, 12 – posuvný držák, 13 – kalibrační vzorek, 14 – demontovatelné závaží

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 KONSTRUKCE FORMY PRO VULKANIZACI PRYŽOVÝCH VZORKŮ

### 6.1 3D model formy


Pro vulkanizaci pryžových vzorků byl navržen 3D model formy (*obr. 36*) v programu CATIA V5 R18, dle rozměrů které byly zvoleny vzhledem k budoucímu tvaru výlisků, vnější rozměr 100 x 100 mm a vnitřní 50 x 50 mm.



*Obr. 36 3D model formy*

### 6.2 Výroba formy

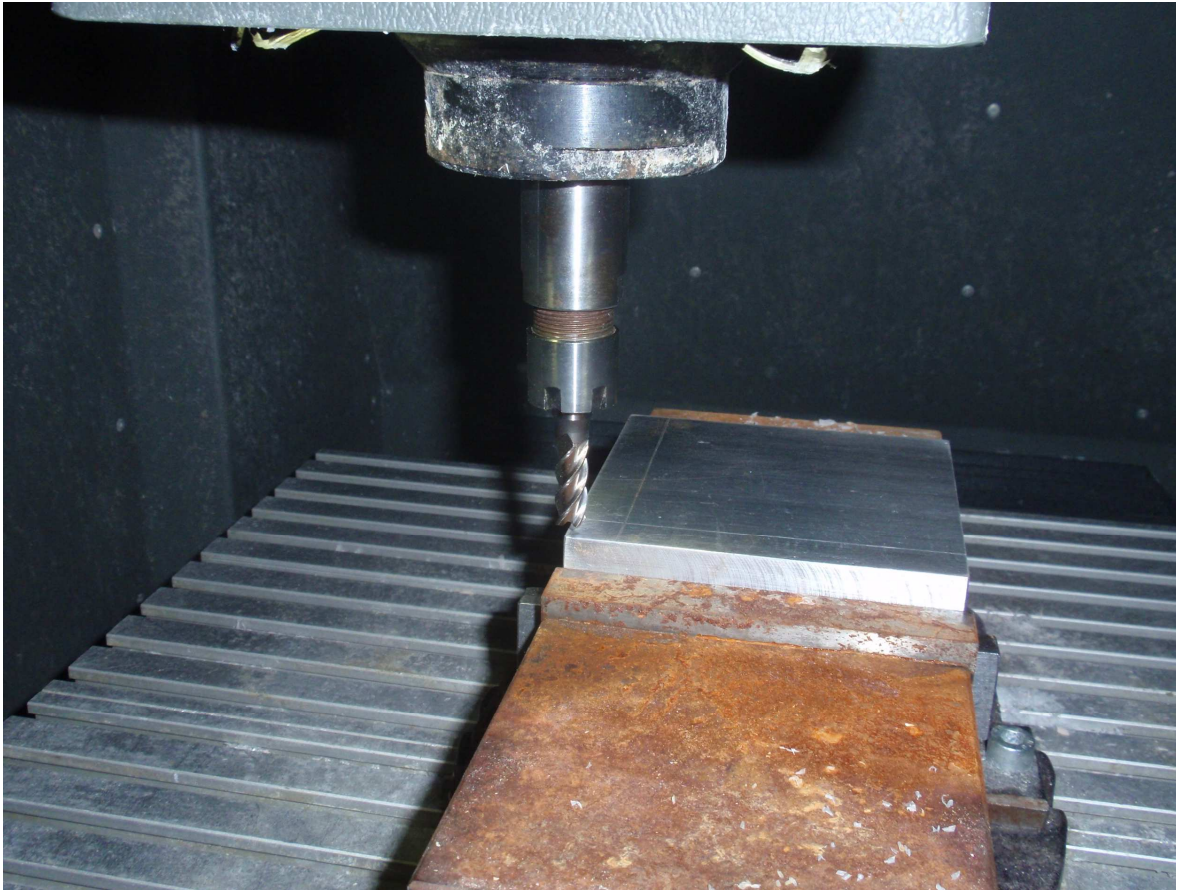
Po vytvoření 3D modelu formy v programu CATIA V5 R18 byl tento model následně uložen ve formátu .igs a nahrán do programu SURFCAM, kde byly zadány jednotlivé podmínky (*obr. 37*) a zvoleny nástroje pro obrábění (*obr. 38*). Z nadefinovaných podmínek byl vytvořen program, který byl zadán do CNC stroje (*obr. 39, 40*).

<b>SURFCAM</b>		<b>TOOLING LIST</b>	
<b>Date:</b> Mon Jan 04 2010			
<b>Time:</b> 12:14:55			
<b>Output Filename:</b> INCSetup_One.INC			
<b>Description:</b>	8mm - 4 flute - HSS Endmill		
<b>Tool Number:</b>	137		
<b>Length Register:</b>	137		
<b>Diameter Register:</b>	137		
<b>Diameter:</b>	8.0000		
<b>Corner Radius:</b>	0.0000		
<b>Flute Length:</b>	19.0000		
<b>Total Length:</b>	63.0000		
<b>Number of Flutes:</b>	4		
<b>Program Point:</b>	Tip		

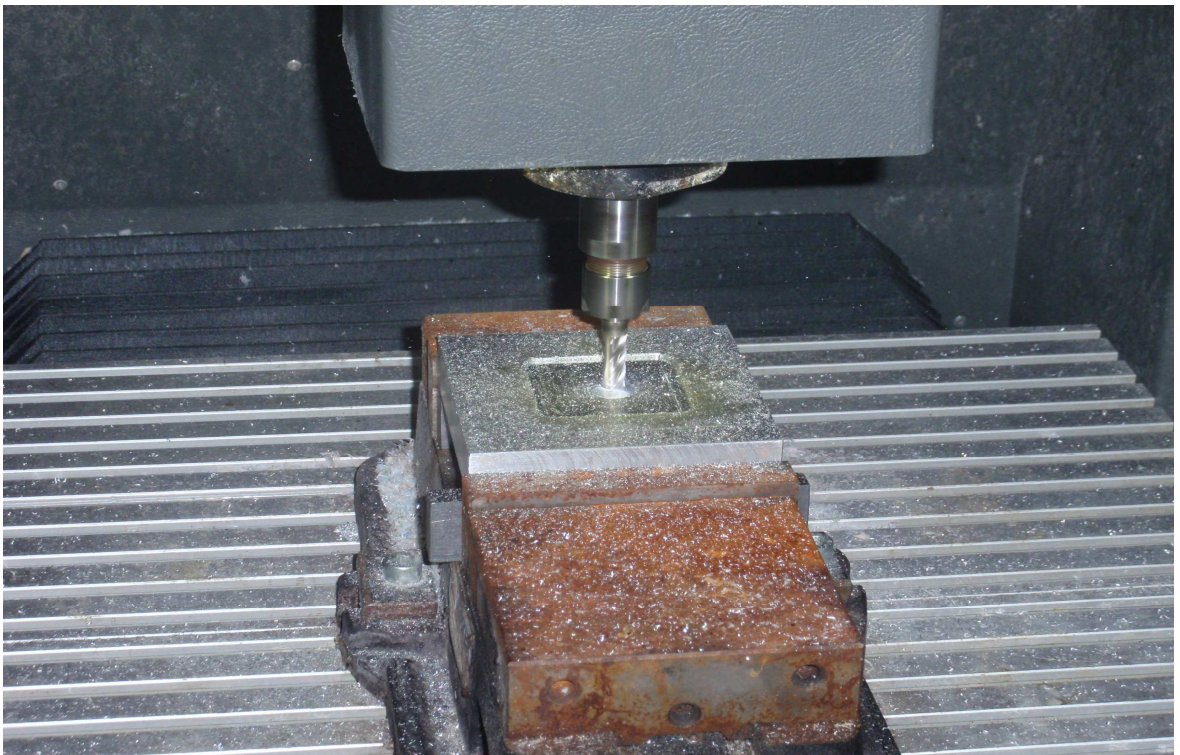
Obr. 37 Nástrojový list z programu SURFCAM

<b>SURFCAM</b>		<b>OPERATIONS LIST</b>									
<b>Date:</b> Mon Jan 04 2010											
<b>Time:</b> 12:14:55											
<b>Output Filename:</b> INCSetup_One.INC											
Tool Number	Operation	Plunge Rate	Feed Rate	Spindle Speed	Min X	Min Y	Min Z	Max X	Max Y	Max Z	Cycle Time
137	2 Axis Pocket	969.850	1939.70 MMPM	2984 RPM	29.1000	29.1000	-20.5000	70.9000	70.9000	25.0000	0:15:28
137	2 Axis Contour 2D	969.850	1939.70 MMPM	2984 RPM	29.0000	29.0000	-20.5000	71.0000	71.0000	25.0000	0:2:44
<b>Overall</b>					29.0000	29.0000	-20.5000	71.0000	71.0000	25.0000	0:18:12
Operation Number	Tool Number	Comments									
1	137	<b>Operation Comments:</b>									
		-									
2	137	<b>Tool Comments:</b>									
		8mm - 4 flute - HSS Endmill									
2	137	<b>Operation Comments:</b>									
		-									
2	137	<b>Tool Comments:</b>									
		8mm - 4 flute - HSS Endmill									

Obr. 38 Operační list z programu SURFCAM



*Obr. 39 Detailní záběr na upnutí a nastavení polohy obráběcího nástroje*



*Obr. 40 Detailní záběr výroby formy na CNC frézce*



## 7 POUŽITÉ MATERIÁLY A VULKANIZACE SMĚSÍ

Po přípravu zkušebních vzorků bylo použito celkem 6 kaučukových směsí, které jsou uvedeny v *tab. 3*. Tyto směsi byly následně zpracovány na dvouválci (*obr. 41*), kde došlo k jejich plastikaci, kdy se snižuje molekulová hmotnost kaučuku, což umožňuje a zlepšuje průběh dalších technologických operací. Po zpracování směsi na dvouválci jsme si za pomoci vysekávacího stroje (*obr. 42*) vysekli ze směsi požadované množství (navážka = 65 g), které bylo vloženo do formy. V posledním kroku jsme tuto formu vložili do lisu (*obr. 43*), kde za definovaných podmínek, tj. teploty a času došlo k vulkanizaci. Uzavírací síla lisu byla 120 MPa. Vylisované zkušební vzorky jsou na *obr. 44*. Po vylisování zkušebních vzorků byla změřena jejich tvrdost (*tab. 4*).

*Tab. 3 Použité kaučukové směsi na přípravu zkušebních vzorků*

Kaučuková směs - č. receptury	Druh kaučuku	Dsk	Podmínky lisování [°C/min]
275	SBR	100	150°C/20'
346	IIR	100	170°C/60'
733	CR	100	150°C/20'
T 317	NR+BR	85+15	160°C/16'
TP 44	SBR+IIR+BR	70+15+15	160°C/16'
9341-358	NBR+CIS+BR	50+10+7	160°C/10'

*Tab. 4 Tvrdost použitých pryžových směsí*

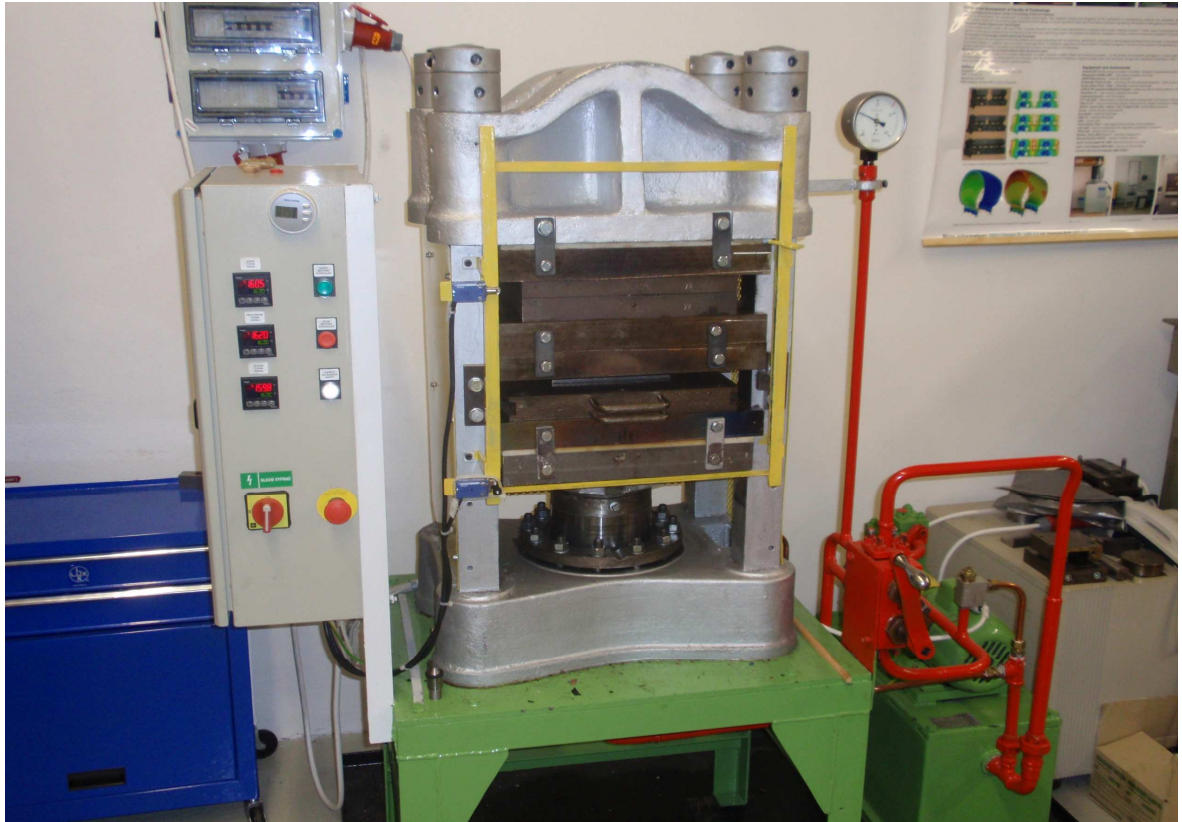
Kaučuková směs - č. receptury	Druh kaučuku	Tvrdost SHORE
275	SBR	54,34
346	IIR	78,97
733	CR	51,65
T 317	NR+BR	57,33
TP 44	SBR+IIR+BR	52,38
9341-358	NBR+CIS+BR	59,04



*Obr. 41 Dvouválec pro míchání směsí*



*Obr. 42 Vysekávací stroj*



*Obr. 43 Lisovací stroj*



*Obr. 44 Vylisované zkušební vzorky*



## 8 BROUŠENÍ VZORKŮ

Při broušení byly použity již předem připraveny pryžové vzorky tvaru kvádrů již předem vyrobené formy, které byly upnuty do zařízení na posuvném stole brusky BRH 20.03 F. Po přejezdu brousícího kotouče po povrchu pryžového vzorku došlo za pomoci dynamometru a daného počítačového softwaru k zaznamenání složek řezných sil. Po broušení bylo prováděno měření drsnosti povrchu na 10-ti různých místech jak ve směru podélném tak i v příčném směru na povrchu broušeného vzorku. Posledním úkonem bylo snímání povrchu za pomoci přístroje ProScope HR.

Následné zpracování dat spočívalo ve vyhodnocení složek řezných sil a následného zpracování naměřených hodnot dle statistických metod.

Během broušení se měnili technologické podmínky, které jsou uvedeny v *tab. 5* a typu brousících kotoučů (*tab. 6*).

*Tab. 5 Technologické podmínky při broušení*

Hloubka řezu $a_e$ [mm]	Posuvová rychlost $v_f$ [m/min]
0,01	7
0,02	14
0,03	21
0,04	13

*Tab. 6 Typy použitých brousících kotoučů*

Kotouč č.	Označení	Typ zrna	Zrnitost	Tvrдост	Pórovitost
1	250 x 20 x 46 99A 30P 8V	hnědý korund	střední	tvrdá	střední
2	250 x 20 x 46 99A 80I 8V	hnědý korund	jemná	měkká	střední
3	250 x 20 x 46 49C 120J 12V	zelený karbid křemíku	jemná	měkká	otevřená

## 8.1 Vodorovná rovinná bruska BRH 20.03 F

### 8.1.1 Princip použití

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 elektro-výzbroje tvoří samostatné celky umístěné mimo stroje.

Podle čísla vyhotovení můžou brusky pracovat s ruční obsluhou, v uzavřeném nebo neuzavřeném automatickém cykle.

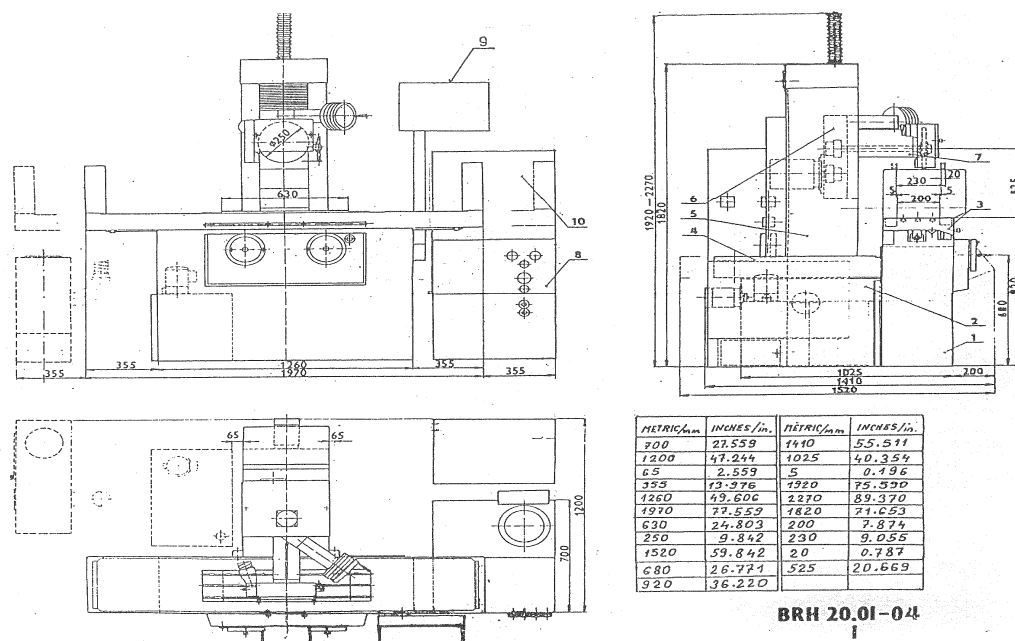
### 8.1.2 Technické parametry

Tab. 7 Technické parametry brusky BRH 20.03 F

Rozměry a hmotnost

Parameter	Metrická sústava		Palcová sústava	
	Jednotka	Hodnota	Jednotka	Hodnota
Pracovná plocha stola	mm	200x630	inch	7,9x24,8
Najväčšia šírka brúsenia bez výbehu brúsneho kotúča	mm	230	inch	9
Najväčšia dĺžka brúsenia	mm	630	inch	24,8
Max. vzdialenosť osi vretena od upínacej plochy stola	mm	525	inch	20,7
Rozmery br. kotúča (Ø x šírka x upín.diera)	mm	250x20-50x76	inch	10x0,8-2x3
Minimálny priemer brús. kotúča	mm	120	inch	4,7
Max. šírka zložených brúsnych kotúčov	mm	100	inch	4
Priemer brúsneho vretena	mm	50	inch	2
Upínací kužel brúsneho vretena	1:5		1:5	
Max. pôdorysná plocha stroja (dĺžka x šírka)	m	2,7x1,5	inch	106,3x59
Výška stroja	mm	2240	inch	88,2
Hmotnosť stroja	kg	1860	lb	4100

## 8.1.3 Specifikace stroje

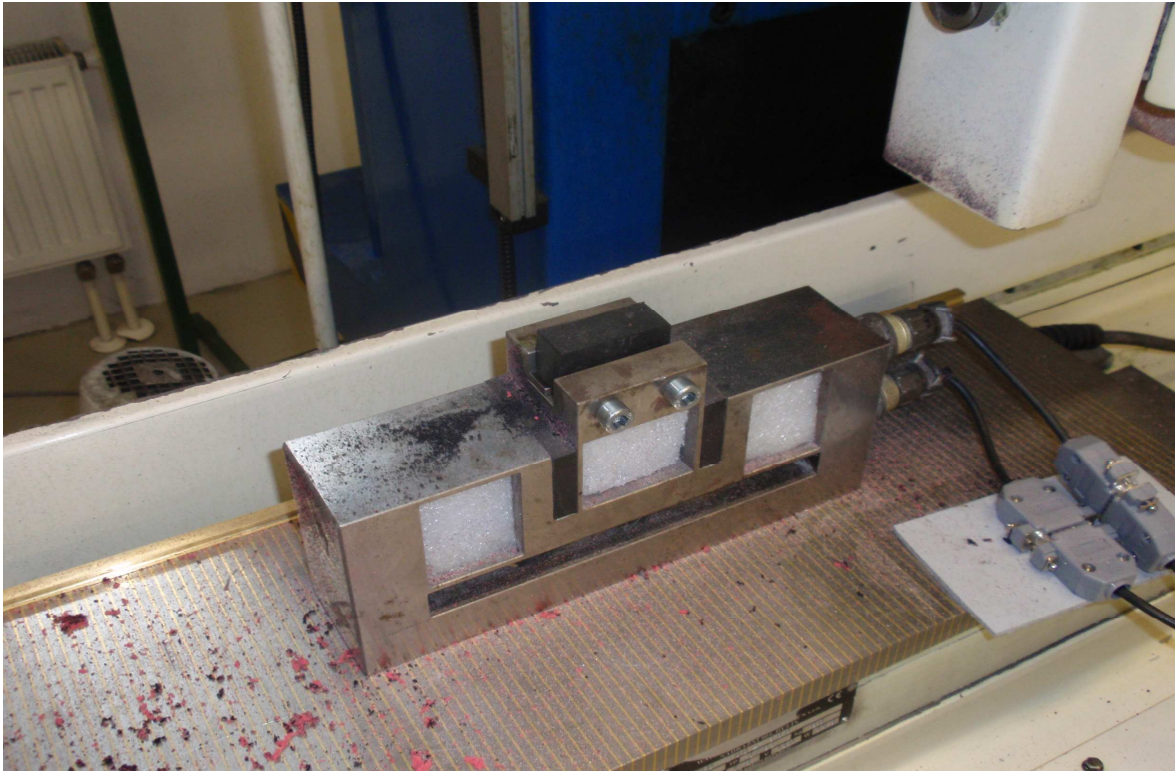


Obr. 45 Schéma brusky BRH 20.03 F

1 - přední lůžko, 2 - zadní lůžko, 3 - stůl, 4 - příčné sáně, 5 - stojan, 6 - svislé sáně, 7 - brusný větěník, 8 - hydraulický agregát, 9 - ovládací panel, 10 - skříň elektrovýbroje



Obr. 46 Vodorovná rovinná bruska BRH 20.03 F



Obr. 47 Detailní záběr na upnutí vzorku při broušení

## 8.2 Drsnoměr Mitutoyo SJ – 301

### 8.2.1 Popis přístroje

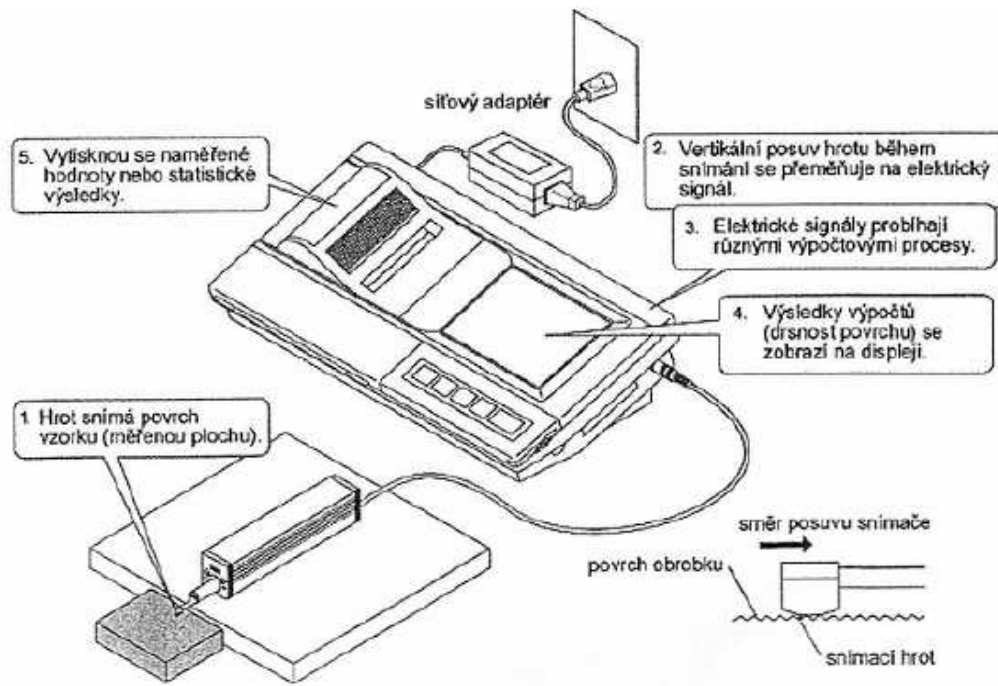
Tento přenosný měřicí přístroj je určený na měření drsnosti povrchu pro použití v dílenském prostředí. Přístroj odpovídá mezinárodním standardům DIN, ISO, ANSI a JIS. Svým snímacím hrotem dokáže měřit strukturu povrchu a charakterizovat ji za pomoci řady parametrů podle různých národních a mezinárodních norem (měření bylo charakterizováno za pomoci normy ČSN EN ISO 4287).

