

Korelace struktury brousícího kotouče a jakosti broušené plochy

Bc. David Kolář

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. David KOLÁŘ**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Téma práce: **Korelace struktury broušícího kotouče a jakosti
broušené plochy**

Zásady pro vypracování:

- 1. Zpracujte teoretickou studii na téma broušení, struktury broušícího nástroje a měření jakosti povrchu po broušení**
- 2. Určete strukturu daných broušících kotoučů**
- 3. Připravte vzorky, broušené kotouči s určenou strukturou, za různých technologických podmínek**
- 4. Zjistěte vliv struktury kotouče na jakost broušené plochy po broušení**
- 5. Naměřená data statisticky vyhodnoťte**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

- 1.Kocman,K.; Prokop,J.: Technologie obrábění. Akademické nakladatelství CERM,ISBN 80-214-3068-0
- 2.Vasilko,K.; Bokučava,G.:Brúsenie kovových materiálov. Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Bratislava
- 3.Bumbálek,B.; Odvody,V.; Ošťádal,B.: Drsnost povrchu. SNTL Praha,1989
- 4.Černý,F.; Trmal,J.; Maršálek,J.: Brusky a broušení. SNTL Praha,1970
- 5.Klocke,F.: Manufacturing Processes 2-Grinding,Honing,Lapping. Springer Berlin,2009, ISBN 978-3-540-92258-2
- 6.Vasilko,K.: Analytická teória trieskového obrábania. Prešov 2007, ISBN 978-80-8073-759-7

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 19. ledna 2010


doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan




doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
vedoucí katedry

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně

.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá hodnocením jakosti broušené plochy v závislosti na technologických podmínkách a použití broušícího kotouče.

V teoretické části je uvedena teorie broušení a kinematika broušení. Dále pak parametry broušené plochy, metody a přístroje pro měření drsnosti povrchu a 3D měření povrchu.

V praktické části je sledována a vyhodnocována závislost jakosti broušených povrchů zkoušených materiálů na technologických podmínkách při aplikaci broušících kotoučů s různou strukturou.

Klíčová slova: broušení, jakost, struktura, broušící kotouč, prostorového hodnocení textury povrchu

ABSTRACT

This diploma thesis deals with evaluation of surface upon production conditions and grinding wheels application.

Theory chapter describes grinding theory, grinding kinematics, parameters of surface grinding, methods and measurement devices and devices for 3D surface measurement.

In practical chapter is evaluated influence of cutting technology and grinding wheels application on the material surface quality.

Keywords: grinding, quality, grinding wheel, structure, 3D surface texture measurement

Poděkování, motto

V první řadě bych chtěl poděkovat panu Ing. Ondřejovi Bílkovi Ph. D., jakož to vedoucímu diplomové práce za vedení a velmi cenné rady v oblasti broušení a měření drsnosti povrchu. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jirímu Šálkovi za zhotovování broušených ploch zkoušených materiálů.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 TEORIE BROUŠENÍ	13
1.1 CHARAKTERISTIKA BROUŠENÍ.....	13
1.2 TYPY BROUŠENÍ	15
1.3 BROUSÍCÍ NÁSTROJE	21
1.3.1 Charakteristika brousících nástrojů	21
1.3.2 Označování a specifikace brousících kotoučů	22
1.3.3 Pojiva	25
1.3.4 Zrnitost.....	28
1.3.5 Tvrdost.....	28
1.3.6 Struktura.....	29
1.3.7 Volba brousícího kotouče	30
1.4 KINEMATIKA BROUŠENÍ.....	30
1.5 GEOMETRIE BROUSÍCÍHO NÁSTROJE	33
2 JAKOST BROUŠENÉ PLOCHY	34
2.1 PARAMETRY BROUŠENÉ PLOCHY	34
2.1.1 Drsnost povrchu	34
2.1.2 Vlnitost obrobku.....	36
2.1.3 Normalizované charakteristiky drsnosti povrchu.....	38
2.1.3.1 Průměrná aritmetická úchylnka posuzovaného profilu Ra.....	38
2.1.3.2 Největší výška profilu Rz.....	40
2.1.3.3 Vzájemný materiálový poměr	40
2.2 SYSTÉM METOD A PŘÍSTROJŮ PRO MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU	41
2.2.1 Dotykové profiloměry.....	42
2.2.1.1 Dotykové profilografy s mechanickým převodem.....	42
2.2.1.2 Mechanicko - optické dotykové profilografy.....	43
2.2.1.3 Dotykové profilografy s mechanicko - pneumatickým převodem.....	43
2.2.1.4 Dotykové profiloměry s mechanicko - elektrickým převodem.....	43
2.2.1.5 Elektromagnetické snímače	45
2.2.1.6 Elektrodynamické snímače	45
2.2.1.7 Piezoelektrické snímače.....	46
2.2.1.8 Elektroinduktivní snímače	47
2.2.1.9 Kapacitní snímače	48
3 PROSTOROVÉ MĚŘENÍ A HODNOCENÍ TEXTURY POVRCHU	49
II PRAKTICKÁ ČÁST	51
4 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	52
5 CHARAKTERISTIKA STROJE A POUŽITÝCH MĚŘÍCÍCH PŘÍSTROJŮ	53
5.1 VODOROVNÁ ROVINNÁ BRUSKA BRH 20.03 F.....	53
5.1.1 Specifikace	53
5.1.2 Technické parametry stroje	54
5.1.3 Schéma stroje	55

5.2	DRSNOMĚR MITUTOYO SJ-301	56
5.3	STROJ COMAGRAV PRO LASEROVÉ 3D SKENOVÁNÍ.....	57
5.4	TALYSURF CLI 500	58
6	CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ A BROUŠENÝCH MATERIÁLŮ.....	60
6.1	CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH KOTOUČŮ	60
6.1.1	Kotouč č.1 – 99A 60 J 12 V.....	60
6.1.2	Kotouč č.2 – 49C 60 K 9 V.....	61
6.1.3	Kotouč č.3 – 99BA 46 J 9 V	62
6.2	CHARAKTERISTIKA BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ VYUŽITÍM 3D SKENOVÁNÍ ZA POMOCÍ LASEROVÉHO SNÍMAČE COMAGRAV	63
6.2.1	Podmínky 3D skenování.....	63
6.2.2	Kotouč č.1 – 99A 60 J 12 V.....	63
6.2.3	Kotouč č.2 – 49C 60 K 9 V.....	64
6.2.4	Kotouč č.3 – 99BA 46 J 9 V	65
6.3	CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH BROUŠENÝCH MATERIÁLŮ.....	66
6.3.1	Ocel ČSN 11 600 – 1.0060	66
6.3.2	Ocel ČSN 19 436 – 1.2080	66
6.3.3	PP - Polypropylen.....	66
6.3.4	PMMA - Polymethylmethakrylát	66
6.3.5	Pryž 1 (NBR + BR)	67
6.3.6	Pryž 2 (SBR)	67
7	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ A METODIKA EXPERIMENTU.....	68
8	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	69
8.1	PRŮMĚRNÁ ARITMETICKÁ ÚCHYLKA RA BROUŠENÉHO POVRCHU	69
8.2	NEJVĚTŠÍ VÝŠKA PROFILU RZ BROUŠENÉHO POVRCHU.....	73
8.3	ZÁZNAMY DRSNOSTÍ A NOSNÝCH PODÍLŮ Z PŘÍSTROJE MITUTOYO SJ-301.....	78
8.3.1	Kotouč č.1 99A 60 J 12 V.....	78
8.3.2	Kotouč č.2 49C 60 K 9 V.....	79
8.3.3	Kotouč č.3 99BA 46 J 9 V.....	80
8.4	MATERIÁLOVÝ PODÍL RM(R) BROUŠENÉHO POVRCHU	82
8.5	3D ZOBRAZENÍ STRUKTUR BROUŠENÝCH PLOCH ZKOUŠENÝCH MATERIÁLŮ	86
8.5.1	Kotouč č.1 99A 60 J 12 V.....	87
8.5.2	Kotouč č.2 49C 60 K 9 V.....	92
8.5.3	Kotouč č.3 99BA 46 J 9 V.....	96
8.6	ZÁKLADNÍ PROFIL PRYŽOVÝCH VZORKŮ	101
8.6.1	Základní profil pryžového vzorku, aplikace kotouče 99A 60 J 12 V....	101
8.6.2	Základní profil pryžového vzorku, aplikace kotouče 49C 60 K 9 V.....	102
8.6.3	Základní profil pryžového vzorku, aplikace kotouče 99BA 46 J 9 V	103
	ZÁVĚR.....	105
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	108
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	110
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	112
	SEZNAM PŘÍLOH.....	119

ÚVOD

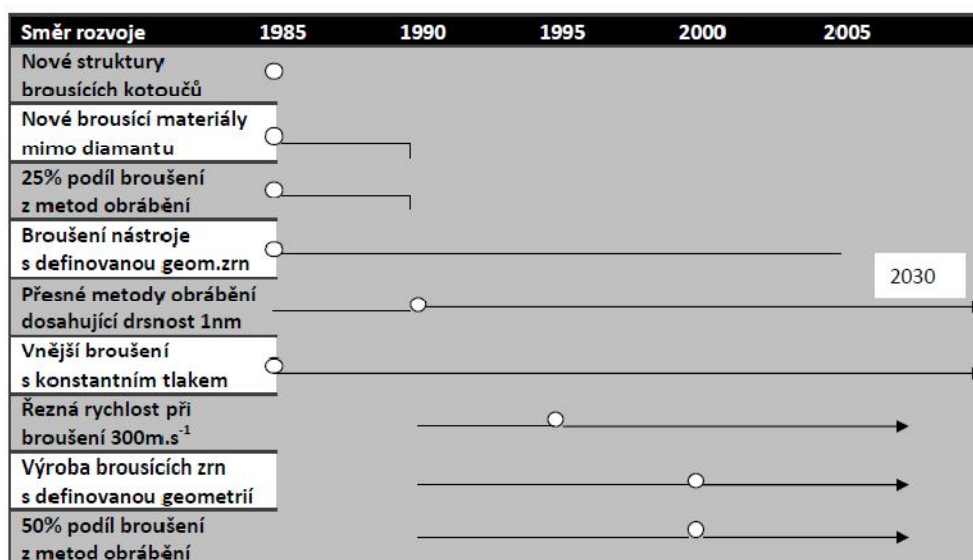
Už v dávné minulosti člověk pískovcem nebo jiným nerostem jako brousícím nástrojem obrušoval ručně nástroje, které vytvořil nejdříve z kamene a později ze železa či bronzu.

Za tuto dobu uběhlo několik staletí, kdy se od ruční brusky přestoupilo k současným brus-kám, které jsou programovatelně řízené, a na kterých se používají kotouče ze syntetických diamantů či kubického nitridu bóru. V současné době broušení vykonává velmi důležitou úlohu v oblasti obrábění.

Obrábění každého dílce se bezprostředně nebo nepřímo spojuje s broušením. Nasvědčuje tomu logický a téměř nepřetržitý nárůst počtu brusek v porovnání s ostatními obráběcími stroji. Procentuální zastoupení broušení v celkovém počtu operací, které se realizují na obráběcích strojích v průmyslu, činí 25% a v některých případech až 65%.

Rozvojem metod odlévání, tváření či práškové metalurgie se získali nehotové výrobky s malými přídávky a na rozdíl od hrubovacích operací je tyto výrobky možné přímo brou-sit.

Široká aplikace nových slitin na bázi těžko tavitelných kovů, kovových či kovo keramic-kých spékaných karbidů, které prakticky není možné obrábět konvenčními metodami, rea-lizuje se abrazivními metodami. Na základě této skutečnosti je možné předpokládat, že úloha a význam broušení bude nadále narůstat v budoucnosti.



Obr.1 Perspektivy rozvoje broušení [4]

Oblasti použití abrazivního obrábění jsou v současné době rozmanité. Broušení se aplikuje při dokončovacích operacích, kde je rozhodujícím faktorem přesnost a vysoká kvalita povrchu. Při broušení se efektivní produktivita zabezpečuje použitím vysokých rychlostí při malých průřezech třísky. Trvanlivost zrn brousícího kotouče je poměrně malá, ale jelikož počet těchto zrn na kotouči je veliký, tudíž při postupném záběru kotouče dochází k neustálému ostření nových klínů zrn.

Jednou ze základních předností tohoto typu obrábění je možnost obrábění tenkých vrstev obráběného materiálu, řádově několik mikrometrů. Při malých průřezech třísky se řezné síly a deformace zmenšují a přesnost výrobků se zvětšuje.

Tribologie, tedy nauka o tření zaznamenala v dalších obdobích rozvoj a na jejích základech byl vytvořen nový vědní obor tribotechnika. Tribotechnika se zabývá studiem interakce navzájem se pohybujících se tuhých těles, kdy v důsledku vznikají třecí síly. Tyto třecí síly mají velký vliv na tření a opotřebení obráběného materiálu, mechanismů a strojů.

Praktické využití tohoto vědního oboru je ve správném výběru třecích se dvojic, mazacího prostředí, konstrukce výrobků v uzlech tření, drsnosti povrchů a fyzikálních mechanických vlastností dotýkajících se povrchů.

Při procesu broušení charakter interakce v místě kontaktu nástroje a obráběného materiálu má velký vliv na vytváření drsnosti a kvalitu obrobeného povrchu, opotřebení a trvanlivosti brousícího kotouče. [4]

I. TEORETICKÁ ČÁST

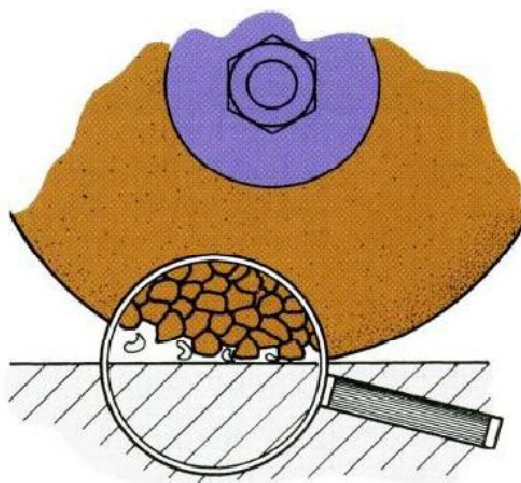
1 TEORIE BROUŠENÍ

1.1 Charakteristika broušení

Metoda broušení je jedním ze způsobů obrábění materiálu. Řezným nástrojem je v tomto případě brusný kotouč. Aktivní částí tohoto nástroje jsou brusná zrna, která jsou spojena do celistvého celku pojivem. Tato brusná zrna jsou vyrobena z nejtvrděších nerostů či umělých materiálů. Tvar a geometrie břítu nástroje a počet současně pracujících brusných zrn nejsou přesně určitelné. Řezná rychlost při této metodě obrábění je mnohonásobně vyšší než při ostatních způsobech obrábění (např. frézování či soustružení). [16]

Tvrдость brusných zrn a také velké řezné rychlosti umožňují obrábět širokou škálu známých kovových či nekovových materiálů. Broušení je jediný hospodárný způsob obrábění tvrdých materiálů. Metoda broušení se například oproti frézování liší v tom, že počet současně zabírajících břitů (zrn) je velký. Jiným výrazným rozdílem je průřez odebírané třísky. Kdežto při frézování je velikost plochy průřezu třísky řádově několik desetín nebo celých mm^2 , je velikost plochy průřezu třísky při broušení v řádu tisícín mm^2 .

S tímto faktem úzce souvisí i výkon obrábění. Při frézování můžeme za 1 minutu při výkonu 1kW ubírat 15 až 20 cm^3 nekalené oceli, při broušení ubereme za stejnou dobu a při stejném výkonu 1 až 2 cm^3 téhož materiálu. To ovšem platí pouze pro normální podmínky broušení, které jsou v současné době běžné.



Obr.2 Schéma vzájemné interakce brousícího kotouče s broušeným materiálem [16]

Broušením lze:

- dosáhnout vysoké kvality povrchu broušených ploch, např. při jemném broušení drsnosti Ra 1,6 μm až 0,2 μm
- dobře obrábět kalené a těžko obrobitelné materiály, např. při broušení nástrojů
- odebrat za krátkou dobu velký objem třísek např. při hrubování broušením (silovém broušení)
- jednoduše dělit materiály, např. při rozbrušování.

Nejrůznější tvary brousících zrn brusiva a jejich různé polohy v pojivu brousícího kotouče zapříčiňují, že hroty břitů zaujímají různé polohy k obrobku, takže nejen k řezání, ale i k zaškrabávání. Elementární třísky a ulomené špičky břitů zrn zůstávají v pórech do doby, dokud nejsou odstraněny proudem řezné kapaliny.

Současně se zrna vylamují z pojiva brusiva, takže se do záběru dostávají zrna ostrá, která jsou v následné vrstvě. Tenhle děj je v řezném procesu velice výhodný, protože dochází k neustálému samoostření brusného kotouče. [2]

1.2 Typy broušení

Metoda broušení se realizuje různými metodami, které se definují pro nejrůznější kritéria. Podle tvaru obrobeného povrchu obrobku a podle jeho realizace se dělí na:

- **rovinné broušení** (výsledkem tohoto typu obrábění je rovinná plocha),(Obr.3)
- **broušení do kulata** (výsledkem tohoto typu obrábění je rotační plocha),(Obr.3)

	Rovinné broušení - pohyb stolu		Broušení do kulata	
	přímočarý	otáčivý	Vnější plochy	Vnitřní plochy
Axiální				
Tangenciální				
Radiální				

n_s - frekvence otáčení brousícího kotouče, n_w - frekvence otáčení obrobku,
 V_{fa} - axiální rychlost posuvu stolu, V_{ft} - tangenciální rychlost posuvu stolu,
 V_{fr} - radiální rychlost posuvu kotouče,
 f_a - axiální posuv stolu, f_r - radiální posuv kotouče

Obr.3 Vybrané způsoby obvodového broušení [8]

Podle aktivní části brousícího kotouče se specifikuje:

- **obvodové broušení** (broušení dochází obvodem kotouče)

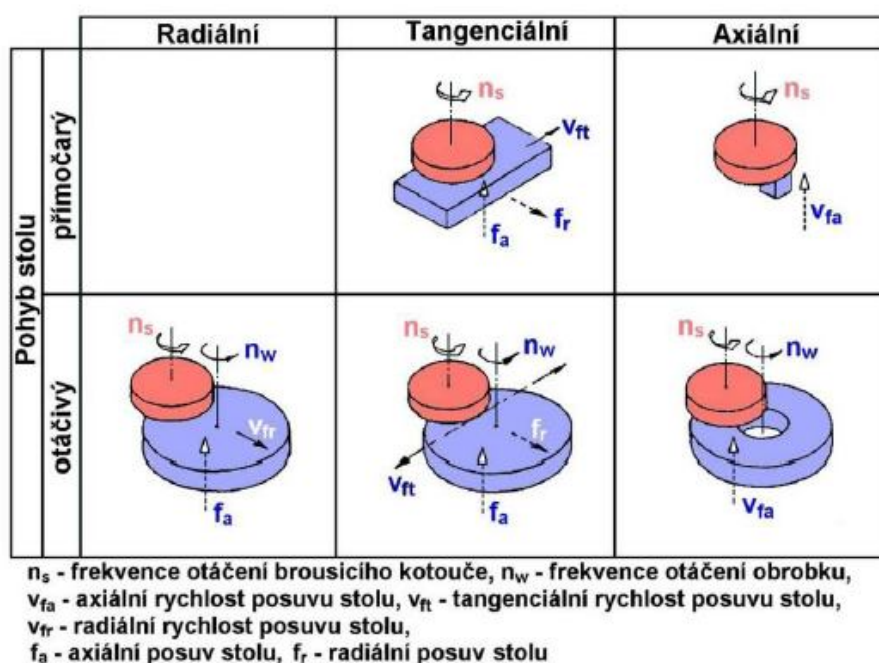
Při tomhle způsobu broušení vykonává stůl brusky přímočarý vratný nebo i kruhový pohyb s přímočarým pohybem stolu. Pracuje se poměrně s úzkým kotoučem a broušený předmět se málo zahřívá, tudíž nedochází k velké deformaci, pouze malé nebo téměř zanedbatelné. Tento způsob patří mezi nejpřesnější způsoby broušení. [8]

Způsob úběru přídavku:

- s velkým přísuvem a malým příčným posuvem
- s malým přísuvem a velkým příčným posuvem

Z hlediska hospodárnosti je způsob s velkým přísuvem hospodárnější, ale lze ho použít pouze na strojích s velkou tuhostí a s dostatečně širokým kotoučem. Kotouč je trvanlivější, výkon větší a obrobek se méně zahřívá.

- **čelní broušení** (broušení dochází čelem kotouče kolmým k jeho ose),(Obr.4)

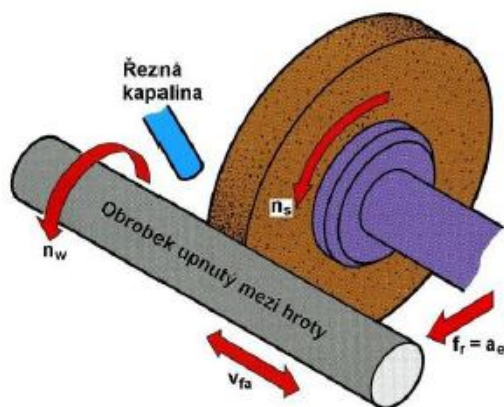


Obr.4 Vybrané způsoby čelního broušení [8]

Tenhle způsob broušení je vhodný pro větší až velké plochy. Tento způsob je výkonnější než broušení obvodem, ale méně přesné. Proto se hodí jen na hrubé práce. Náklon kotouče je přibližně $0-4^\circ$ z důvodu menšího zahřívání brusného kotouče. U tohoto způsobu broušení je možné použít i segmentových kotoučů. [8]

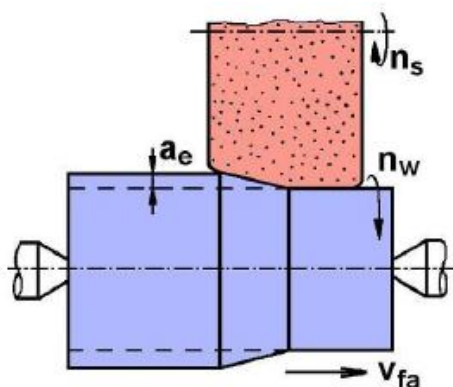
Podle vzájemné polohy brousícího kotouče a obrobku se charakterizuje:

- **vnější broušení** (broušení vnějšího povrchu obrobku)
 - s podélným posuvem- tento způsob se používá u obrobků, kde je délka delší než šířka kotouče. Obrobek koná kromě rotačního pohybu ještě posuv podélný. Přísuve koná vřeteník (nebo stůl). Přídavek je odebrán několika přísuvy.(Obr.5)



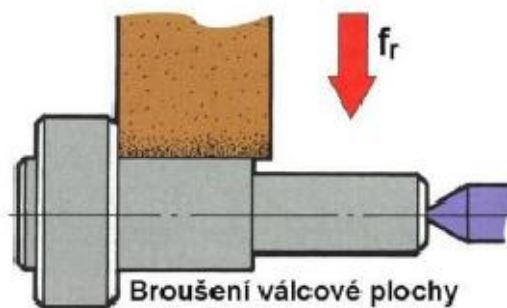
Obr.5 Podélné broušení válcových ploch [8]

- *hloubkové*- zde je celý přírůstek odebírán jedním přísuvem při podélném posuvu. Tohoto způsobu broušení se používá u obrobků s kratší délkou, přičemž kotouč je ze strany záběru ořvnán kuželovitě. Přísuv bývá 0,1-0,4 na zdvih a posuv 1-6 mm.ot⁻¹. obrobku.(Obr.6).

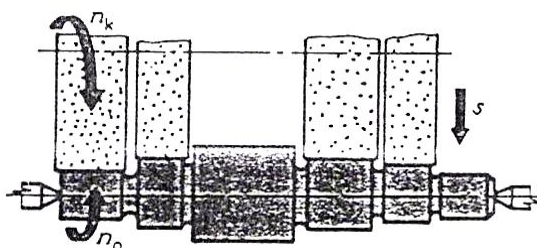


Obr.6 Hloubkové broušení válcových ploch [8]

- *zapichovací*- ten způsob je velmi výkonný, protože nástroj koná pouze přísuv na celou hloubku (najednou). Kotouč má vždy větší šířku než je délka obrobku. Při zapichovacím broušení se dosahuje 40 až 80% většího výkonu než u podélného broušení. (max. do délky 350mm).(Obr.7). Jinak delší plochy obrobku s odstupňovanými průměry lze brousit najednou složenými kotouči (sadou kotoučů). Broušení u delších ploch než je šířka kotouče, se provede tzv. postupným zapichováním a poslední úběr (tříška) se provede podélným broušením.(Obr.8)



Obr.7 Zapichovací broušení [8]

Obr.8 Broušení válcových ploch
sadou kotoučů

- *bezhraté*- u tohoto způsobu broušení je obrobek volně uložen na opěrné vodící liště (pravítku) mezi brousícím a podávacím kotoučem, kde osa obrobku je asi 5-30 mm nad osami obou kotoučů. Rychlosti otáčení obou kotoučů jsou stejné jako u broušení mezi hroty.

Používáme dvou způsobu broušení:

- o *průběžné*- zde podávací kotouč je pod sklonem 1-6° (pro dlouhé a hladké součásti např. trny, kolíky nebo čepy).
- o *zapichovací*- zde podávací kotouč je pod sklonem 0-1° pro obrobky s kuželovými a tvarovými plochami. Výjimečně je tento způsob vhodný pro plochy kužlové, kdy se osvědčil jako velmi progresivní.

- **vnitřní broušení** (broušení vnitřního povrchu obrobku)

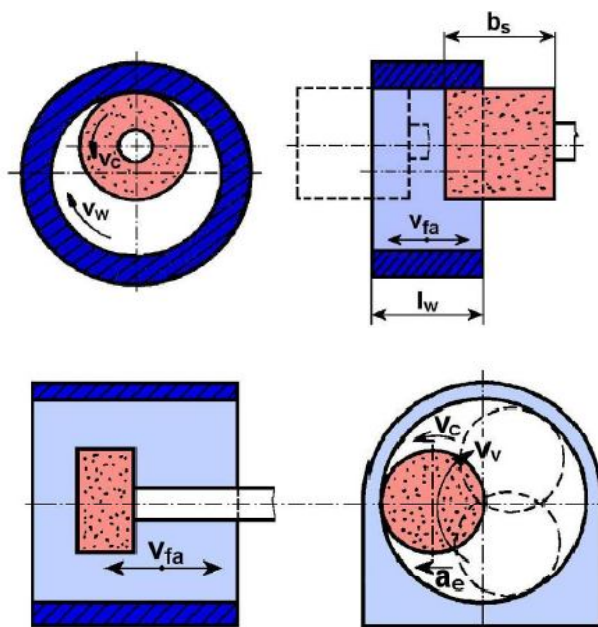
Broušení je obtížnější a nákladnější než u broušení vnějších ploch. Průměr kotouče se volí 3/4 – 4/5O broušené díry, proto bývají otáčky brousícího kotouče mnohem vyšší a to až 100 000 ot.min⁻¹.

K broušení jsou potřeba tyto pohyby:

- otáčivý brousícího kotouče
- otáčivý obrobku (proti kotouči)
- podélný vratný
- přířuv kotouče nebo obrobku

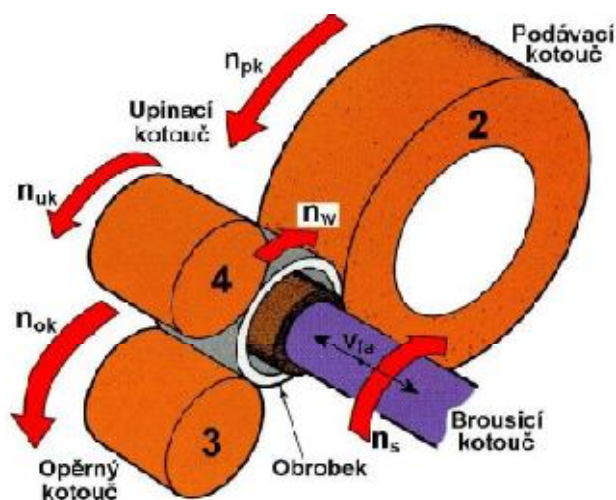
Broušení je možno provést těmito způsoby:

- *podélným broušením*- tento způsob se používá u velmi tvrdých materiálů pro odlitky s nerovnoměrnou tvrdostí. Musí se volit menší přířuv z důvodu malé tuhosti vřetena. Kotouč se volí co nejširší a díry s vysokou přesností se brousí načisto i několikrát, přičemž přířuv se po každém záběru zmenšuje.
- *planetovým broušením*- používá se u součástí, které nelze běžným způsobem upnout na normální brusce (mezi hroty, do sklíčidla). Otáčivý pohyb zde koná pouze nástroj (obrobek se neotáčí). Vyložení nástroje je veliké, a proto tuhost soustavy je nižší. Takto zhotovené díry nejsou tak přesné.