Přístroj má zdvih (rozsah osy Z) 350  $\mu\text{m}$ , posuv (rozsah osy X) 12,5 mm a lze na něm získat až 37 parametrů. Výsledky měření se zobrazí digitálně a graficky na speciální na dotek citlivé ovládací obrazovce a pomocí vestavěné tiskárny se mohou průběhy drsnosti i s jeho hodnotami vytisknout (obr. 48). [11]

Snímací hrot přístroje zaznamenává i nejjemnější nepravidelnosti povrchu vzorku. Drsnost povrchu se vypočítá z vertikálního posuvu snímacího hrotu, ke kterému dochází, když snímací hrot přejíždí přes nepravidelnosti povrchu. Poloha snímacího hrotu vůči obrobku musí být zajištěna tak, aby posuv při měření byl rovnoběžný s povrchem obrobku.



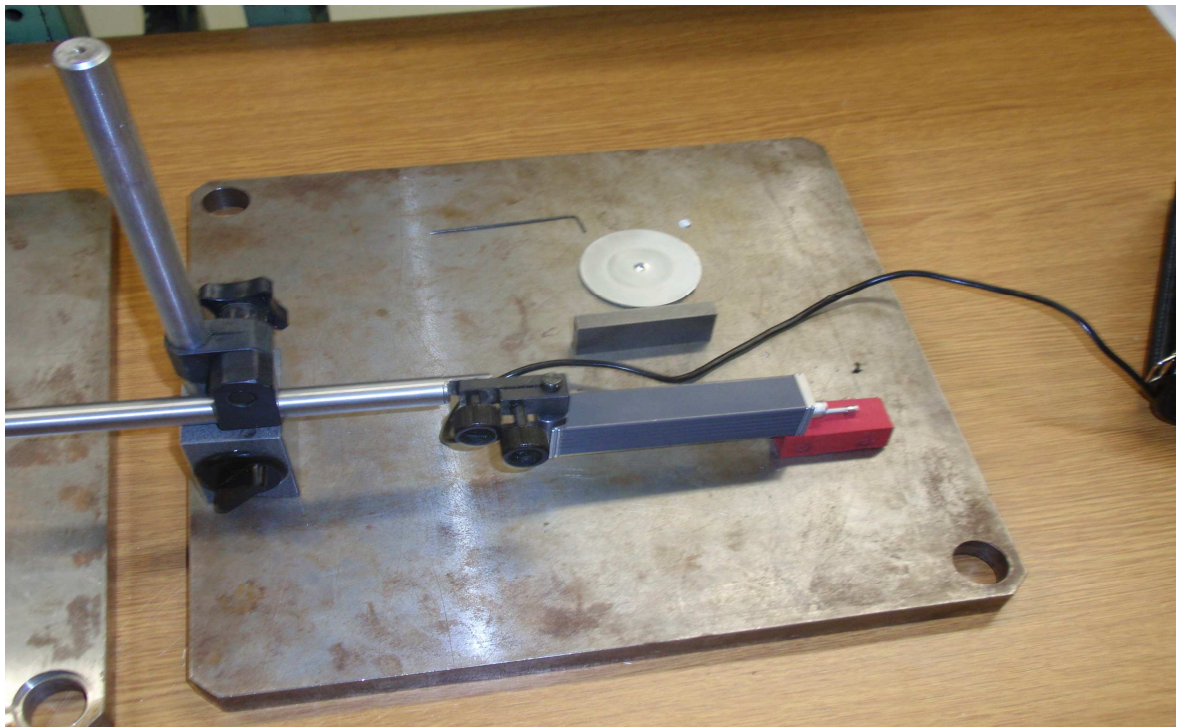
## 8.2.2 Specifikace přístroje



Obr. 48 Schéma drsnoměru Mitutoyo SJ – 301



Obr. 49 Drsnoměr Mitutoyo SJ - 301

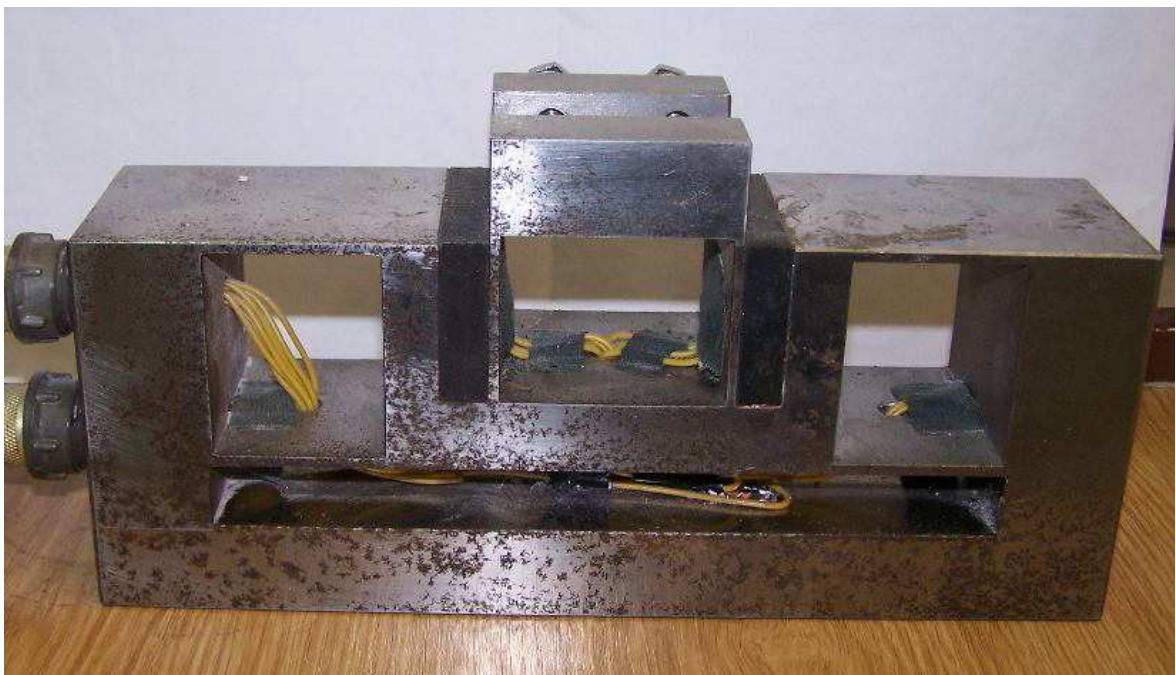


*Obr. 50 Detailní záběr měření drsnosti povrchu broušeného vzorku*

## 9 VYHODNOCENÍ SLOŽEK ŘEZNÝCH SIL

### 9.1 Dynamometr

Měření řezných sil při broušení bylo prováděno na dvousložkovém tenzometrickém dynamometru (*obr. 51*). Toto zařízení bylo upevněno na pracovní stůl brusky, na něj byly upnuty materiály určené k obrábění. Dynamometr byl pomocí kabelů připojen k počítači s měřicím systémem Conmes Spider, kde docházelo k zápisu naměřených dat (*obr. 52*). Princip měření řezných sil je zobrazen na *obr. 53*. [19]

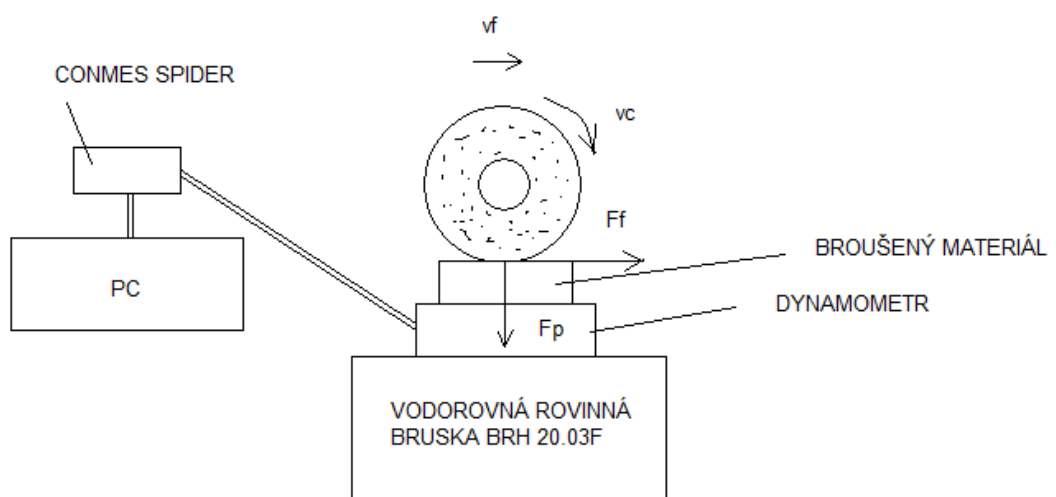


*Obr. 51 Dvousložkový tenzometrický dynamometr*





Obr. 52 Charakteristika měření zapsána pomocí programu Conmes Spider



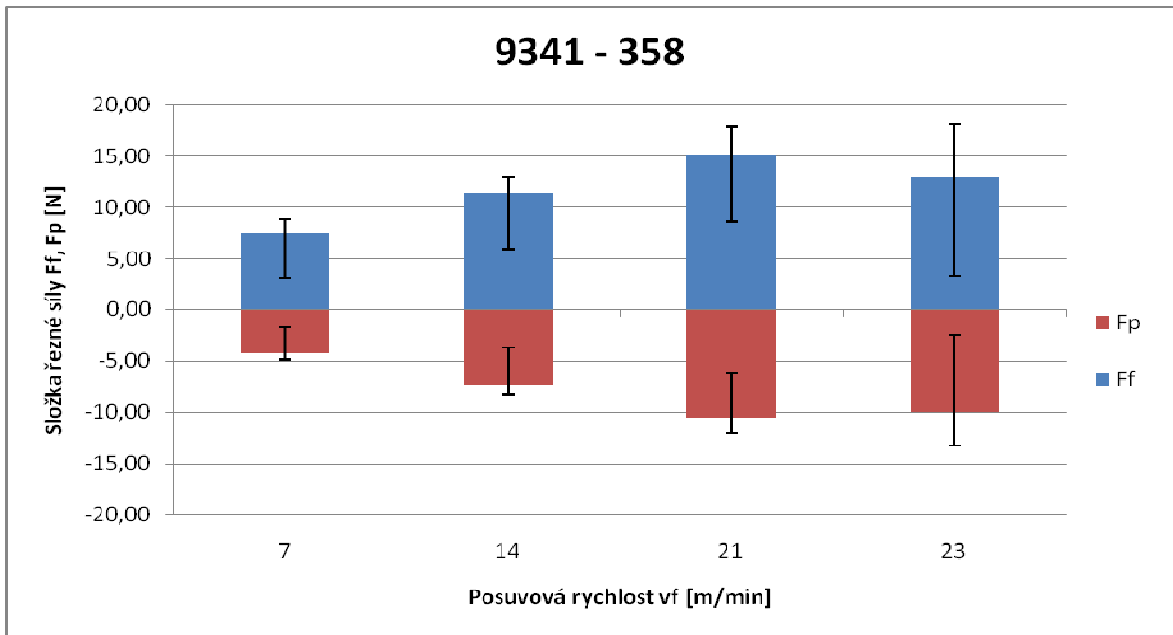
Obr. 53 Schéma měření složek řezných sil



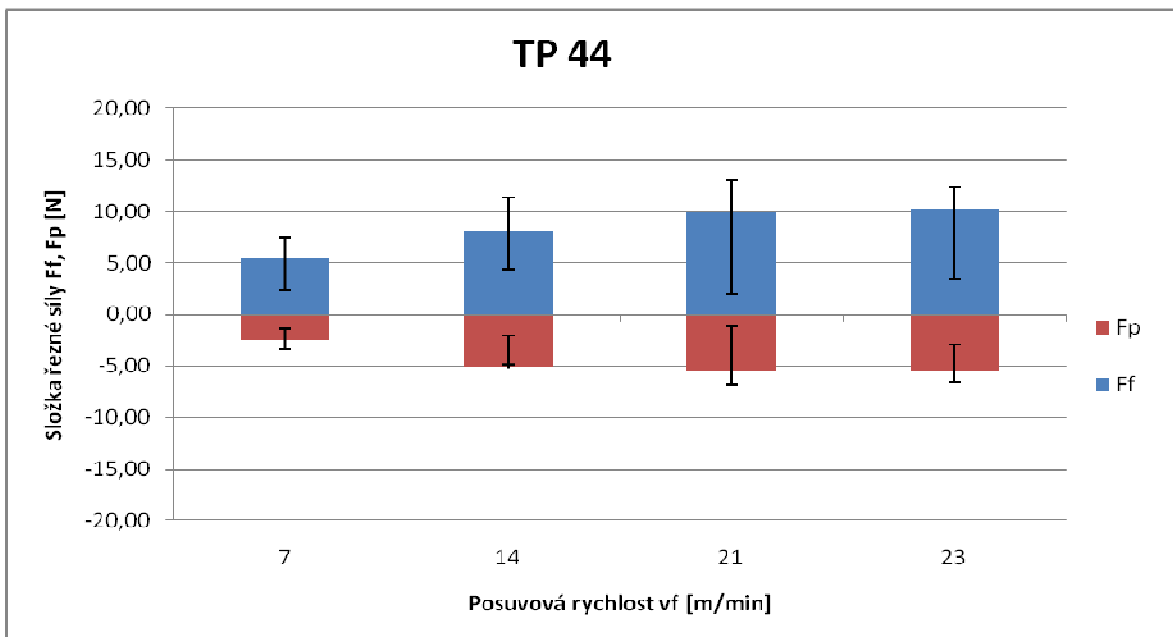
## 9.2 Vliv posuvové rychlosti na řezné síly

Při broušení bylo prováděno měření složek řezných sil za pomoci programu Conmes Spider, kde byly následně vyhodnoceny závislosti řezných sil na posuvové rychlosti při konstantní hloubce řezu, tj.  $a_e = 0,01$  mm, pro jednotlivé použité kotouče a směsi.

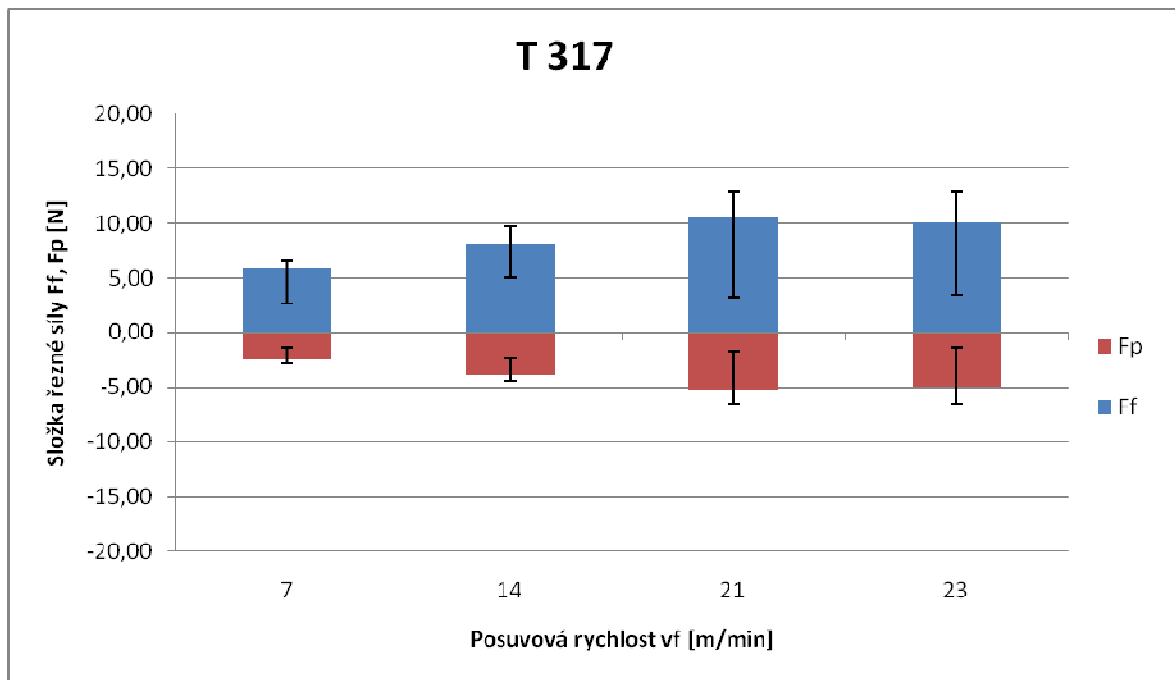
### 9.2.1 Kotouč 99A 30P 8V



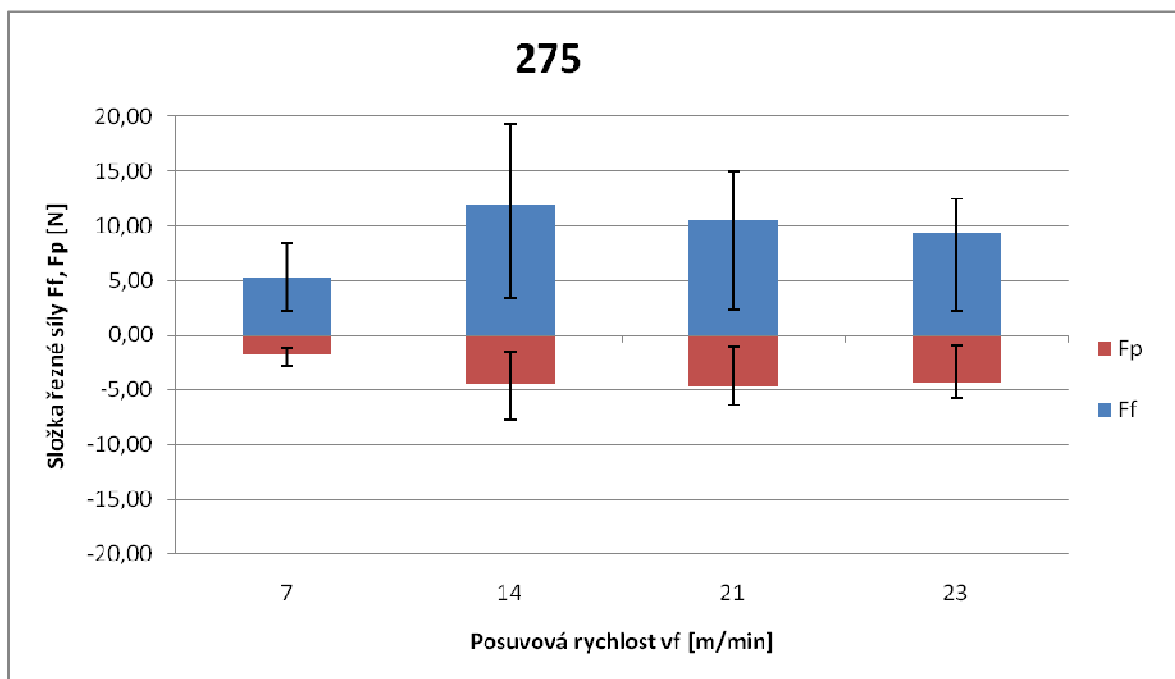
Obr. 54 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 9341 - 358



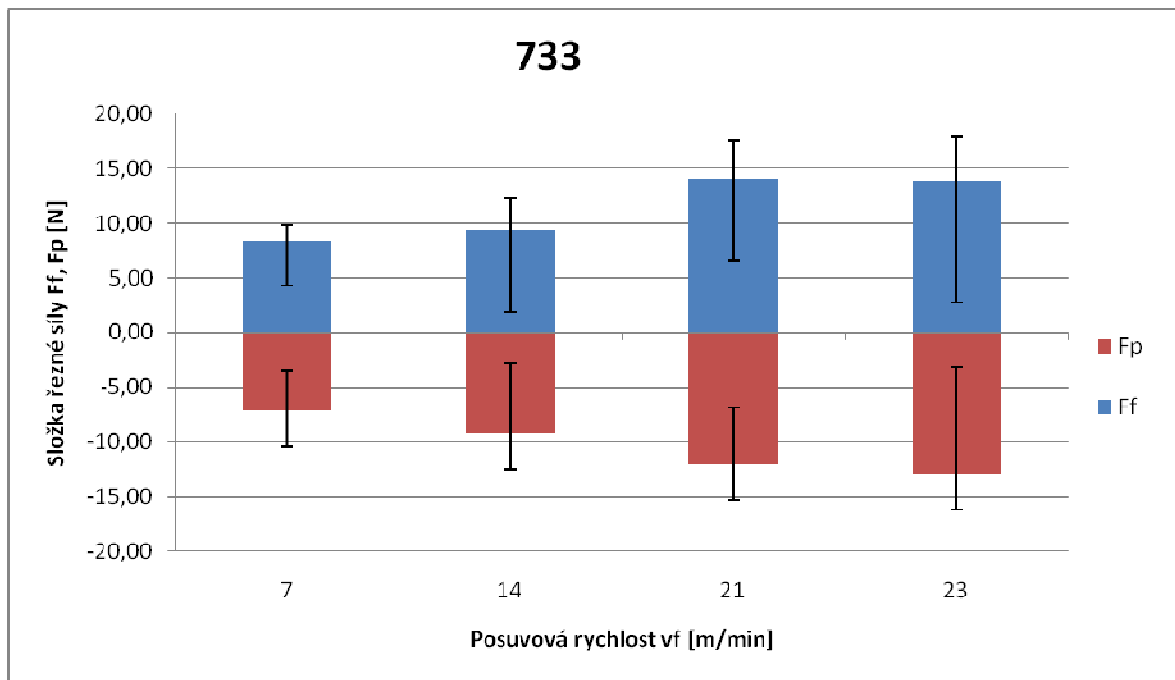
Obr. 55 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál TP 44



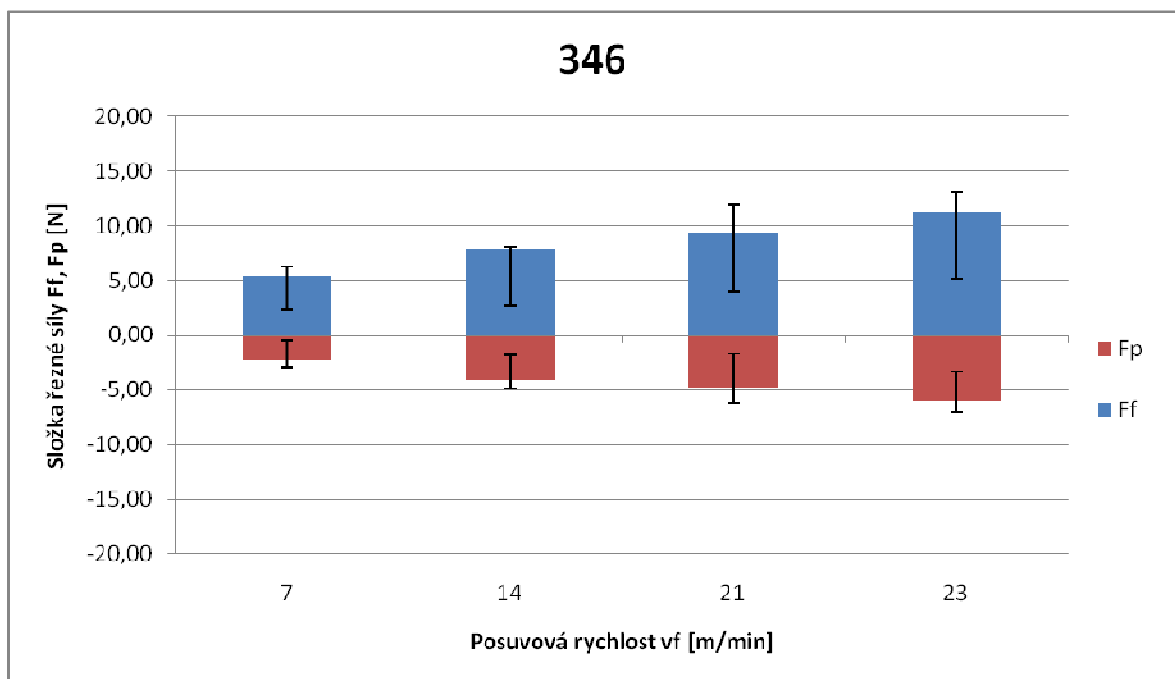
Obr. 56 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál T 317



Obr. 57 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 275

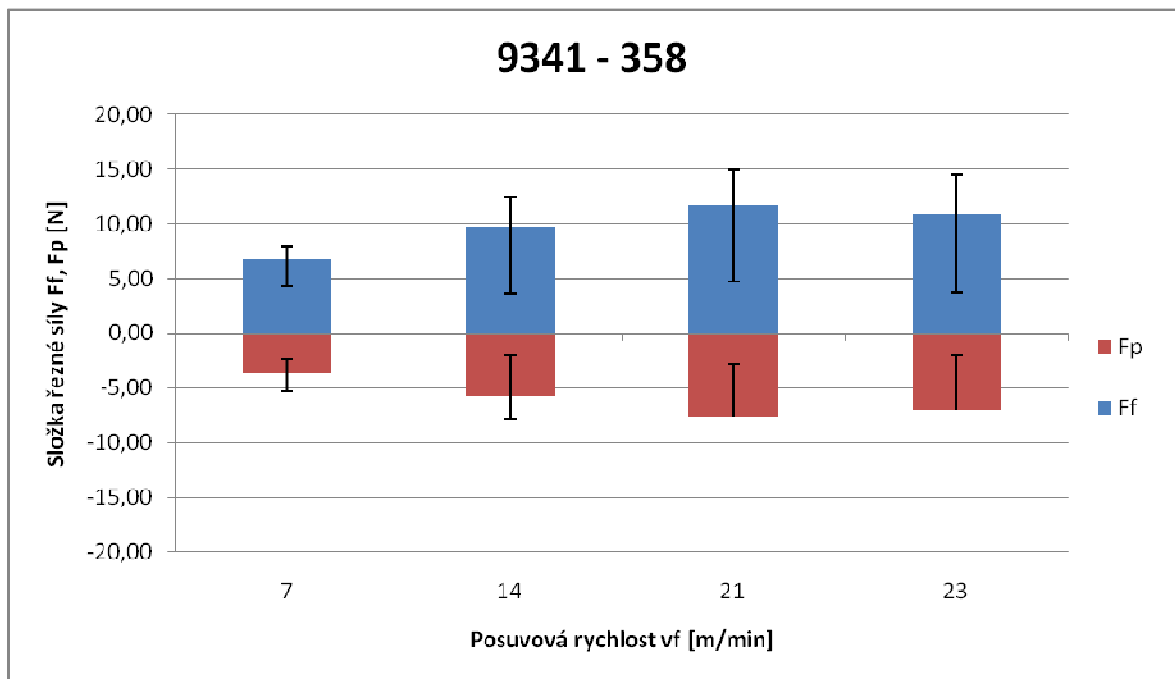


Obr. 58 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 733

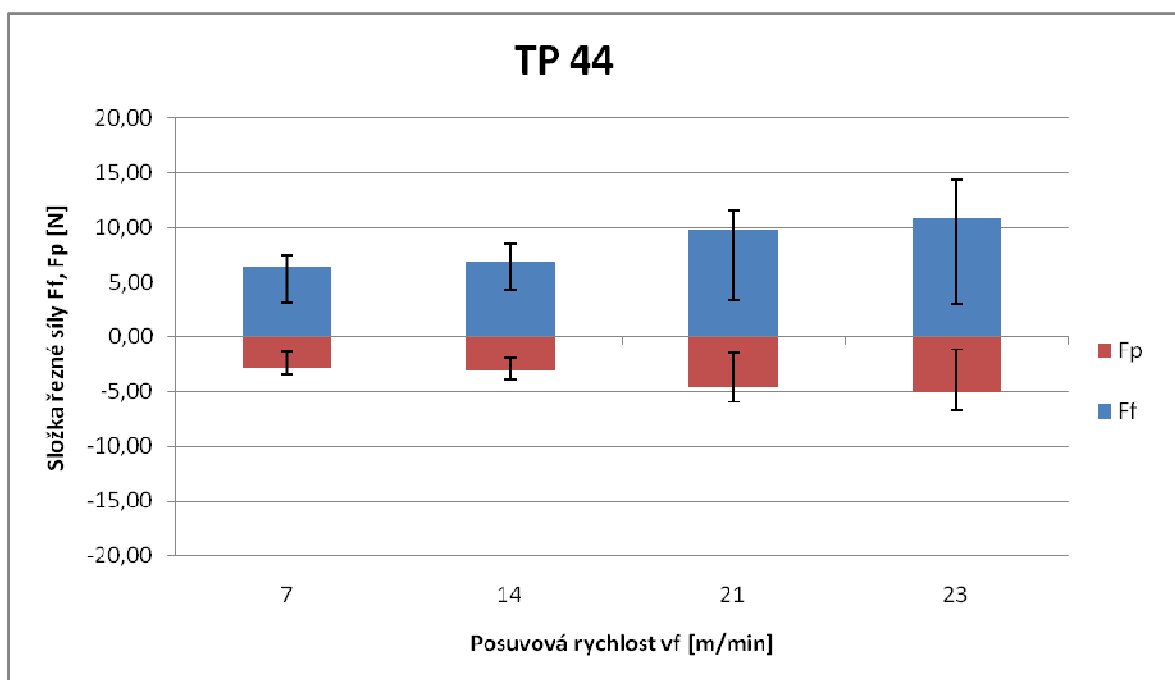


Obr. 59 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 346

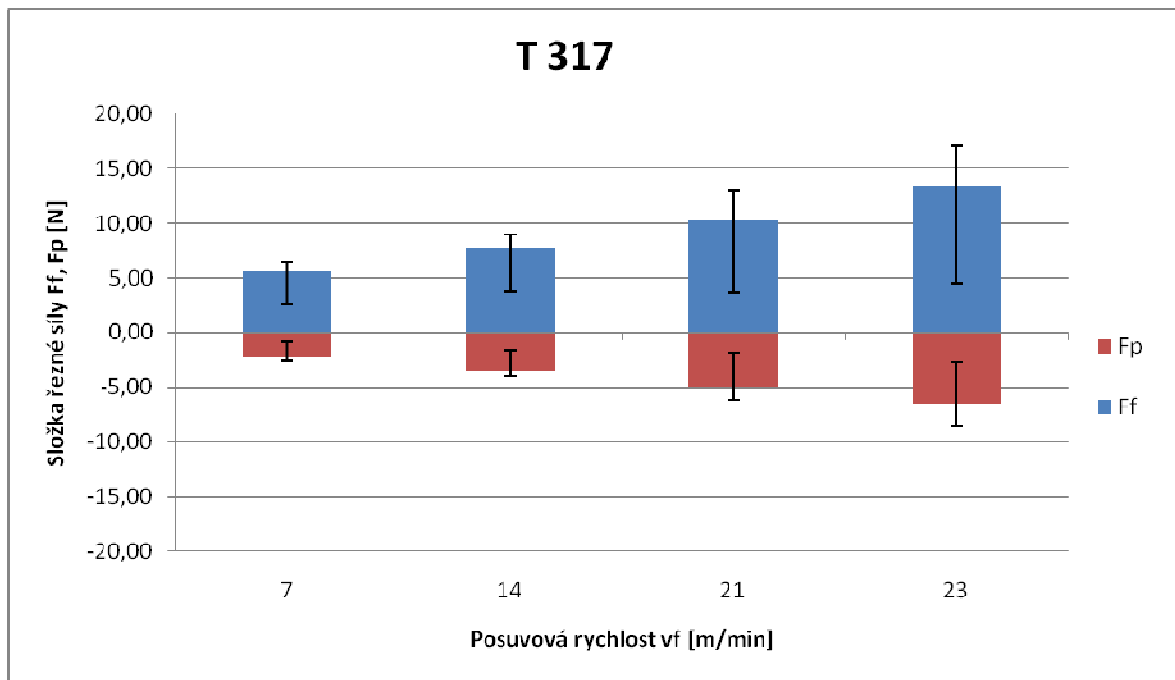
## 9.2.2 Kotouč 99A 80I 8V



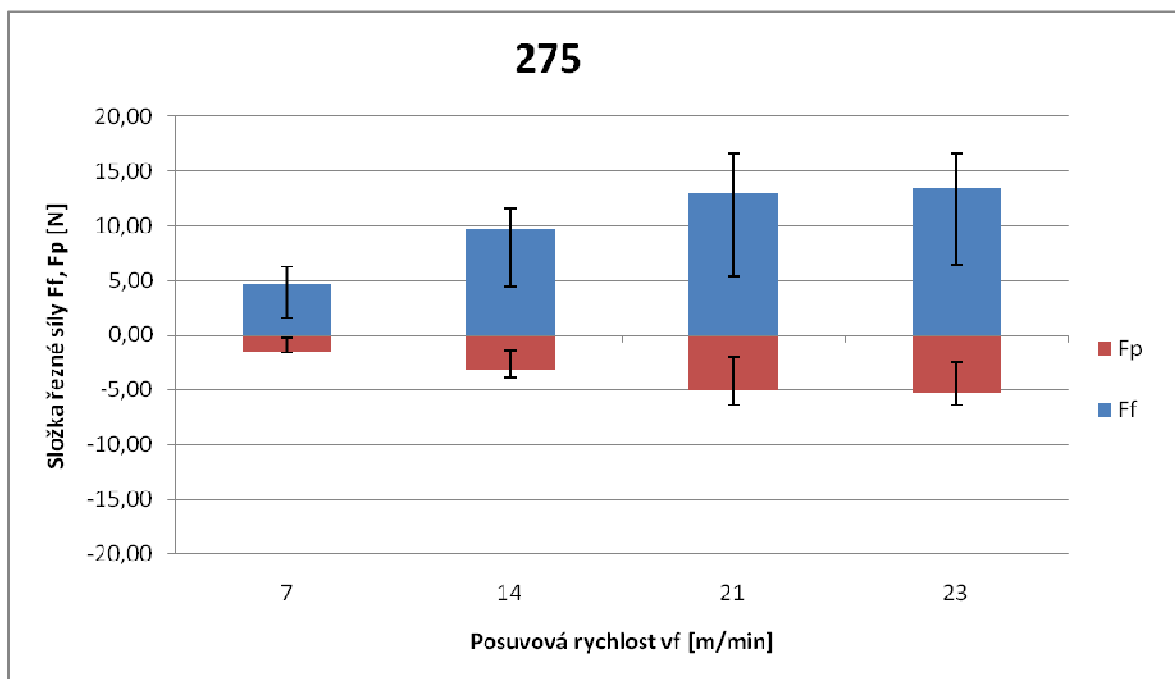
Obr. 60 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 9341 - 358



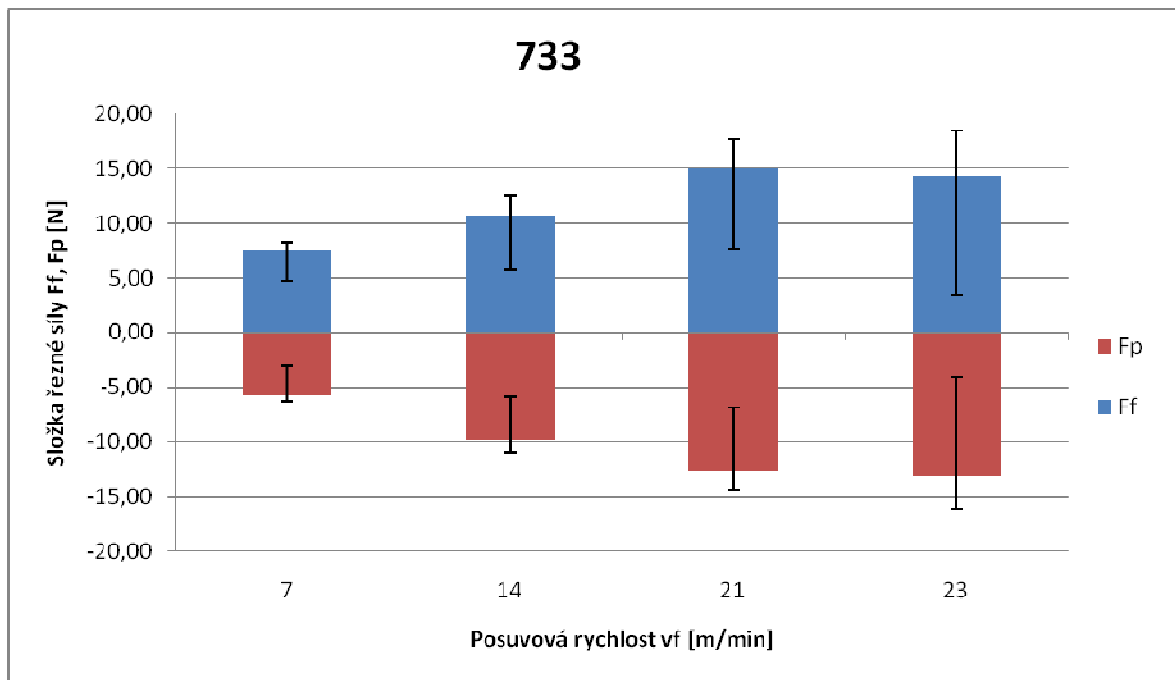
Obr. 61 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál TP 44



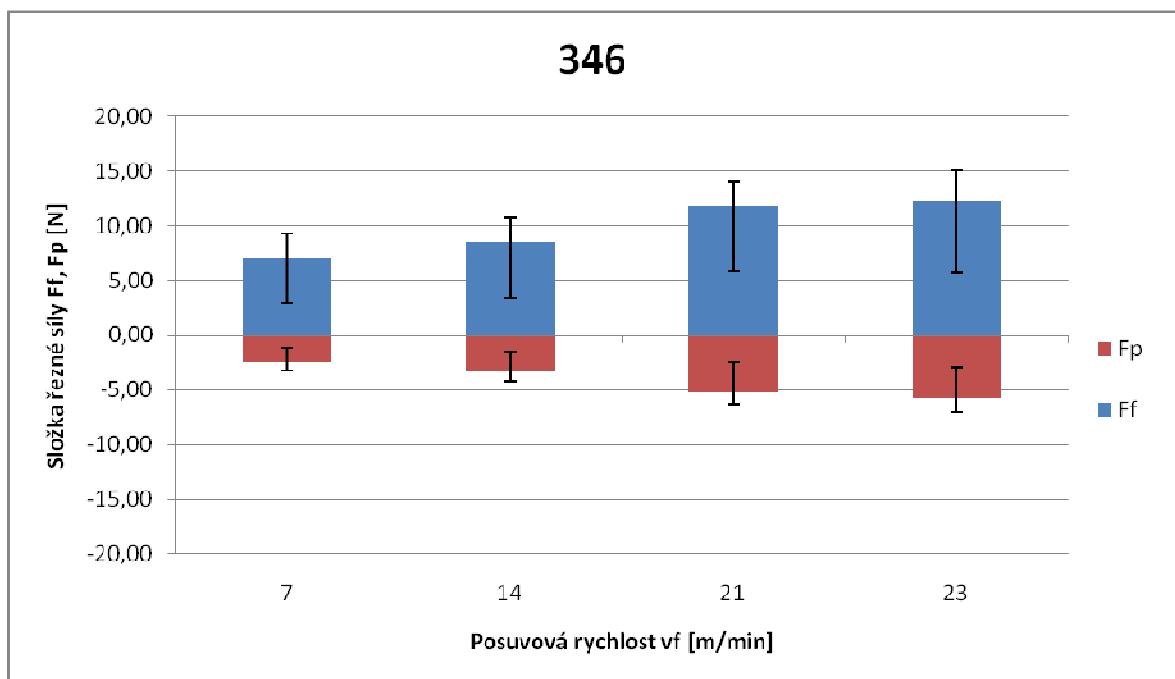
Obr. 62 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál T 317