Obr.9 Vnitřní broušení – podélné broušení (nahore), planetové broušení (dole) [8]

- *zapichovacím broušením*- používá se méně než podélný způsob broušení, protože je soustava stroj-nástroj-přípravek-obrobek méně tuhá, ale výhodně se používá pro kratší plochy. Kotouč je vždy širší než délka díry. Přísuv se volí asi poloviční než u podélného broušení a lze brousit i čelní plochy drážek nebo osazení.
- *bezhrotovým broušením*- většinou se používá zapichovacího způsobu. Je nutné ovšem použití podpěrných kladek.



Obr.10 Schéma vnitřního bezhrotého broušení [8]

- *broušení na otáčivém stole* (broušení s rotačním posuvem)
- *tvarovací broušení* (broušení fréz, závitů, ozubených kol atd.)
- *kopírovací broušení* (broušení s řízenou změnou posuvu, NC stroje)
- *broušení tvarovacími brousícími kotouči* (profil brousícího kotouče určuje konečný profil obrobku)

1.3 Brousící nástroje

1.3.1 Charakteristika brousících nástrojů

Brousící nástroje jsou nástroje, které tvoří zrna brusiva pevně vázaná v tuhých nebo pružných tělesech nejrůznějších velikostí a tvarů, jako jsou brousící, řezací a drážkovací kotouče, brousící tělíška, superfinišovací a honovací kameny, brousící a obtahovací kameny a segmenty, nebo jsou nanášena a zakotvena na brousících plátnech a papírech. Ovšem nejvyšší rozsah v oblasti broušení se používají brousící kotouče. [5], [6]

Aby bylo možné přizpůsobit brousící nástroje materiálu obrobku, každý brousící kotouč je charakterizován:

- *druhem brusiva* - látkou, z nichž se skládají brousící nástroje
- *zrností*- představuje velikost zrn brusiva
- *stupněm tvrdost i*- představuje houževnatost pojiva
- *strukturou* - pórovitost kotouče
- *pojivem* - látky, které udržují zrna brusiva pohromadě



Obr.11 Tvary brousících nástrojů

Volba správného brousícího nástroje je velmi těžká a vyžaduje jistou zkušenost. Jestliže má broušení na určitém materiálu probíhat optimálně, musí brousící nástroj splňovat několik podmínek brousícího procesu:

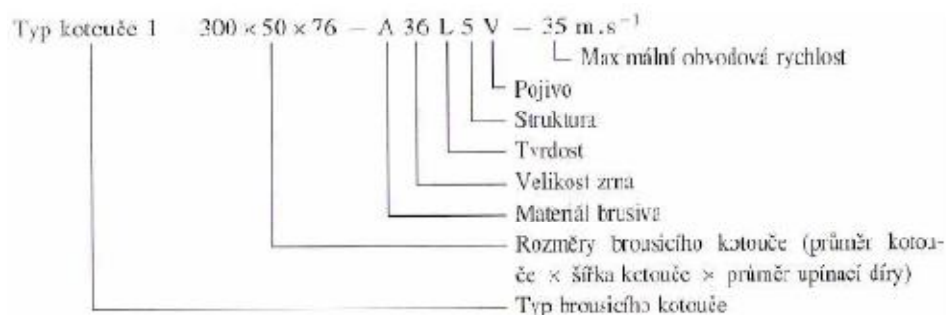
- velikost prostoru pro třísky musejí odpovídat obrobitelnosti materiálu (dlouhá nebo krátká tříška
- pojivo má při broušení u měkkých materiálů dlouho držet zrna brusiva a u tvrdých materiálů jim umožnit rychlejší vylomení.
- zrna brusiva musejí být u tvrdých, případně kalených materiálů velmi tvrdá, což pak vede ke zvýšení jejich křehkosti, a tím i nebezpečí poškození břitu
- velké brousící nástroje umožňují velký řezný výkon při větší drsnosti povrchu, u malých nástrojů je tomu přesně naopak

1.3.2 Označování a specifikace brousících kotoučů

Podle ČSN 22 45 01 musí vykazovat každý brousící kotouč tyto minimální údaje:

- výrobce
- rozměry brousícího kotouče
- přípustnou maximální pracovní rychlost v $m.s^{-1}$
- maximální přípustné otáčky v $1.min.^{-1}$
- specifikaci
- poznámku o zkoušce

Každý brousící nástroj je opatřen štítkem (kulatým nebo čtyřhranným), kde jsou uvedeny všechny údaje.



Obr.12 Označování a specifikace brousícího kotouče

Brusiva

Brusiva jsou tvrdé, houževnaté a ostrohranné krystalické látky, kterými lze obrábět měkčí materiály. [14]

Dělíme je:

- **přírodní** – jsou to převážně minerály nebo horniny vhodné pro broušení nebo leštění. Patří sem leštící růže, pískovec, břidlice, granát, přírodní korund nebo diamant atd. Tohoto brusiva se používá tehdy, nelze-li umělými brusivy dosáhnout stejného výsledku, nebo je-li levnější než umělé. Rozhodující je velikost zrna, dále houževnatost a tvrdost, která s výjimkou diamantu je vždy nižší než u umělých brusiv.
- **umělá** – často užívaná brusiva jsou oxidy hliníku tavené v elektrické peci, které se nazývají korundy.

Brousicí materiál	Označení
Bílý	A99
Růžový	A98
Manganový	A98M
Hnědý	A96
Zirkonový	A97E
Mikrokrytalický	A97M
Polokřehký	A97P
Černý	C48
Zelený	C49
Karbid boru	B
Kubický nitríd boru	BN
Kysličník hlinitý	K
Diamant	D
Kysličník ceričitý (Tecepol)	TC
Leštící čerň	F

Obr.13 Brousicí materiály a jejich označení

Umělý korund Al_2O_3

- *bílý* - obsah Al_2O_3 činí nad 99,5 %. Vyrábí se tavbou chemicky vysoce čistého oxidu hlinitého. Je vhodný pro broušení náradí z nástrojových ocelí, rychlořezných ocelí, kalených a nerezových ocelí.
- *růžový* - je to legovaný bílý korund oxidem chromitým. Chrom vstupuje do krystalické

mřížky a zvyšuje tak houževnatost. Je velice tvrdý a houževnatý, odolný proti opotřebení. Je vhodný pro broušení nerezových a vysoce legovaných ocelí.

- *hnědý* - je to vysoce houževnatý materiál, který obsahuje 95 až 96 % Al_2O_3 , 1,5 až 3 % TiO_2 a 1 až 2 % ostatních přírodních látek. Výroba spočívá tavením bauxitu. Je to nejběžnější druh brusiva. Používá se pro broušení nízce legovaných ocelí a kovových materiálu střední a vysoké pevnosti. Je vhodný pro velké hrubování.
- *monokrystalický* - je to speciální korund s velkými krystaly. Využívá se jak pro řezání, tak pro broušení tvrdých ocelí.

mikrokrystalický - je to speciální korund vyráběný keramickou cestou s vysokou samoostřicí schopností. Je vhodný pro broušení vysoce tvrdých ocelí (58 HRC a výše) a těžko obrobitelných materiálu.

Karbid křemíku SiC

- *černý* - tento typ karbidu křemíku se vyrábí redukcí oxidu křemíku uhlíkem. Obsah SiC činí nad 96%. Je velmi tvrdý, ovšem méně křehký než zelený. Je vhodný pro broušení kovových a nekovových materiálů o nízké pevnosti, šedé litiny, temperované litiny před žháním, výkovků, mosazi, hliníku a bronzu.
- *zelený* - tento karbid křemíku je charakterizován o vyšší čistotě, použití je analogické jako u černého, především v oblasti použití jemných a středních zrn. Je to velmi tvrdý materiál, křehký a citlivý na nárazy a údery. Používá se pro broušení slinutých karbidů, keramiky, skla atd.

Karbid bóru B₄C

- tento typ karbidu se vyrábí z kyseliny borité a koksu, která obsahuje až 94% krystalického karbidu bóru. Je výhradně používaný jako brusivo do lapovacích past.

Kubický nitrid bóru BN

- je to vysoce tvrdý materiál, který svojí tvrdostí převyšuje korund a blíží se umělému diamantu. Jeho použití spadá pro materiály o tvrdosti více jak 60 HRC, dále pro broušení tvrdých a těžko obrobitelných materiálů a pro ostření rezných nástrojů. Jeho výhoda oproti umělému diamantu spočívá ve vyšší tepelné a chemické odolnosti.

Umělý diamant

- Umělý diamant se vyrábí syntézou z grafitu za přítomnosti katalyzátoru. Vytvořené krystaly se aplikují jako brusiva na kotouče, tak i jako volné brusivo. Používá se pro broušení tvrdých a těžko obrobitelných materiálů, pro dokončovací broušení, lapování. Dále pro ostření nástrojů a jemné broušení.

Brousící materiál	Tvrdość podle Mohsovy stupnice	Tvrdość podle Knoop
Umělý korund (Al_2O_3)	9 až 9,5	16 350 až 20 850
Karbid křemíku (SiC)	9,5	23 500 až 26 500
Karbid boru (B_4C)	9,5 až 9,75	29 000 až 31 000
Kubický nitrid boru (BN)	9,6	45 000 až 47 000
Diamant	10,0	50 000 až 87 000

Obr. 14 Tvrdość brousících materiálů

1.3.3 Pojiva

Je to prostředek k zajištění potřebného tvaru brousícího nástroje. Má zajišťovat spojení zrn a jejich uvolnění po otupení. Nemá brousící účinky. Pojivo dále také spolupůsobí na tvrdost a zvláště na houževnatost kotouče. Vedle mechanického namáhání je vystaveno také vysokému tepelnému namáhání.

Pojivo	Označení
Keramické	V
Silikátové	S
Pryžové	R
Umělá pryskyřice	B
Šelakové	E
Magnezitové	Mg
Polyuretanové	U
Kožní klič	G

Obr. 15 Pojiva brousících nástrojů

Keramická - obsahují živec, kaolín, mastek. Směs se vypaluje v rozmezí 1350 - 1380°C. Velmi často je vypálené pojivo příliš tvrdé (po překročení teploty), a proto se dodatečně změkčuje částečným porušením slinuté vazby. Tímto jevem se tak zeslabí tlusté můstky pojiva mezi zrn, čehož se velmi často využívá k opravě nevhodných kotoučů.

Výhody:

- je to nejpoužívanější pojivo
- dává možnost odstupňované tvrdosti
- umožňuje velkou pórovitost
- je netečný vůči vodě, oleji a chemickým vlivům

Nevýhody:

- křehkost
- nesnášenlivost rázů

Silikátová - je to směs vodního skla, živce, kaolinu a plavené křídly. Vytvrzují se při 250 - 300°C. Proto je výroba rychlejší a levnější a pojivo se měkčí než keramické. Jsou použitelná do rychlosti 25 m.s⁻¹.

Výhody:

- zrna se dobře uvolňují
- mají studený řez
- jemný výbrus a dobře odolávají vodě

Magnesitová - je to směs magnesitu a chloridu vápenatého.(MgCO₃ + MgCl₂). Jsou použitelná za sucha do rychlosti 15 m.s⁻¹.

Výhody:

- nevypaluje se ani nesuší
- má chladný řez
- mohou se vyrábět kotouče velkých průměrů (až 2m)

Nevýhody:

- nesnáší velké změny teplot
- musí se brousit za sucha

Šelakové - jedná se o přírodní pryskyřici. Je vhodné na výrobu tenkých kotoučů broušných pil do rychlosti 60 m.s^{-1} , na ostřicí kotouče atd.

Nevýhody:

- při vysokých teplotách se stává lepavým

Gumové - jedná se o kaučuk s 30% síry. Je vhodné pro pro kotouče vystavené mimořádně velkému mechanickému namáhání při zvláště velkých obvodových rychlostech.

Výhody:

- vysoká pružnost a pevnost
- výroba tenkých kotoučů

Umělá pryskyřice – základ tvoří fenolformaldehydová pryskyřice + vlákna(skelná) a textil. Je vhodné pro největší řezné rychlosti u řezacích kotoučů, na výrobu závitů atd. Vyznačují se velkou pórovitostí, kotouče se nezahřívají, ovšem hraniční teplota pro tento typ pojiva činí 180°C .

Výhody:

- značná pevnost
- slouží pro výrobu řezacích kotoučů
- používá se na hrubé obrušování, ale i na lapování
- výroba rychlořezných kotoučů ($80\text{-}100 \text{ m.s}^{-1}$)

Kovová – toto pojivo je tvrdší než pojivo z pryskyřice. Používá se hlavně pro broušící kotouče s diamantovým brusivem.

Kovová pojiva spékaná - jedná se o pojivo buď na měděném, železném, wolframovém, molybdenovém či podkladu z tvrdokovu (WC, TiC + Co..).

Kovová pojiva galvanická - jedná se zrna brusiva, které jsou velmi pevně uložena v jedné vrstvě k ocelovému tělesu galvanicky nanášeným povlakem. Jedná se výhradně o tvarově složité kotouče. Vysoká rychlost broušení u tohoto typu kotoučů je docílena tím, že je 1/3 povrchu zrn brusiva je odhalena z kovového pojiva, čímž brusivo kotouče tvoří ze 100% efektivní broušící plochu.

1.3.4 Zrnitost

Pod pojmem zrnitost rozumíme velikost zrn brusiva. Zrnitost brusiva je určena měrným rozměrem zrna, což je jeho šířka. Čísla zrnitosti jsou oka na 1 palec (inch) délky hrany síta, kterým bylo zrno prosáto. U diamantu a nitridu boritého odpovídá označení zrnitosti vzdálenosti ok síta v μm . Zrnitost kotouče se volí podle předepsané drsnosti povrchu součásti.

Velmi hutné a hutné	polohutné	jemné (pórovité)	velmi jemné (velmi pórovité a zvlášť pórovité)
6	30	70	220
8	36	80	240
10	46	90	280
12	54	100	320
14	60	120	400
16		150	500
20		180	600
24			1000
			1200

Obr.16 Značení slohu broušících kotoučů

1.3.5 Tvrdost

Je dána odporem, který klade pojivo proti vylomení jednotlivých zrn brusiva z nástroje. Zrna brusiva se po určité době otupují. Při vhodně zvolené tvrdosti kotouče se vylomí otupené zrno na základě vyššího řezného odporu, a tím umožňuje užití nových ostrých zrn. Obráběný materiál zásadně ovlivňuje volbu broušícího kotouče. Broušící kotouč volíme tím měkčí, čím tvrdší je broušený předmět.

Tvrdost je závislá:

- druhu pojiva
- množství pojiva

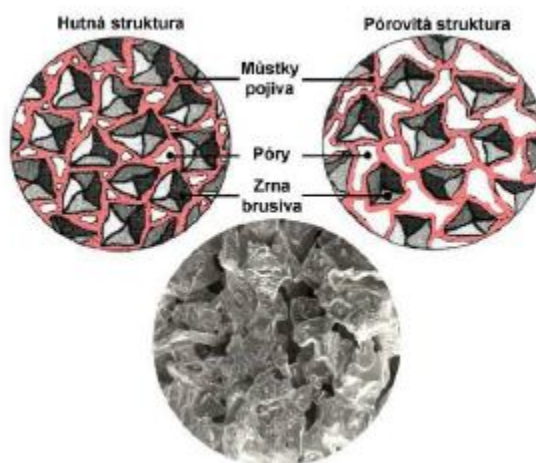
- způsobu zpracování (teplotě vypalování)

A	B	C	D	maximálně měkké (norma ČSN neuvádí)
E	F	G	-	velmi měkké
H	I	J	K	měkké
L	M	N	O	střední
P	Q	R	S	tvrdé
T	U	V	W	velmi tvrdé
X	Y	Z	-	zvlášť tvrdé

Obr.17 Stupně tvrdosti brousicích kotoučů

1.3.6 Struktura

Pod pojmem struktura rozumíme velikost a počet pórů brusného nástroje a podíl brusiva a pojiva na celkovém objemu. Póry jsou nutné prostory pro třísky. Jejich velikost a počet ovlivňuje také tvrdost. Příliš tvrdý kotouč působí příliš tupě a odebere příliš málo obráběného materiálu. Příliš pórovitým kotoučem může být dosažení vyšší kvality povrchu obtížné.



Obr.18 Struktura brousicího kotouče [14]

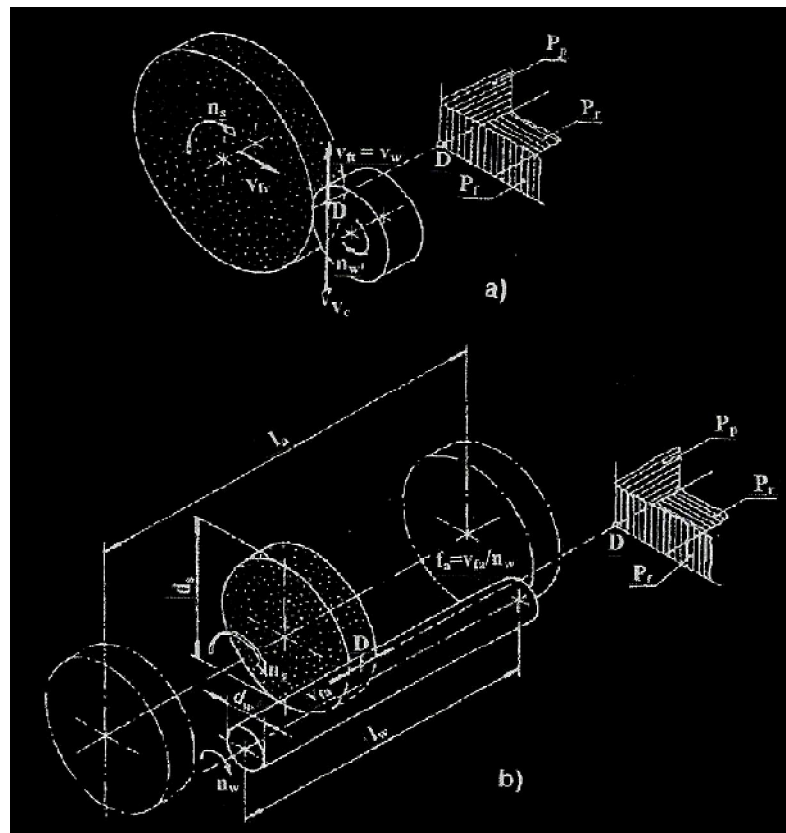
Struktura se označuje čísly 0 až 14, popř. i vyšším. Čím je číslo vyšší, tím je vzdálenost mezi zrny větší.

1.3.7 Volba brousícího kotouče

- pro větší úběr materiálu se volí větší zrnitost kotouče
- pro broušení materiálů se sklonem k mazlavosti se volí kotouč měkký a hrubý
- čím větší je styčná plocha mezi brousícím kotoučem a broušeným materiálem, tím hrubší se volí zrnitost a nižší tvrdost kotouče
- pro materiály citlivé na změny teploty se volí měkčí kotouč
- pro broušení přerušovaných ploch se volí kotouč tvrdší

1.4 Kinematika broušení

Pohyby a rychlosti při broušení se identifikují pro jednotlivé brousící způsoby. V rámci problematiky je dále charakterizováno obvodové vnější broušení do kulata. [1],[15]



Obr.19 Pohyby a souřadnicové soustavy rovin pro obvodové vnější broušení do kulata [1]

Řezná rychlost v_c se vyjádří vztahem:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (1)$$

Řezná rychlost při běžném broušení dosahuje hodnot 30 až 35 m.s⁻¹. Při rychlostním broušení je nutné použít brousícího kotouče se speciálním druhem pojiva a řezná rychlost obvykle dosahuje hodnot 80 m.s⁻¹ a více. V speciálních případech až 180 m.s⁻¹.

Obvodová rychlost obrobku v_w je dána vztahem:

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} \quad (2)$$

Ekvivalentní tloušťka broušení h_{eq} se vztahuje na jednotku aktivní šířky brousícího kotouče a obecně se vyjádří:

$$h_{eq} = \frac{Q_w}{b_D \cdot v_c} \quad (3)$$

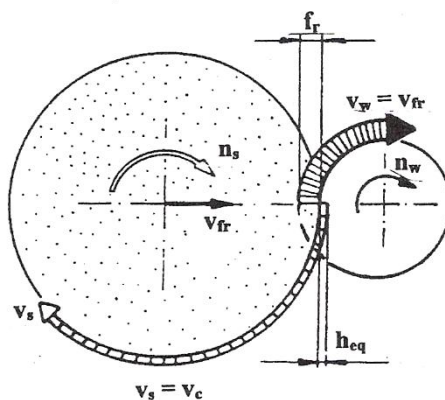
$$Q_w = \frac{\Delta V_w}{\Delta t} \quad (4)$$

Hodnota ekvivalentní tloušťky h_{eq} se pro obvodové radiální broušení do kulata vnější, vyjádří na základě poměrů ve tvaru:

$$h_{eq} = \frac{v_w}{60 \cdot v_c} \cdot f_r \quad (5)$$

Pro obvodové broušení do kulata vnější s radiální rychlostí posuvu stolu v_{fr} je:

$$h_{eq} = \frac{v_{fr}}{60 \cdot v_c \cdot n_w} \quad (6)$$



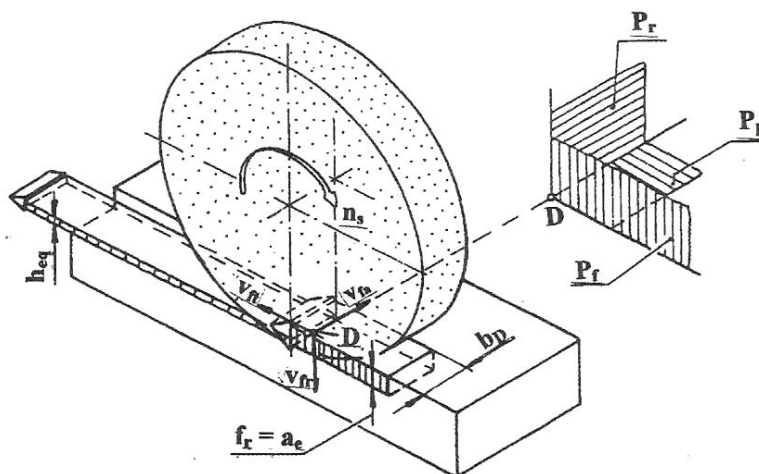
Obr.20 Ekvivalentní tloušťka broušení při obvodovém radiálním broušení do kulata vnějším [1]

Pro obvodové axiální broušení do kulata vnější budou mít příslušné závislosti tvar:

$$h_{eq} = \frac{v_{fa}}{60 \cdot v_c \cdot n_w} \tag{7}$$

Pro rovinné obvodové broušení tangenciální broušení s přímočarým pohybem stolu se h_{eq} vyjádří na základě poměrů (Obr.21):

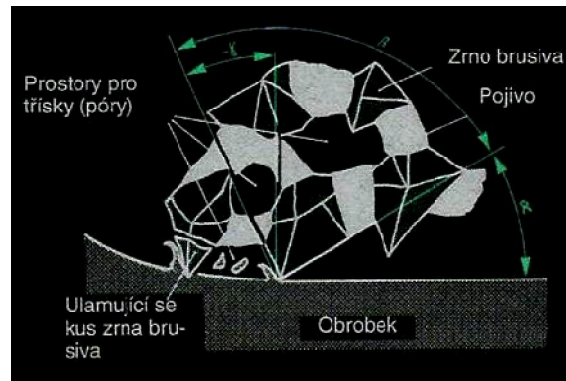
$$h_{eq} = \frac{v_{ft}}{60 \cdot v_c} \cdot a_e \tag{8}$$



Obr.21 Ekvivalentní tloušťka broušení při rovinném obvodovém tangenciálním broušení [1]

1.5 Geometrie brousícího nástroje

Každé zrno brusiva má jiný tvar (záporný úhel čela γ). [9],[10]



Obr.22 Geometrie brousícího nástroje [9]

Záporné úhly čela jednotlivých zrn jsou různé a obvykle velké (ovlivňují oblast primární plastické deformace).

2 JAKOST BROUŠENÉ PLOCHY

Jakost broušené plochy můžeme posuzovat jako souhrn geometrických a chemických vlastností skutečného povrchu vyšetřované plochy. To znamená povrchu, který tvoří hranici a zároveň odděluje těleso obrobku od okolního prostředí. Na jakosti závisí například funkční vlastnosti strojů, životnost, nebo pevnost jednotlivých součástí, a také vzhled či výrobní náklady. Při hromadné či sériové výrobě je nutné dodržení stejné a požadované jakosti povrchu funkčních ploch, což je jedno z nutných podmínek úplné zaměnitelnosti součástí. [3]

Stav jednotlivých broušených ploch hotové součásti záleží jednak na způsobu zpracování materiálu na polotovár, ale také na způsobu obrobení vyšetřované plochy. Podle toho lze na obrobcích rozlišit plochy obrobené a neobrobené, nebo s povrchovou úpravou či bez ní.

Jakost broušené plochy má značný vliv na přesnost a trvanlivost stroje. Hrubší a nerovnoměrný obrobený se při chodu stroje časem vyhladí. Při vyšetřování jakosti broušené plochy strojových součástek je nutné rozlišovat druh povrchu, vlnitost a drsnost povrchu.

Obecný druh povrchu může být:

- *neopracovaný* - součástky odlité, lisované, kované, válcované apod.
- *opracovaný* – povrch součásti je soustružený, hoblovaný, frézovaný, broušený apod.

2.1 Parametry broušené plochy

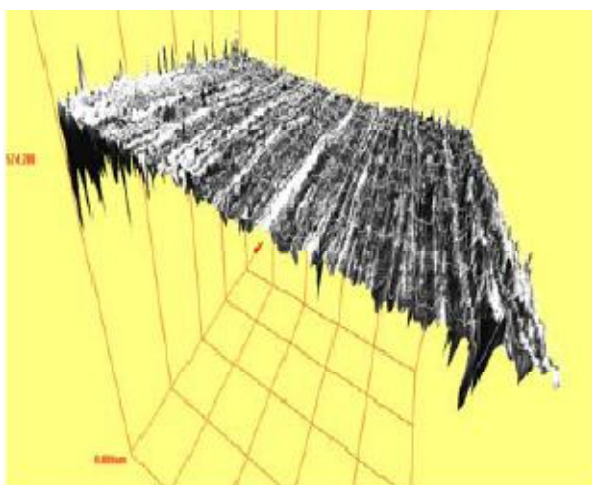
2.1.1 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu je jednou z nejdůležitějších hodnot při posuzování kvality a jakosti broušeného povrchu. Podstata tohoto hodnocení vyplývá z toho, že drsnost povrchu funkčních ploch obrobku ovlivňuje ve velké míře spolehlivost, přesnost a trvanlivost celého zařízení.

Při broušení se odebírají jednotlivé části materiálu obrobku účinkem jednotlivých brusných zrn. Na povrchu obrobku zůstávají stopy po zrnech v podobě různých rysek, jejich profil je dán tvarem břitu zrn. Vytváření drsnosti povrchu obrobku při broušení je složitějšího původu než je tomu například u soustružení, hoblování či frézování, kde je nástroj jednobřítý

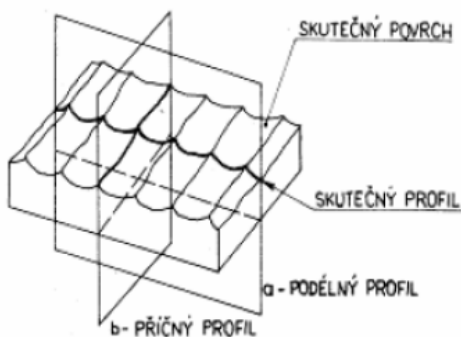
nebo vícebřítý, kdežto brousící kotouč je typickým představitelem mnohobřitého nástroje s odlišnou stavbou a specifickými vlastnostmi.