Obr. 63 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 275

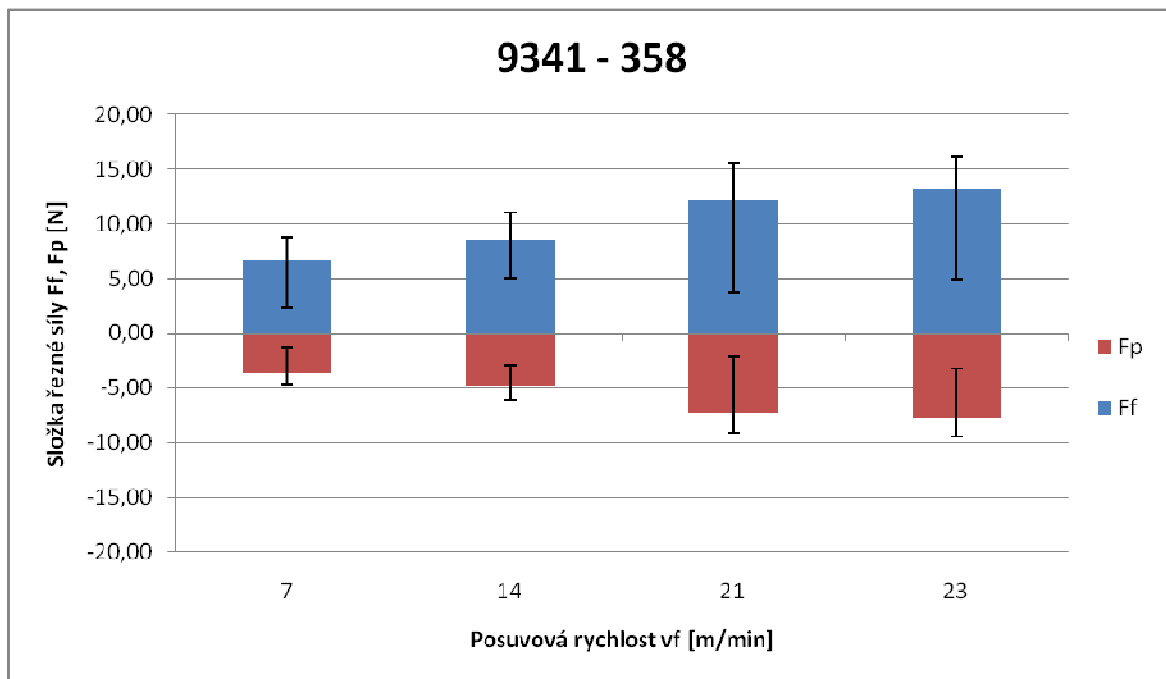


Obr. 64 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 733

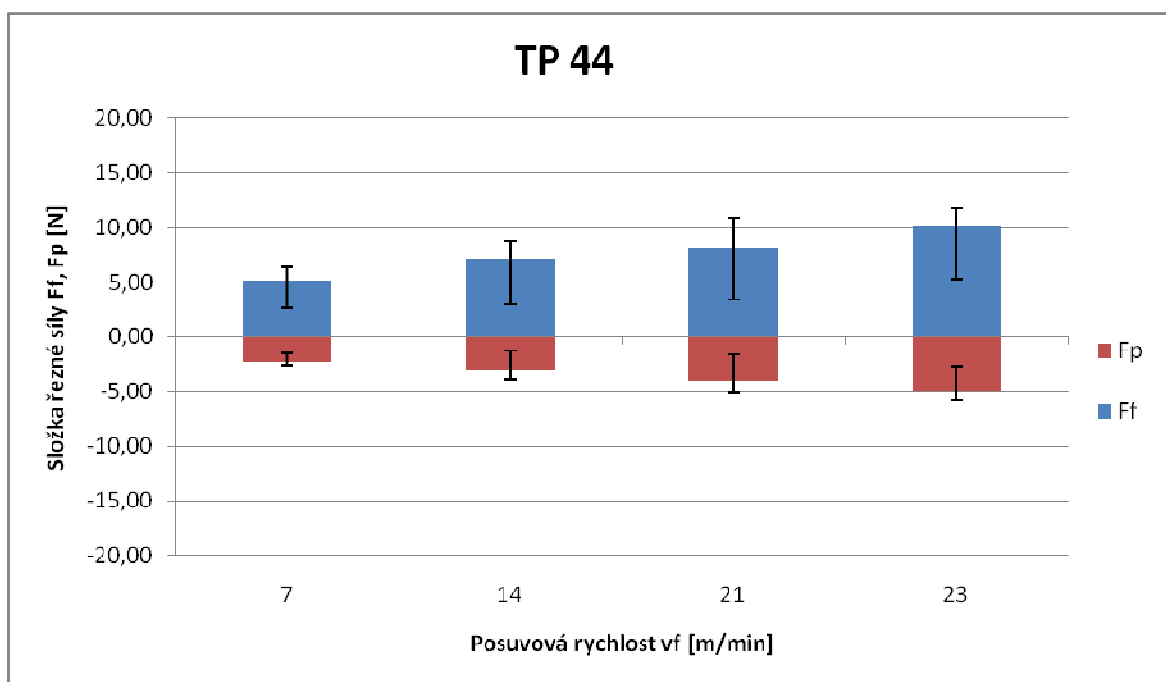


Obr. 65 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 346

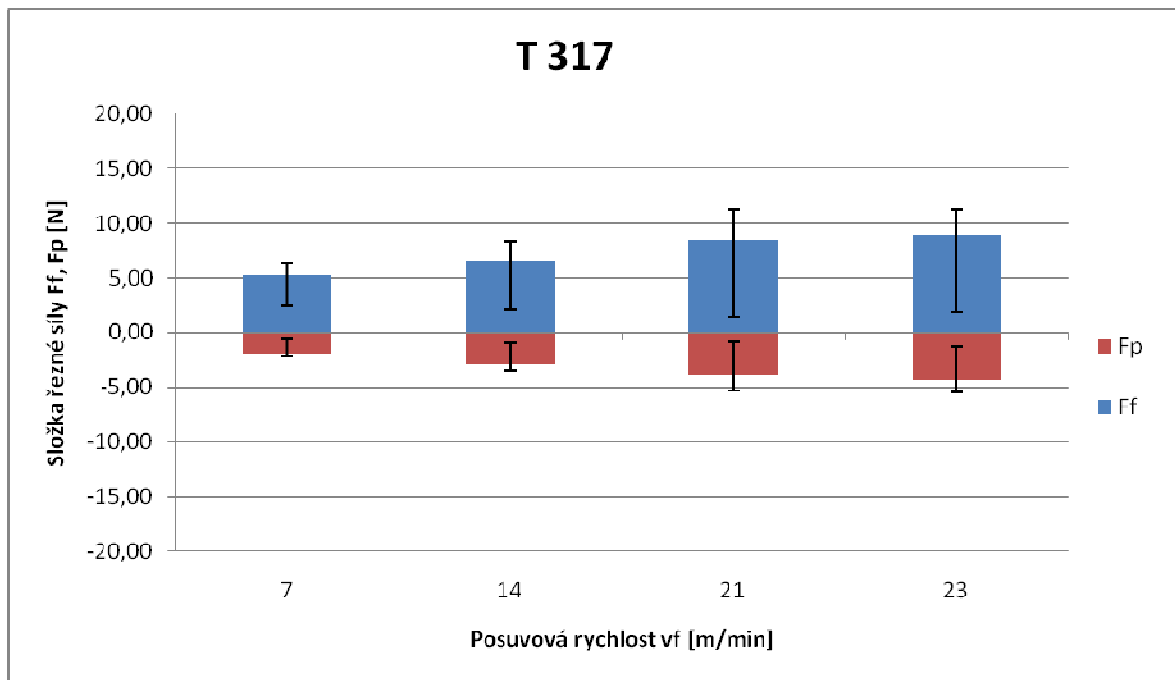
## 9.2.3 Kotouč 49C 120J 12V



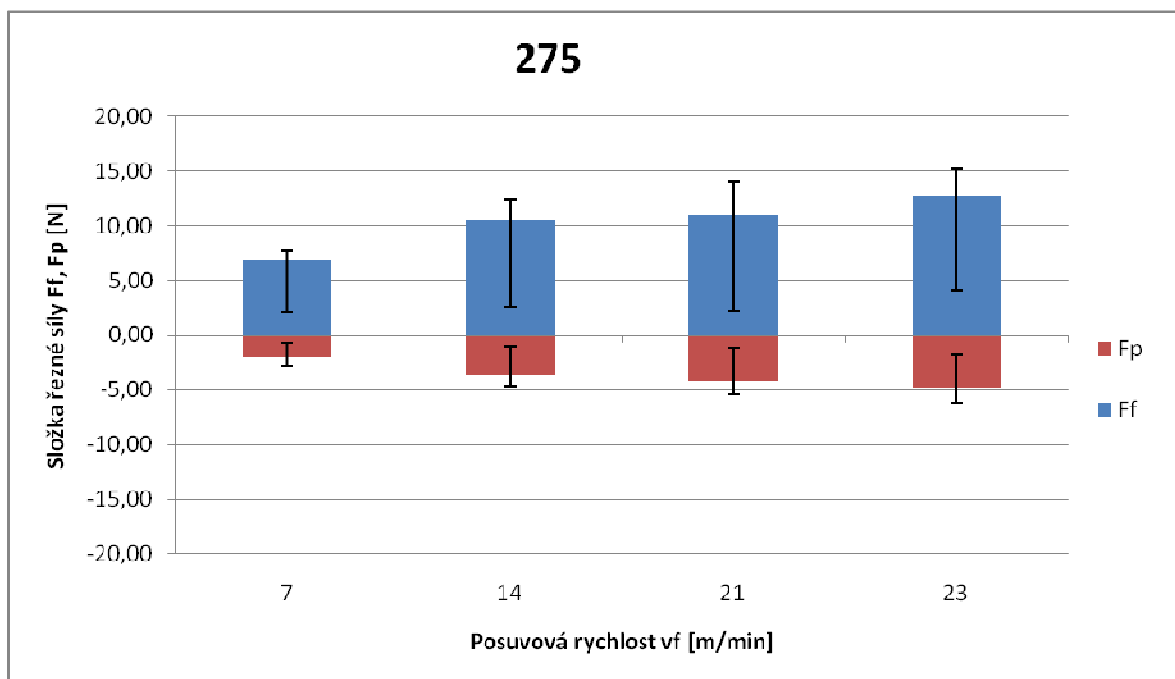
Obr. 66 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 9341 - 358



Obr. 67 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál TP 44

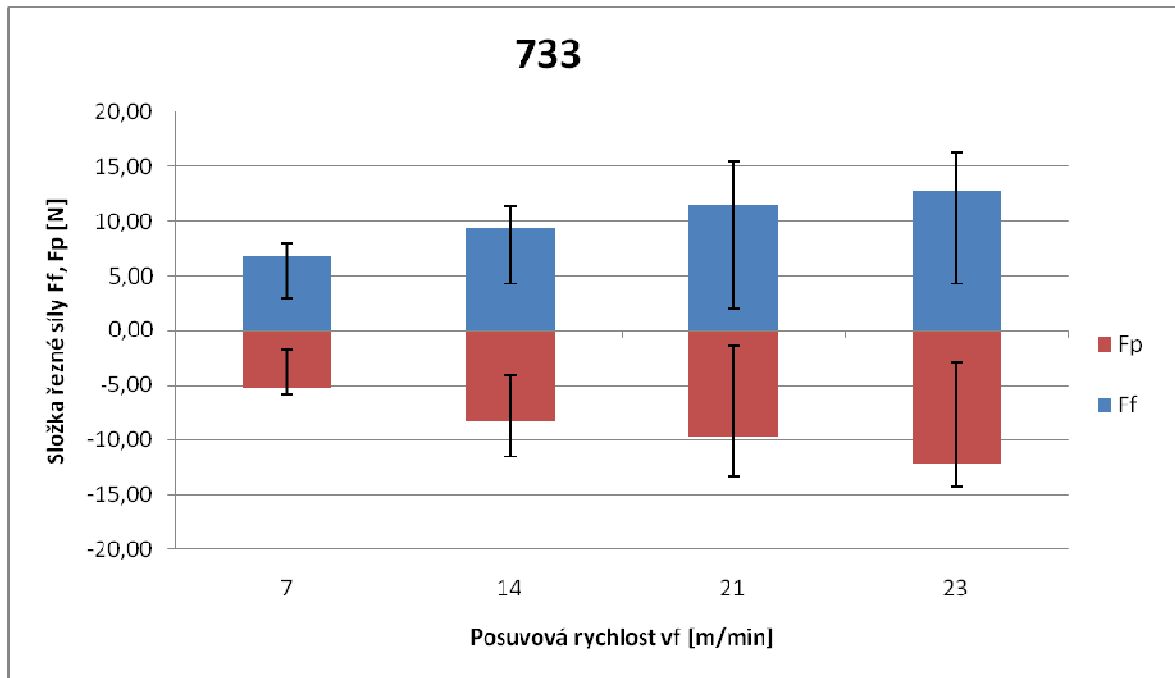


Obr. 68 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál T 317

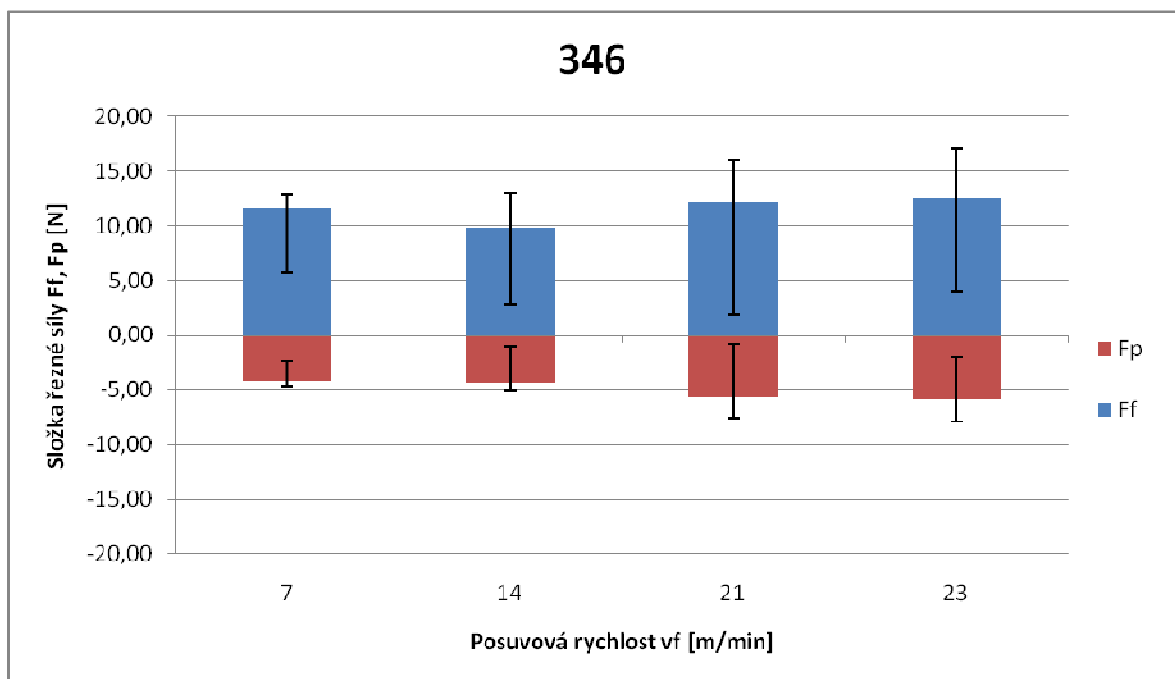


Obr. 69 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 275





Obr. 70 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 733

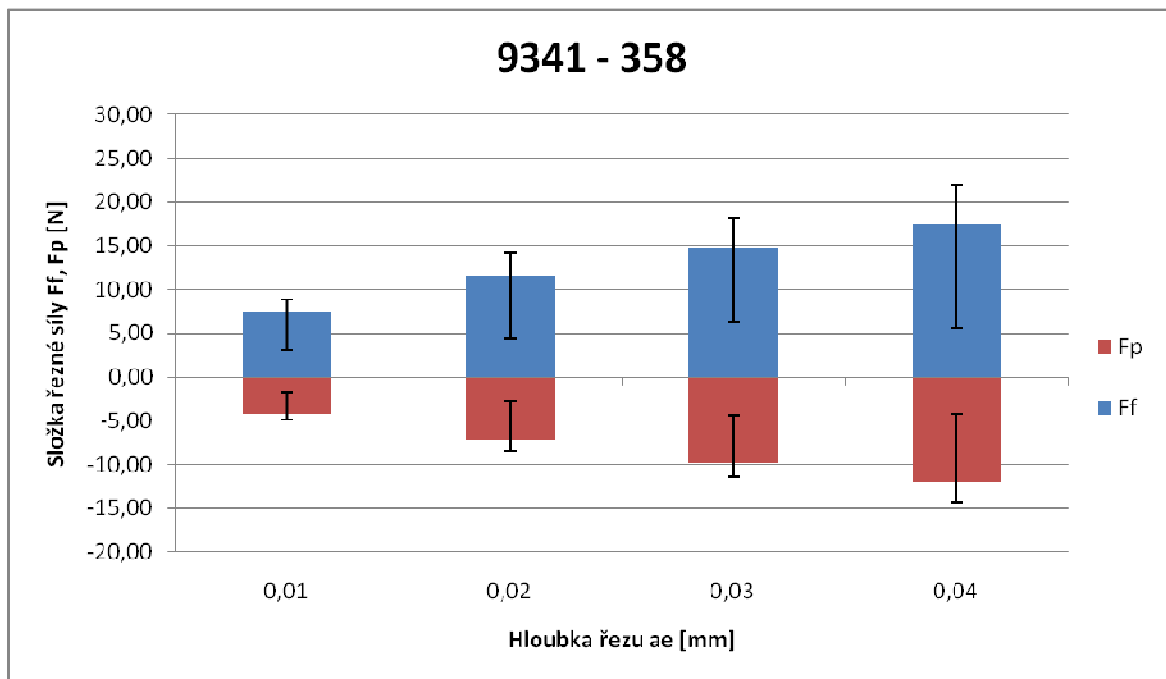


Obr. 71 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 9341 - 358

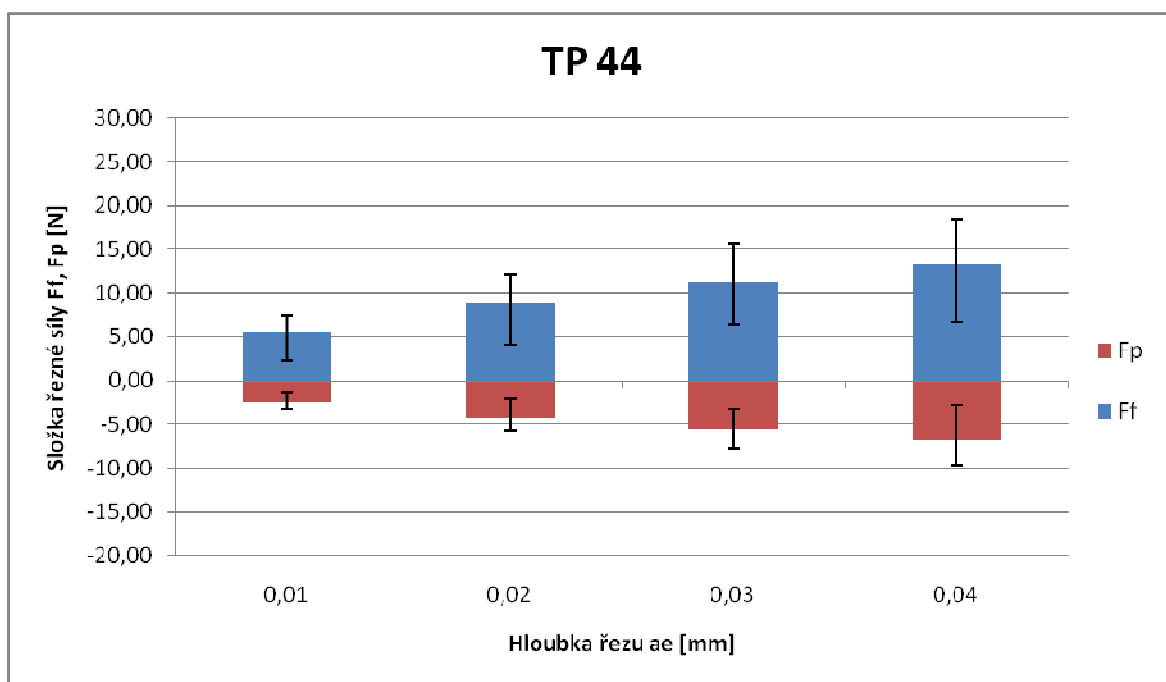
### 9.3 Vliv hloubky řezu na řezné síly

Při broušení bylo prováděno měření složek řezných sil za pomoci programu Connes Spider, kde byly následně vyhodnoceny závislosti řezných sil na hloubce řezu při konstantní posuvové rychlosti, tj.  $v_f = 7$  m/min, pro jednotlivé použité kotouče a směsi.

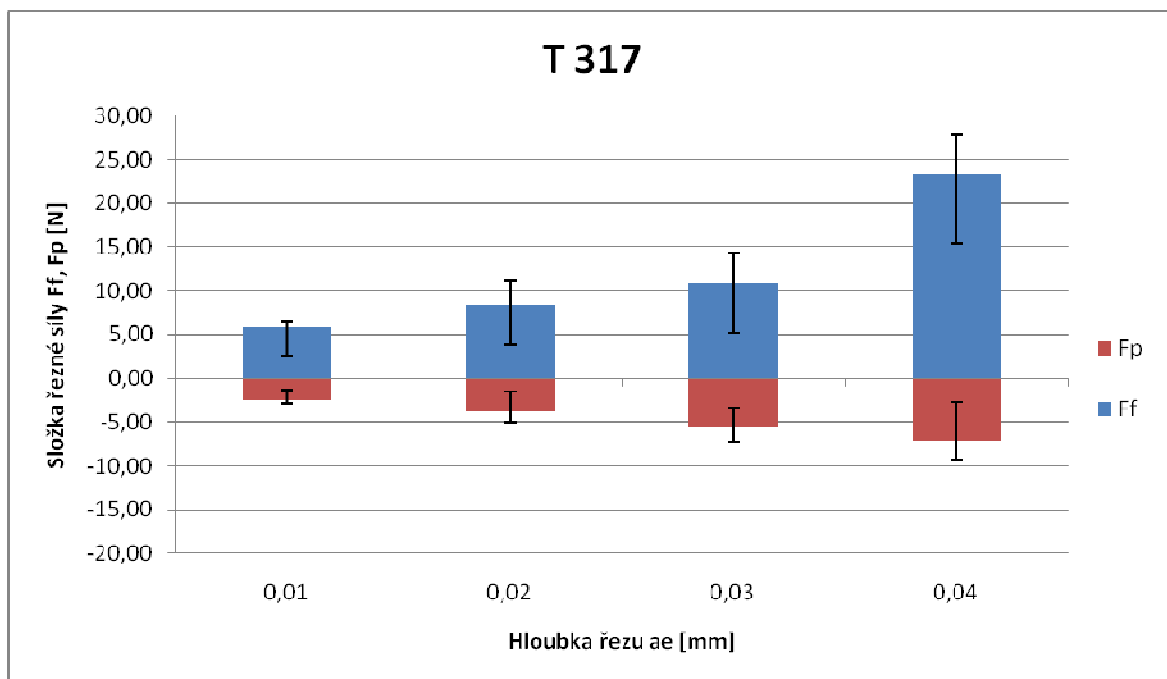
## 9.3.1 Kotouč 99A 30P 8V



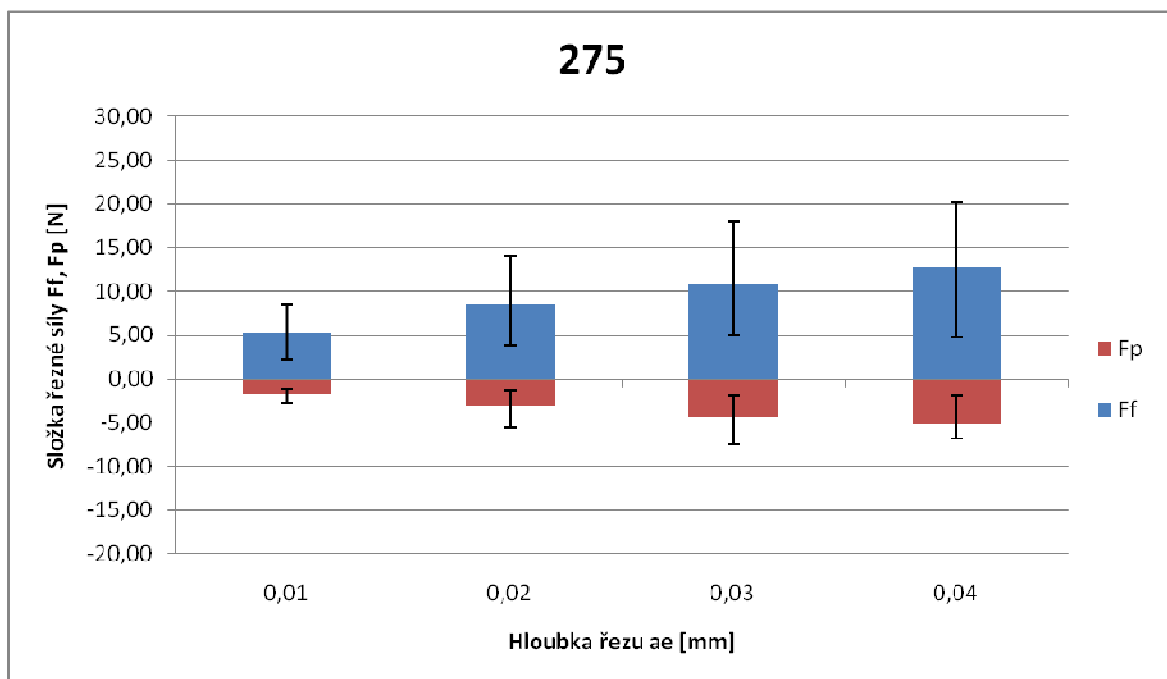
Obr. 72 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 9341 - 358