Jednotlivá brusná zrna mají nepravidelné tvary a velikosti, jsou nepravidelně proti sobě orientována, mají negativní úhly čel a zaoblená ostří. Tyto specifické rozdíly spolu s dalšími odlišnostmi broušení, jako velká řezná rychlost, velký měrný řezný odpor, vysoká teplota v místě řezu mají obrovský vliv na drsnost broušené plochy (Obr.23). [3],[18]



Obr.23. Obrázek ve 3D – topografie povrchu kalené oceli – reálný obraz povrchu

Vyhodnocujeme - li drsnost povrchu, setkáváme se s dvojitou drsností povrchu, podle toho, ve kterém směru ji pozorujeme a měříme. Můžeme rozeznat drsnost příčnou, kterou měříme v rovině kolmé na směr hlavního řezného pohybu, který souhlasí se směrem otáčení brusného kotouče, a drsnost podélnou, měřenou ve směru hlavního řezného pohybu (Obr.24).



Obr.24 Příčná a podélná drsnost povrchu [3]

Příčná drsnost je asi 2krát až 3krát větší než drsnost podélná, z toho důvodu je také rozhodující pro kvalitu a jakost povrchu. Obvykle neměříme drsnost podélnou, protože její odlišení od vlnitosti je obtížné. Pod názvem drsnost povrchu se tedy rozumí (pokud to není jinak stanoveno) příčná drsnost povrchu a v běžné praxi se u nás nejčastěji určuje jako R_a (μm).

Obecná závislost drsnosti povrchu na všech podmínkách broušení je velmi složitá. Představovala by ji složitá exponenciální funkce nezávisle proměnných veličin, jakou např. řezné podmínky broušení, vlastnosti a rozměry brusného kotouče, materiál a rozměry obrobku, způsob chlazení, relativní chvění mezi brusným vřeteníkem a obrobkem.

Přesné matematické vyhodnocení těchto závislostí je prakticky nemožné. Proto se tyto závislosti mezi technologickými podmínkami jako nezávislé proměnnými veličinami a drsností broušeného povrchu jako závislé proměnnou veličinou prověřují experimentálně.

Dosažená drsnost povrchu pro daný obrobek je závislá:

- *na vhodně voleném brusném kotouči*
- *na způsobu a režimu broušení*
- *na způsobu orovnávaní brusného kotouče*
- *na použitém druhu a čistotě chladicí kapaliny*
- *na relativním chvění mezi obrobkem a brusným kotoučem*

Tyto podmínky až na poslední jsou podmínky technologické, související s řezným režimem.

2.1.2 Vlnitost obrobku

Vlnitost obrobku je dána relativním kmitáním obrobku a brusného kotouče proti sobě. Kmitání, které se při broušení vyskytuje na brusce, lze zařadit do těchto kategorií:

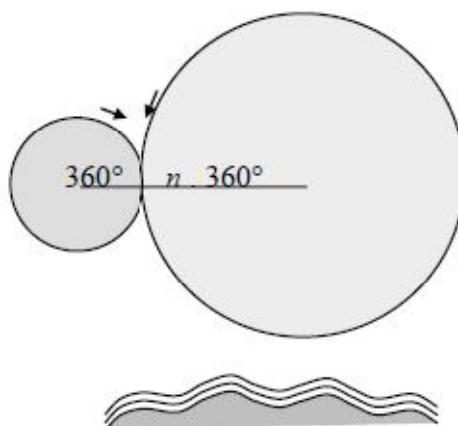
- *Kmitání vynucené zdroji na stroji*
- *Kmitání samobuzené (vznikající od řezné síly)*
- *Kmitání vynucené zdroji mimo stroj*

Vlnitost obrobku jsou periodické pravidelné nerovnosti povrchu s vlnami delšími než rozteče výstupků a prohlubní drsnosti povrchu. Jsou viditelné pouhým okem při vhodném osvětlení a vznikají důsledkem chvění soustavy stroj – nástroj - obrobek. Vlnitost je přechodová fáze mezi drsností a úchytkou tvaru.

Vlny vznikají i při velmi malých hodnotách házení kotouče v řádech μm a jsou důsledkem periodického přibližování a oddalování kotouče od obrobku. [17],[19]

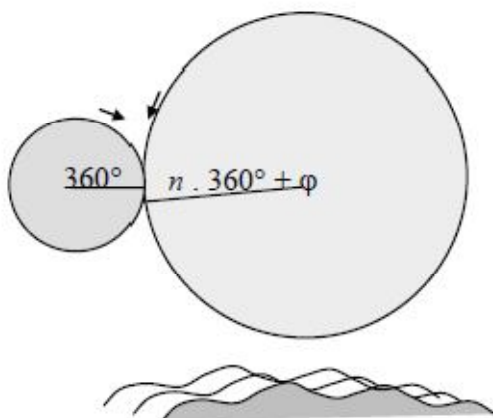
Mohou nastat dva případy:

- V případě celočíselného poměru (n) úhlových rychlostí kotouče a obrobku se při otáčení obrobku o 360° se kotouč otočí o $n \cdot 360^\circ$ a dostaneme se na totéž místo na povrchu obrobku, a tak se vlna posouvá stále hlouběji do materiálu obrobku, nicméně její geometrický tvar zůstává neměnný (Obr.25).



Obr.25 Broušení s celočíselným poměrem rychlostí – vlny vytvořené při posledních 3 otáčkách kotouče

- V případě, že poměr úhlových rychlostí kotouče a obrobku není během obrábění celé číslo, kotouč se při otočení obrobku o 360° dostane místo do téhož místa o něco dále po obvodu obrobku. V ideálním případě, kdy je fázový posuv 180° , dojde k oříznutí vrchu předchozí vlny, a tím ke snížení vlnitosti povrchu (Obr.26).



Obr.26 Broušení bez celočíselného poměru rychlostí

2.1.3 Normalizované charakteristiky drsnosti povrchu

Požadavky na drsnost povrchu se vyjadřují charakteristikou ČSN 01 4451, číselnou hodnotou příslušné veličiny a základní délkou, na které se veličina určuje.[3],[11] Normalizované charakteristiky drsnosti povrchu jsou následující:

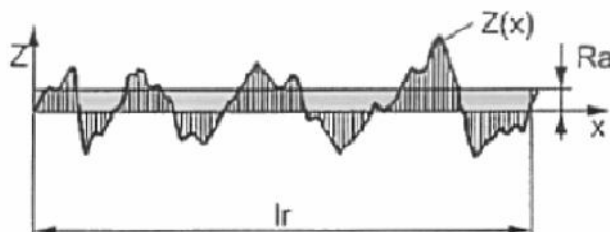
- R_a - průměrná aritmetická posuzovaného profilu
- R_z - největší výška profilu
- R_v - největší hloubka prohlubní profilu
- R_{sm} - průměrná šířka prvku profilu
- $R_m(r)$ - vzájemný materiálový poměr

2.1.3.1 Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a

Tato úchylka je přednostní výškovou charakteristikou drsnosti povrchu. Je to střední aritmetická hodnota absolutních úchylek profilu v rozsahu základní délky.

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (9)$$

Geometricky se tento parametr definuje výškou obdélníku sestrojeného na střední čáře a o stejné ploše jako nerovnosti profilu, uzavřené profilem od střední čáry (Obr.27).



Obr.27 Vyjádření hodnoty R_a [3]

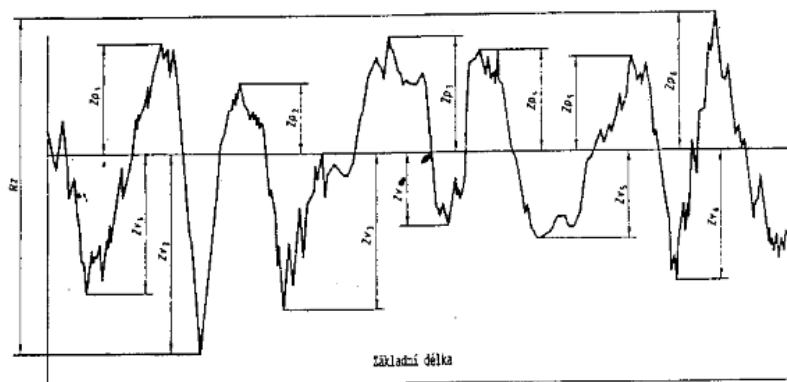
Je třeba mít na paměti, že výšková charakteristika R_a ve své podstatě udává pouze střední hodnotu vzdáleností souřadnic jednotlivých bodů profilů zkoumaného povrchu od střední čáry profilu. Je pouze charakteristickou hodnotou, neurčující nic víc než je její základní definice. Z této skutečnosti nemusí být R_a ve všech případech efektivní při hodnocení drsnosti profilu povrchu, tudíž může vést i k omylům v případech posuzování povrchů členitých, pórovitých, povrchů porušených hlubokými rýhami, trhlinami apod.

Střední aritmetická úchylka profilu R_a nemůže umožnit představu o tom, jak povrch vytvořený technologickou operací vlastně vypadá. Tato charakteristika je však základní pro určení mikrogeometrie povrchu, je široce užívaná, protože hodnocení drsnosti povrchu podle R_a je poměrně jednoduché, už z důvodu na pořizovací cenu nutného měřicího přístroje.

Získané hodnoty vykazují poměrně značnou přesnost při opakovaném měření. Je třeba taktéž uvést i to, že systém určení střední aritmetické úchylky profilu je v souladu s platnou normou.

Není však možno přehlédnout skutečnost, že dva povrchy mající stejnou hodnotu R_a mohou být zcela rozdílné ve svém chování z hlediska funkční spolehlivosti, popřípadě životnosti součástí.

2.1.3.2 Největší výška profilu Rz

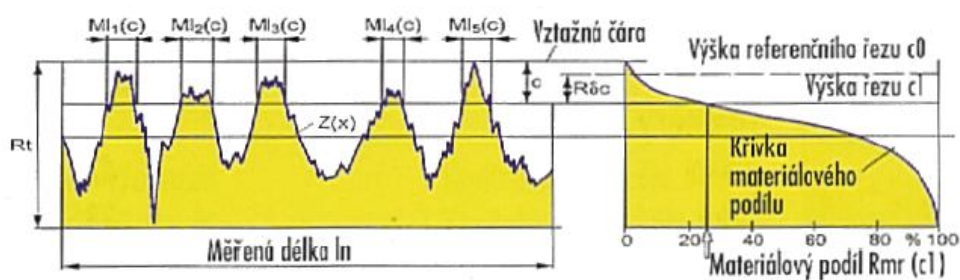


Obr.28 Vyjádření hodnoty Rz [3]

Největší výška profilu Rz je součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky (Obr.28).

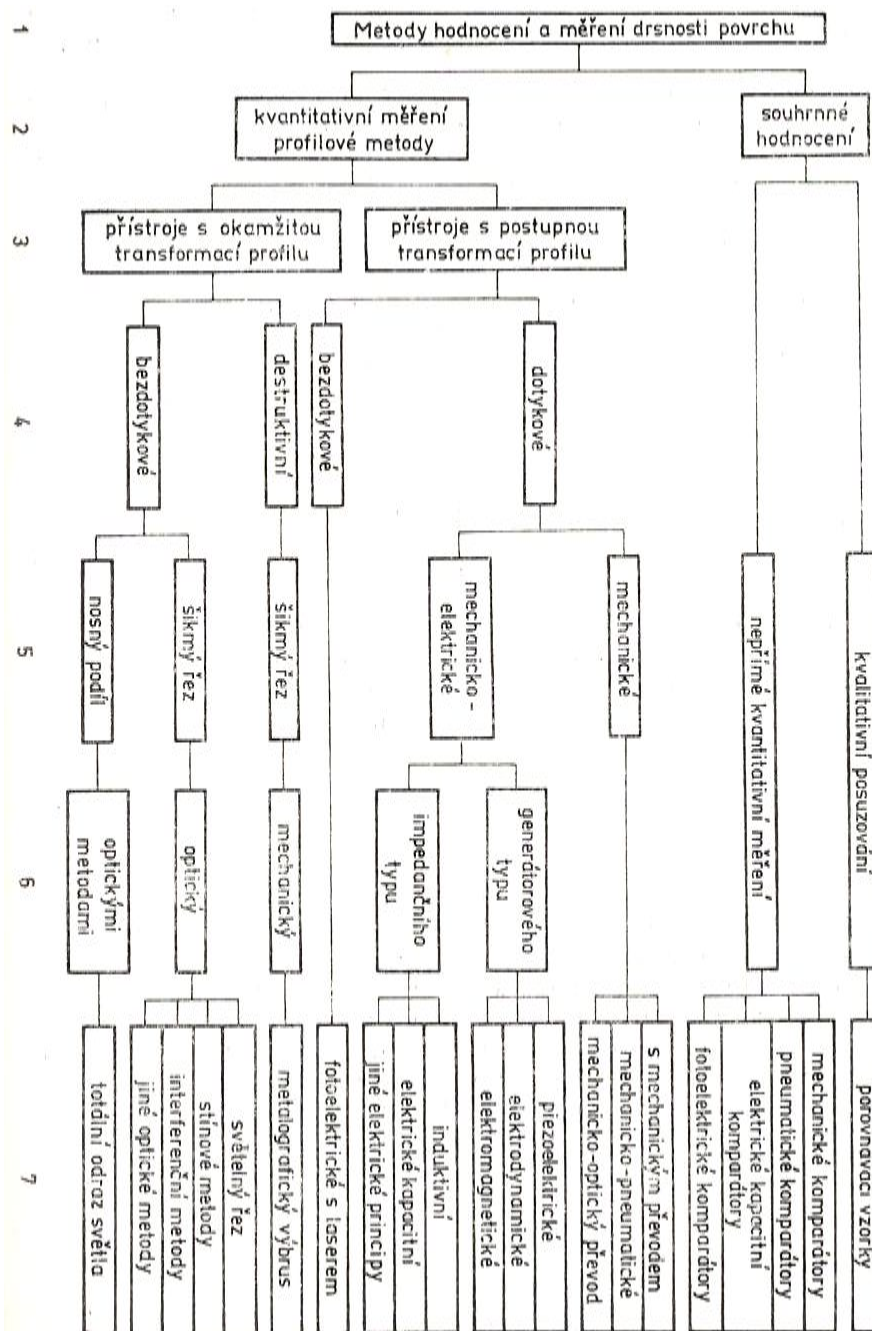
2.1.3.3 Vzájemný materiálový poměr

Materiálový podíl drsnosti profilu se určuje dle ISO 4287 a vyjadřuje procentuální podíl součtu délek materiálových přímek $M_l(c)$ v dané výšce profilu k měřené délce l_n . Křivka podílu materiálu udává pak podíl materiálu jako funkci hladiny (výšky) řezu (Obr.29).



Obr.29 Křivka materiálového poměru drsnosti povrchu [3]

2.2 Systém metod a přístrojů pro měření drsnosti povrchu



Obr.30 Klasifikace metod a přístrojů pro měření drsnosti povrchu [11]

Hlavní hlediska pro zařazení přístrojů jsou převzata z norem a uspořádána v řádcích 2-5. Ve 2. řádce je způsob kontroly, která uvádí souhrnné kvalitativní hodnocení (např. porovnání drsnosti povrchu zjištěné lidskými smysly nebo porovnávacími přístroji se vzorkovými plochami o známé drsnosti povrchu) a profilové metody kvantitativního měření drsnosti povrchu. Ve 3. řádce je způsob přenosu informace o tvaru profilu nebo plochy, zahrnuje

přístroje s postupnou nebo okamžitou transformací tvaru profilu. Ve 4. a 5. řádku je způsob snímání nebo znázornění tvaru profilu plochy, zahrnuje způsob dotykový (vždy přístroje s postupnou transformací profilu) nebo bezdotykový (až na výjimky optické přístroje s okamžitou transformací profilu).[11],[12]

2.2.1 Dotykové profiloměry

Dotykové profiloměry jsou v současné době nejrozšířenějšími a nejdokonalejšími přístroji pro měření drsnosti povrchu. Patří do skupiny přístrojů s postupnou transformací profilu. Po měření povrchu se posouvá rovnoměrnou rychlostí měřící dotek s velmi malým zaoblením hrotu, případně se posouvá kontrolovaná plocha pod měřícím hrotem. Změny výškové polohy měřícího hrotu, způsobené nerovnostmi povrchu, se mnohonásobně zvětšují některým z fyzikálních principů.

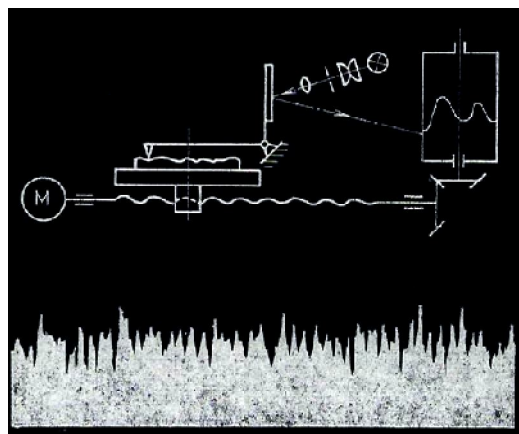
Tyto změny se buď zaznamenávají ve tvaru profilogramů, nebo se u elektrických metod převádějí na analogové změny napětí nebo indukčnosti. Změny elektrického signálu již umožňují snadné vyhodnocení jedné nebo libovolného počtu charakteristik drsnosti povrchu, definovaných v normách.[13]

2.2.1.1 Dotykové profilografy s mechanickým převodem

U tohoto typu profilografu, výšková poloha měřícího hrotu s poloměrem zakřivení 1 až 2 μm se měřila speciálním mikrokátorem se seřiditelnou měřící silou 1 až 2 mN a s stupnicí s dělením po 0,1 μm . Celkový rozsah měření byl do 4 μm . Měřilo se krokovým způsobem. Pákovým převodem se zdvihal měřící hrot a současně se posouval mikrometrickým šroubem stolek s měřenou součástí o 5 až 10 μm . Ze záznamu naměřených hodnot bylo možné nakreslit profil měřeného povrchu.

2.2.1.2 *Mechanicko - optické dotykové profilografy*

U dotykových profilografů s mechanicko-optickým převodem naklání měřící hrot při změně polohy přes pákový převod zrcátka a tím vychyluje odražený světelný paprsek, který vytváří na fotografickém materiálu zvětšený obraz profilu povrchu.



Obr.31 *Princip mechanicko-optických profilografů* [13]

2.2.1.3 *Dotykové profilografy s mechanicko - pneumatickým převodem*

Na zcela pneumatickém principu od přenosu pohybu měřícího hrotu až po grafický záznam byly vyvinuty přístroje, na kterých mohly být pořízeny profilogramy při výškovém zvětšení 500 až 20 000 : 1 a při podélném 400 : 1. Používání těchto pneumatických přístrojů se v praxi nerozšířilo.

2.2.1.4 *Dotykové profiloměry s mechanicko - elektrickým převodem*

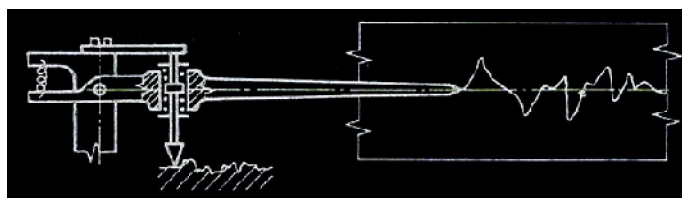
Tyto profiloměry patří dnes mezi nejrozšířenější a nejuniverzálnější přístroje. Jsou velmi přesné, mají velkou citlivost, umožňují vyhodnocování různých normalizovaných charakteristik drsnosti povrchu, obsluha je poměrně jednoduchá, většinou současně umožňují získat grafický záznam profilu.

Základní princip všech mechanicko-elektrických profiloměrů je v podstatě stejný. Změny polohy měřícího hrotu převádí snímač na analogové změny elektrického napětí nebo indukčnosti. Tyto elektrické signály lze již zpracovat v nejrůznějších elektronických obvodech. Podle konstrukčního principu snímačů se rozdělují elektrické profiloměry do dvou základních skupin:

- *Generátorového typu*
- *Impedančního typu*

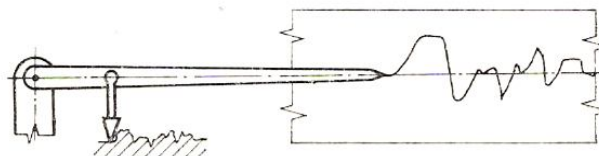
U generátorového typu, u nichž pouze při pohybu měřicího doteku vzniká na výstupních vodičích snímače elektrických napětí úměrné rychlosti pohybu hrotu. Měřené hodnoty charakteristických veličin drsnosti povrchu (např. R_a , R_z) se obvykle odhadují ze střední polohy výchylek analogového ukazatele.

U snímačů tohoto typu sleduje páka uvedeného funkčního modelu pouze rychlé pohyby měřicího hrotu a obě pružiny tlumiče působí jako tuhá spojka. Při pomalých změnách polohy hrotu, například na vlnitém povrchu a na plochách s rozsáhlejšími výstupky nebo prohlubněmi, by měly naopak obě pružiny tlumiče včas vyrovnávat změny tlaku a tlačít stále rameno páky do střední polohy. Záznam profilu by byl v takovém případě zkreslen.



Obr.32 Pákový model funkce snímačů drsnosti povrchu generátorového typu [13]

U impedančního typu, u nichž změna polohy měřicího hrotu způsobuje analogovou změnu impedance elektrického obvodu, nejčastěji indukčnosti. Tyto snímače jsou v současné době nejvíce používány. U toho typu může být jejich funkce přirovnána k tuhé páce. Zvětšený tvar měřeného profilu je úměrný změnám polohy měřicího hrotu.

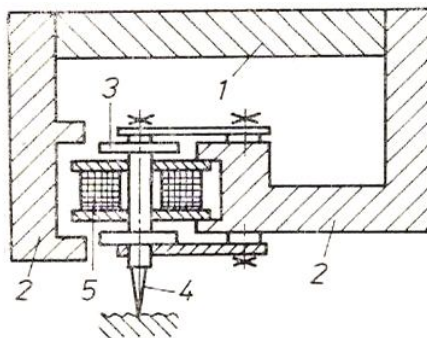


Obr.33 Pákový model funkce snímačů drsnosti povrchu impedančního typu [13]

Do skupiny snímačů generátorového typu patří snímače elektromagnetické, elektrodynamické a piezoelektrické. Snímače indukční a kapacitní jsou impedančního typu.

2.2.1.5 Elektromagnetické snímače

U tohoto typu snímačů magnetický obvod je tvořen permanentním magnetem 1 a pólovými nástavci 2. Ve vzduchové mezeře pólových nástavců kmitá železná kotva 3 vedená planžetovým přímovodem, vychylovaná měřicím hrotem 4. Pohyb kotvy způsobuje v pevné cívce 5 změnu magnetického toku (Obr.34).

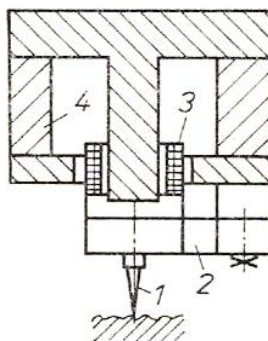


Obr.34 Schéma elektromagnetického snímače [13]

Tím se indukuje v závitěch cívky elektrické napětí, úměrné změně rychlosti pohybu měřicího hrotu. Výhodou je malá hmotnost pohyblivé části snímače a dobrá odolnost proti mechanickému poškození. Elektromagnetické snímače se používaly u starších typů profilometrů.

2.2.1.6 Elektrodynamické snímače

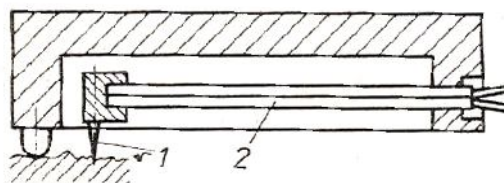
U tohoto typu profilometru měřicí hrot 1, vedený planžetovým přímovodem 2 je pevně spojen s cívkou 3, která může volně kmitat a ve vzduchové mezeře silného permanentního magnetu 4 s pólovými nástavci. Při pohybu cívky v magnetickém poli vzniká v jejích závitěch elektromotorická síla úměrná rychlosti změn indukčního toku. Výstupní elektrické napětí snímače je tedy závislé na změnách rychlosti pohybu měřicího hrotu. Tyto snímače se používaly u starších typů profilometrů (Obr.35).



Obr.35 Schéma elektro-
dynamického snímače
[13]

2.2.1.7 Piezoelektrické snímače

Piezoelektrické snímače jsou generátorového typu. Destičky vyříznuté z krystalů některých látek (např. z krystalů křemene, bariumtitanátu atd.) nebo zhotovené ze zvláštních keramických materiálů, mají při namáhání ohybem nebo tlakem na opačných stranách opačné elektrické náboje.



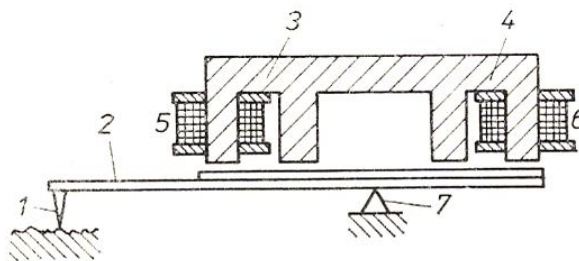
Obr.36 Schéma piezoelektrického
snímače [13]

U piezoelektrických snímačů deformuje měřicí hrot 1 buď přímo, nebo přes pákový převod destičku z piezoelektrického materiálu 2. Elektrické napětí úměrné namáhání destiček je snímáno na jejich polepech z vodivého materiálu.

Piezoelektrické snímače se používají především u dílenských profiloměrů i profilografů. Jejich předností je malý rozměr. Hodí se proto pro měření drsnosti v dírách malého průměru, v dutinách apod.

2.2.1.8 Elektroinduktivní snímače

Tento typ snímače je v současné době považován za jeden z nejdokonalejších a nejpřesnějších snímačů. Změna polohy měřicího hrotu způsobu změnu impedance elektrického obvodu, nejčastěji indukčnosti. Pro měření drsnosti povrchu se používají dvě provedení:



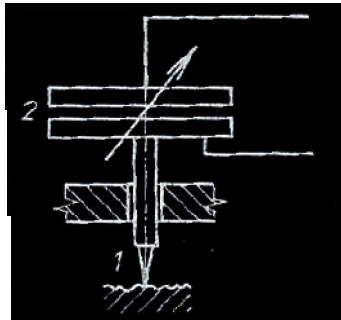
Obr.37 Schéma elektroinduktivního snímače [13]

U prvního typu, měřicí hrot 1 při posouvání snímače po povrchu (Obr.37) mění sklon dvouramenné páky 2 a tím i velikost vzduchové mezery mezi magnetickým obvodem 3 a 4 a indukčnostmi 5 a 6. Otočný bod 7 páky je volen tak, aby se při změně jejího sklonu zvětšovala vzduchová mezera jedné indukčnosti, a u druhé se o stejnou hodnotu zmenšovala.

U druhého konstrukčního typu provedení se při změně polohy měřicího hrotu nemění velikost vzduchové mezery magnetického obvodu, ale změně indukčnosti se dosahuje přesouváním feromagnetického jádra uvnitř jedné, popř. dvou nad sebou uspořádaných cívek.

2.2.1.9 Kapacitní snímače

Kromě uvedených konstrukčních řešení snímačů impedančního typu se v praxi objevily také kapacitní snímače (Obr.38).