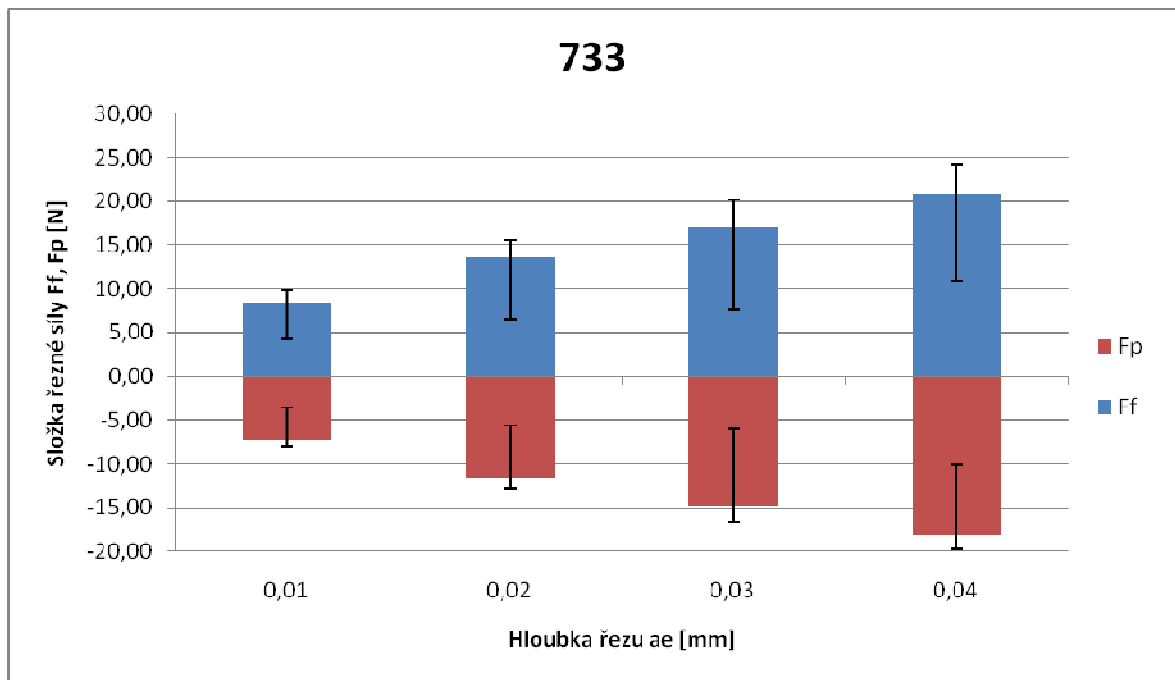
Obr. 73 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál TP 44



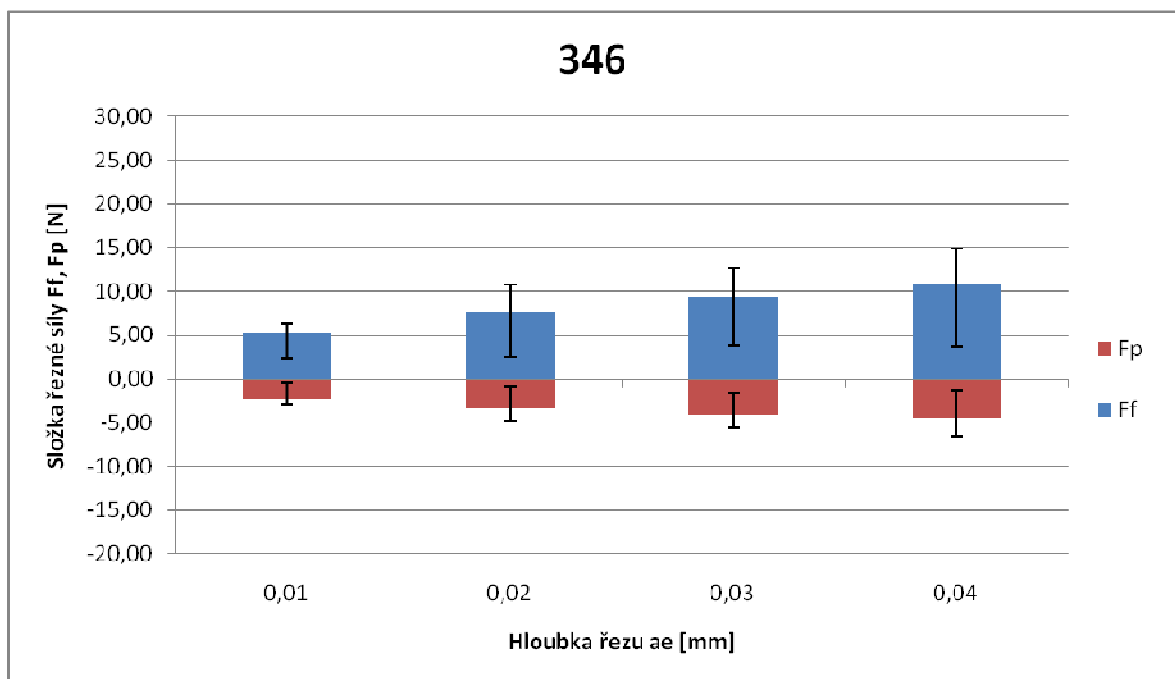
Obr. 74 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál T 317



Obr. 75 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 275

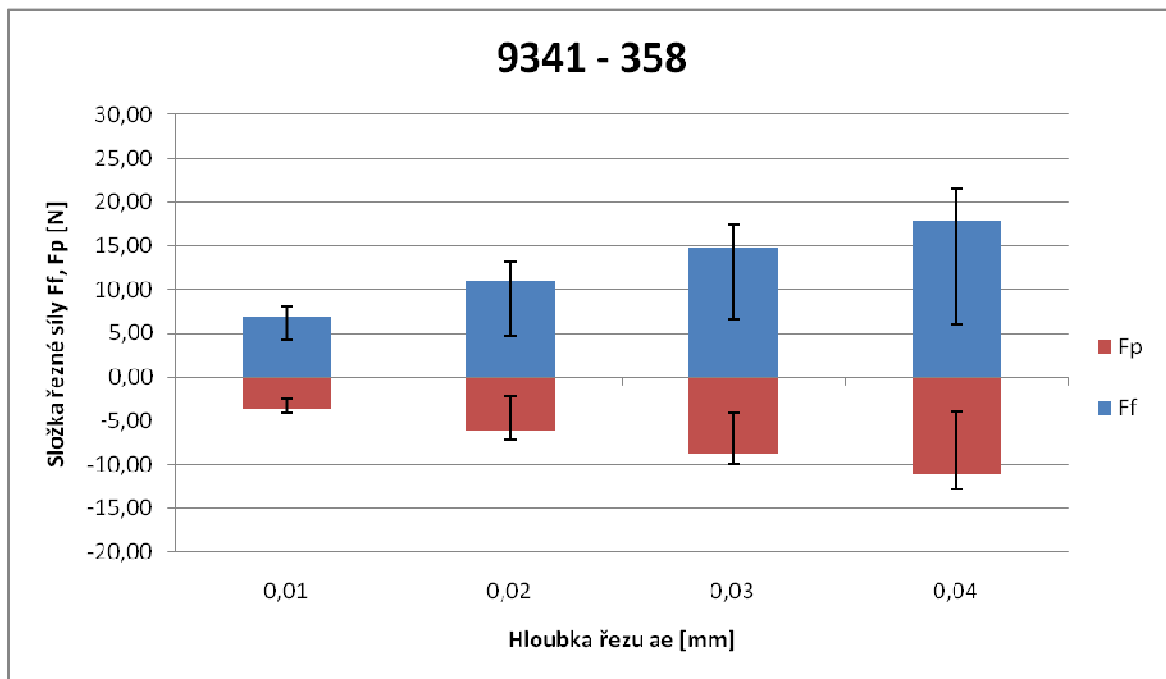


Obr. 76 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 733

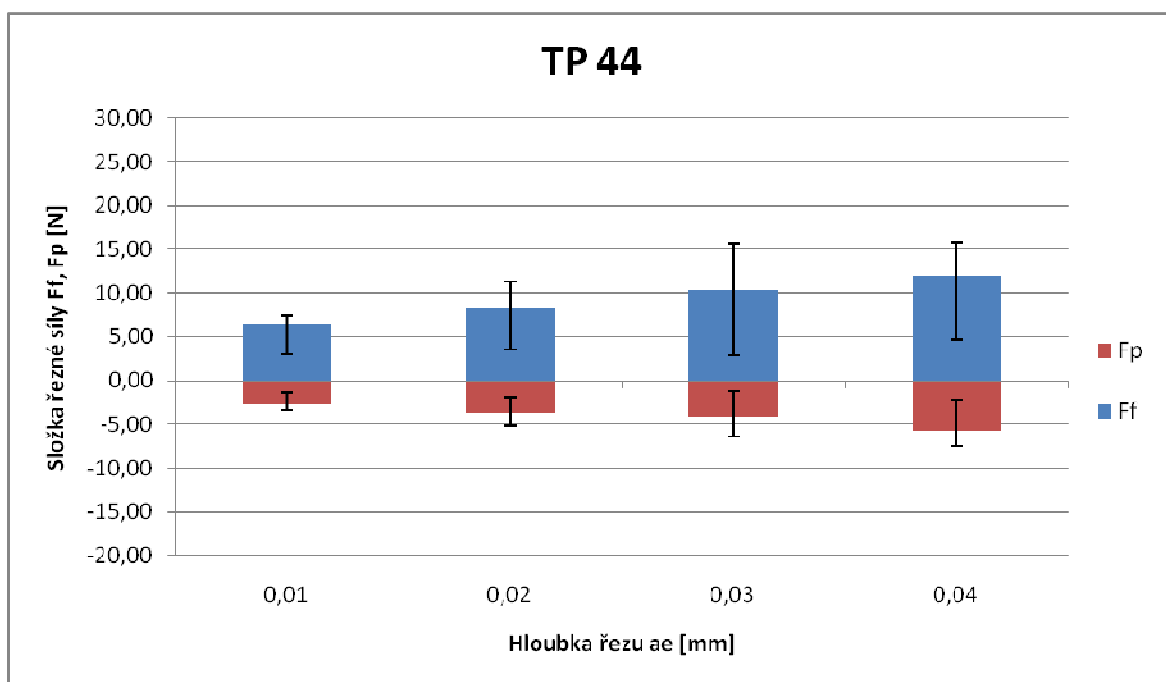


Obr. 77 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 346

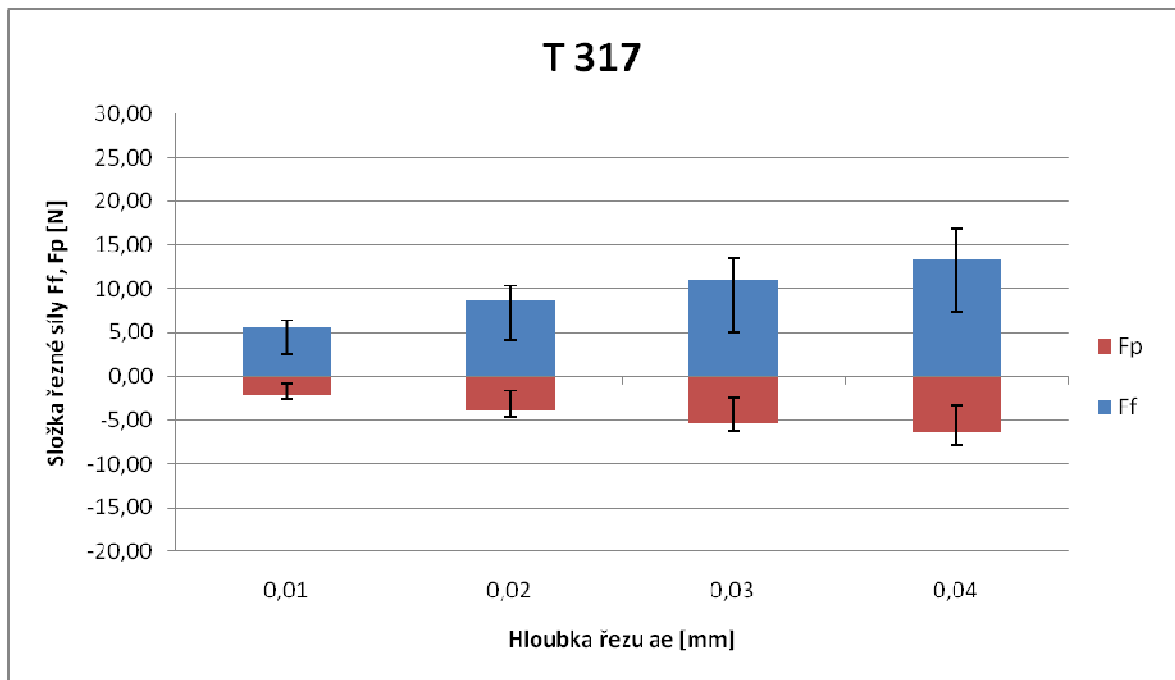
## 9.3.2 Kotouč 99A 80I 8V



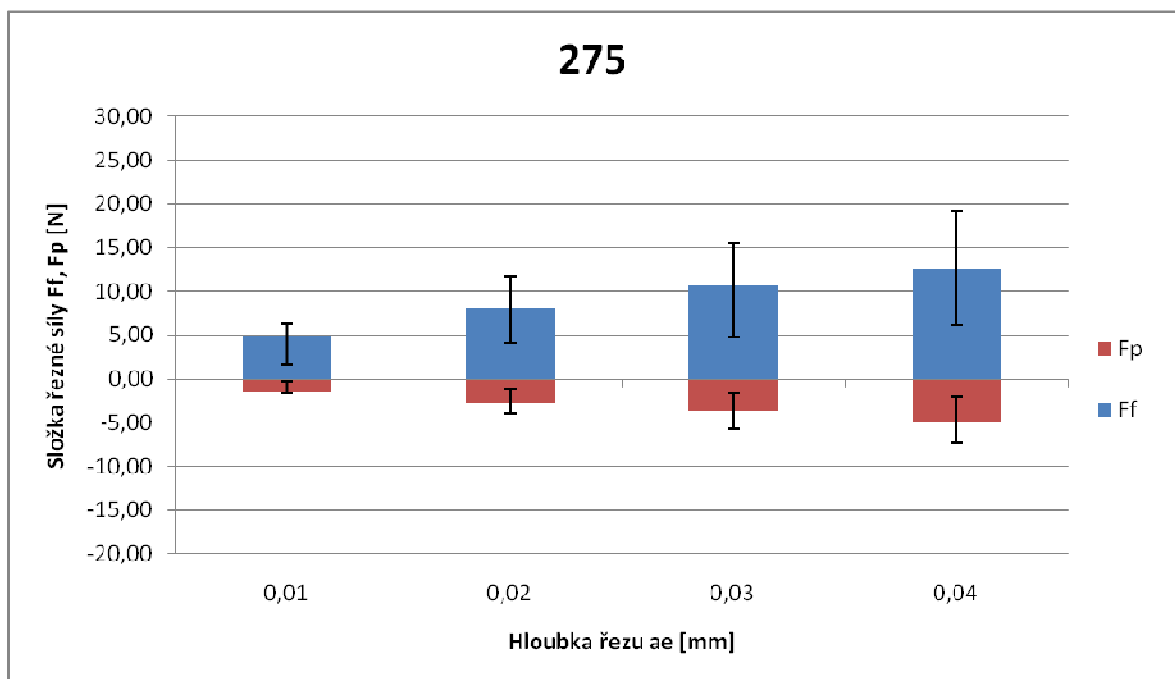
Obr. 78 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 9341 - 358



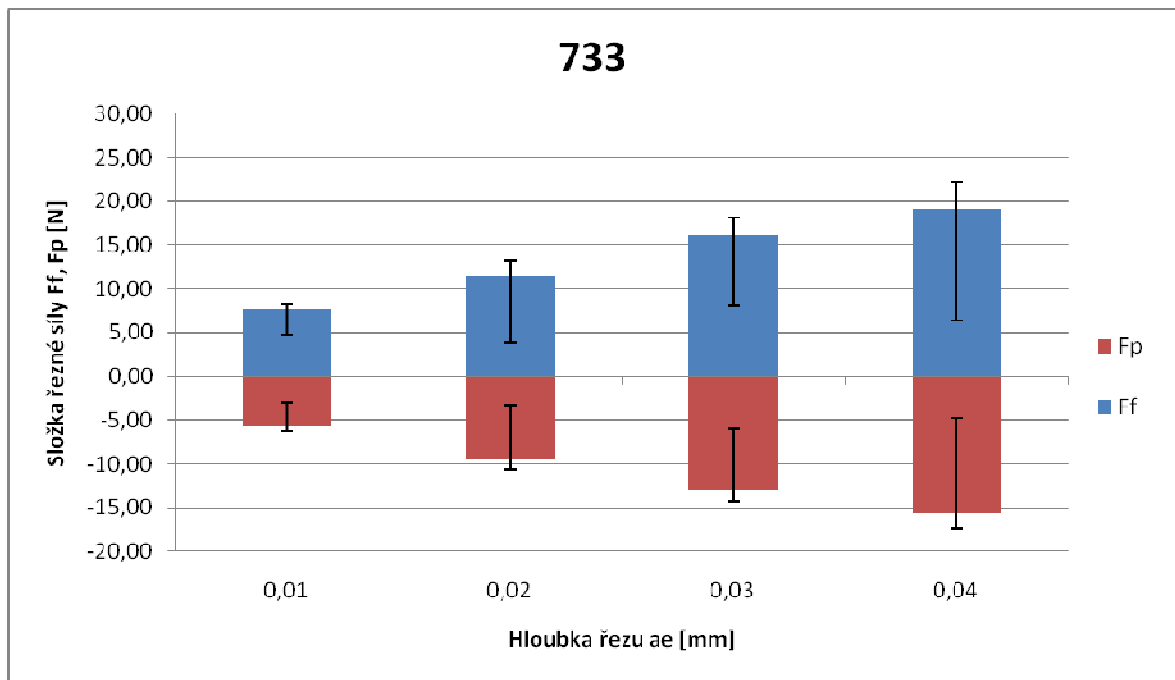
Obr. 79 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál TP 44



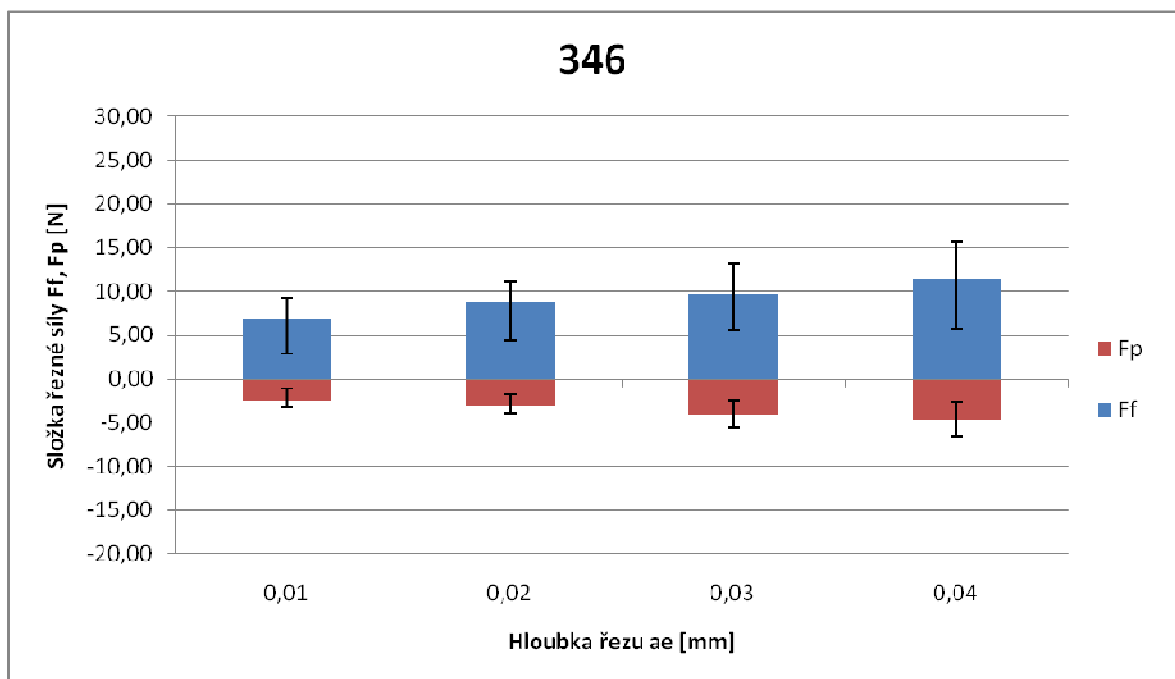
Obr. 80 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál T 317



Obr. 81 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 275

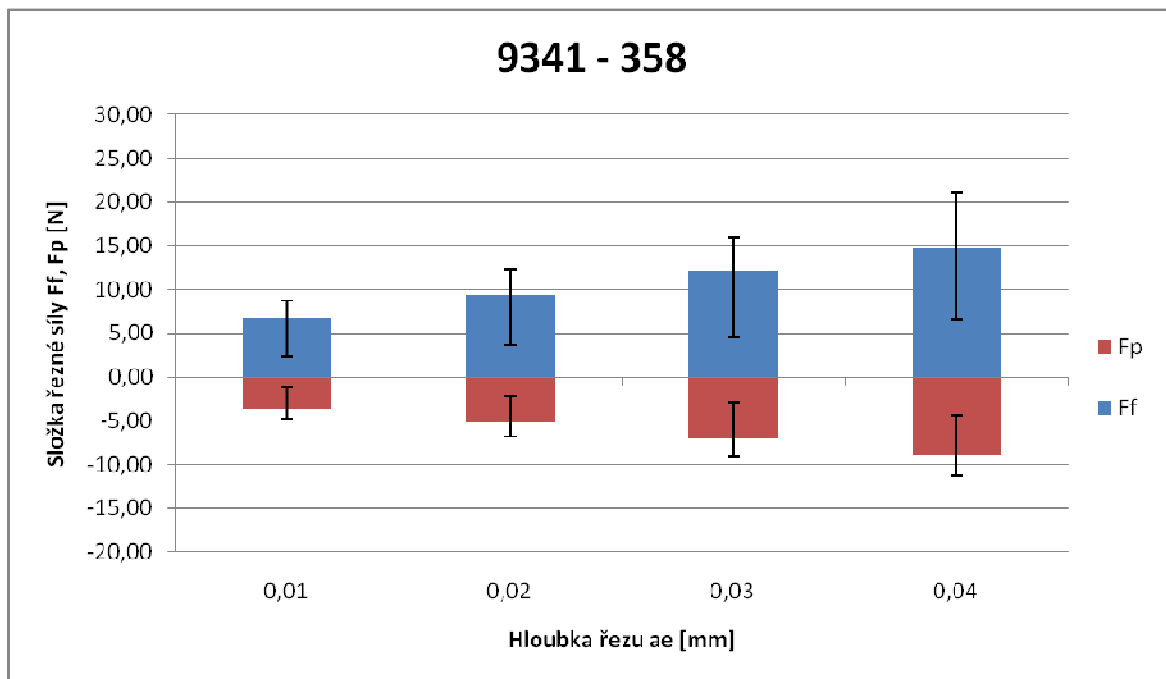


Obr. 82 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 733

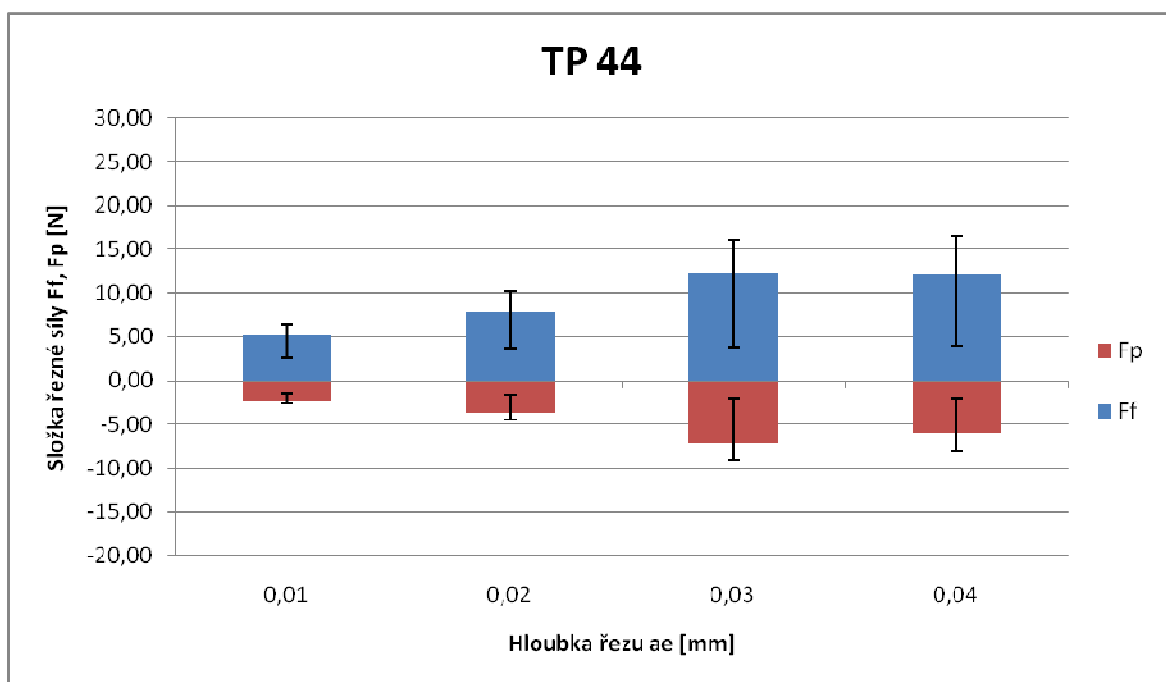


Obr. 83 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 346

## 9.3.3 Kotouč 49C 120J 12V

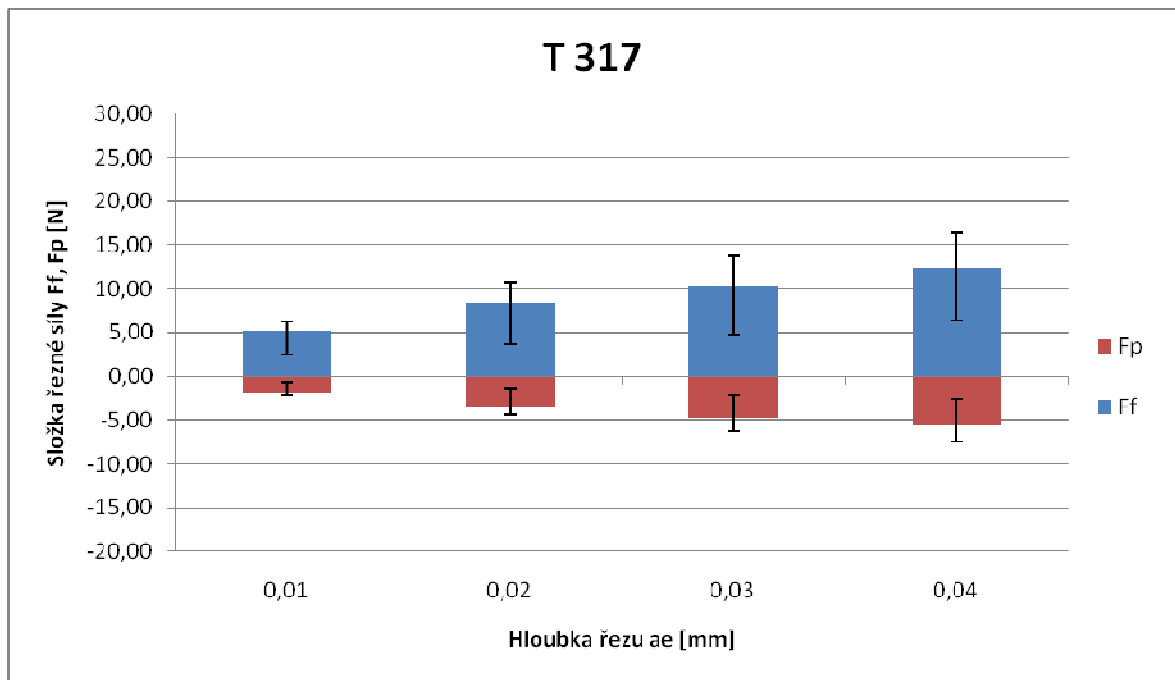


Obr. 84 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 9341 - 358

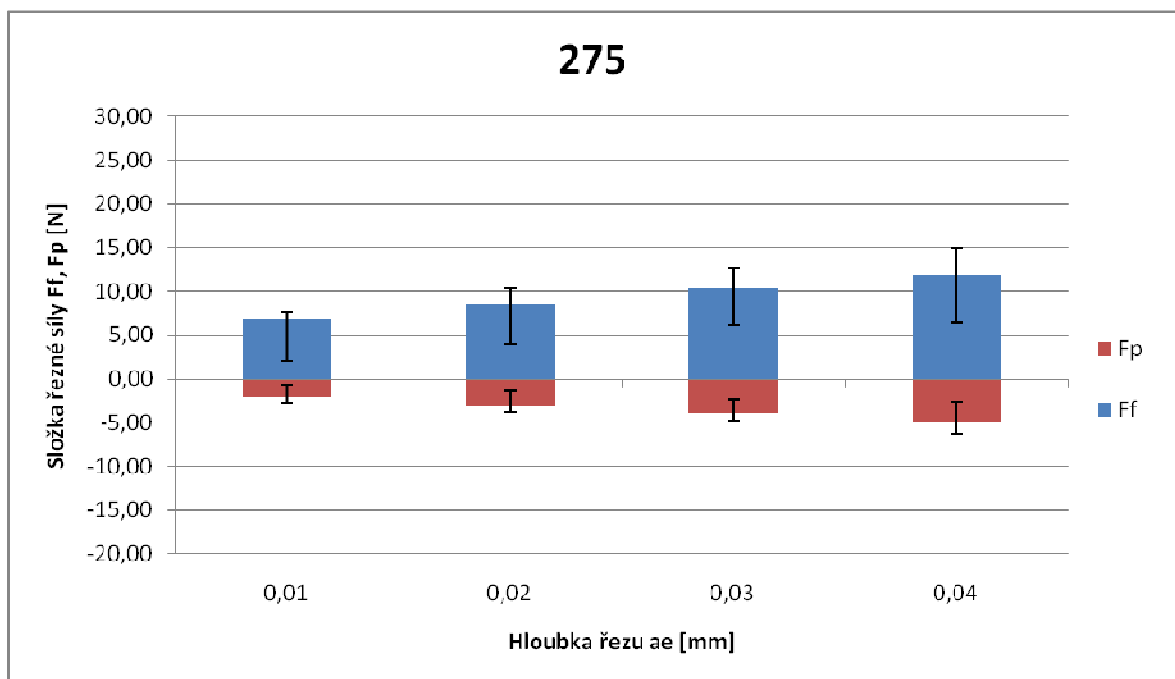


Obr. 85 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál TP 44

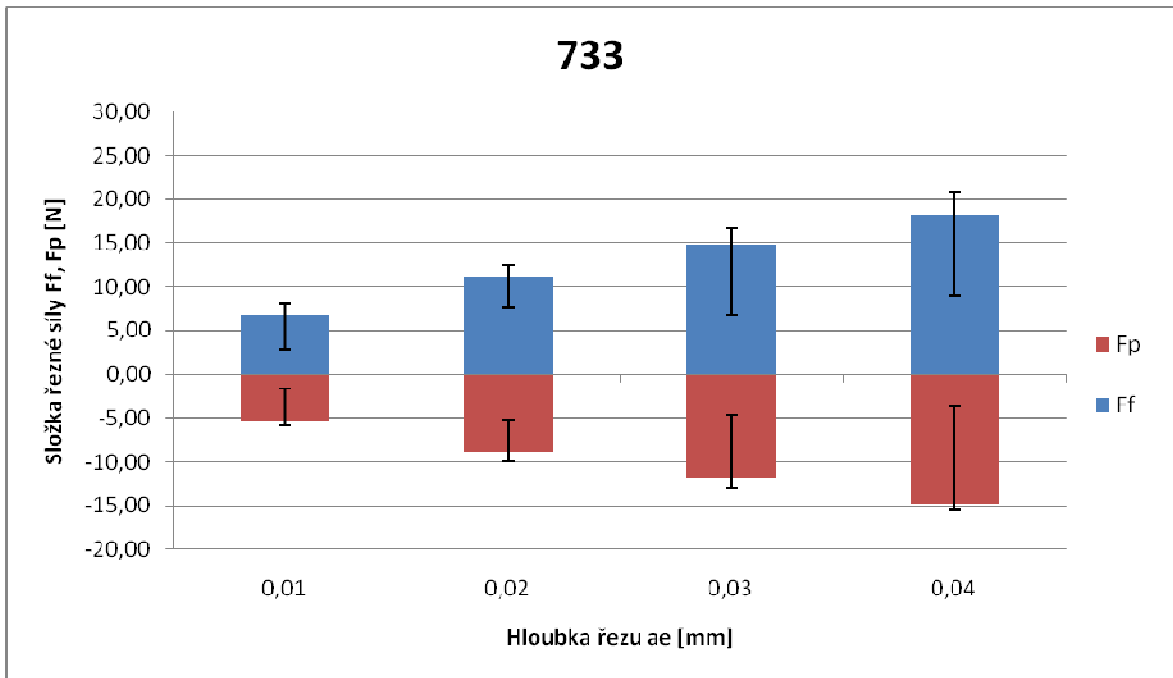




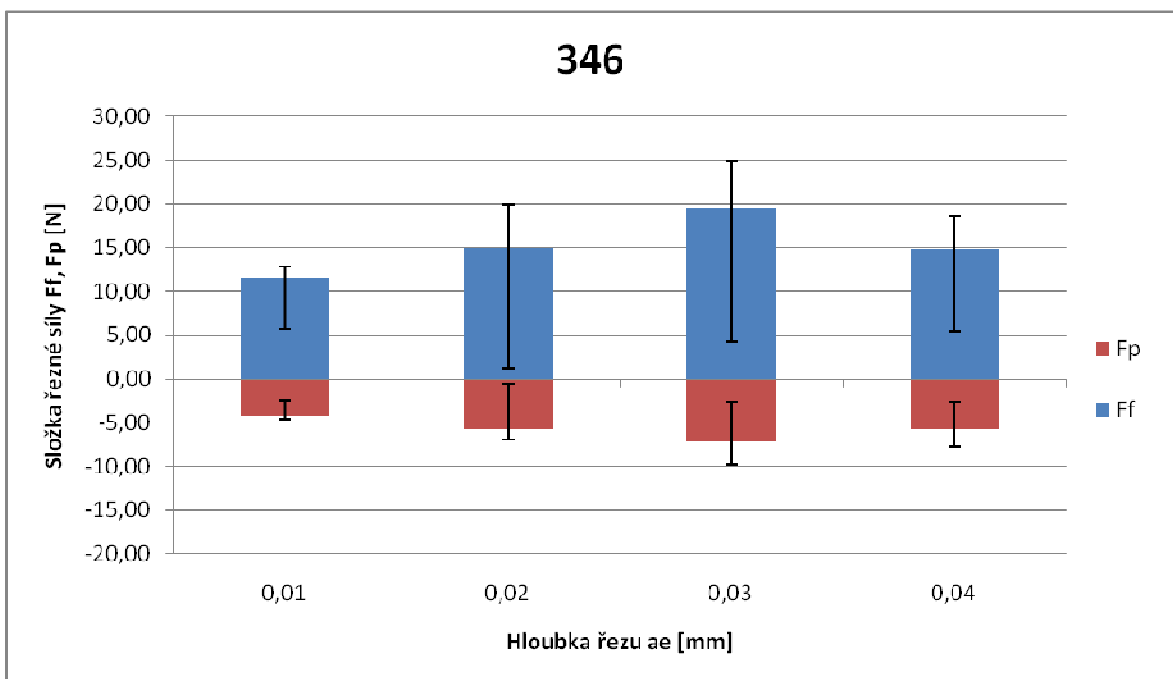
Obr. 86 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál T 317



Obr. 87 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 275



Obr. 88 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 733

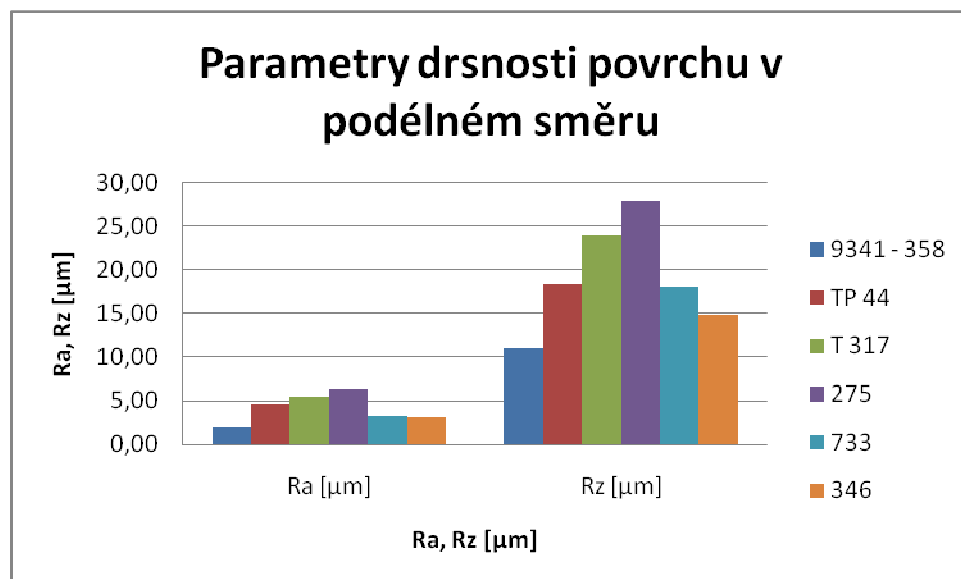


Obr. 89 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 346

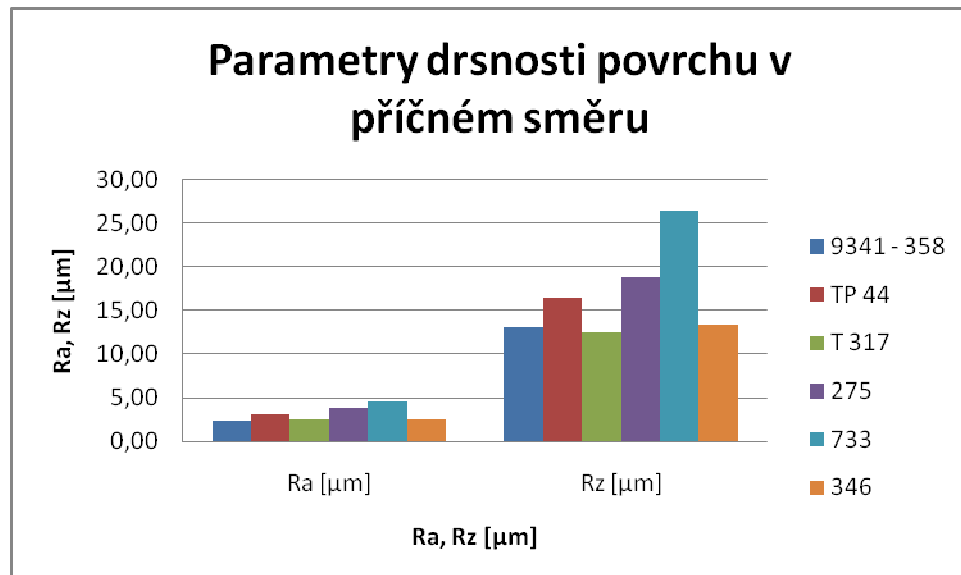
#### 9.4 Měření drsnosti povrchu

Po broušení bylo prováděno měření drsnosti povrchu na 10-ti různých místech jak ve směru podélném tak i v příčném směru na povrchu broušeného vzorku při maximální posuvové rychlosti a hloubky řezu, tj.  $a_e = 0,04$  mm,  $v_f = 23$  m/min.