Obr.38 Schéma elektro-
kapacitního snímače [13]

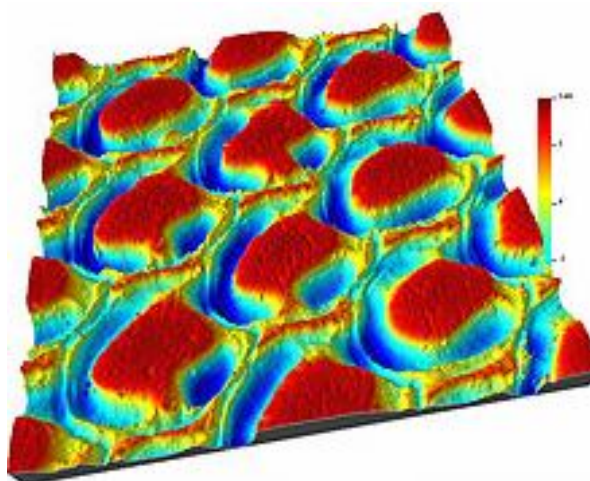
Dvě dokonalé izolované destičky z elektricky vodivého materiálu tvoří měřicí kondenzátor 2. Pohybem měřicího hrotu 1 se mění vzdálenost destiček, a tím i kapacita měřicího kondenzátoru. Jelikož tyto změny kapacity jsou velmi malé, používá se téměř vždy můstkového zapojení kapacitního snímače kompenzační metodou.

3 PROSTOROVÉ MĚŘENÍ A HODNOCENÍ TEXTURY POVRCHU

Prostorové měření a hodnocení profilu povrchu přináší velmi užitečné a prakticky využitelné informace o vztazích mezi geometrickou charakteristikou povrchu a jeho funkčními vlastnostmi. 3D charakteristika vyšetřovaného povrchu nám otevírá nové možnosti pro hodnocení textury obecného vyšetřovaného povrchu.

K rozšiřování prostorového hodnocení textury povrchu přispívá především vývoj měřicí techniky a programového zabezpečení celého procesu. Progresivní měřicí přístroje uplatňují ve větší míře bezdotykové způsoby snímání povrchu, především optické, využívají přesnější a výkonnější pohybové i náhonové prvky. Výsledkem je, že profil povrchu je snímán výrazně rychleji v porovnání s klasickými metodami a hlavně je získán popis textury podstatně větším počtem datových údajů. Programové zabezpečení se soustřeďuje nejen na přípravu a provedení vlastního měření, ale především na zpracování a vyhodnocení naměřených hodnot textury povrchu.

Měření a zpracování většího počtu dat, která popisují prostorový profil povrchu, přináší velké množství informací pro prezentaci reálného vyšetřovaného povrchu. Prostorové analýzy textury povrchu mimo početního hodnocení nabízí i grafické zobrazení profilu formou axonometrického pohledu, topografické mapy nebo záznamu rozdělení souřadnic. [7]



Obr.39 3D zobrazení abrazivního povrchu

[7]

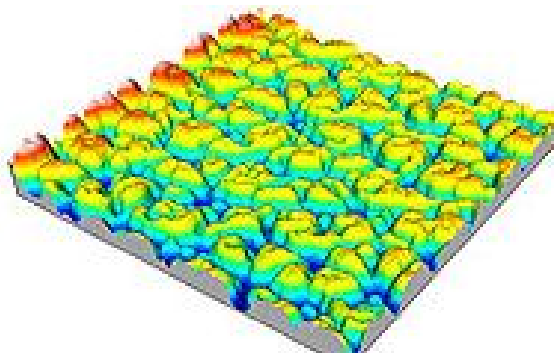
Charakteristiky povrchu plochy, např. počet, velikost, tvar a rozložení výstupků a prohlubní profilu, nejen zvyšují objektivitu hodnocení povrchu, ale lze je využít i pro predikci

vlastností funkčně zatíženého povrchu a jejich změn v průběhu provozu. Právě rozšíření možností kvantitativního posuzování funkčních vlastností povrchu, jako např. průběhu opotřebení, tření, podmínek mazání, únavových vlastností, těsnění stykových ploch, procesu stárnutí, koroze apod., patří k hlavním přednostem prostorového hodnocení struktury povrchu.

Hodnocení struktury povrchu plochy může přispět k vysvětlení a řešení řady problémů v tribologii a výrobní technologii. Umožní studium geometrických a rozměrových změn profilu povrchu v různých etapách výrobních procesů součástí, po jejich dokončení i v průběhu jejich funkčních využití.

Zvyšování přesnosti a jakosti dokončovaných povrchů broušením vyžaduje použití tvrdších broušicích materiálů, ale současně se klade důraz na velikost a rovnoměrnost rozložení broušicích zrn, která by měla s celkovou strukturou broušicího kotouče tvořit konsistentní celek. Měření povrchu broušicího kotouče nebo jednotlivých zrn brusiva, většinou z kysličníku hlinitého nebo karbidu křemíku, dotykovými způsoby je velmi obtížné nebo zcela nemožné. Proto se u těchto případů používá bezkontaktního způsobu měření povrchu, a to laserového způsobu měření. Takto lze měřit:

- velikost zrn brusiva
- rovnoměrnost rozložení zrn na povrchu kotouče
- výšku zrn nad povrchem pojiva
- počet vrcholků zrn na funkčně důležitém mezním rozměru kotouče



Obr.40 3D zobrazení povrchu broušicího kotouče [7]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Dle zadání diplomové práce byla vypracována literární studie teorie broušení, jakosti broušené plochy a prostorového měření a textury povrchu.

Teoretická část práce je zaměřena na studium jednotlivých metod broušení, kinematiky broušení, charakteristiky brousícího kotouče. Dále pak studiem charakteristiky drsnosti povrchu, měření drsnosti povrchu či textury obrobené plochy v trojrozměrném pohledu.

Experimentální část je věnována následujícím úkolům:

- vyjádření závislosti drsnosti broušeného povrchu ($R_a, R_z, R_m(r)$) testovaných broušených materiálů při měnících se technologických podmínkách za použití brousícího kotouče 99A
- vyjádření závislosti drsnosti broušeného povrchu ($R_a, R_z, R_m(r)$) testovaných broušených materiálů při měnících se technologických podmínkách za použití brousícího kotouče 49C
- vyjádření závislosti drsnosti broušeného povrchu ($R_a, R_z, R_m(r)$) testovaných broušených materiálů při měnících se technologických podmínkách za použití brousícího kotouče 99BA
- vzájemné porovnání charakteristik drsnosti ($R_a, R_z, R_m(r)$) u testovaných broušených materiálů (kovy, plasty, pryže) mezi těmito brousícími kotouči
- vyjádření struktury povrchů použitých brousících kotoučů

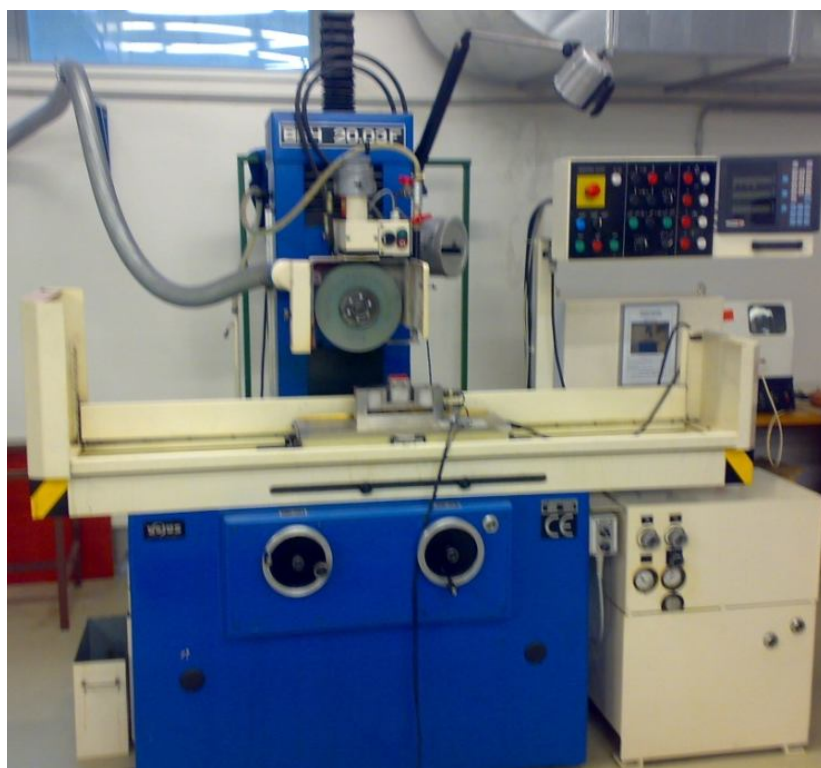
5 CHARAKTERISTIKA STROJE A POUŽITÝCH MĚŘÍCÍCH PŘÍSTROJŮ

5.1 Vodorovná rovinná bruska BRH 20.03 F

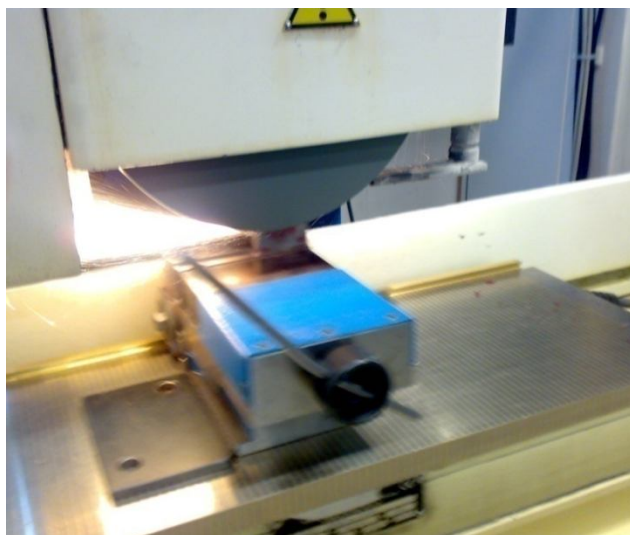
5.1.1 Specifikace

Tento typ brusky se vyznačuje horizontálním vřetenem s pravoúhlým stolem. Je přímo určený pro broušení rovinných a tvarových ploch dílců z oceli, litiny či jiných kovových materiálů, kde je požadována vysoká rozměrová přesnost a kvalita zpracování. Tento typ brusky je nejvíce využíván pro obvodové broušení a dílce se zde upínají buď přímo na elektromagnetickou desku, nebo do upínacího zařízení v podobě svěráku. Tato bruska je vybavena číslicovým odměřováním NV 300E fy FAGOR, která napomáhá odměřovat dráhu v příčném či podélném směru stolu.

Z pohledu konstrukce se bruska vyznačuje tím, že stůl koná podélný posuv po vedení vytvořeném na předním loži a příčný posuv vytváří vřeteník společně se stojanem, ve kterém je přímo vytvořeno vedení pro jeho svislý posuv. Bruska BHV 20.03F dokáže pracovat taktéž pracovat v uzavřeném nebo neuzavřeném automatickém cyklu.



Obr.41 Bruska BHV 20.03F pohled 1



Obr.42 Bruska BHV 20.03F pohled 2

5.1.2 Technické parametry stroje

Funkčné vlastnosti

Parameter	Metrická sústava		Palcová sústava	
	Jednotka	Hodnota	Jednotka	Hodnota
Rýchlosť kola obrúta regulovateľná	m.min ⁻¹	1-30	ipm	3,2-98
Maximálna dĺžka pohybu stola	mm	710	inch	27,9
Automatický priečny posuv plynulý	m.min ⁻¹	0,2-2,5	inch	0,65-8,2
Automatický priečny posuv prerušovaný	mm	0,3-15	inch	0,012-0,6
Priečny rýchloposuv	m.min ⁻¹	2,5	ipm	3,2
Priečny posuv ručný (1 dielik=0,05 mm) (1 div=0,002 inch) s možnosťou odčítania 1,005 mm, a 0,0002 inch)	mm.inch	5	inchrev	0,2
Max. dráha priečného posuvu	mm	230	inch	9
Automaticky zvislý posuv	mm	0,002-0,03	inch	0,00008-0,0012
Zvislý rýchloposuv	m.min ⁻¹	0,5	ipm	1,6
Zvislý posuv ručný (1 dielik=0,002) (1 div=0,0001 inch)	mm.inch	0,25	inchrev	0,01
Max. dráha zvislého posuvu	mm	480	inch	18
Otáčky brúsneho kolesa	min ⁻¹	2560	rpm	2560
Výkon elektromotora brúsneho kolesa	kW	2,2		
Výkon elektromotora hydr. agreg.	kW	1,1		
Výkon elektromotora hydr. agreg.	kW	0,55		
Výkon elektromotora chladiča oleja	kW	0,12		
Výkon elektromotora zvislého rýchloposuvu	kW	0,25		
Elektromotor magnet. čerpa	kW	0,190		
Výkon elektromotora chladivého agregátu	kW	0,09+0,16		
Výkon elektromotora odsávania	kW	0,37		
Maximálny príkon stroja	kVA	6,3		
Max. zaťaženie stola vrátane uzinača	N	2000	lb	443
Hlučnosť v mieste obsluhy - dovolená	dB	75		

Obr.43 Technické parametry stroje 1

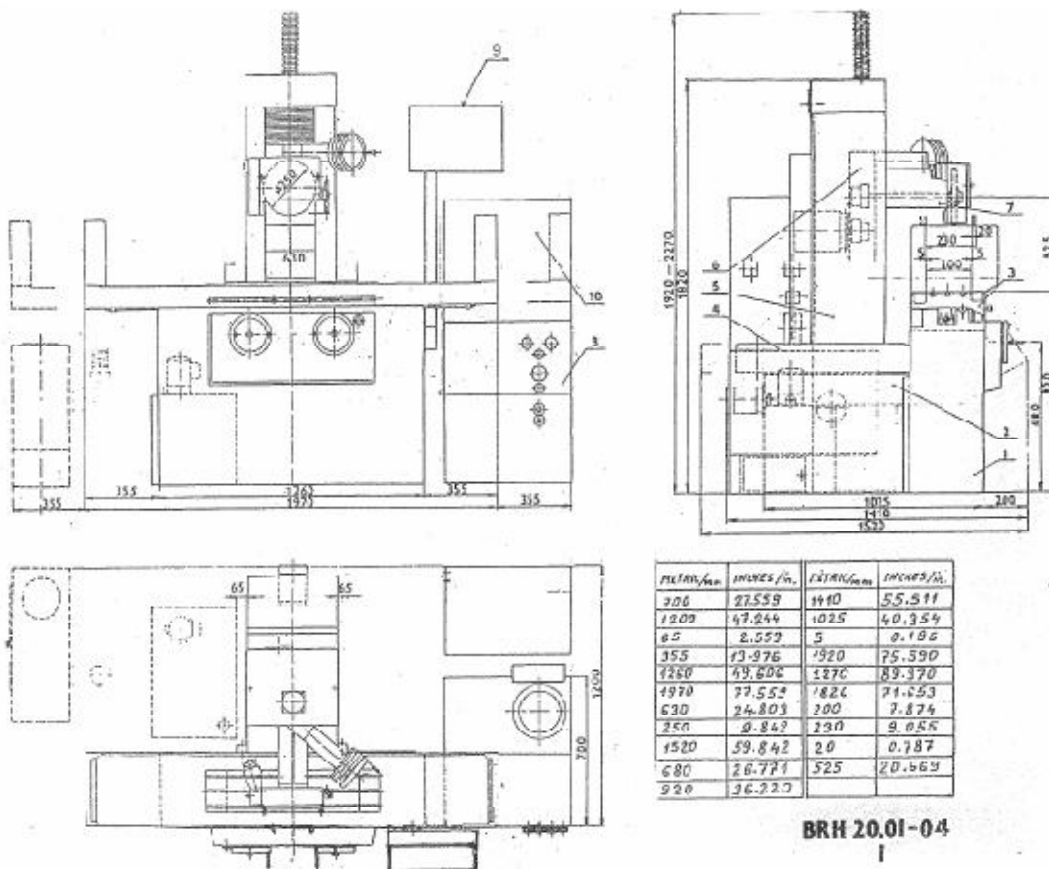
Rozměry a hmotnost

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

Obr.44 Technické parametry stroje 2

5.1.3 Schéma stroje

1. Přední lůžko, 2. Zadní lůžko, 3. Stůl, 4. Příčné saně, 5. Stojan, 6. Svislé saně, 7. Brusný vřeteník, 8. Hydraulický agregát, 9. Ovládací panel, 10. skříň

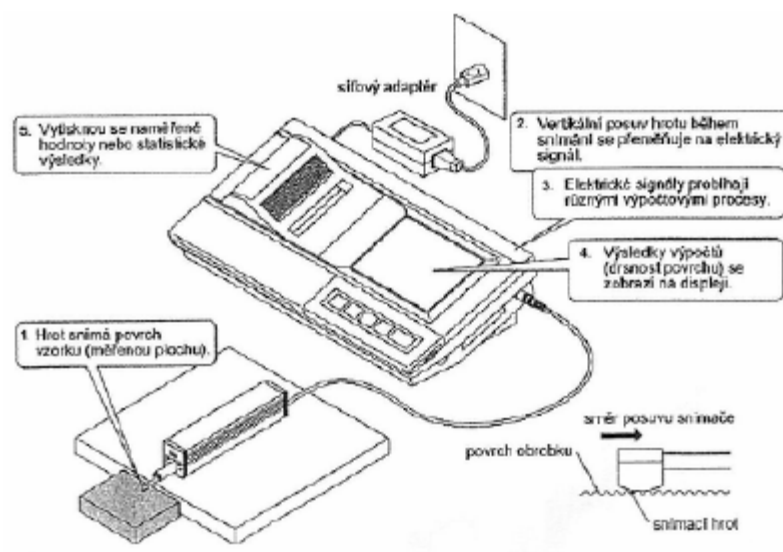


Obr.45 Schéma stroje

5.2 Drsnoměr Mitutoyo SJ-301

Tento typ měřicího přístroje je určen pro měření drsnosti povrchu v dílenském prostředí. Přístroj splňuje kritéria mezinárodních standardů ISO, DIN, ANSI a JIS. Drsnoměr obsahuje dotykový snímací hrot, který měří strukturu povrchu a vyhodnotit za pomoci řady parametrů podle národních a mezinárodních norem. V mém případě bylo měření prováděno za pomoci normy ČSN EN ISO 4287.

Drsnoměr se vyznačuje zdvihem (v ose Z) 350 μm , posuvem (v ose X) 12,5 mm a dokáže vyhodnotit až 37 parametrů. Výsledky měření se zobrazují digitálně a graficky za pomoci vestavěné tiskárny se mohou průběhy drsnosti i s jeho hodnotami vytisknout.



Obr.46 Drsnoměr Mitutoyo SJ-301 – popis



Obr.47 Drsnoměr Mitutoyo SJ-301

Měřené parametry: Ra, Ry, Rz, Rt, Rq, Rv, Sm, S, Pc, R3z, mr, Rpk, Rvk, Rk, Mr1, Mr2, Lo, R, AR, Rx, A1, A2.

Základní vlastnosti:

Grafická analýza: BAC1, BAC2, ADC

Pracovní rozsah: Ra 0,01 – 75 μm , Ry/Rz 0,02 – 300 μm

Délka posuvu: 0,08; 0,25; 0,8; 2,5 a 8 mm

Vzorkování: x1, x3, x5; digitální filtr a zvětšení

Statistika: minimální hodnota, maximální hodnota, směrodatná odchylka, rozložení frekvence, pass ratio

Rozhraní RS232 pro připojení tiskárny nebo PC

5.3 Stroj COMAGRAV pro laserové 3D skenování

Stroje COMAGRAV jsou počítačem řízené 3D gravírovací, řezací, modelovací a skenovací frézky pro nejširší oblast použití. Mají schopnost obrábět mosaz, hliník, ocel, akrylát, dřevo, plasty a veškeré běžně obrobitelné materiály. COMAGRAV se uplatňuje při řezání desek z plastů, dřeva, mosazi, hliníku, při výrobě cedulí, firemních log, přístrojových panelů, desek plošných spojů, forem, raznic a přesného gravírování.



Obr.48 Skenovací stroj COMAGRAV

Stroje COMAGRAV jsou dostupné ve dvou typech 3D skenování - laserové nebo mechanické. Obě metody jsou velmi přesné, je možné je použít s jakýmkoli strojem značky COMAGRAV, takže jediným rozměrovým omezením je pracovní plocha stroje. Obě metody mají své specifické výhody a omezení.

Data ze skeneru lze rovnou importovat ve formátu DXF do libovolného CAD/CAM systému, včetně softwaru Delcam ArtCAM Express nebo programu Copy Mate.

	Laserová sonda	Dotyková sonda
Rychlost skenování	extrémně vysoká, až 800 vzorků za vteřinu, nezávislá na výšce vzorku	závislá na tvrdosti materiálu a nastavení kroku
Přesnost skenování	od 0,002 mm (závislé na čočce)	souvisí s přesností stroje
Skenovaný rastr v osách XY		libovolný
Materiál	vše kromě průhledných a černých povrchů	vše kromě měkkých materiálů
Metoda snímání	bezdotyková	dotyková
Skenovaný rozsah	max. 250 mm (závislé na čočce)	max. 219 mm (závislé na zdvihu frézky)
Inkrementální skenování	není potřeba, osa Z se nepohybuje	ano
Software		součástí řízení PILOT
Neomezený formát dat		ano
Výstup dat		DXF, G-code, ASCII

Obr.49 Technické údaje stroje pro dotykové či bezdotykové skenování

5.4 Talysurf CLI 500

Měřicí přístroje typu CLI jsou vysoce účinnými měřicími prostředky k provádění rychlého prostorového měření a hodnocení povrchu s vysokým rozlišením. Systém CLI nabízí možnosti měření a analýzy povrchu ve třech osách, s využitím dotykové nebo bezdotykové měřicí techniky. Tento přístroj umí provádět analýzu dat při hodnocení struktury povrchu z jednoho profilu řezu (2D) i profilu plochy povrchu (3D).

Systém CLI je vybaven automatickým posuvem ve všech osách (X, Y, Z), s rychlostí až do 30 mm/s, což umožňuje rychlé automatické měření. Měřicí prostor u toho typu přístroje je o rozloze (max.50 x 50 x 50 mm).

Základem programového vybavení přístroje Talysurf CLI je program Talymap, který zabezpečuje veškeré řídicí, kontrolní, vyhodnocovací i informační služby. Výkonný program pro analýzu dat zahrnuje standardní funkce vyhodnocení struktury povrchu 2D a 3D, včetně vyjmutí profilu 2D z povrchu 3D, měření ploch a objemů, výšky a vzdálenosti stupňů, analýzy výstupků, nosného podílu, velikosti a hustotu zrn, atd.



Obr.50 Talysurf CLI 500

Program využívá pro prostorové hodnocení povrchu amplitudové parametry, dále parametry popisující materiálový poměr povrchu (ISO 13565-2), parametry vztažené k rozmístění nerovnosti (např. hustota výstupků, rozvinutý povrch apod.) a objemové parametry (poměr objemů materiál/dutiny). Celkem program nabízí pro charakteristiku povrchu 120 parametrů v režimu 2D a 40 parametrů pro 3D. Navíc dovoluje vyjmout z hodnoceného povrchu jeden profil a provést jeho hodnocení (2D). Na 3D zobrazený povrch lze v libovolném směru vyznačit profil (čáru), který je následně vyhodnocen funkcemi 2D.

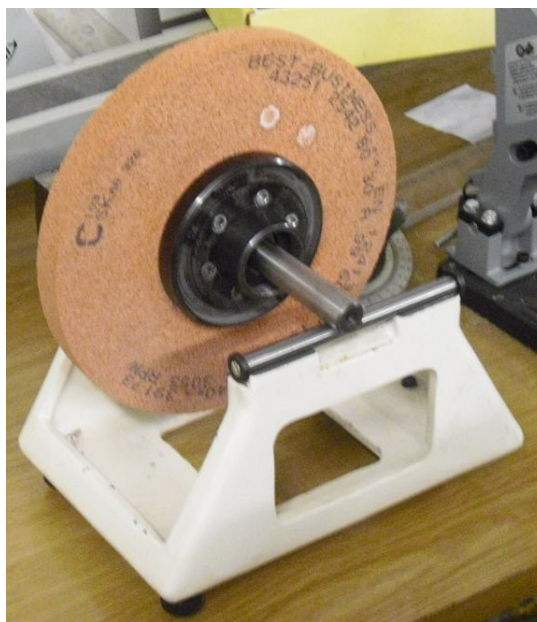
Výsledky měření získané dotykovým a bezdotykovým způsobem je třeba srovnávat a posuzovat velmi důkladně. Na stejném povrchu může být reakce odraženého světla a snímání hrotu zcela odlišná. Proto ne vždy je možná korelace mezi výsledky dotykového a bezdotykového měření. Přesto tuto skutečnost se bezdotykové měření prosazuje svými praktickými přednostmi jako je například : vysoká rychlost měření, oboustranné snímání snižuje dobu kontroly, možnost měření měkkých a pružných materiálů, a v neposlední řadě i menší náchylnost optických měřidel k opotřebení nebo poškození.

6 CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ A BROUŠENÝCH MATERIÁLŮ

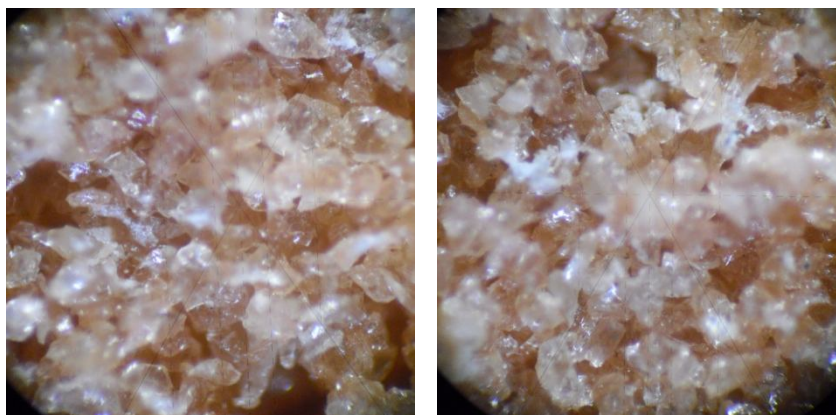
6.1 Charakteristika použitých kotoučů

6.1.1 Kotouč č.1 – 99A 60 J 12 V

Jedná se o kotouč s označením A99, z čehož vyplývá, že materiál brousícího zrna se skládá z bílého umělého korundu, jehož tvrdost v Mohsově stupnici dosahuje 9 stupně. Tento typ korundu obsahuje více než 99,5% Al_2O_3 oxidu hlinitého. Je nejvíce vhodný pro broušení nástrojových a nerezových ocelí. Materiál pojiva je keramický. Dále tento typ kotouče se vyznačuje střední zrnitostí, měkkou tvrdostí a vyšší pórovitostí.



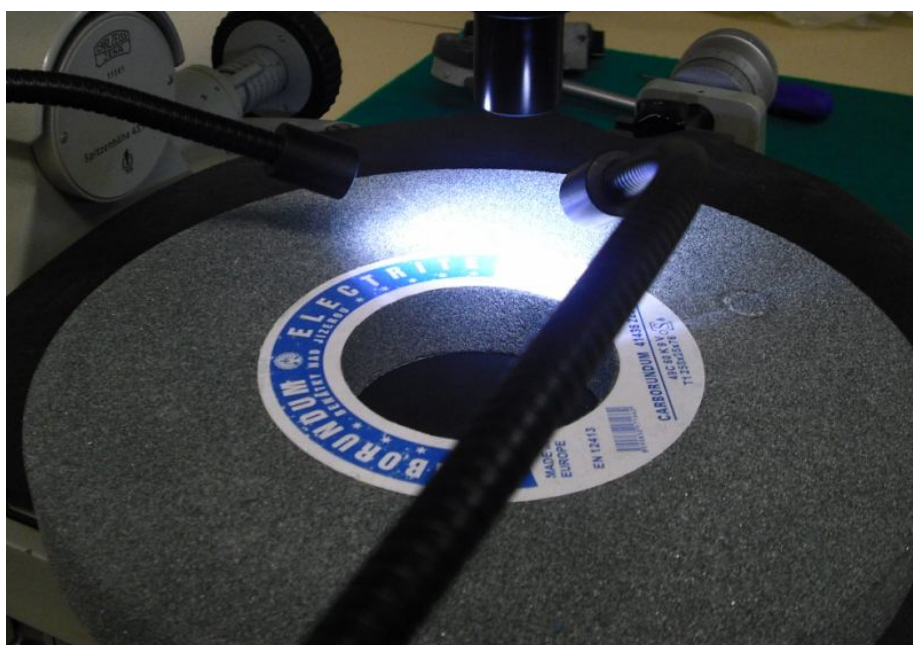
Obr.51 Kotouč č.1 – 99A 60 J 12 V



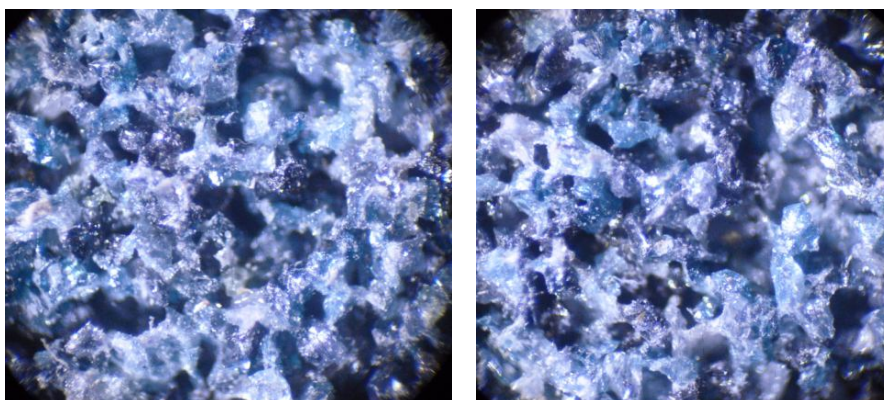
Obr.52 Obrázek struktury kotouče 99A 60 J 12 V (30x násobné zvětšení)

6.1.2 Kotouč č.2 – 49C 60 K 9 V

U tohoto typu brousícího kotouče s označením 49C, se materiál brusného zrna skládá z karbidu křemíku, kdy jeho tvrdost v Mohsově stupnici dosahuje hodnoty 9,5. Tento typ zeleného karbidu se vyznačuje vyšším stupněm čistoty oproti černému. Je vysoce tvrdý ale křehký. Je nejvhodnější pro broušení slinutého karbidu, plastu či keramiky. Materiál pojiva je taktéž keramický. Dále se tento typ kotouče vyznačuje střední zrnitostí, měkkou tvrdostí a nižší pórovitostí než je tomu v případě kotouče s označením 99A.



Obr.53 Kotouč č.2 – 49C 60 K 9 V



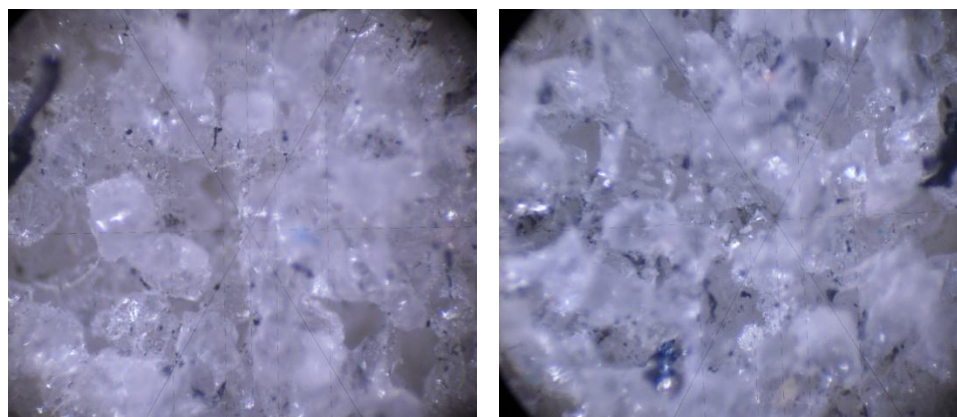
Obr.54 Obrázek struktury kotouče 49C 60 K 9 V (30x násobné zvětšení)

6.1.3 Kotouč č.3 – 99BA 46 J 9 V

Tento typ brousícího kotouče s označením 99BA nese brousící zrno o materiálu z bílého umělého korundu. Materiál pojiva je keramický. Dále se tento typ kotouče vyznačuje střední zrnitostí a zároveň nejnižší ze všech tří brousících kotoučů, potom měkkou tvrdostí a stejnou hodnotou struktury jako u kotouče s označením 49C.



Obr.55 Kotouč č.3 – 99BA 46 J 9 V



Obr.56 Obrázek struktury kotouče 99BA 46 J 9 V (30x násobné zvětšení)

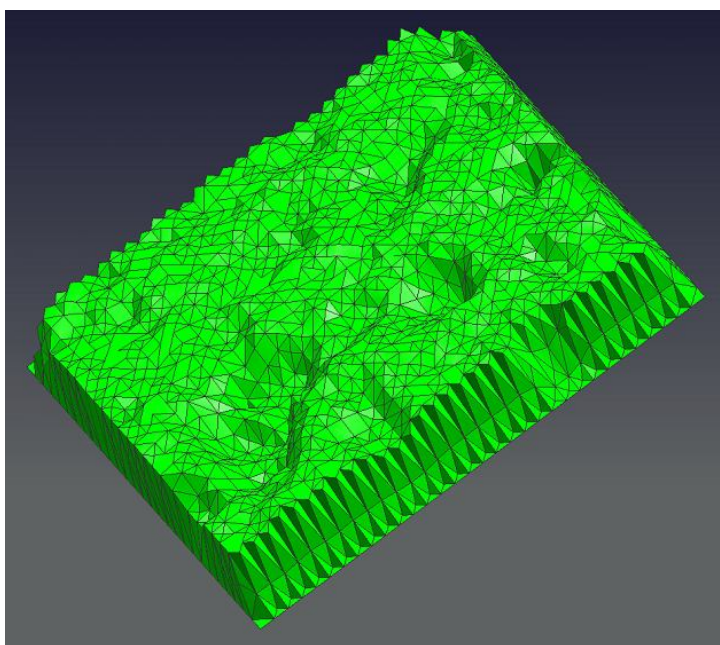
6.2 Charakteristika brousících kotoučů využitím 3D skenování za pomocí laserového snímače COMAGRAV

6.2.1 Podmínky 3D skenování

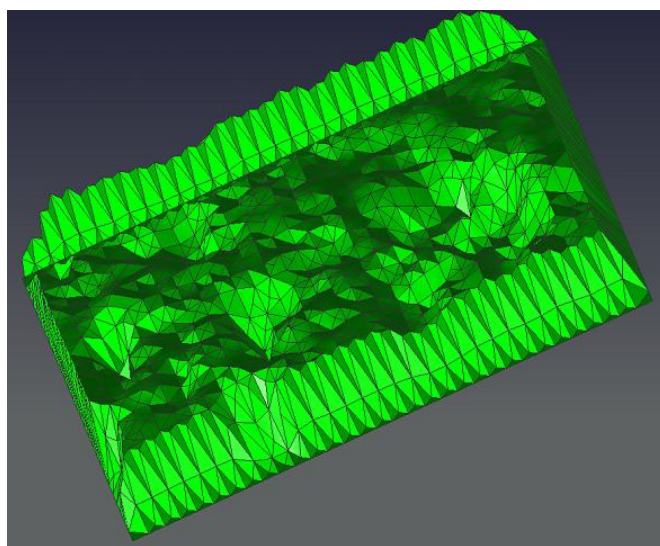
- skenování v obou směrech
- velikost skenované plochy 10 x 10 mm
- čočka s ohniskovou vzdáleností 50 mm
- velikost skenovacího kroku v obou směrech (X,Y) se rovná 0,12 mm
- odrazivost cca 60 %
- kvalita skenování v rozmezí 50 – 70 %
- max. výškový rozdíl byl získán z rozdílu max. prohlubně a max. výstupku

<i>Výsledky snímání povrchů brousících kotoučů snímačem Comagrav</i>	
Maximální výškový rozdíl v [mm] výstupků a prohlubní abrazivního povrchu kotoučů	
Kotouč č.1 99A 60 J 12 V	1,491
Kotouč č.2 49C 60 K 9 V	0,442
Kotouč č.3 99BA 46 J 9 V	0,853

6.2.2 Kotouč č.1 – 99A 60 J 12 V

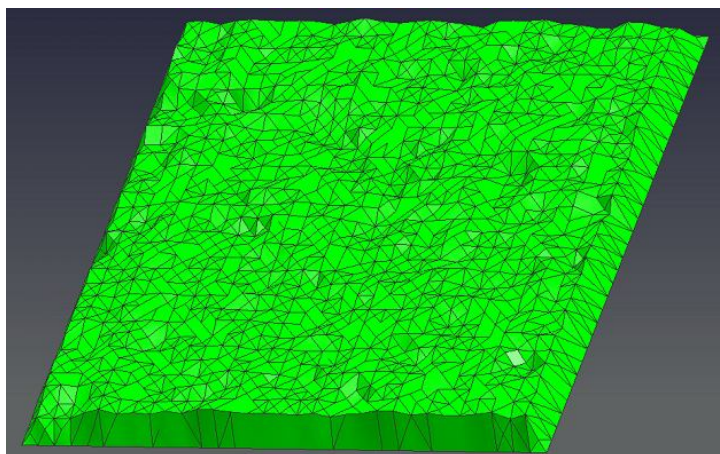


Obr.57 Kotouč č.1 – pohled 1

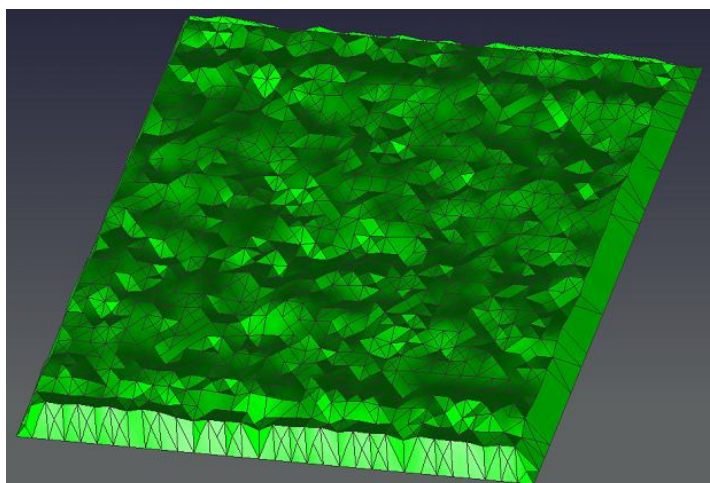


Obr.58 Kotouč č.1 – pohled 2

6.2.3 Kotouč č.2 – 49C 60 K 9 V

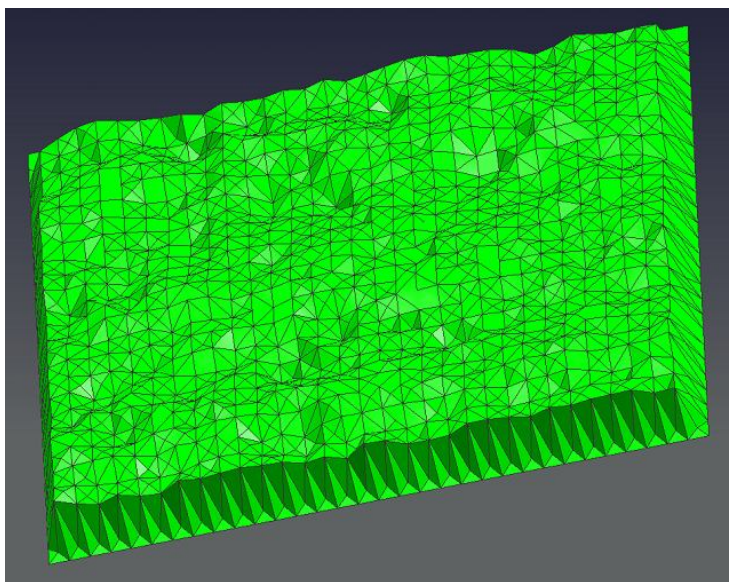


Obr.59 Kotouč č.2 – pohled 1

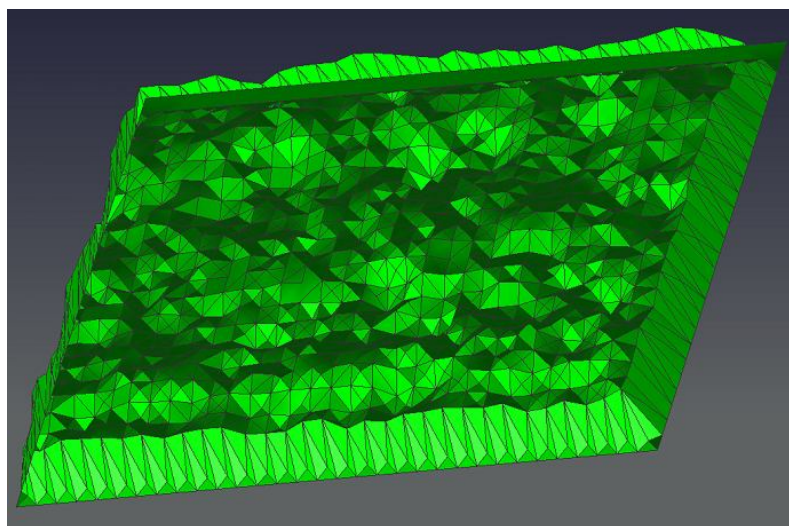


Obr.60 Kotouč č.2 – pohled 2

6.2.4 Kotouč č.3 – 99BA 46 J 9 V



Obr.61 Kotouč č.3 – pohled 1



Obr.62 Kotouč č.3 – pohled 2

6.3 Charakteristika použitých broušených materiálů

6.3.1 Ocel ČSN 11 600 – 1.0060

Tento druh ocele patří do skupiny konstrukčních nelegovaných ocelí s obsahem uhlíku 0,5 %. Při průběhu tepelného zpracování se ocel nejprve normalizačně žihá v rozmezí teplot 840 – 870 °C a následně popouští v intervalu teplot 670 – 700 °C. Ochlazení probíhá v obou případech na vzduchu. Svařitelnost je u tohoto typu ocele obtížná. Mez pevnosti materiálu se pohybuje v rozmezí 412 – 745 MPa.

6.3.2 Ocel ČSN 19 436 – 1.2080

Tento druh ocele patří do skupiny nástrojových ocelí. Jedná se o vysoce legovanou chromovou ledeburitickou ocel s vysokým obsahem uhlíku a chromu vyznačující se vysokou odolností proti otěru. Dále se vyznačuje dobrou rozměrovou stálostí po zakalení, vysokou pevností v tlaku a značně nízkou houževnatostí zejména v příčném směru. Je vhodná zejména pro práci za studena.

Mez pevnosti se pohybuje v rozmezí 800 - 850 MPa a tvrdost po zakalení dosahuje až 64 HRC. Žihací teplota se pohybuje v rozmezí 600 – 830 °C podle typu žihání. Dále kalící teplota v intervalu teplot 940 - 970 °C a popouštění v rozmezí 180 - 250 °C.

6.3.3 PP - Polypropylen

Polypropylen je krystalický polymer o stupni krystalinity 60 až 75 %. Vzhledem ke své krystalinitě je PP neprůhledný. Bod tání čistého izotaktického PP je 176 °C. Vykazuje dobré elektroizolační vlastnosti v široké oblasti frekvencí a chemickou odolnost. Jeho tepelná použitelnost je krátkodobě do 135 °C, dlouhodobě 100 °C. Dále se vyznačuje vyšší pevností v tahu a v tlaku, vyšší tvrdostí a odolností proti oděru. PP se výhradně zpracovává vstřikováním a vytlačováním.

6.3.4 PMMA - Polymethylmethakrylát

Výrobek z PMMA se nejčastěji označuje jako organické sklo. Nejcharakterističtější vlastností PMMA je jeho čírost a naprostá bezbarvost i v tlustých vrstvách. PMMA je při teplotě 130 až 140 °C kaučukovitý a snadno tvarovatelný. Dá se dobře mechanicky obrábět. Tepelná odolnost bez zatížení je kolem 80 °C. Jeho nedostatkem je nízká povrchová tvrdost.

6.3.5 Pryž 1 (NBR + BR)

Tato směs se skládá z 80 % NBR (Butadien-akrylonitrilový kaučuk) a z 20 % BR (Polybutadienový kaučuk). Fyzikální a technologické vlastnosti NBR jsou závislé na obsahu akrylonitrilu. Se vzrůstajícím obsahem stoupá tvrdost a klesá elasticita. Co se týká BR, tento typ kaučuku se používá ve směsi za účelem zvýšení odolnosti proti oděru, odrazové pružnosti. Tato směs se lisuje při teplotě 160 °C. Pevnost v tahu u NBR se pohybuje u neplněné pryže kolem 4 MPa a plněné 25 MPa. Odolnost proti oděru je velmi dobrá. Teplotní použitelnost u NBR dlouhodobě se nachází v teplotním rozsahu - 40 – 110 °C a nárazově při 130 °C. Dále pevnost v tahu u BR se pohybuje u neplněné pryže cca 9 MPa a plněné 18 MPa. Odolnost proti oděru je výborná. Teplotní použitelnost u BR dlouhodobě se nachází v teplotním rozsahu - 90 – 100 °C a nárazově při 120 °C.

6.3.6 Pryž 2 (SBR)

SBR neboli Butadien-styrenový kaučuk je univerzální kaučuk, který představuje asi 45 % celosvětové výroby syntetických kaučuků. Elasticita a dynamické vlastnosti jsou nižší než vlastnosti přírodního kaučuku. SBR se používá pro běhouny pneumatik i pro technickou pryž. Tato pryž se lisuje při teplotě 150 °C. Pevnost v tahu u SBR se pohybuje u neplněné pryže kolem 3 MPa a plněné 25 MPa. Odolnost proti oděru je velmi dobrá. Teplotní použitelnost u SBR dlouhodobě se nachází v teplotním rozsahu - 45 – 100 °C a nárazově při 120 °C.

7 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ A METODIKA EXPERIMENTU

V tomto experimentu před samotným měřením dosahovali vzorky rozměrů:

- ocel 11 600, 19 436, plast PMMA – 50 x 50 x 10 mm
- plast PP – 50 x 50 x 20 mm
- pryž NBR+BR, SBR – 40 x 15 x 15 mm

Na začátku celého měření byly brousící kotouče staticky vyváženy na stojanu, kde kotouč s přírubou se nasadil na vyvažovací trn. Vyvažovací stojan se ustavil vodováhou do vodorovné polohy. Brousící kotouč se položil na odvalovací dráhy stojanu a odvalil se do polohy, kdy je nejhmotnější místo dole. Na protější straně se udělala značka a pod ní se v drážce příruby umístilo přestavitelné závaží. Postupně se zjišťovali další nejhmotnější místa brousícího kotouče a vyvažování pokračovalo tak dlouho, dokud kotouč zůstal nehybný, tedy staticky vyvážený. Před každým broušením, se nově použitý kotouč orovnal přímo na vřetenu brusky.

Postup broušení na jednotlivých vzorcích materiálů probíhal tak, že každá boční plocha byla přebroušena pod jinou hloubkou řezu a_e v rozmezí hodnot 0,01 – 0,04 mm za stejné hodnoty posuvové rychlosti v_f . Po vykonání tohoto přebroušení ploch, proběhlo změření drsnosti dotykovým způsobem či bezdotykovým a následovala příprava těchto ploch pro další experiment při další hodnotě posuvové rychlosti v_f . Tento postup se opakoval až do té doby, než došlo k přebroušení ploch při všech posuvových rychlostech v_f rozmezí hodnot 7 – 23 m/min. Tento postup probíhal za stejných podmínek při broušení všech tří brousících kotoučů při otáčkách vřetene $n = 2550$ ot./min. a bez chlazení.

Dále každá broušená plocha materiálu byla stejným směrem zbroušena a to posuvem stolu brusky zleva doprava.

Při zjišťování hodnot parametrů drsnosti R_a , R_z a $R_m(r)$ byla každá přebroušená plocha materiálu vzorku při každé hloubce řezu a_e a posuvové rychlosti v_f 10x dotykovým způsobem změřena a statisticky vyhodnocena. (aritmetický průměr, směrodatná odchylka a interval spolehlivosti na 95%).

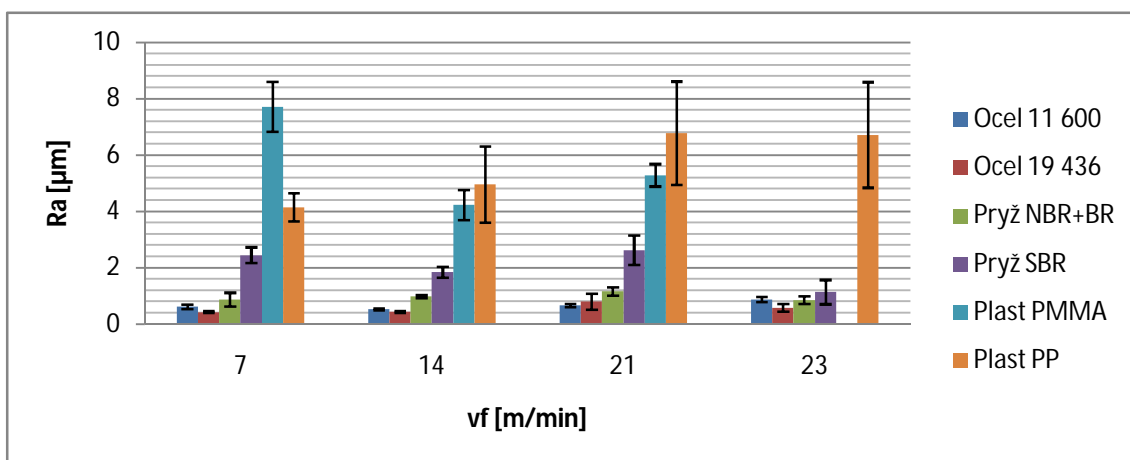
U bezdotykového snímání povrchu byla každá plocha, pokud byla nasnímana ve stavu přebroušení $a_e = 0,04$ mm a posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min.

8 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

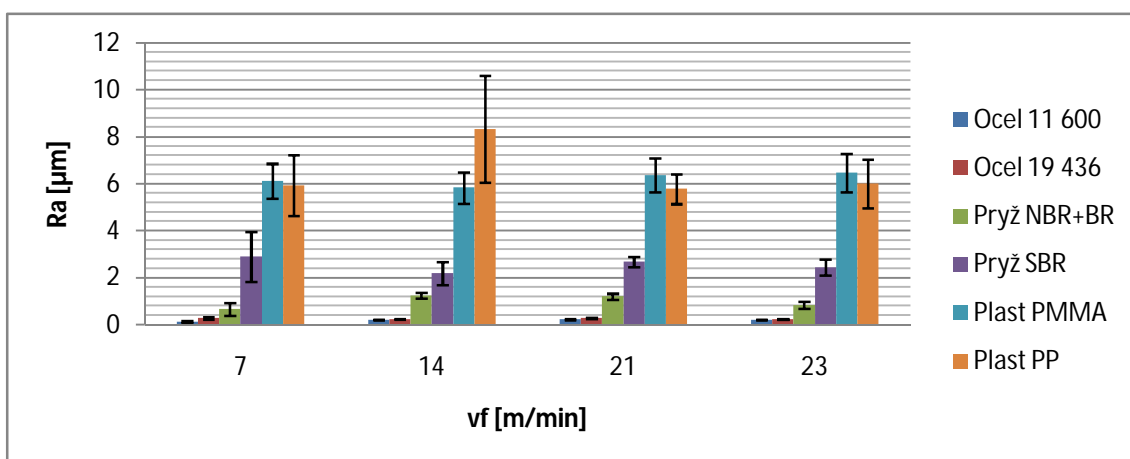
Při procesu broušení byly nastaveny konstantní otáčky brousících kotoučů pro všechny měření $n_k = 2550$ ot./min. Dále hodnoty, které byly nastaveny konstantně na drsnoměru Mitutoyo činili: délka posuvu (cut off) $\lambda_c = 0,8$ mm s rychlostí posuvu $0,5$ mm.s⁻¹ u plastu a pryže a $\lambda_c = 0,25$ mm s rychlostí posuvu $0,25$ mm.s⁻¹ u kovu, počet měření na vyšetřované délce $N=5$, $Rm(r) = 20\%$

U všech hodnot aritmetických průměru Ra a Rz byla vypočítaná směrodatná odchylka a interval pravděpodobnosti (spolehlivosti) na 95%.