## 9.4.1 Kotouč 99A 30P 8V

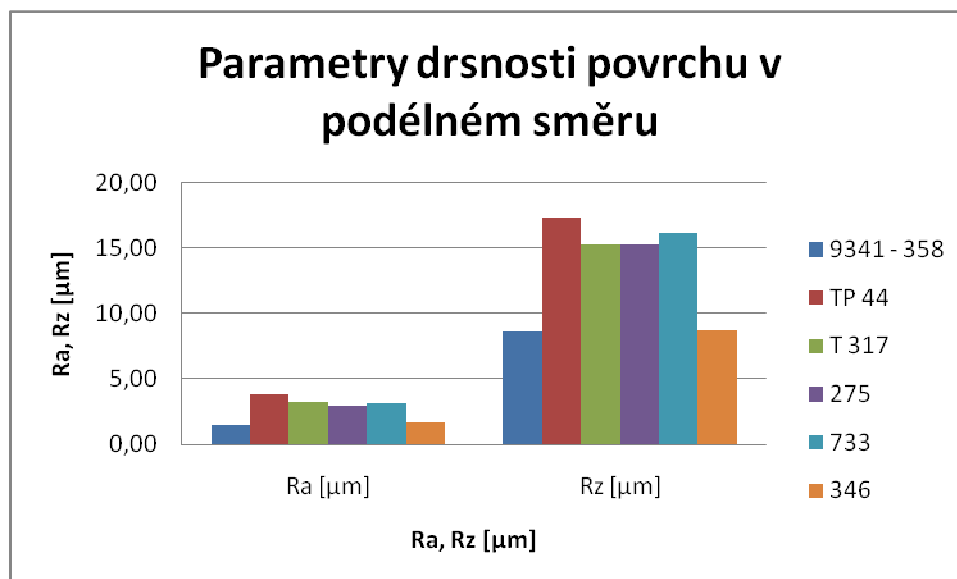


Obr. 90 Parametry drsnosti povrchu v podélném směru

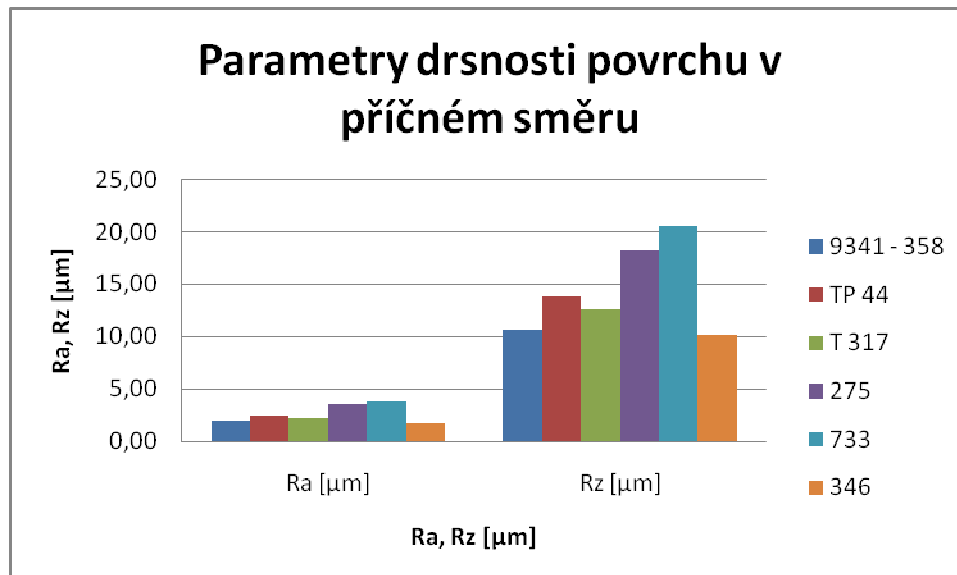


Obr. 91 Parametry drsnosti povrchu v příčném směru

## 9.4.2 Kotouč 99A 80I 8V

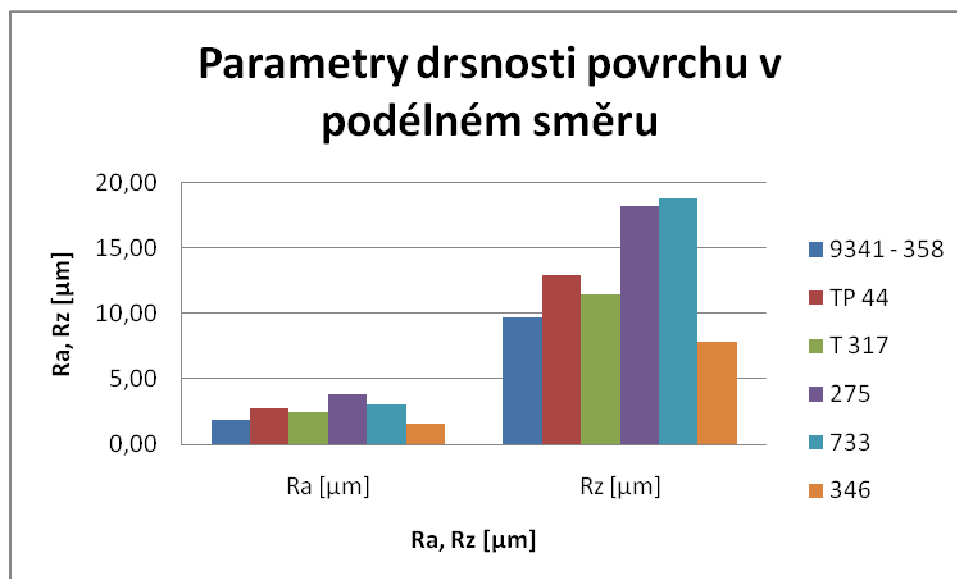


Obr. 92 Parametry drsnosti povrchu v podélném směru

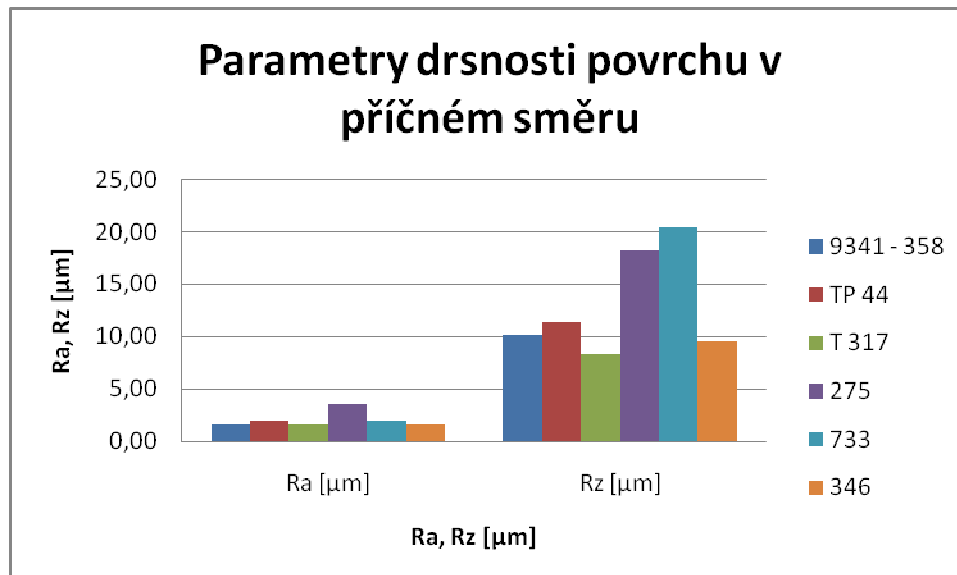


Obr. 93 Parametry drsnosti povrchu v příčném směru

## 9.4.3 Kotouč 49C 120J 12V



Obr. 94 Parametry drsnosti povrchu v podélném směru



Obr. 95 Parametry drsnosti povrchu v příčném směru

## 9.5 Vyhodnocení

Při broušení daných pryžových materiálů docházelo k měření složek řezných sil za pomoci programu Conmes Spider, kde se při broušení měnily jednotlivé technologické parametry broušení, jak hloubka řezu, tak i posuvová rychlost. Na broušení byly použity 3 různé typy kotoučů s různou zrnitostí, tvrdostí a pórovitostí. Po broušení bylo prováděno měření drsnosti povrchu na 10-ti různých místech, jak ve směru podélném, tak i v příčném směru na povrchu broušeného vzorku při maximální posuvové rychlosti a hloubky řezu, tj.  $a_e = 0,04$  mm,  $v_f = 23$  m/min. Další činností bylo snímání povrchu broušeného materiálu za pomoci přístroje ProScope HR.

Samotné vyhodnocování spočívalo v sestavení dvou závislostí. První závislostí byla závislost řezných sil na hloubce řezu, která byla vyhodnocená při konstantní posuvové rychlosti,  $v_f = 7$  m/min. Druhou vyhodnocovanou závislostí byla závislost řezných sil na posuvové rychlosti a to při konstantní hloubce řezu,  $a_e = 0,01$  mm. Na základě naměřených a vyhodnocených dat můžeme dojít k následujícím závěrům.

### 9.5.1 Vliv posuvové rychlosti na řezné síly

Při vyhodnocování složek řezných sil můžeme ve všeobecnosti říci, že docházelo v závislosti při zvyšování posuvové rychlosti při konstantní hloubce řezu  $a_e = 0,01$  mm k plynulému nárůstu velikosti řezných sil jak pro složku  $F_f$  tak i pro  $F_p$ , což můžeme pozorovat např. z obr. 59 nebo 62. Na těchto charakteristikách je zobrazena závislost řezných sil pro posuvové rychlosti, které byly vyhodnocovány pro použitý kotouč typu 99A 80I 8V a 49C 120J 12V. Při použití těchto dvou kotoučů lze říci, že vyhodnocované závislosti mají skoro stejný průběh, což můžeme přiřadit ke skoro stejným vlastnostem kotoučů 99A 80I 8V a 49C 120J 12V, které mají jak zrnitost, tak tvrdost stejnou, tj. jemnou a měkkou. Z obr. 71 kde byl použit kotouč typu 99A 30P 8V, který má zrnitost střední a tvrdost tvrdou, můžeme pozorovat, že při zvyšování posuvové rychlosti dochází k nárůstu řezných sil a jejímu opětovnému poklesu. Tento jev se následně opakuje, kdy dochází k nárůstu složek řezných sil pro  $v_f = 21$  m/min a pro  $v_f = 23$  m/min dochází k mírnému poklesu řezných sil. Z hlediska hodnocení použitých materiálů lze říci, že skoro u všech materiálů docházelo při zvyšování posuvové rychlosti k nárůstu řezných sil. Nejideálnější chování můžeme pozorovat u materiálů 275 a 733, což může být způsobeno jejich složením nebo tvrdostí daného materiálu.

### 9.5.2 Vliv hloubky řezu na řezné síly

Pro vyhodnocování složek řezných sil v závislosti při zvyšování hloubky řezu při konstantní posuvové rychlosti, tj.  $v_f = 7$  m/min, lze opět říci, že docházelo k nárůstu řezných sil jak  $F_f$  tak i  $F_p$ . Tento nárůst se zvyšováním hloubky řezu, jak můžeme vidět např. z *obr.* 76, 82, 88 je patrný u všech typů použitých kotoučů 99A 30P 8V, 99A 80I 8V a 49C 120J 12V. Při použití kotouče typu 49C 120J 12V se jemnou zrnitostí a měkkou tvrdostí lze říci, že opět dochází vzhledem ke zvyšování hloubky řezu k nárůstu řezných sil, ale není tomu tak u všech použitých typů materiálů. U materiálu TP 44 (*obr.* 85) a 346 (*obr.* 89) lze říci, že pro  $a_e = 0,04$  mm dochází k poklesu velikosti řezných sil a tudíž můžeme konstatovat, že tyto dva materiály se nechovají ideálně, což může být opět způsobeno např. typem jejich složení nebo jejich tvrdostí. Z hlediska použitých typů kotoučů lze konstatovat, že při zvyšující se hloubce řezu docházelo ke zvyšování řezných sil.

### 9.5.3 Měření drsnosti povrchu materiálu

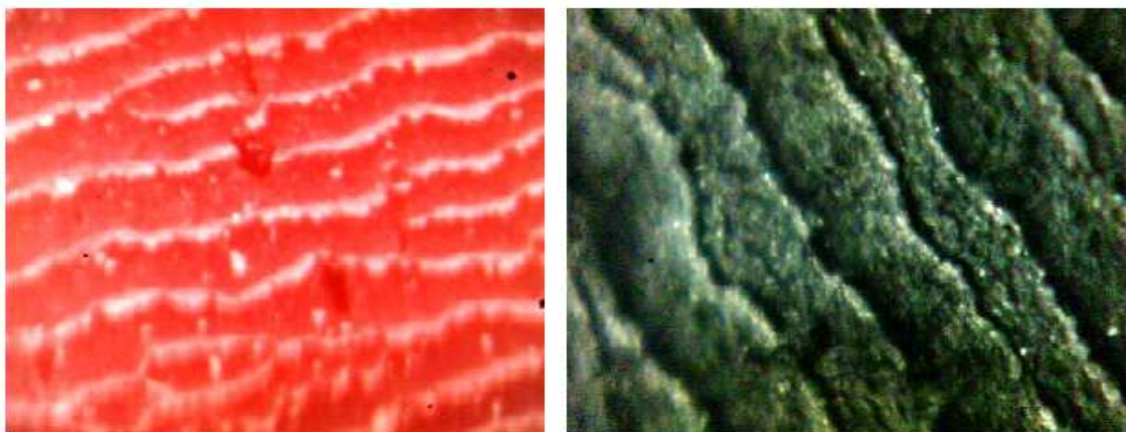
Měření drsnosti povrchu bylo prováděno na 10-ti různých místech, jak ve směru podélném, tak i v příčném směru na povrchu broušeného vzorku při maximální posuvové rychlosti a hloubky řezu, tj.  $a_e = 0,04$  mm,  $v_f = 23$  m/min. Drsnost povrchu při použití kotouče 99A 30P 8V je z *obr.* 90, 91 zřejmé, že hodnoty drsnosti ve směru příčném jsou nižší než ve směru podélném, kde u obou případů má materiál 9341 – 358 nejnižší drsnost povrchu z použitých materiálů. Naopak materiál 733 má ve směru příčném hodnoty drsnosti povrchu vyšší než ve směru podélném. Při použití kotouče 99A 80I 8V (*obr.* 92, 93) lze opět konstatovat, že hodnoty ve směru příčném jsou vyšší než ve směru podélném. I u tohoto typu kotouče má materiál 9341 – 358 nejnižší drsnost povrchu z použitých materiálů. U materiálu TP 44 jsou hodnoty drsnosti povrchu ve směru podélném vyšší než ve směru příčném. Při použití posledního typu kotouče 49C 120J 12V (*obr.* 94, 95) můžeme konstatovat nejnižší hodnoty drsnosti povrchu v příčném směru ze všech použitých typů kotoučů, což mohlo být zapříčiněno jemnou zrnitostí kotouče.

### 9.5.4 Snímání povrchu broušeného materiálu

Poslední činností bylo snímání povrchu broušeného materiálu za pomoci přístroje ProScope HR. U některých typů materiálů docházelo vlivem tření ke generování tzv.

Schallamachových vln, které mají vliv na parametr drsnosti  $R_a$  a při mikroskopickém pozorování se jeví jako vlny (obr. 96).

V roce 1971 Schallamach zjistil, že třením měkkého elastomeru po tuhé ploše pak na rozhraní často dominuje výskyt a šíření elastických nestabilit v podobě povrchových vln → tzv. Schallamachovy vlny. Přítomnost těchto vln může vést k výrazným změnám v frikčních vlastnostech. Schallamachovy vlny se skládají z malých pravidelných lomů (vrstev) napříč směrem posuvu. Schallamachovy vlny se utvářejí na elastomeru, když tvrdé těleso nebo válec se pohybují přes povrch elastomeru kritickou rychlostí. Schallamachovy vlny neobrušují ani neopotřebovávají povrch elastomeru. Přestože výskyt Schallamachových vln byl zkoumán posledních několik desetiletí, obecná mapa týkajících základních materiálových vlastností, geometrie, a provozní podmínky (tj. rychlost a teplota) nebyla stanovena. [5]

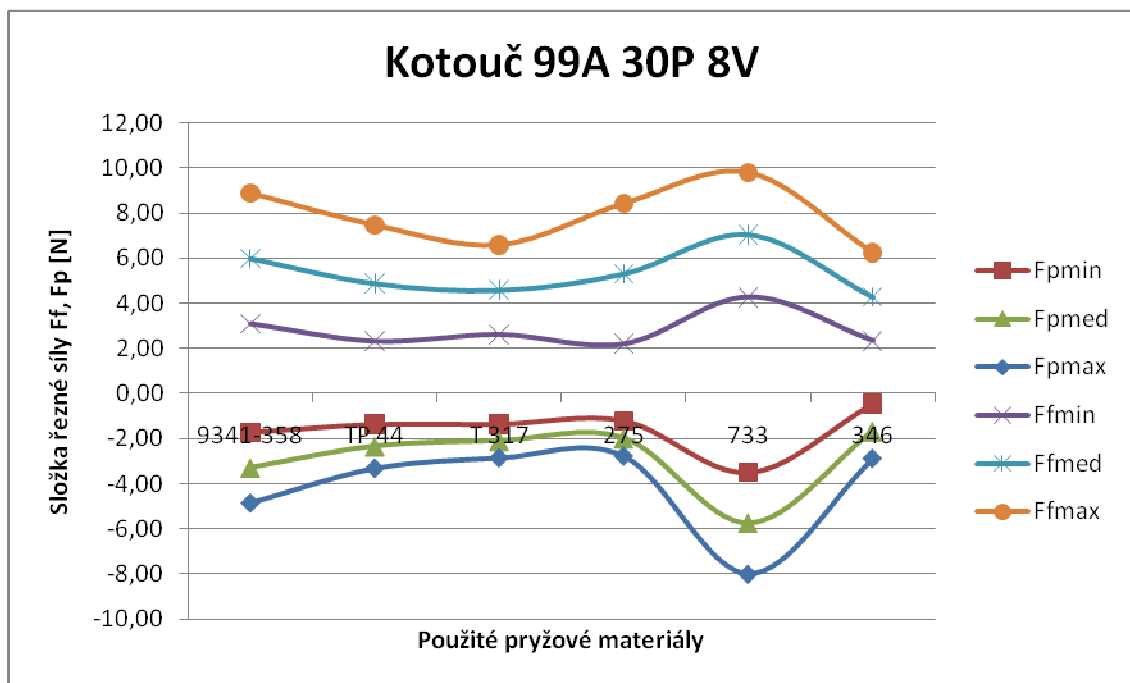


Obr. 96 Pozorování Schallamachových vln u použitých materiálů 9341 – 358 a 733

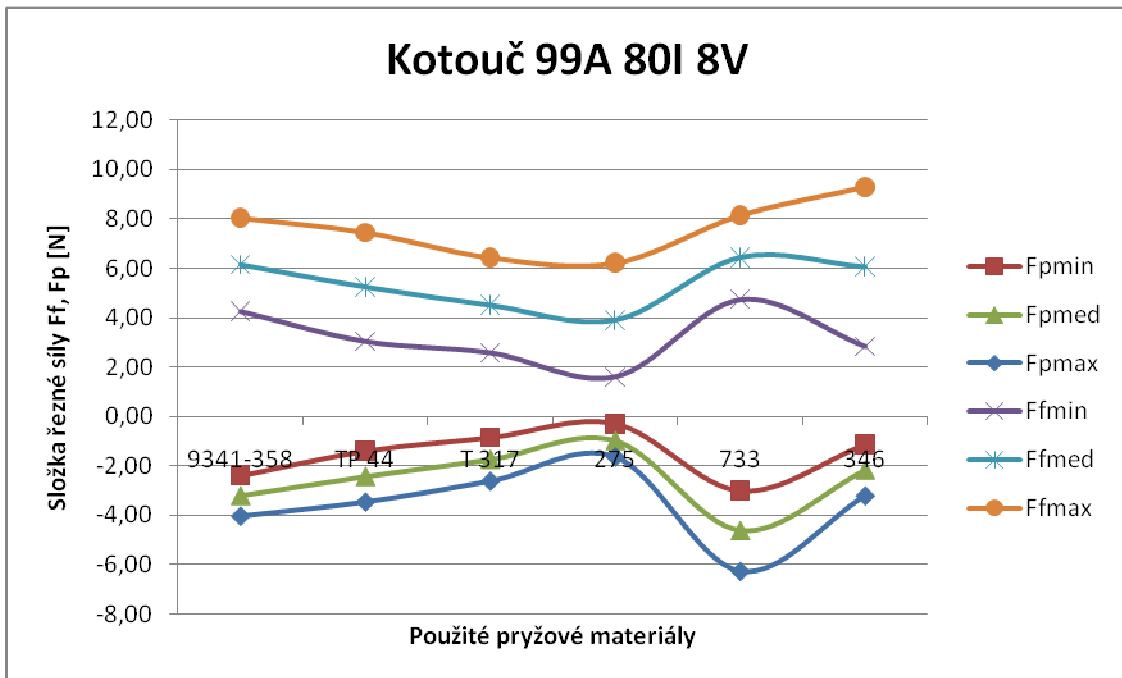


## 10 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

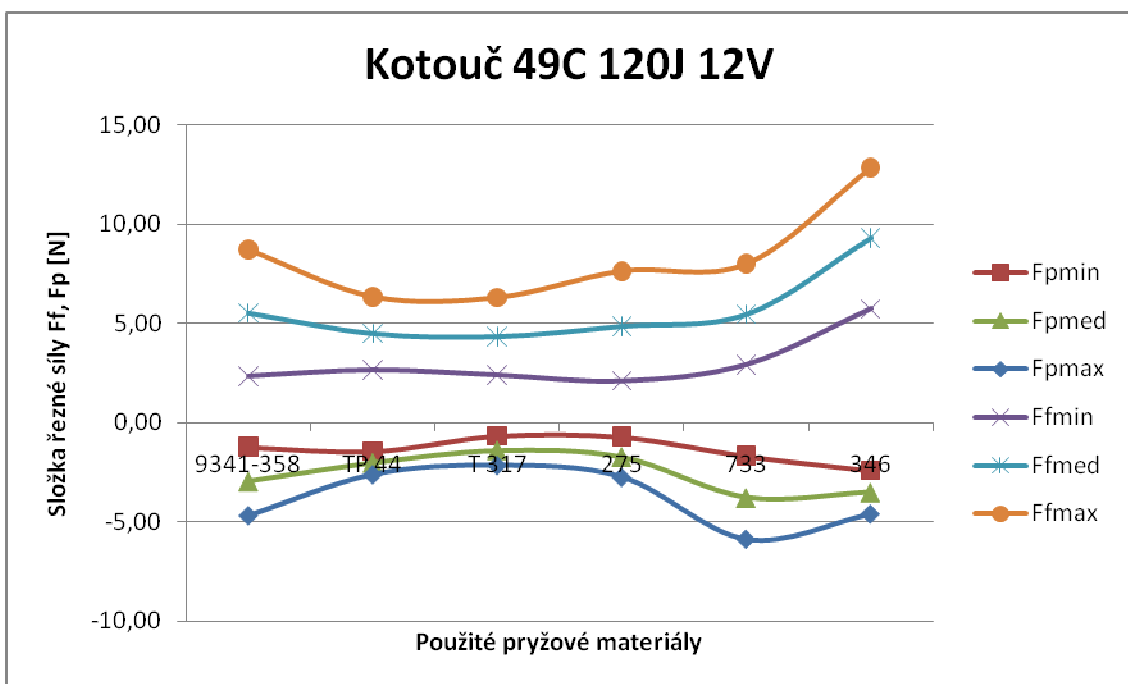
V této kapitole jsem zpracovával naměřená data dle statistických metod. Samotné vyhodnocení bylo rozděleno na dvě vyhodnocení. V prvním případě se jednalo o závislost, kde se vynášely složky řezných sil pro jednotlivé použité pryžové materiály při konstantních technologických podmínkách, tj.  $a_e = 0,01$  mm,  $v_f = 7$  m/min. Za složky řezných sil  $F_f$  a  $F_p$  se vynášely hodnoty maxima, minima a mediánu složek řezných sil. Vyhodnocovány byly všechny typy použitých kotoučů, tj. kotouč 99A 30P 8V (obr. 97), kotouč 99A 80I 8V (obr. 98) a kotouč 49C 120J 12V (obr. 99). Nejideálnější chování dle vyhodnocení podle statistických metod lze pozorovat z obr. 97, kde můžeme vidět plynulé a skoro totožné průběhy pro jednotlivé vynášené hodnoty.