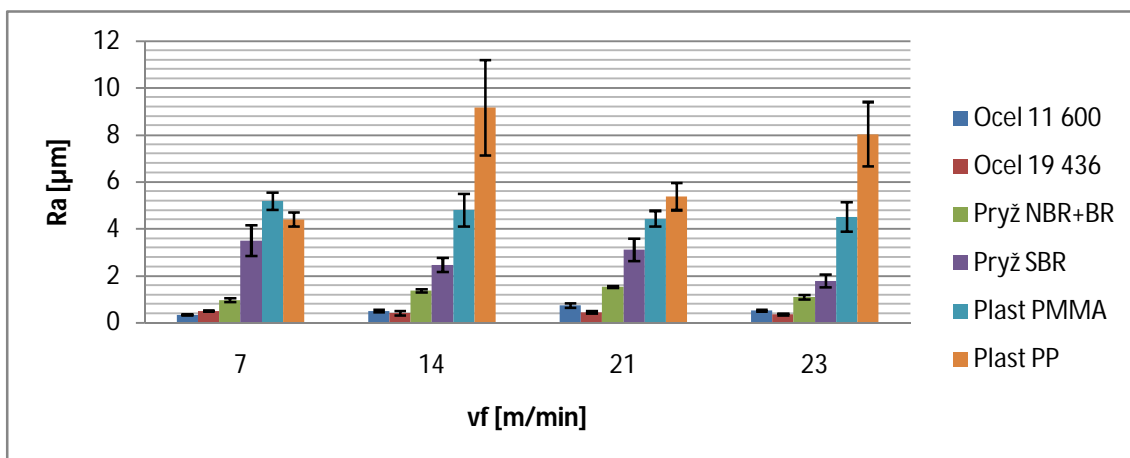
8.1 Průměrná aritmetická úchylka Ra broušeného povrchu



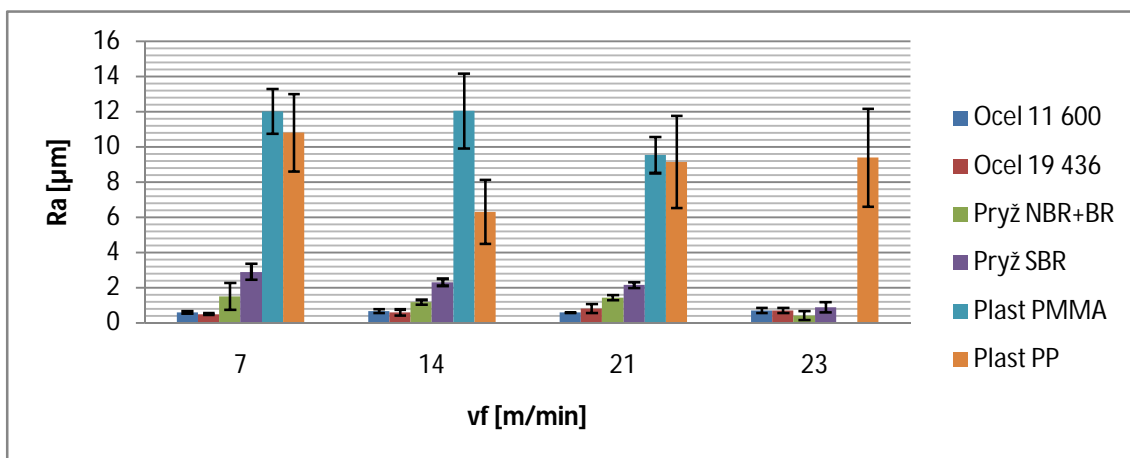
Obr.63 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e=0,01$ mm na parametr drsnosti Ra kotouče 99A 60 J 12 V



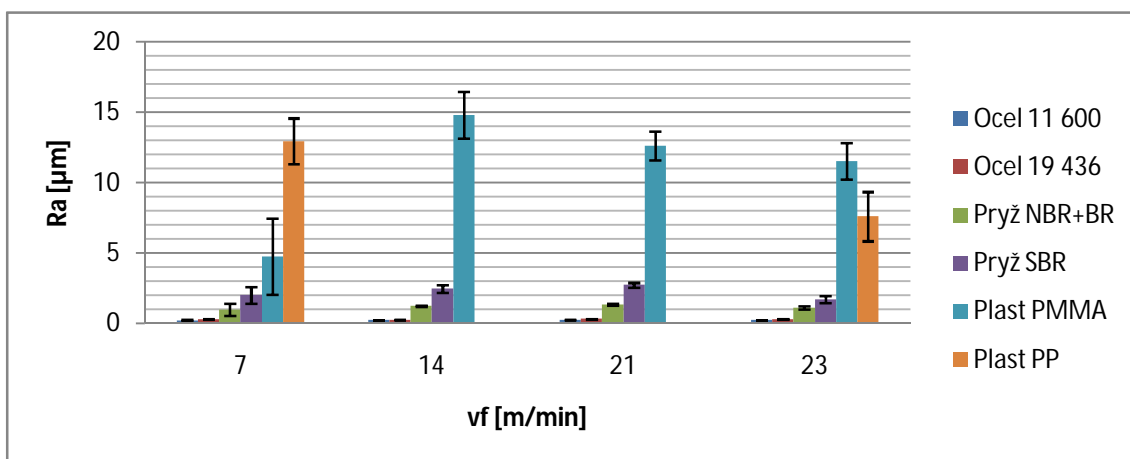
Obr.64 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,01$ mm na parametr drsnosti Ra kotouče 49C 60 K 9 V



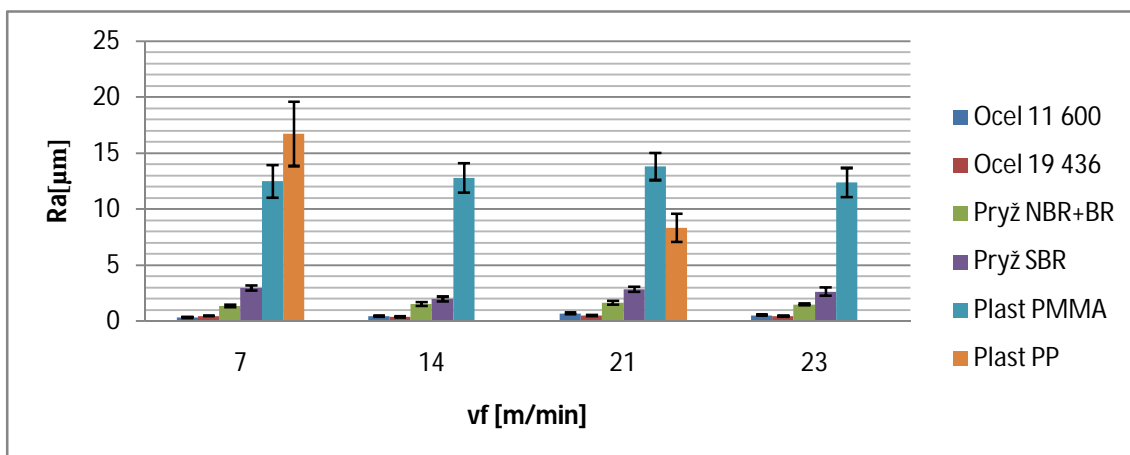
Obr.65 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,01$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 99BA 46 J 9 V



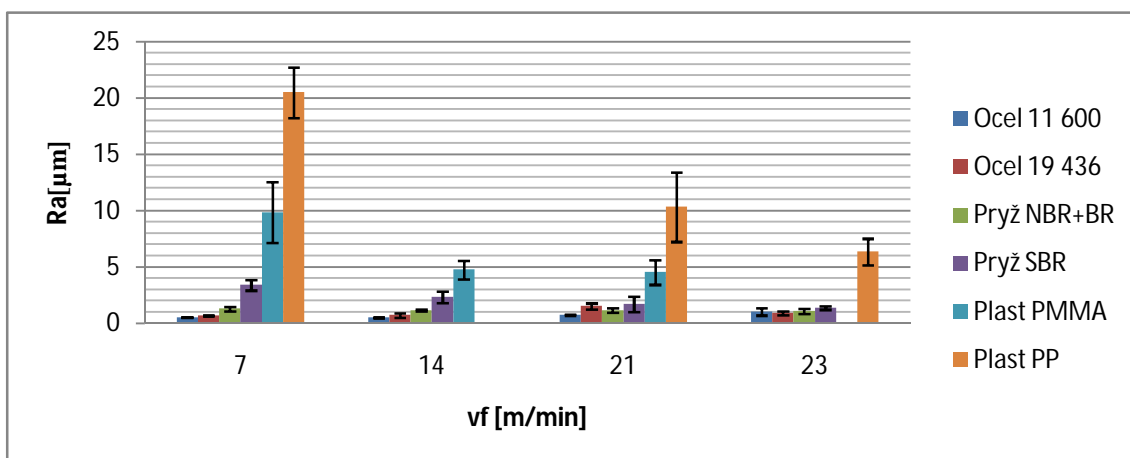
Obr.66 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,02$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 99A 60 J 12 V



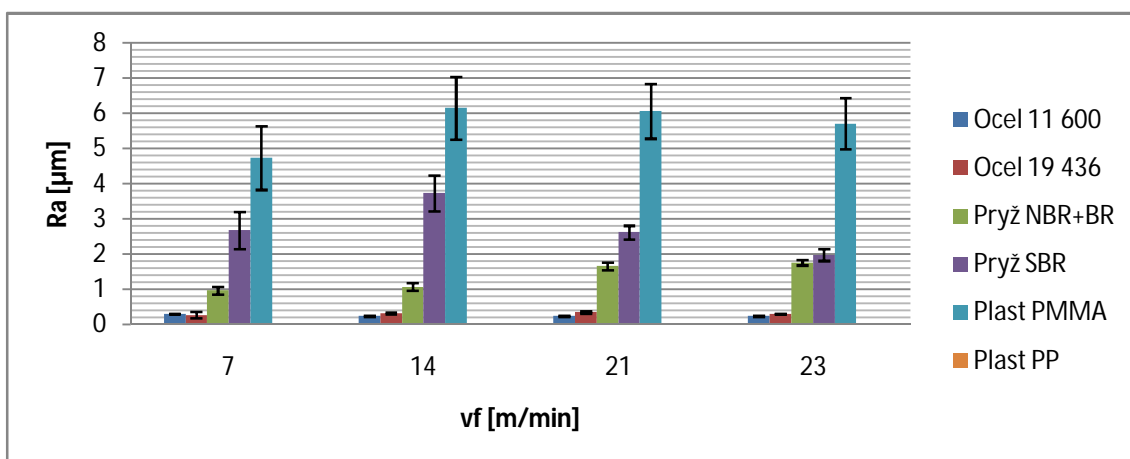
Obr.67 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,02$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 49C 60 K 9 V



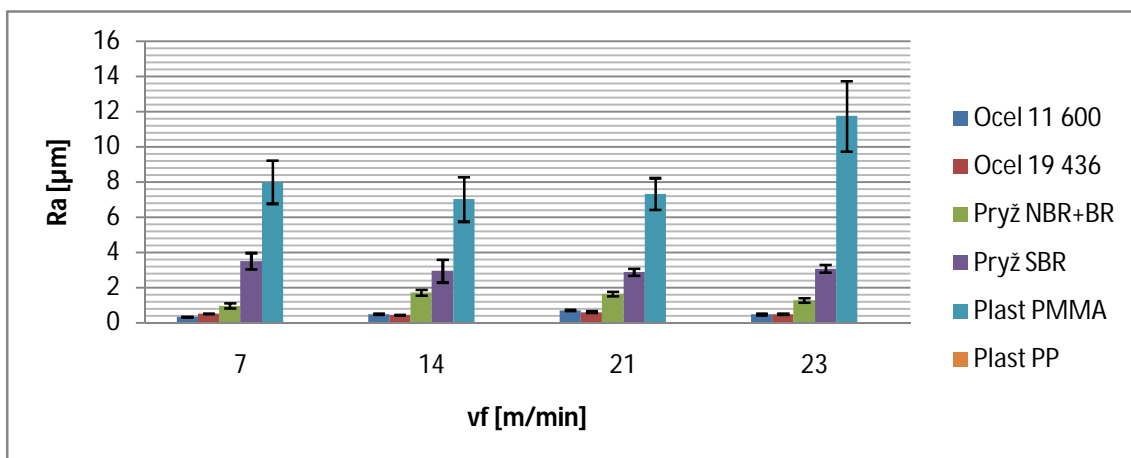
Obr.68 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,02$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 99BA 46 J 9 V



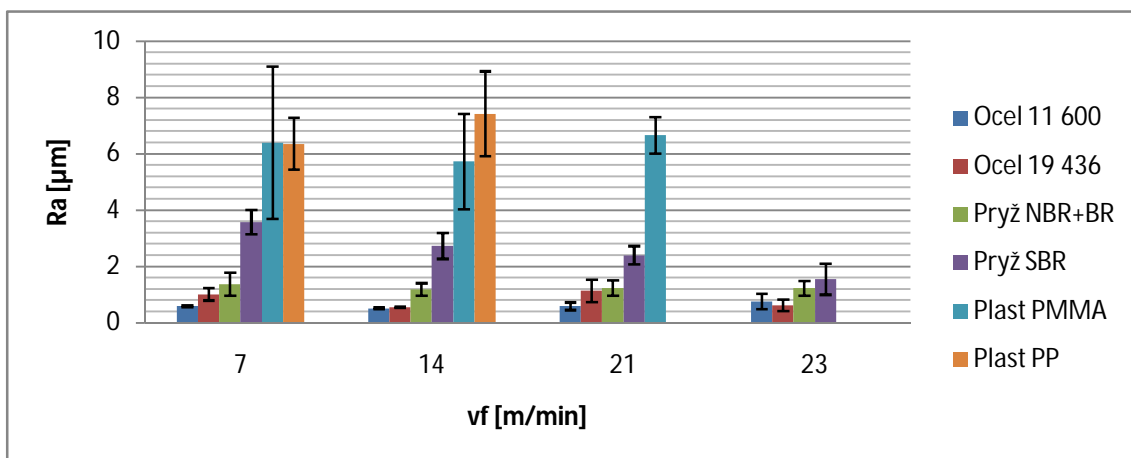
Obr.69 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 99A 60 J 12 V



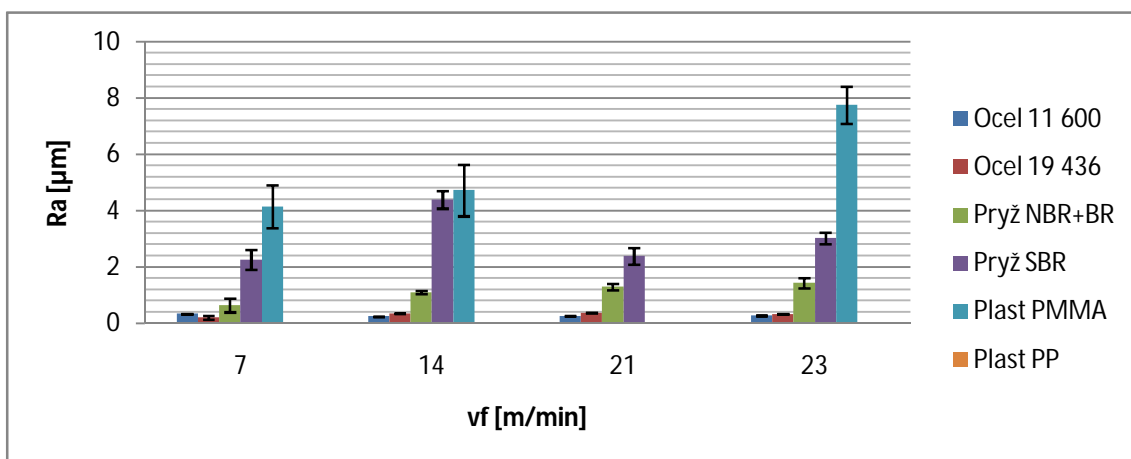
Obr.70 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 49C 60 K 9 V



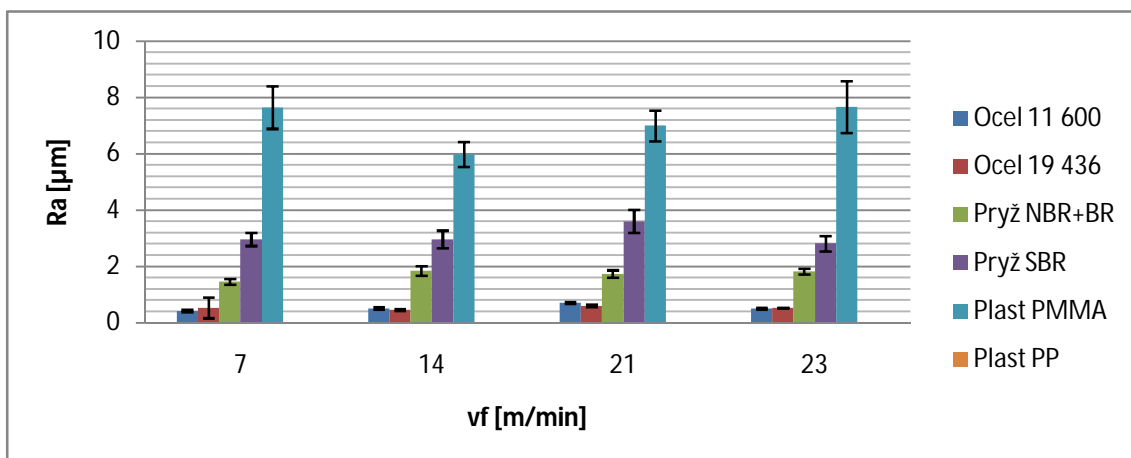
Obr.71 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm na parametr drsnosti Ra kotouče 99BA 46 J 9 V



Obr.72 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na parametr drsnosti Ra kotouče 99A 60 J 12 V

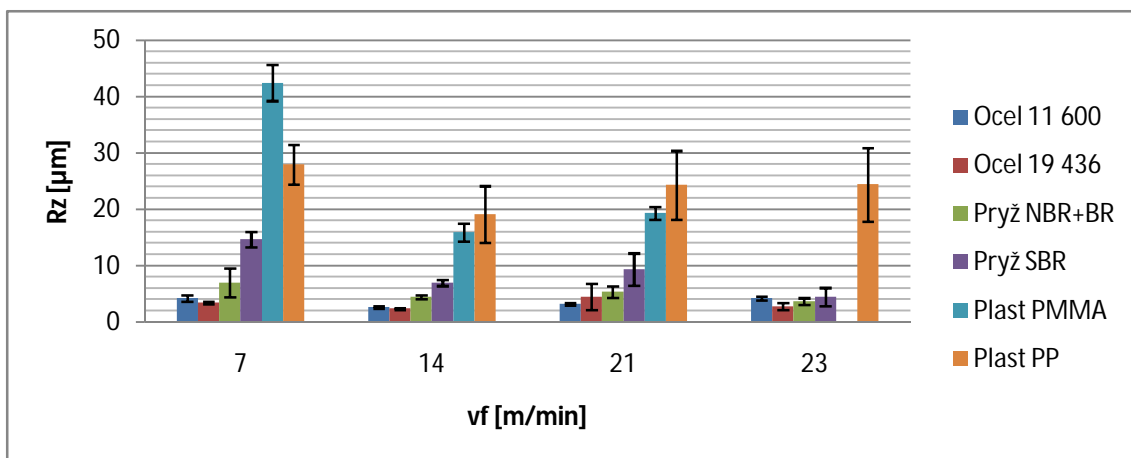


Obr.73 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na parametr drsnosti Ra kotouče 49C 60 K 9 V

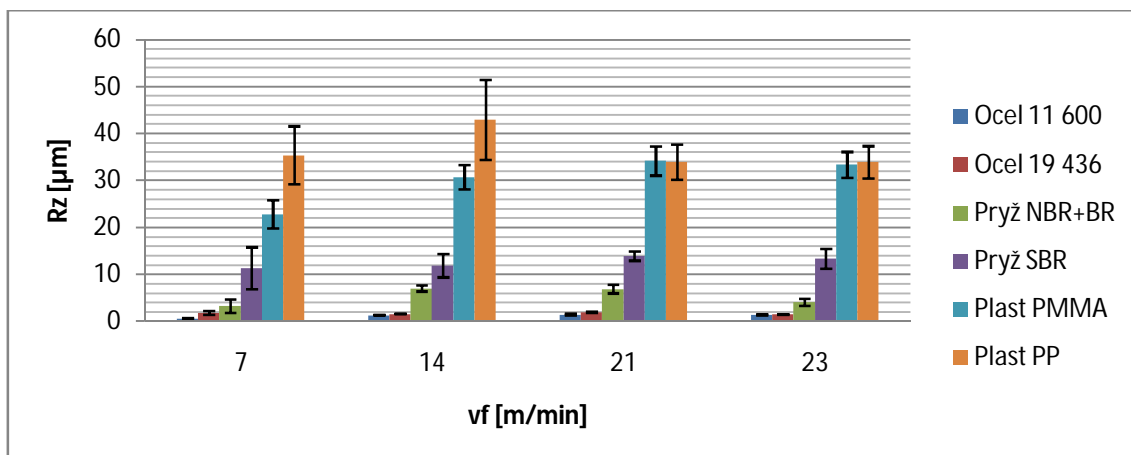


Obr.74 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 99BA 46 J 9 V

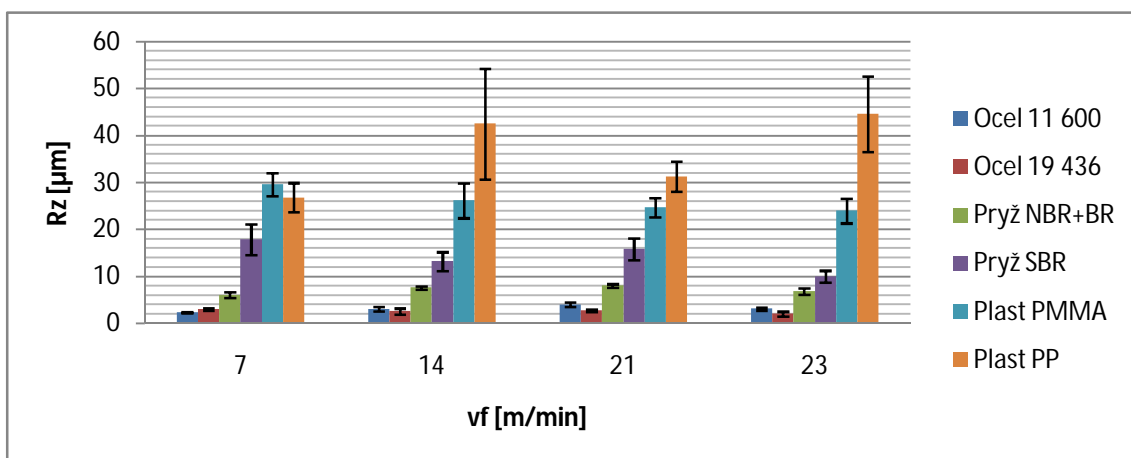
8.2 Největší výška profilu Rz broušeného povrchu



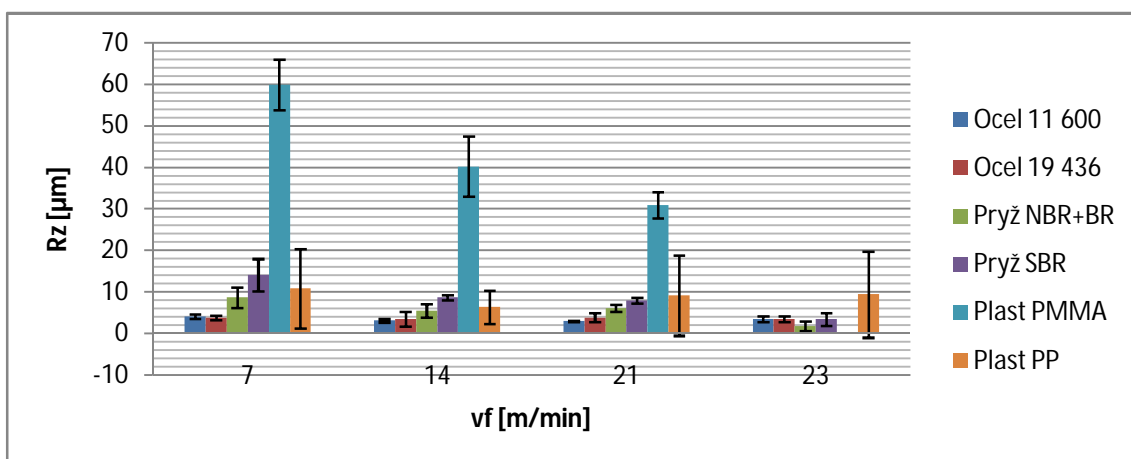
Obr.75 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,01$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 99A 60 J 12 V



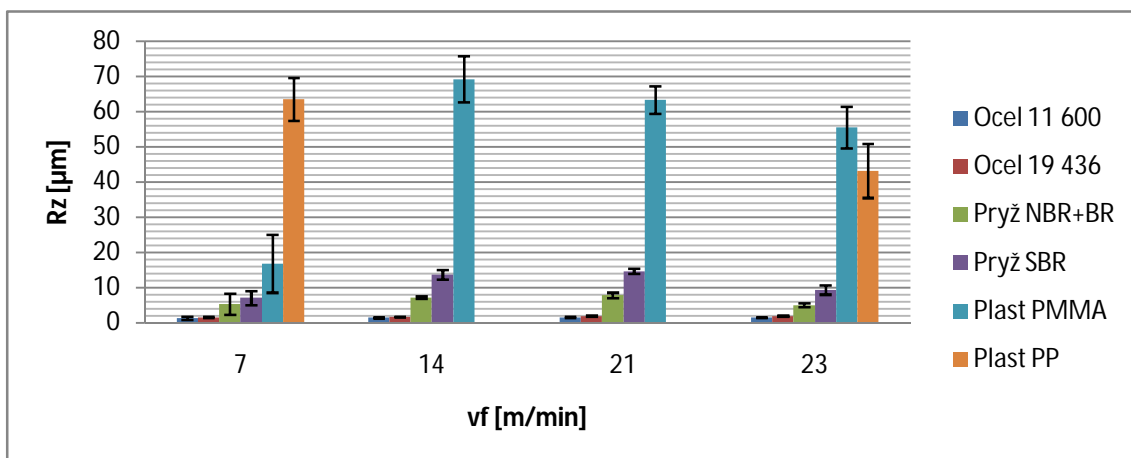
Obr.76 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,01$ mm na parametr drsnosti Rz kotouče 49C 60 K 9 V



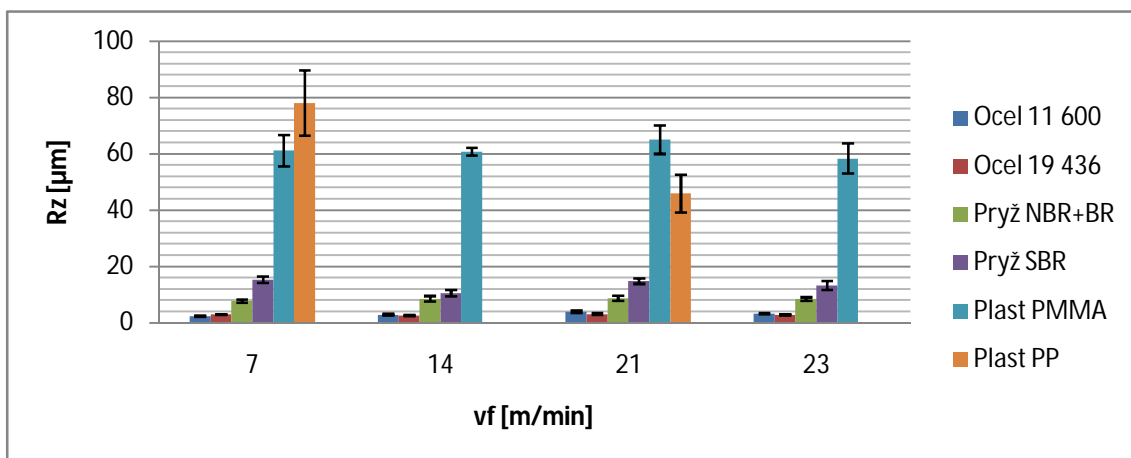
Obr.77 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,01$ mm na parametr drsnosti Rz kotouče 99BA 46 J 9 V



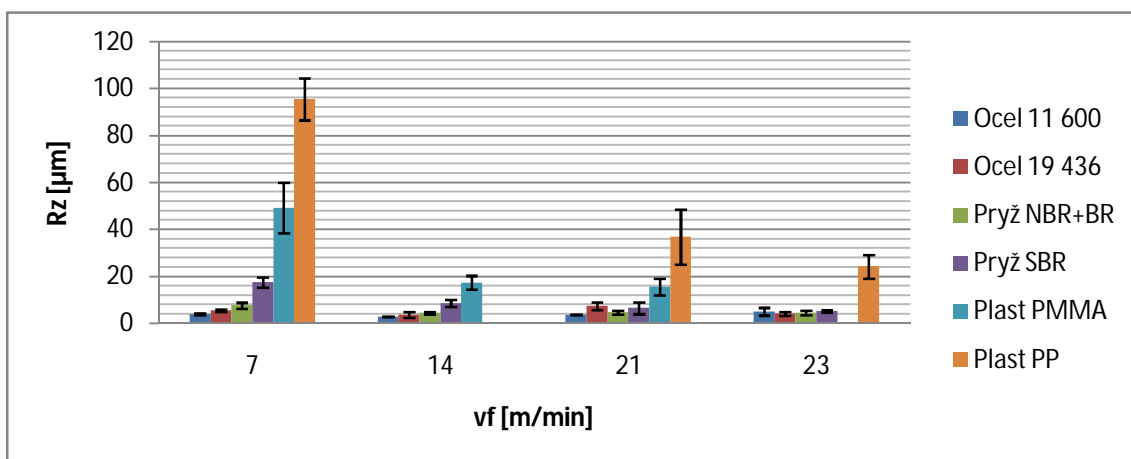
Obr.78 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,02$ mm na parametr drsnosti Rz kotouče 99A 60 J 12 V



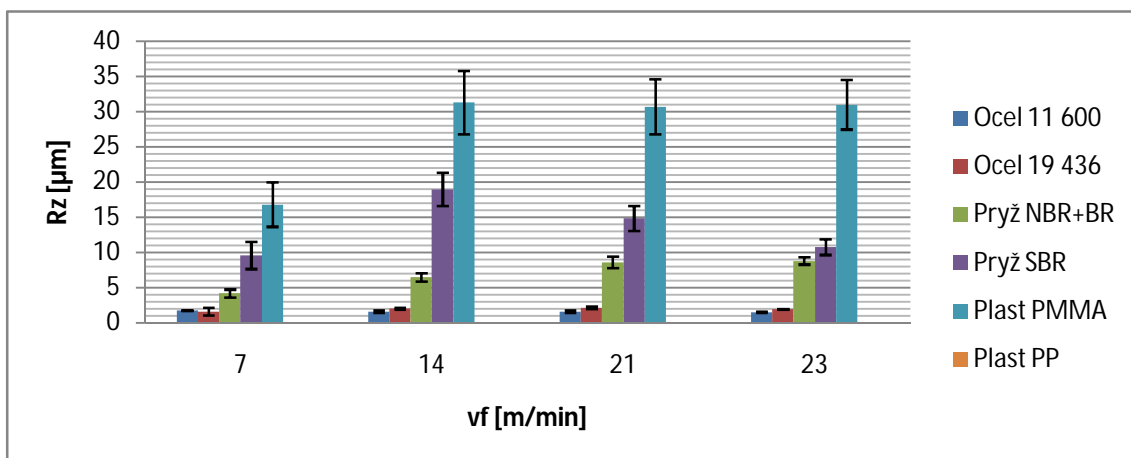
Obr.79 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,02$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 49C 60 K 9 V



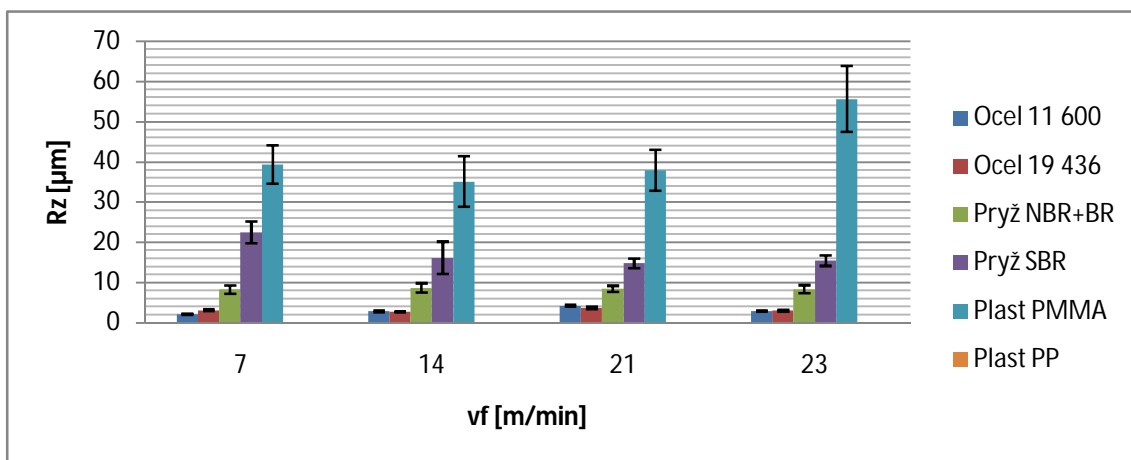
Obr.80 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,02$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 99BA 46 J 9 V



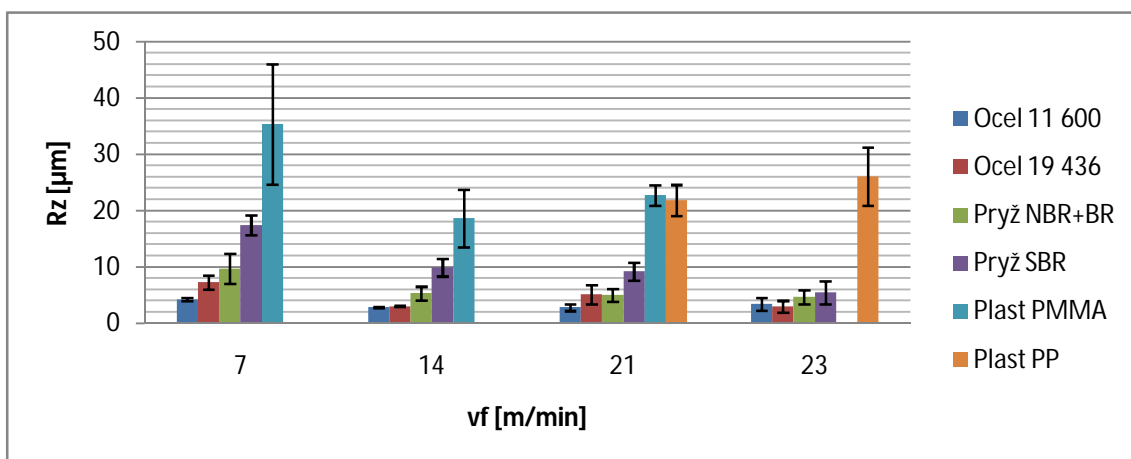
Obr.81 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 99A 60 J 12 V



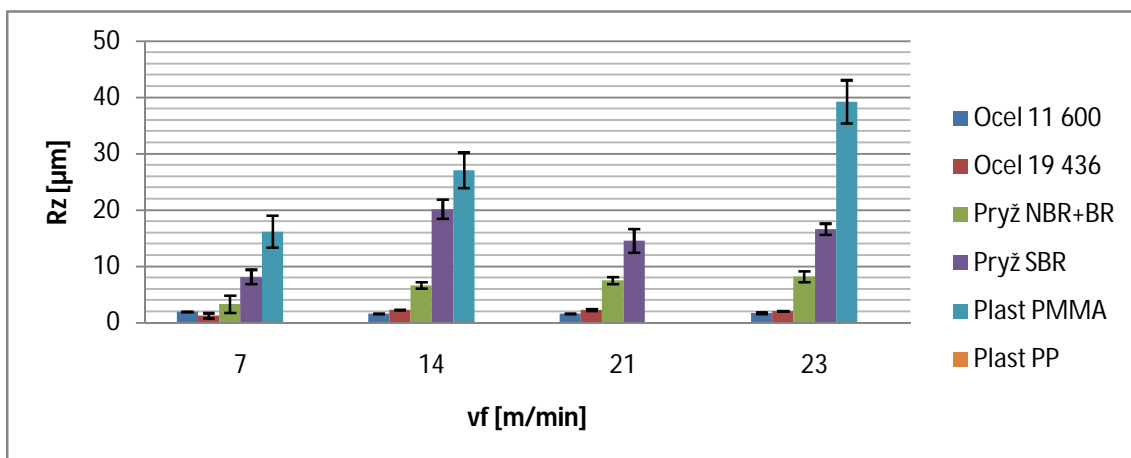
Obr.82 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 49C 60 K 9 V



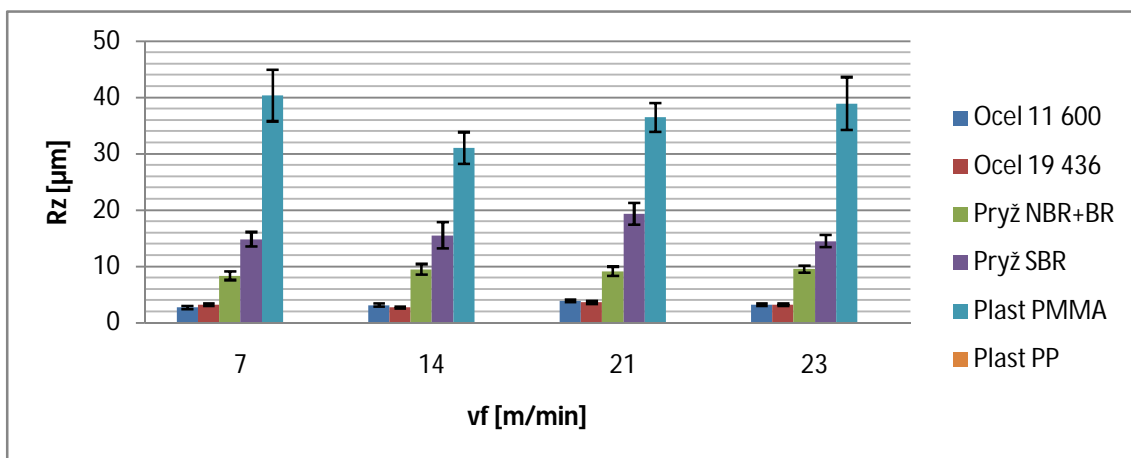
Obr.83 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 99BA 46 J 9 V



Obr.84 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 99A 60 J 12 V



Obr.85 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 49C 60 K 9 V

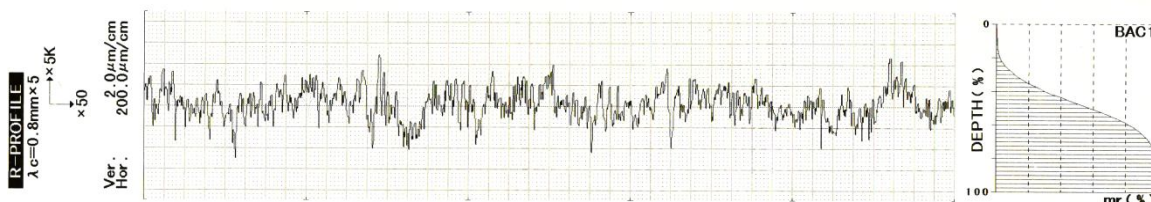


Obr.86 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 99BA 46 J 9 V

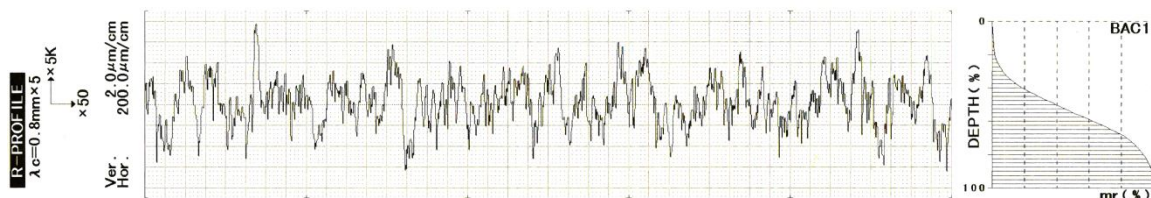
8.3 Záznamy drsností a nosných podílů z přístroje Mitutoyo SJ-301

Vytváření záznamů drsností a nosných podílů broušených povrchů vzorků přístrojem Mitutoyo SJ-301 bylo prováděno za stejných podmínek a to takových, že každá zaznamenaná broušená plocha byla ve stavu úběru materiálu $a_e = 0,04$ mm.

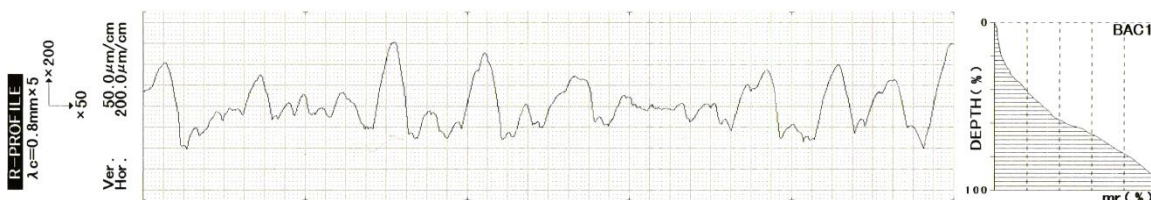
8.3.1 Kotouč č.1 99A 60 J 12 V



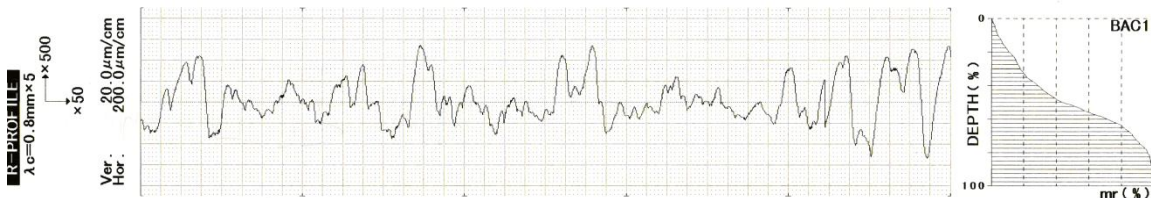
Obr.87 Záznam profilu oceli 11 600 při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min



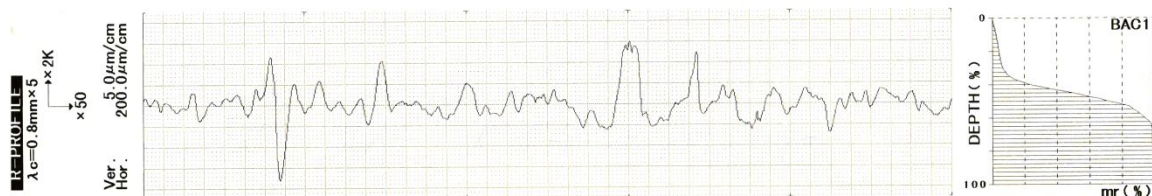
Obr.88 Záznam profilu oceli 11 600 při posuvové rychlosti $v_f = 23$ m/min



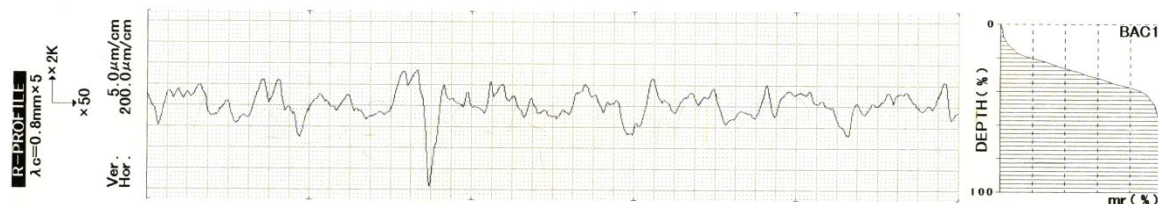
Obr.89 Záznam profilu polypropylenu PP při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min



Obr.90 Záznam profilu polypropylenu PP při posuvové rychlosti $v_f = 23$ m/min

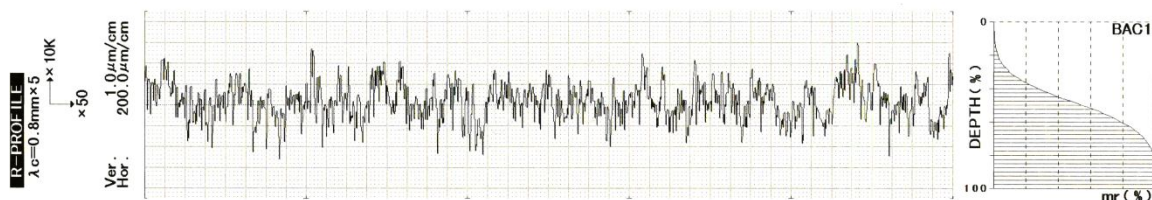


Obr.91 Záznam profilu pryže NBR+BR při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min

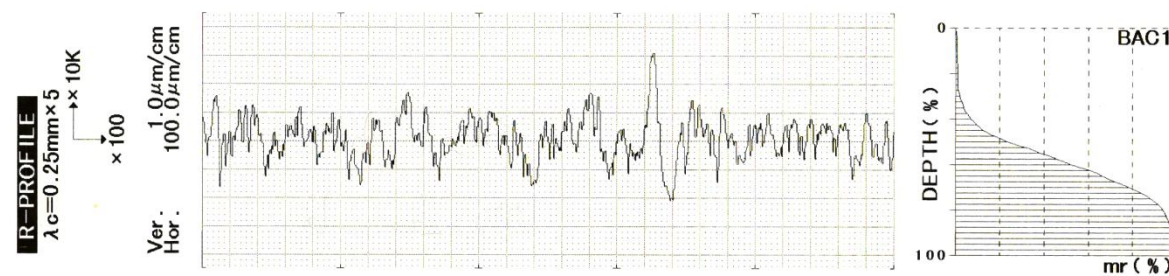


Obr.92 Záznam profilu pryže NBR+BR při posuvové rychlosti $v_f = 23$ m/min

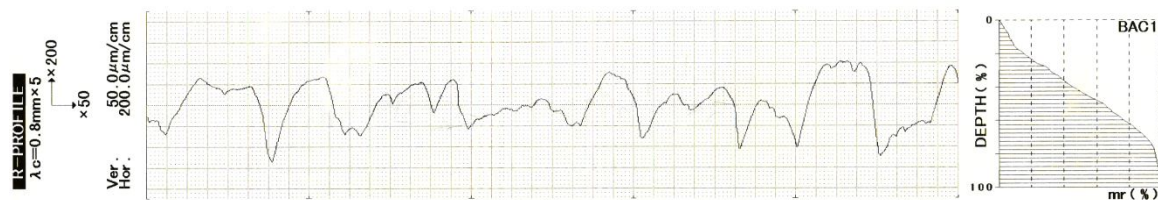
8.3.2 Kotouč č.2 49C 60 K 9 V



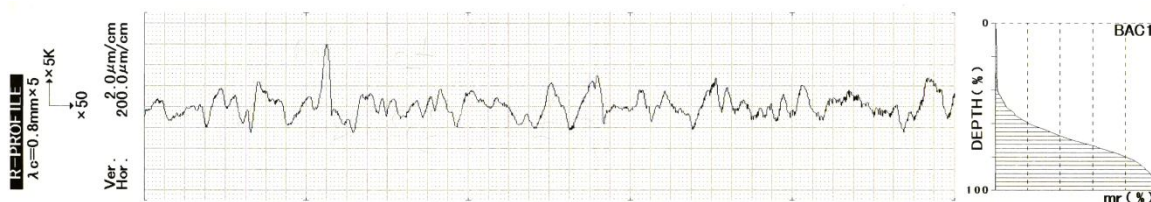
Obr.93 Záznam profilu oceli 11 600 při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min



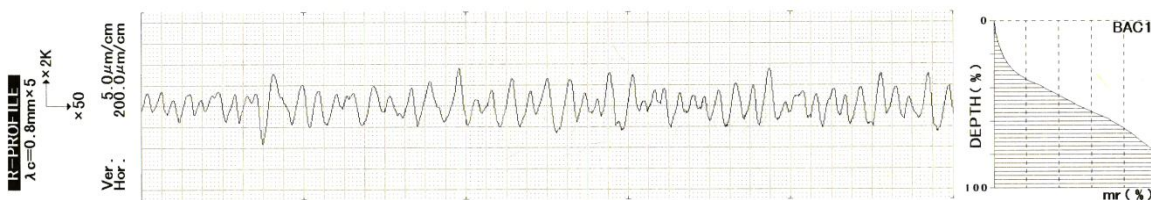
Obr.94 Záznam profilu oceli 11 600 při posuvové rychlosti $v_f = 23$ m/min



Obr.95 Záznam profilu polypropylenu PP při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min

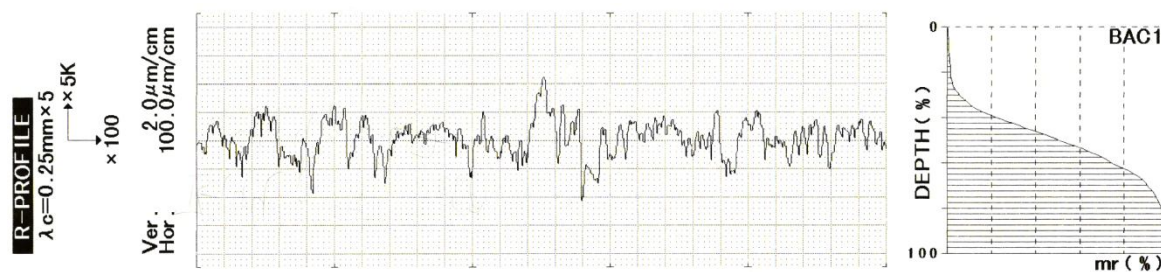


Obr.96 Záznam profilu pryže NBR+BR při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min

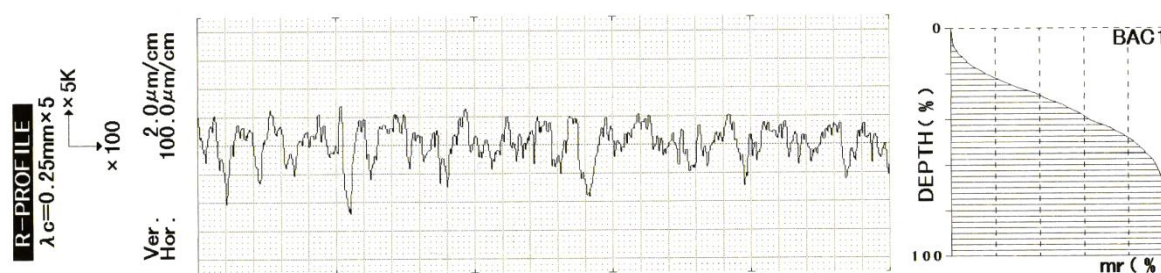


Obr.97 Záznam profilu pryže NBR+BR při posuvové rychlosti $v_f = 23$ m/min

8.3.3 Kotouč č.3 99BA 46 J 9 V



Obr.98 Záznam profilu oceli 11 600 při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min

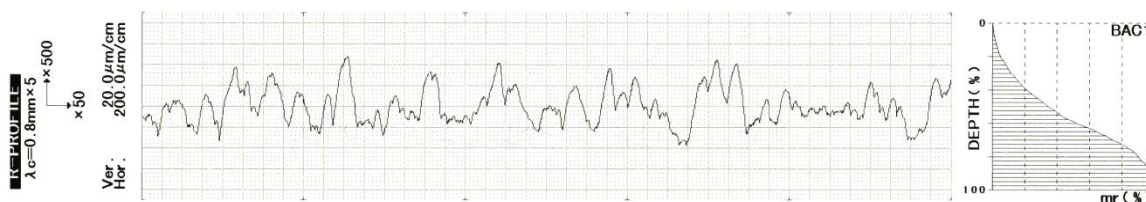


Obr.99 Záznam profilu oceli 11 600 při posuvové rychlosti $v_f = 23$ m/min



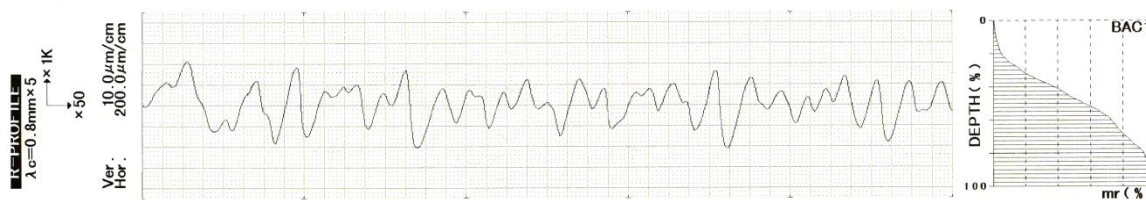
Obr.100 Záznam profilu polymethylmethakrylátu PMMA při posuvové rychlosti

$$v_f = 7 \text{ m/min}$$

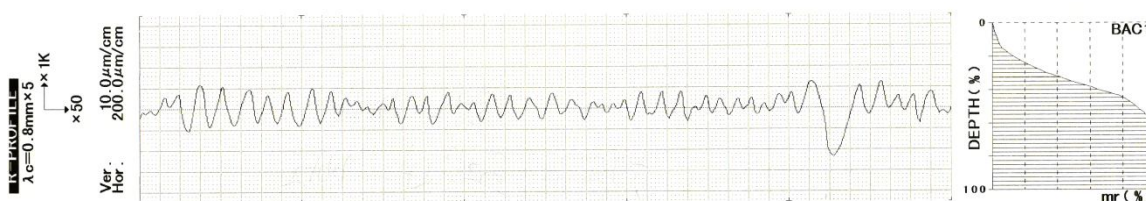


Obr.101 Záznam profilu polymethylmethakrylátu PMMA při posuvové rychlosti

$$v_f = 21 \text{ m/min}$$

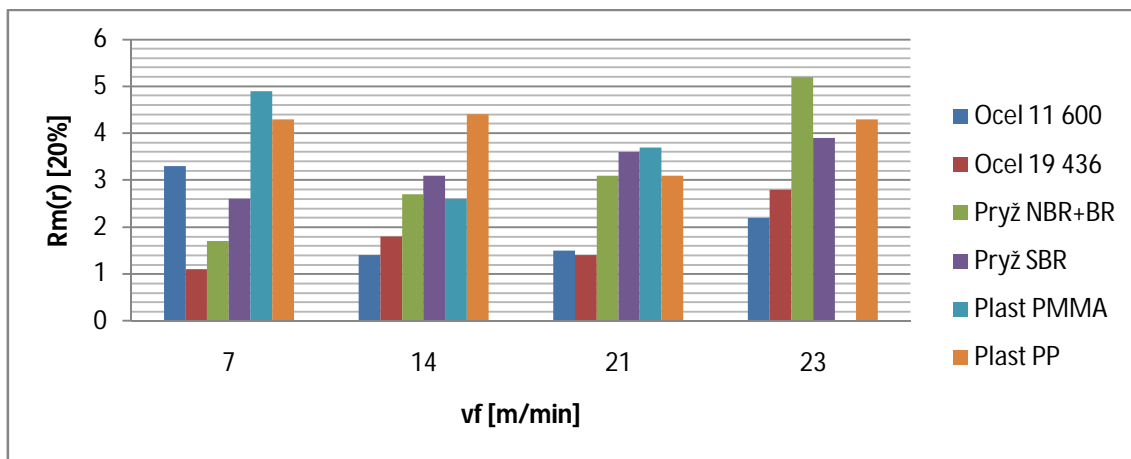


Obr.102 Záznam profilu pryže NBR+BR při posuvové rychlosti $v_f = 7 \text{ m/min}$

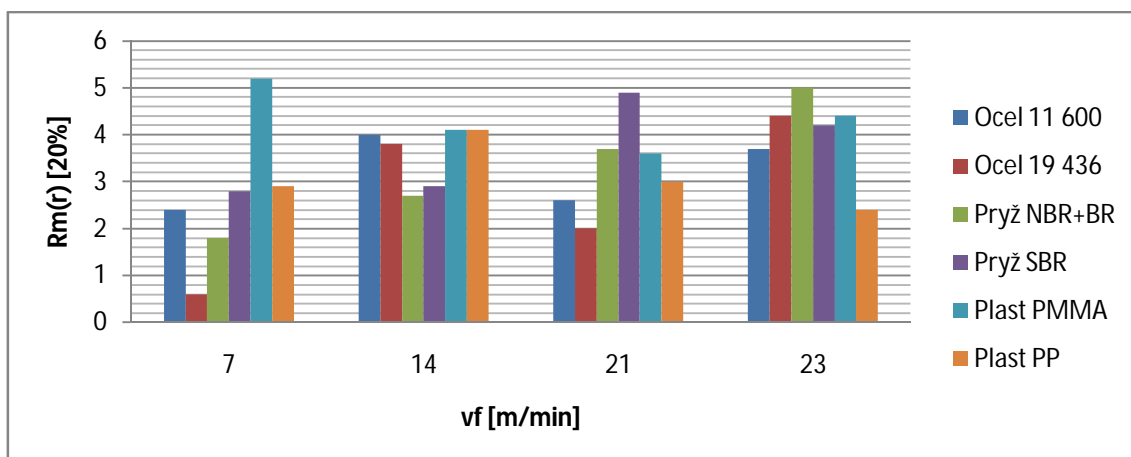


Obr.103 Záznam profilu pryže NBR+BR při posuvové rychlosti $v_f = 23 \text{ m/min}$

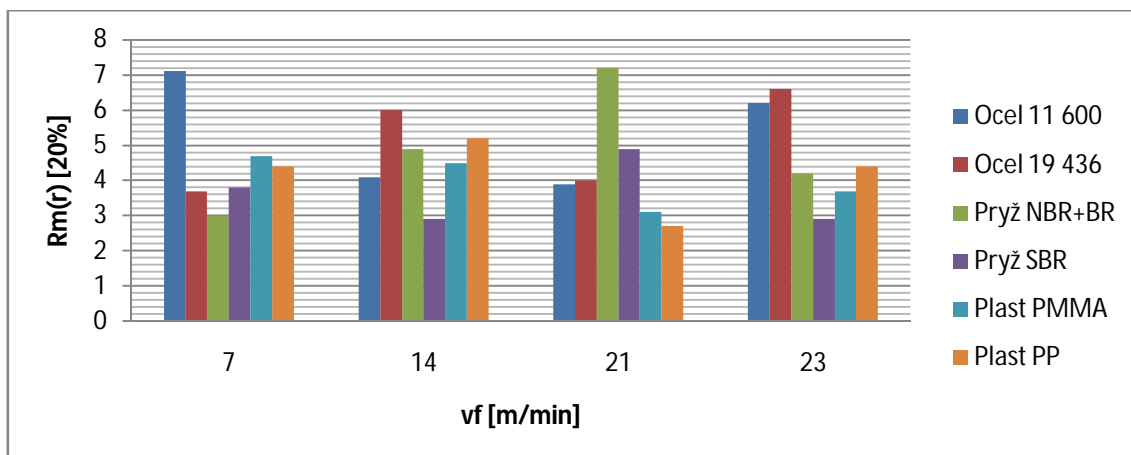
8.4 Materiálový podíl Rm(r) broušeného povrchu