Obr. 97 Statistické vyhodnocení pro kotouč 99A 30P 8V



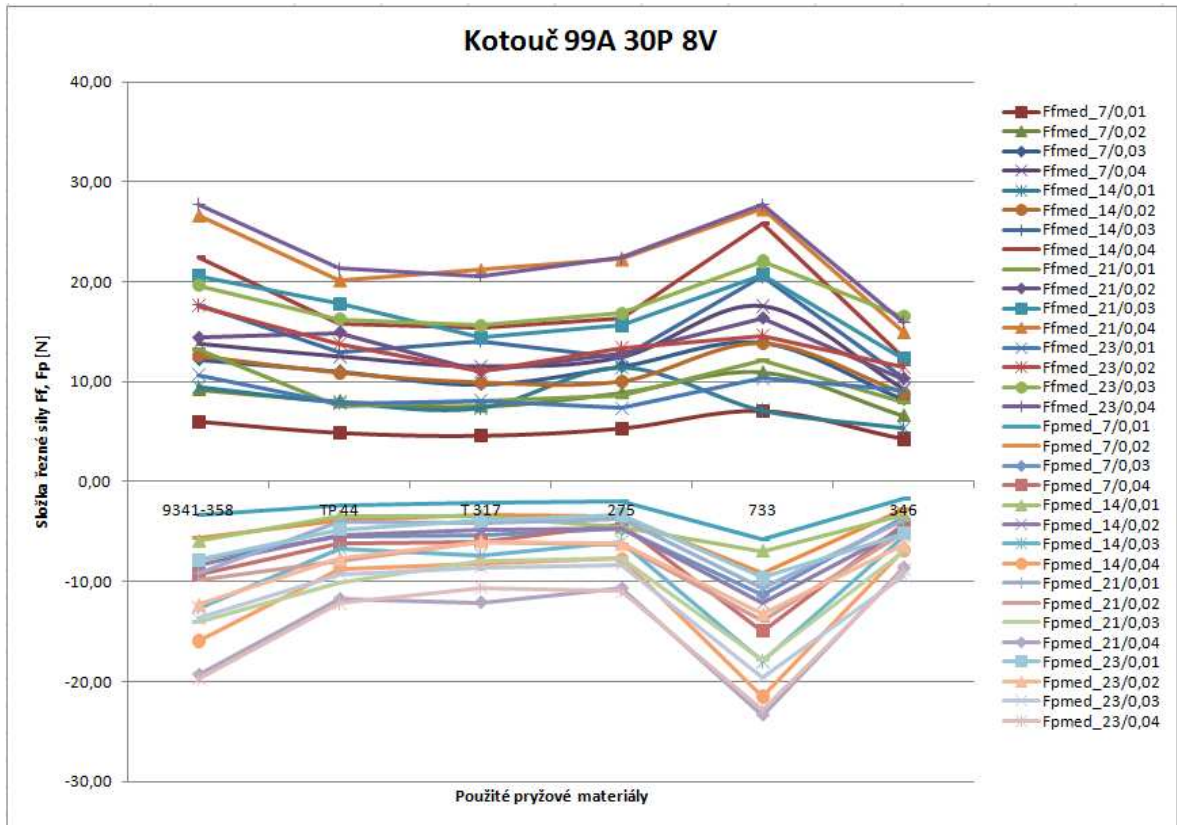
Obr. 98 Statistické vyhodnocení pro kotouč 99A 80I 8V



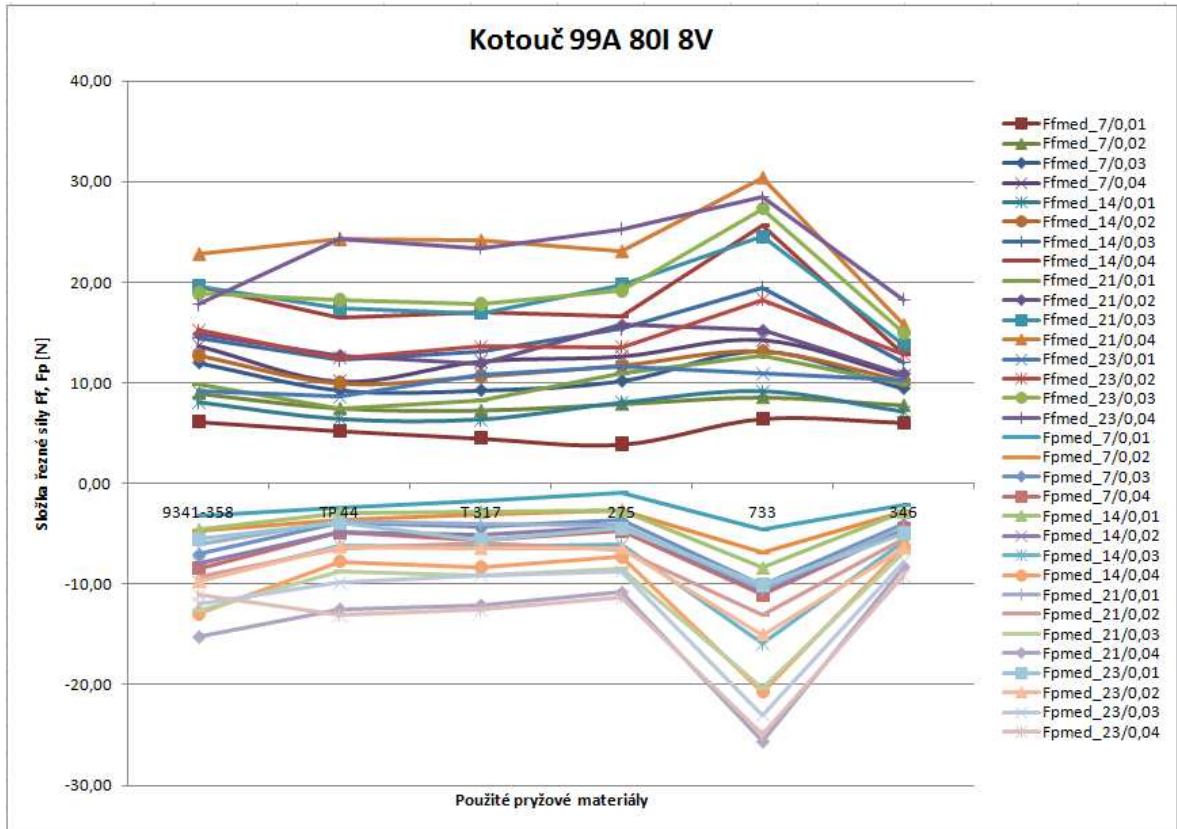
Obr. 99 Statistické vyhodnocení pro kotouč 49C 120J 12V

V druhém případě se jednalo o závislost, kde se vynášely mediány složek řezných sil pro jednotlivé použité pryžové materiály pro všechny technologické podmínky, tj. kombinace všech posuvových rychlostí a hloubek řezu,  $4 \times a_e$ ,  $4 \times v_f$ . Za složky řezných sil  $F_f$  a  $F_p$  se vynášel medián složek řezných sil, kde pro každou složku vycházelo 16 závislostí. Vyhodnocovány byly všechny typy použitých kotoučů, tj. kotouč 99A 30P 8V (obr. 100),

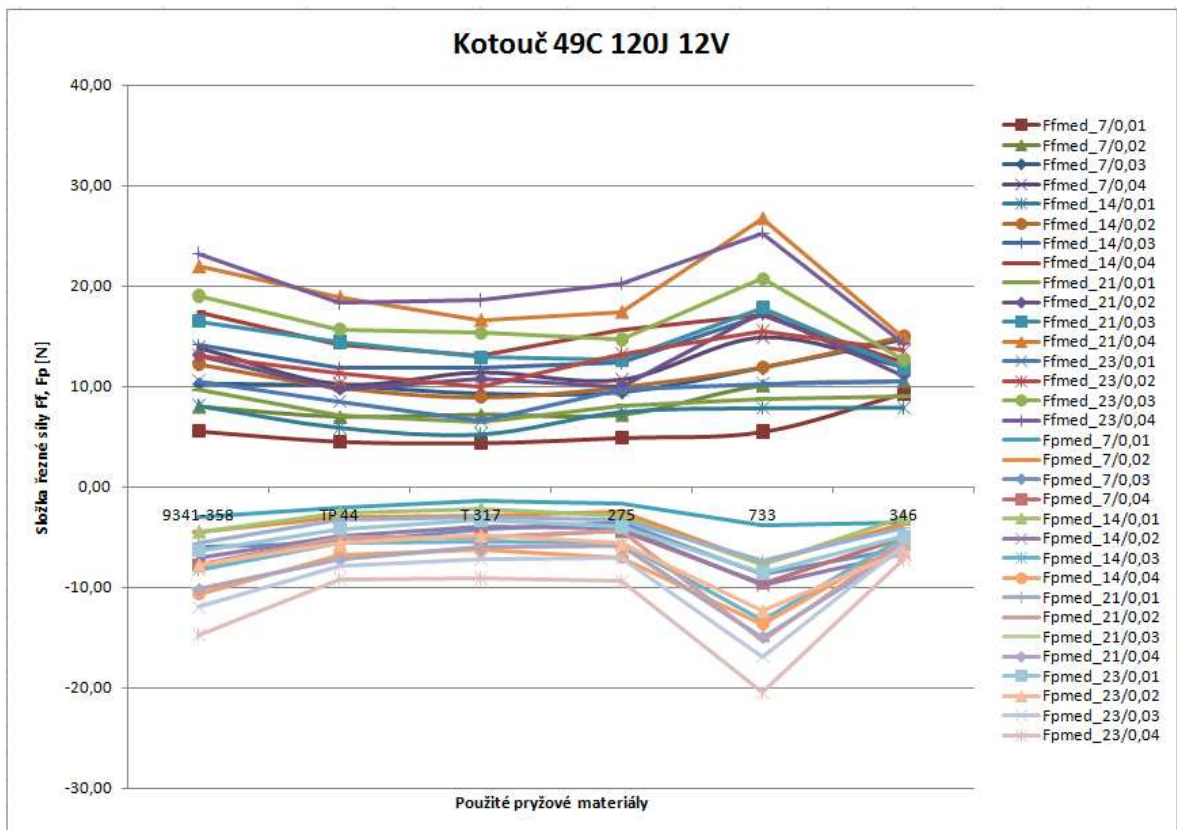
kotouč 99A 80I 8V (obr. 101) a kotouč 49C 120J 12V (obr. 102). Nejdeálnější chování dle vyhodnocení podle statistických metod lze pozorovat z obr. 100, kde můžeme vidět plynulé a skoro totožné průběhy pro jednotlivé vynášené hodnoty.



Obr. 100 Statistické vyhodnocení pro kotouč 99A 30P 8V



Obr. 101 Statistické vyhodnocení pro kotouč 99A 80I 8V



Obr. 102 Statistické vyhodnocení pro kotouč 49C 120J 12V

## ZÁVĚR

Pomocí broušení dosahujeme konečné přesnosti obrobků a upravujeme zároveň jejich povrch. Používáme k tomu broušicích látek a to buď prášků nebo různých kotoučů a tyčinek. Broušící stroje slouží jednak k obrábění předmětů, ale jednak i k ostření nástrojů.

Náplní mojí diplomové práce bylo určit dynamickou obrobiteľnosť pryžových vzorků při broušení, které se provádělo na stroji BRH 20.03F.

Cíl mého měření byl rozdělen do několika bodů. V prvním bodě bylo třeba navrhnout 3D model formy, potřebné k následné vulkanizaci daných pryžových vzorků. Po návrhu byla tato forma vyrobena na CNC frézce. Dalším krokem byla příprava zkušebních vzorků, která spočívala ve vulkanizaci těchto vzorků. Po přípravě vzorků došlo k jejich broušení, při kterém se měřily složky řezných sil při změně jednotlivých technologických parametrů při broušení a následně zpracovávali za pomoci programu Conmes Spider. Posledním krokem bylo měření drsnosti povrchu zkušebních vzorků jak v podélném směru tak i v příčném směru.

Při vyhodnocování naměřených dat jsem vyčíslil složky řezných sil, které byly následně použity v závislosti na posuvové rychlosti a hloubce řezu. Tyto hodnoty byly následně použity pro vyhodnocení dle statistických metod. Vyhodnocování měření jsem prováděl v programu Microsoft Excel.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] KOČMAN, K. – PROKOP, J. *Technologie obrábění*. CERM Brno, 2001.  
ISBN 80-214-3068-0
- [2] MUSÍLKOVÁ – ROSA. *Teorie obrábění*. 2 vyd. ČVUT Praha, 1970.
- [3] VASILKO, K. *Technológia dokončovania povrchov*. COFIN Prešov, 2004.  
ISBN 80-8073-124-1
- [4] ŘASA, J. – GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 – 1 díl*. 2 vyd. SCIENTEA Praha, 2005.
- [5] ADÁMEK, T. Diplomová práce. *Dokončovací obrábění termoplastů*. UTB Zlín, 2008.
- [6] MATULA, L. Bakalářská práce. *Vliv technologických podmínek na jakost při broušení na stroji BRH 20.03 F*. UTB Zlín, 2008.
- [7] Drsnost povrchu – použité materiály doc. Ing. Imricha Lukovicsa, CSc.
- [8] VASILKO, K. – BOKUČAVA, G. *Brúsenie kovových materiálov*. ALFA Bratislava, 1988. ISBN 30205-063-143-88
- [9] PULCOVÁ, T. Diplomová práce. *Dynamická obrobiteľnosť kovů a plastů při broušení*. UTB Zlín, 2007.
- [10] ČSN EN ISO 4287. *Povrch a jeho parametry. Drsnost povrchu*. ČNI Praha, 1997.
- [11] MITUTOYO SJ – 301. *Přístroj na měření drsnosti povrchu*. Návod k použití.
- [12] DVOŘÁK, Z. *Zpracovatelské procesy gumárenské*. Skripta ZPG Zlín, 2009.
- [13] MARCÍN, J. – ZÍTEK, P. *Gumárenské výroby I - Pneumatiky*. SNTL Praha, 1985.  
ISBN 04-626-85
- [14] DOLEŽAL, P. – PACAL, B. *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů*. VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství.
- [15] TICHAVA, M. *Měření tvrdosti pryže a plastů v současném zkušebnictví. Technická správa VUGPT Zlín*. Zlín, 1985.
- [16] JAROUŠEK, J. *Metody zkoumání polymerů*. VŠCHT Pardubice, 1984.

- [17] VAŠÍŘ, J. Bakalářská práce. *Studie tribologických vlastností povrchu dutiny formy*. UTB Zlín, 2006.
- [18] ŠŮSTEK, P. *Výzkum metod určování intenzivního opotřebení technologických ploch*. UTB Zlín, 2001.
- [19] POPELKA, A. Diplomová práce. *Dynamická obrobiteľnosť kovů a plastů při broušení a frézování*. UTB Zlín, 2008.
- [20] DVOŘÁK, Z. – JAVOŘÍK, J. *Konstrukce výrobků. Konstrukční materiály elastomerní a formy pro jejich výrobu*. Skripta KSV Zlín, 2009.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$R_a$	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [ $\mu\text{m}$ ]
$R_z$	Největší výška profilu [ $\mu\text{m}$ ]
$v_f$	Posuvová rychlost [ m/min ]
$a_e$	Hloubka řezu [ mm ]
$v$	Řezná rychlost [ m/s ]
$f_z$	Posuv na zrno [ mm ]
$z$	Počet zubů na obvodě kotouče
$v_o$	Obvodová rychlost obrobku
$u_k$	Frekvence otáčení kotouče [ $\text{min}^{-1}$ ]
$\tau_S$	Strojový čas [ min ]
$n$	Otáčky [ ot/min ]
$\gamma_n$	Normálový úhel čela
$\alpha_n$	Normálový úhel hřbetu
$r_n$	Poloměr zaoblení ostří
$F_c$	Řezná síla
$F_p$	Pasivní síla
$F_f$	Posuvová síla



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Adhezivní opotřebení</i> .....	19
<i>Obr. 2 Abrazivní opotřebení</i> .....	20
<i>Obr. 3 Erozivní opotřebení</i> .....	21
<i>Obr. 4 Kavitační opotřebení</i> .....	21
<i>Obr. 5 Únavové opotřebení</i> .....	22
<i>Obr. 6 Vibrační opotřebení</i> .....	22
<i>Obr. 7 Vybrané způsoby obvodového a čelního broušení</i> .....	24
<i>Obr. 8 Model záběru brousícího zrna</i> .....	25
<i>Obr. 9 Rozložení řezných sil při obvodovém axiálním broušení do kulata</i> .....	26
<i>Obr. 10 Princip radiálního (zapichovacího) broušení</i> .....	28
<i>Obr. 11 Hloubkové broušení odstupňovaným kotoučem</i> .....	28
<i>Obr. 12 Hloubkové broušení zešikmeným kotoučem (a) a kombinovaným kotoučem (b)</i> .....	28
<i>Obr. 13 Vnitřní broušení. a – s rotací obrobku, b – s planetovou rotací brusného kotouče</i> .....	29
<i>Obr. 14 Bezhruté broušení</i> .....	30
<i>Obr. 15 Schéma rovinného broušení</i> .....	31
<i>Obr. 16 Schéma rovinného broušení čelem kotouče</i> .....	32
<i>Obr. 17 Schéma nerovnoměrní deformací abrazivního pásu při broušení lopatky plynové turbíny. 1-5 jednotlivé zrna pásu</i> .....	33
<i>Obr. 18 Způsoby broušení pásem</i> .....	33
<i>Obr. 19 Schéma práce volného brusného zrna při dokončování povrchu</i> .....	34
<i>Obr. 20 Schéma superfinišování vnější válcové plochy</i> .....	34
<i>Obr. 21 Lístkový leštící kotouč (a) a pohled na vyleštěný povrch (b)</i> .....	35
<i>Obr. 22 Příklad označení brousícího kotouče</i> .....	36
<i>Obr. 23 Označování tvarů brousících kotoučů</i> .....	37
<i>Obr. 24 Broušení rovinných ploch obvodem kotouče</i> .....	39
<i>Obr. 25 Podélné broušení válcových ploch</i> .....	40
<i>Obr. 26 Planetové broušení</i> .....	40
<i>Obr. 27 Bezhruté broušení</i> .....	41
<i>Obr. 28 Profil obrobeného povrchu při různých metodách obrábění</i> .....	44

<i>Obr. 29 Nerovnosti povrchu .....</i>	45
<i>Obr. 30 Příčná a podélná drsnost .....</i>	45
<i>Obr. 31 Interferenční mikroskop.....</i>	49
<i>Obr. 32 Schéma absolutního snímače.....</i>	49
<i>Obr. 33 Schéma relativního snímače .....</i>	50
<i>Obr. 34 Princip piezoelektrického snímače .....</i>	50
<i>Obr. 35 Schéma měřícího přístroje Shore .....</i>	53
<i>Obr. 36 3D model formy .....</i>	55
<i>Obr. 37 Nástrojový list z programu SURFCAM.....</i>	56
<i>Obr. 38 Operační list z programu SURFCAM .....</i>	56
<i>Obr. 39 Detailní záběr na upnutí a nastavení polohy obráběcího nástroje .....</i>	57
<i>Obr. 40 Detailní záběr výroby formy na CNC frézce .....</i>	57
<i>Obr. 41 Dvouválec pro míchání směsí.....</i>	59
<i>Obr. 42 Vysekávací stroj.....</i>	59
<i>Obr. 43 Lisovací stroj .....</i>	60
<i>Obr. 44 Vylisované zkušební vzorky .....</i>	60
<i>Obr. 45 Schéma brusky BRH 20.03 F.....</i>	63
<i>Obr. 46 Vodorovná rovinná bruska BRH 20.03 F.....</i>	63
<i>Obr. 47 Detailní záběr na upnutí vzorku při broušení .....</i>	64
<i>Obr. 48 Schéma drsnoměru Mitutoyo SJ – 301 .....</i>	65
<i>Obr. 49 Drsnoměr Mitutoyo SJ - 301 .....</i>	65
<i>Obr. 50 Detailní záběr měření drsnosti povrchu broušeného vzorku.....</i>	66
<i>Obr. 51 Dvousložkový tenzometrický dynamometr.....</i>	67
<i>Obr. 52 Charakteristika měření zapsána pomocí programu Conmes Spider.....</i>	68
<i>Obr. 53 Schéma měření složek řezných sil.....</i>	68
<i>Obr. 54 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 9341 - 358 .....</i>	69
<i>Obr. 55 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál TP 44.....</i>	69
<i>Obr. 56 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál T 317 .....</i>	70
<i>Obr. 57 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 275 .....</i>	70
<i>Obr. 58 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 733 .....</i>	71
<i>Obr. 59 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 346 .....</i>	71
<i>Obr. 60 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 9341 - 358.....</i>	72
<i>Obr. 61 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál TP 44.....</i>	72

<i>Obr. 62 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál T 317</i> .....	73
<i>Obr. 63 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 275</i> .....	73
<i>Obr. 64 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 733</i> .....	74
<i>Obr. 65 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 346</i> .....	74
<i>Obr. 66 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 9341 - 358</i> .....	75
<i>Obr. 67 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál TP 44</i> .....	75
<i>Obr. 68 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál T 317</i> .....	76
<i>Obr. 69 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 275</i> .....	76
<i>Obr. 70 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 733</i> .....	77
<i>Obr. 71 Závislost řezných sil na posuvové rychlosti pro materiál 9341 - 358</i> .....	77
<i>Obr. 72 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 9341 - 358</i> .....	78
<i>Obr. 73 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál TP 44</i> .....	78
<i>Obr. 74 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál T 317</i> .....	79
<i>Obr. 75 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 275</i> .....	79
<i>Obr. 76 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 733</i> .....	80
<i>Obr. 77 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 346</i> .....	80
<i>Obr. 78 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 9341 - 358</i> .....	81
<i>Obr. 79 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál TP 44</i> .....	81
<i>Obr. 80 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál T 317</i> .....	82
<i>Obr. 81 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 275</i> .....	82
<i>Obr. 82 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 733</i> .....	83
<i>Obr. 83 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 346</i> .....	83
<i>Obr. 84 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 9341 - 358</i> .....	84
<i>Obr. 85 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál TP 44</i> .....	84
<i>Obr. 86 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál T 317</i> .....	85
<i>Obr. 87 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 275</i> .....	85
<i>Obr. 88 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 733</i> .....	86
<i>Obr. 89 Závislost řezných sil na hloubce řezu pro materiál 346</i> .....	86
<i>Obr. 90 Parametry drsnosti povrchu v podélném směru</i> .....	87
<i>Obr. 91 Parametry drsnosti povrchu v příčném směru</i> .....	87
<i>Obr. 92 Parametry drsnosti povrchu v podélném směru</i> .....	88
<i>Obr. 93 Parametry drsnosti povrchu v příčném směru</i> .....	88
<i>Obr. 94 Parametry drsnosti povrchu v podélném směru</i> .....	89

---

<i>Obr. 95</i>	<i>Parametry drsnosti povrchu v příčném směru .....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 96</i>	<i>Pozorování Schallamachových vln u použitých materiálů 9341 – 358 a 733 .....</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 97</i>	<i>Statistické vyhodnocení pro kotouč 99A 30P 8V .....</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 98</i>	<i>Statistické vyhodnocení pro kotouč 99A 80I 8V .....</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 99</i>	<i>Statistické vyhodnocení pro kotouč 49C 120J 12V .....</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 100</i>	<i>Statistické vyhodnocení pro kotouč 99A 30P 8V .....</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 101</i>	<i>Statistické vyhodnocení pro kotouč 99A 80I 8V .....</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 102</i>	<i>Statistické vyhodnocení pro kotouč 49C 120J 12V .....</i>	<i>96</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1</i> Obvodové rychlosti běžných brusných kotoučů.....	27
<i>Tab. 2</i> Drsnost povrchů obrobených rovinných ploch.....	47
<i>Tab. 3</i> Použité kaučukové směsi na přípravu zkušebních vzorků .....	58
<i>Tab. 4</i> Tvrdost použitých pryžových směsí.....	58
<i>Tab. 5</i> Technologické podmínky při broušení.....	61
<i>Tab. 6</i> Typy použitých brousících kotoučů.....	61
<i>Tab. 7</i> Technické parametry brusky BRH 20.03 F.....	62

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1:      Dynamická obrobiteľnosť pryžových materiálů broušením  
                    (elektronická příloha)