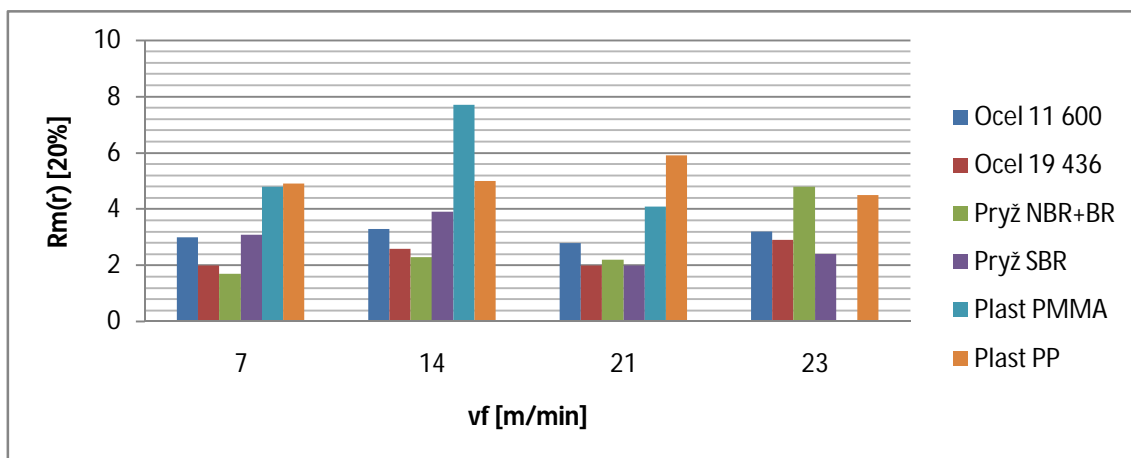
Obr.104 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,01$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 99A 60 J 12 V



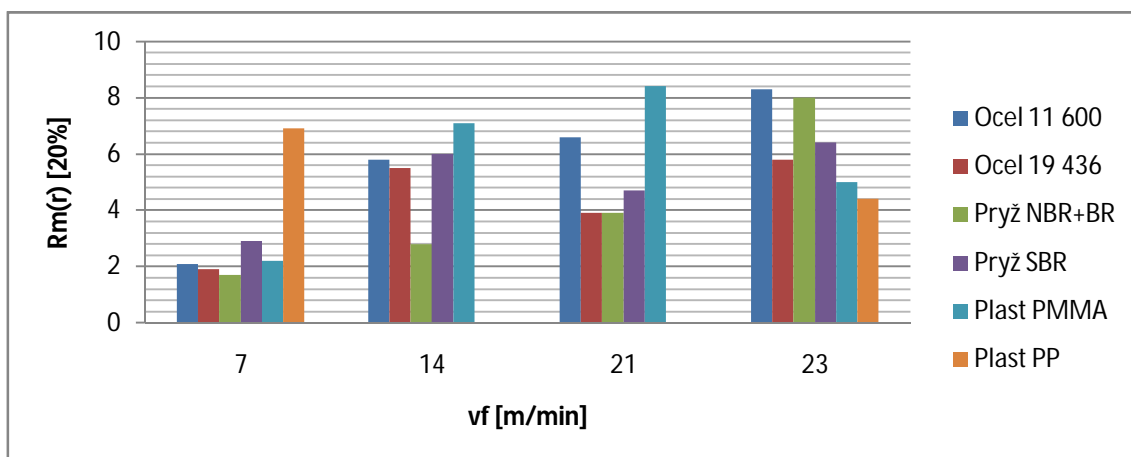
Obr.105 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,01$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 49C 60 K 9 V



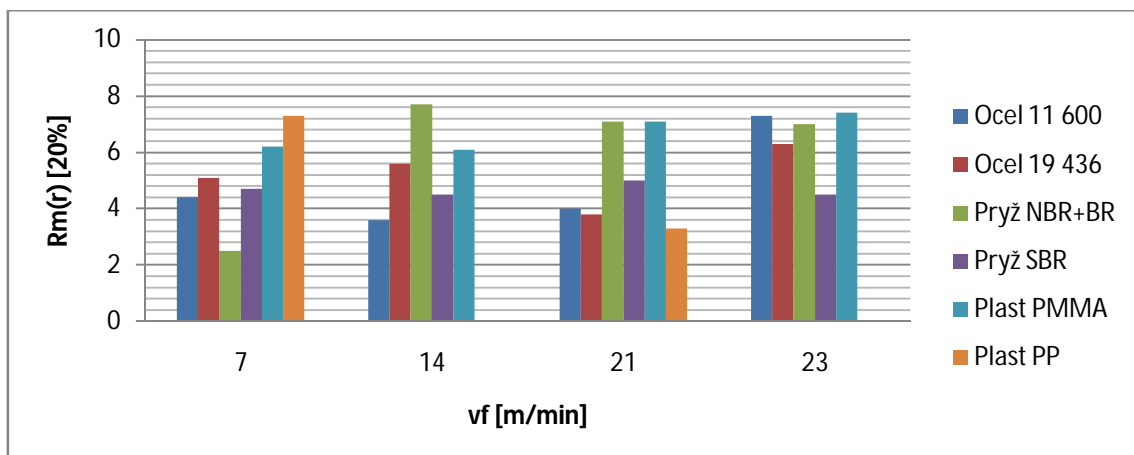
Obr.106 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,01$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 99BA 46 J 9 V



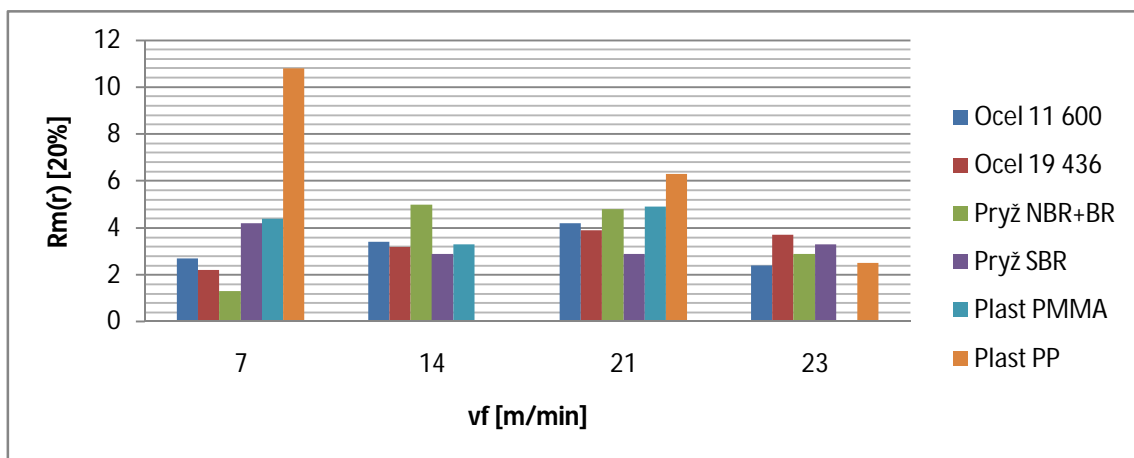
Obr.107 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,02$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 99A 60 J 12 V



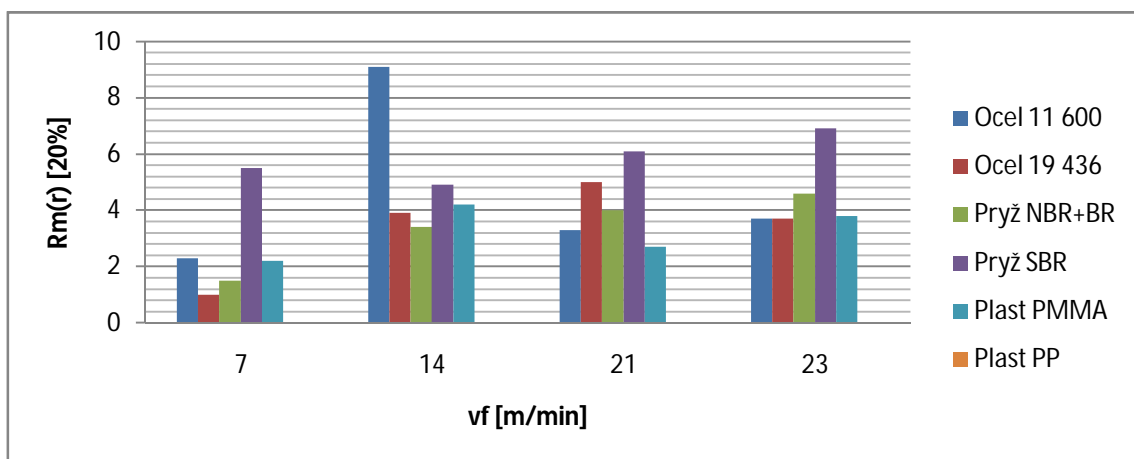
Obr.108 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,02$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 49C 60 K 9 V



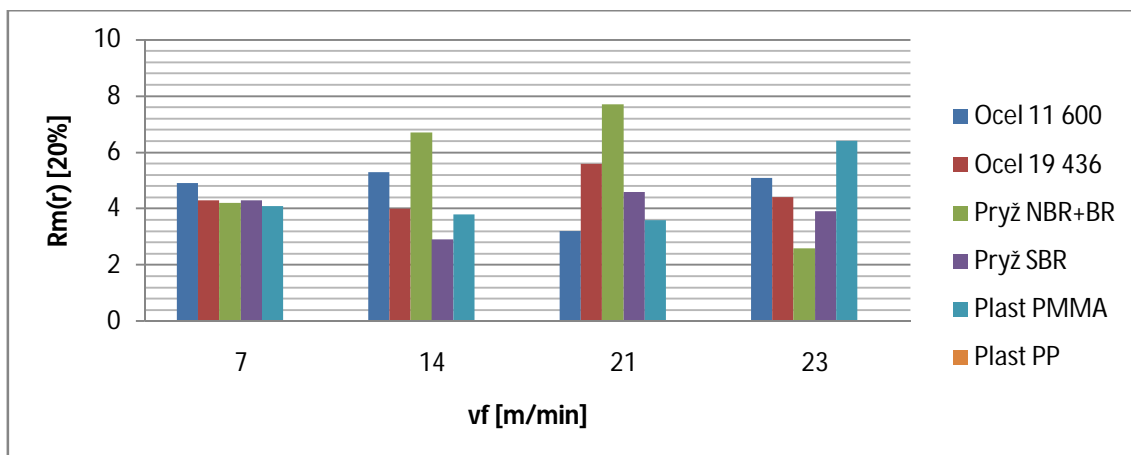
Obr.109 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,02$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 99BA 46 J 9 V



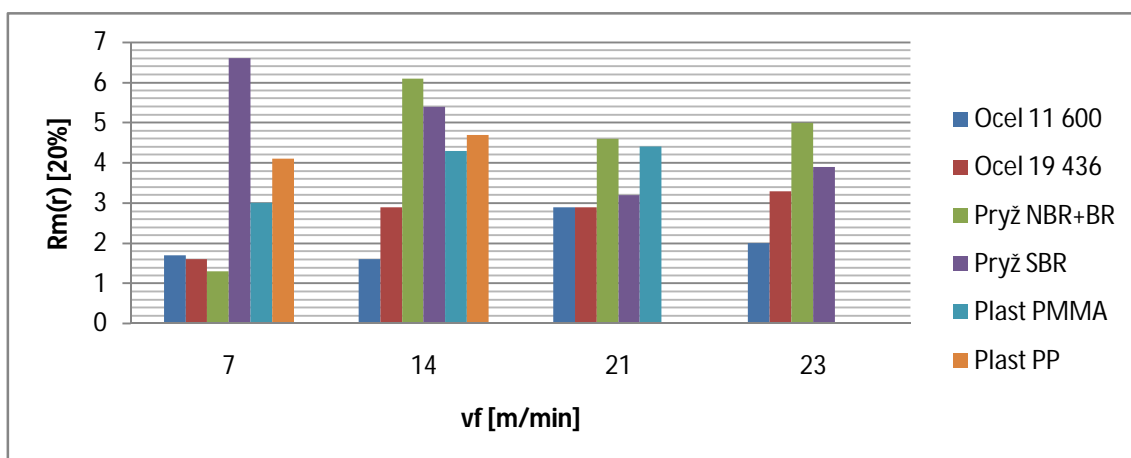
Obr.110 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 99A 60 J 12 V



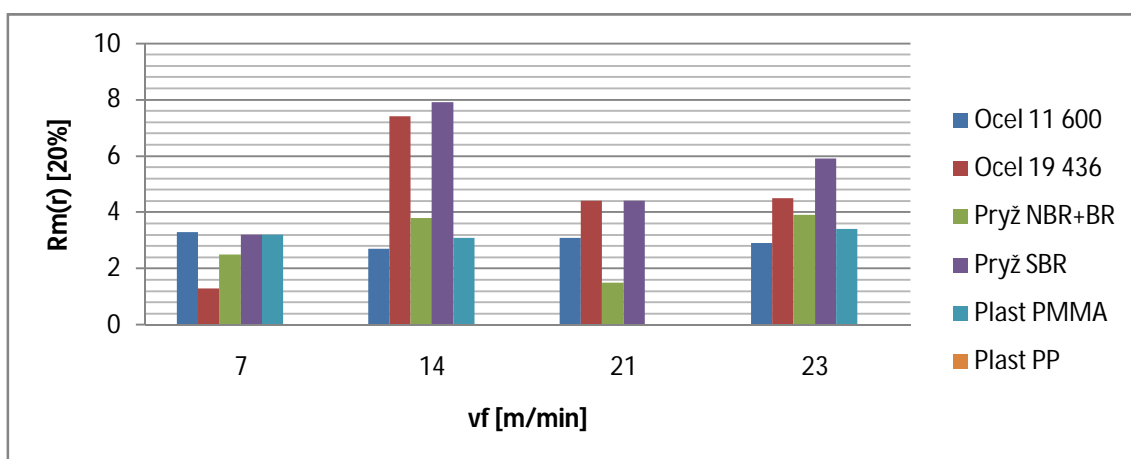
Obr.111 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 49C 60 K 9 V



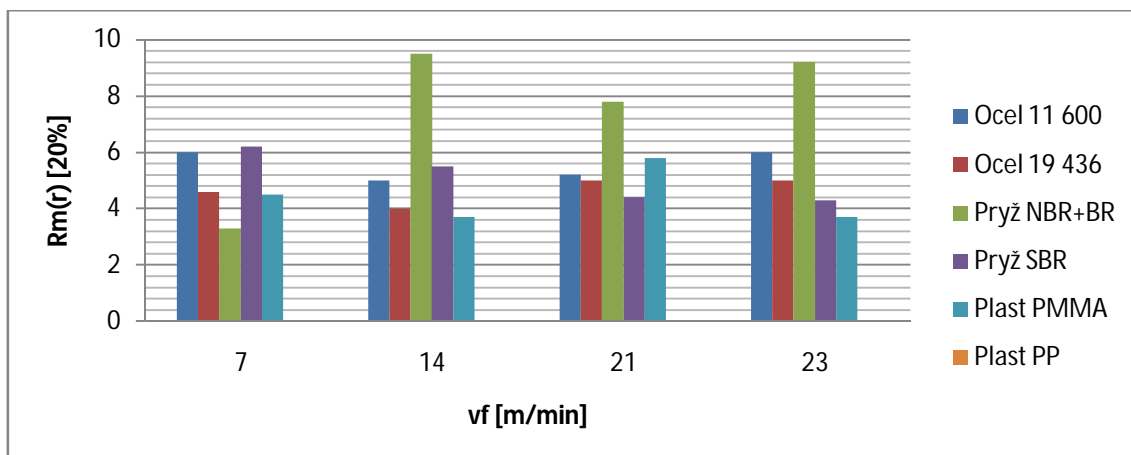
Obr.112 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 99BA 46 J 9 V



Obr.113 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 99A 60 J 12 V



Obr.114 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 49C 60 K 9 V

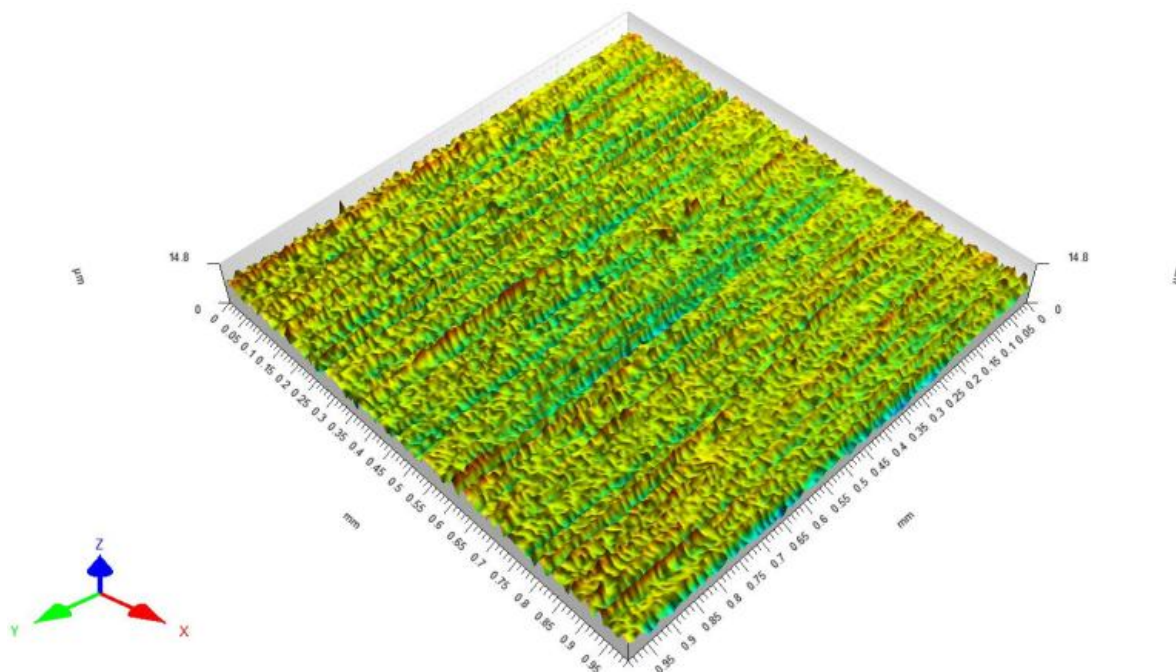


Obr.115 Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 99BA 46 J 9 V

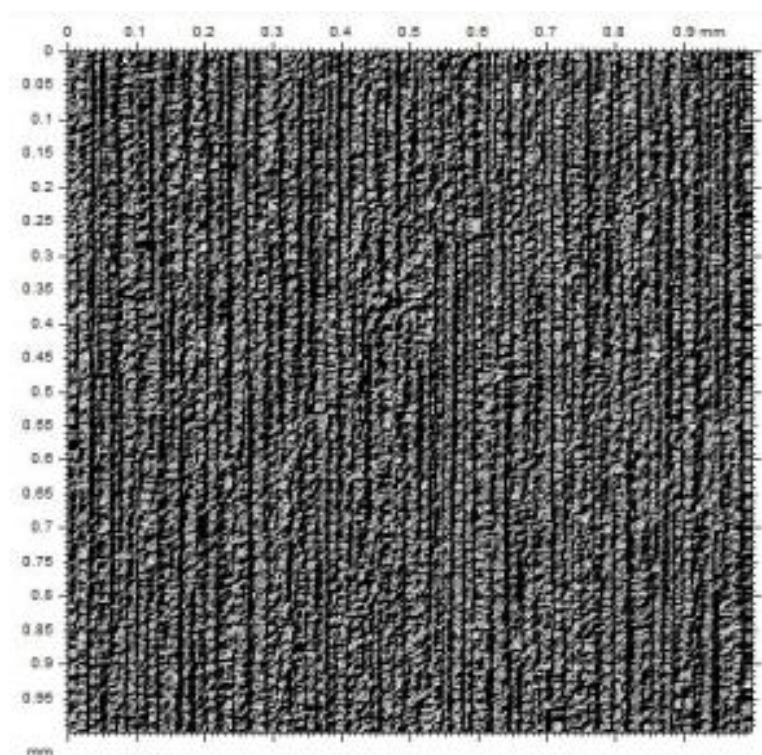
8.5 3D zobrazení struktur broušených ploch zkoušených materiálů

Vytváření 3D struktur broušených povrchů vzorků přístrojem Talysurf CLI 500 bylo prováděno za stejných podmínek a to takových, že u ocelí a pryže každá zaznamenaná broušená plocha byla ve stavu úběru materiálu $a_e = 0,04$ mm a posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min. U plastů byla zase každá zaznamenaná broušená plocha ve stavu úběru materiálu $a_e = 0,01$ mm a posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min. Dále pak velikost vyšetřované plochy činila 1 x 1 mm. Broušená plocha pryže SBR nebyla možná naskenovat, z důvodu velice nízké odrazivosti laserového paprsku (pod 50%).

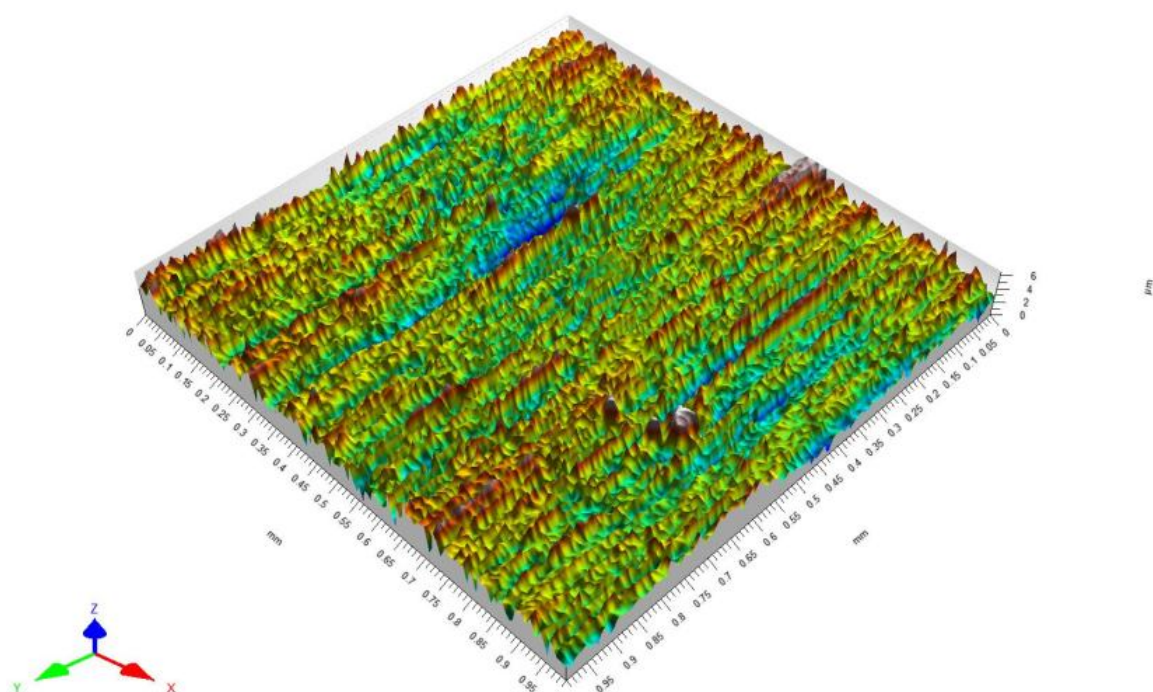
8.5.1 Kotouč č.1 99A 60 J 12 V



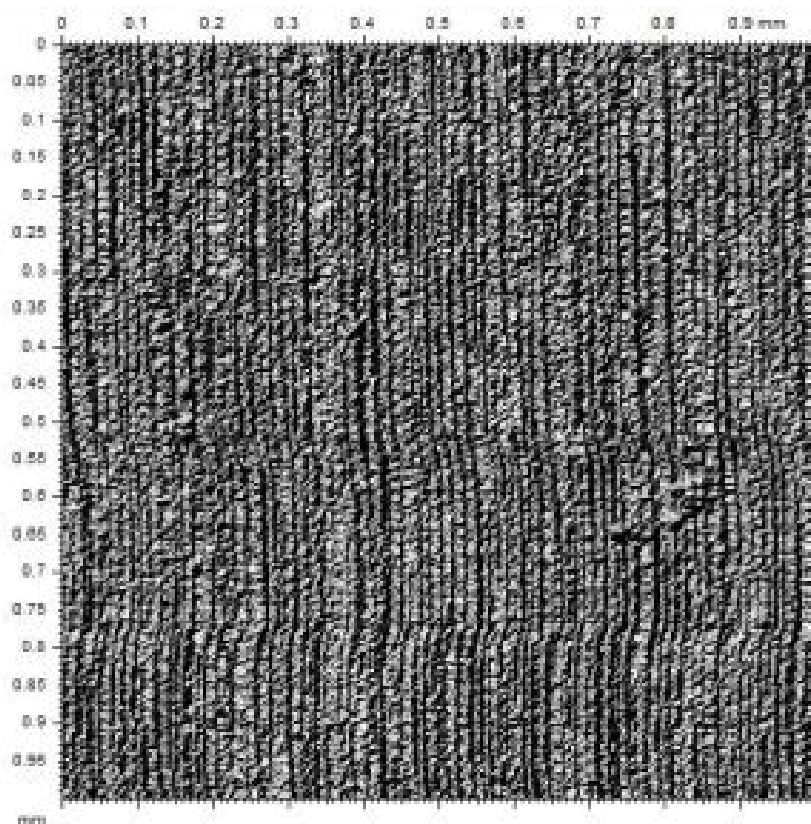
Obr.116 3D zobrazení broušeného povrchu oceli 11 600



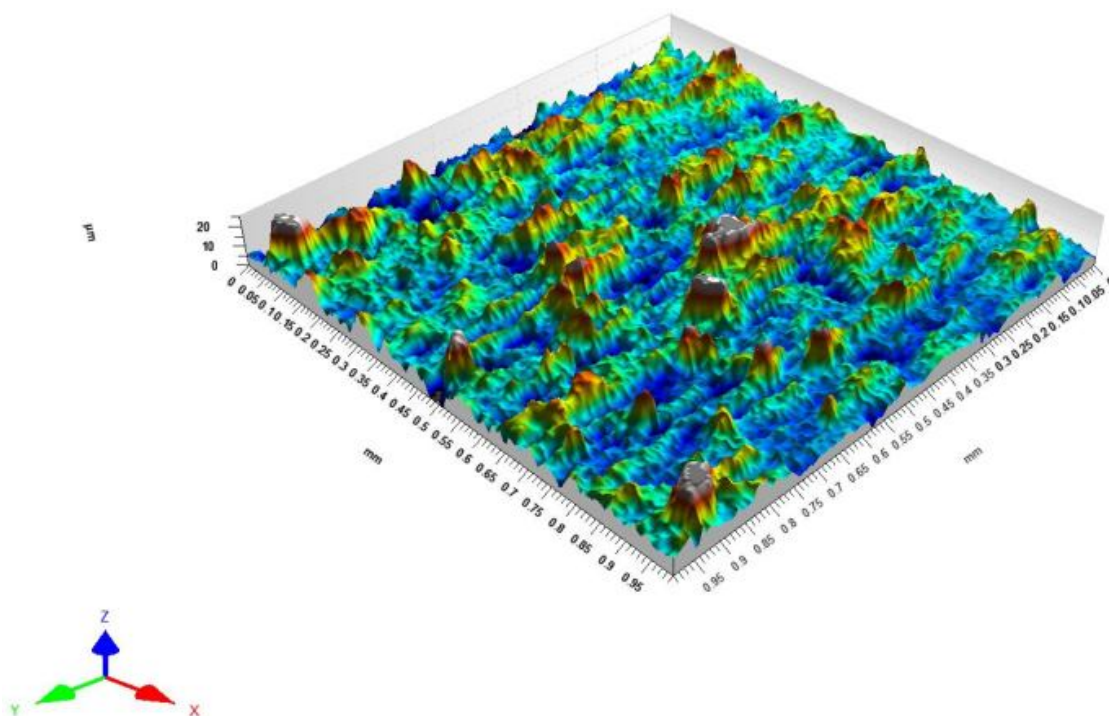
Obr.117 2D zobrazení broušeného povrchu oceli 11 600



Obr.118 3D zobrazení broušeného povrchu oceli 19 436

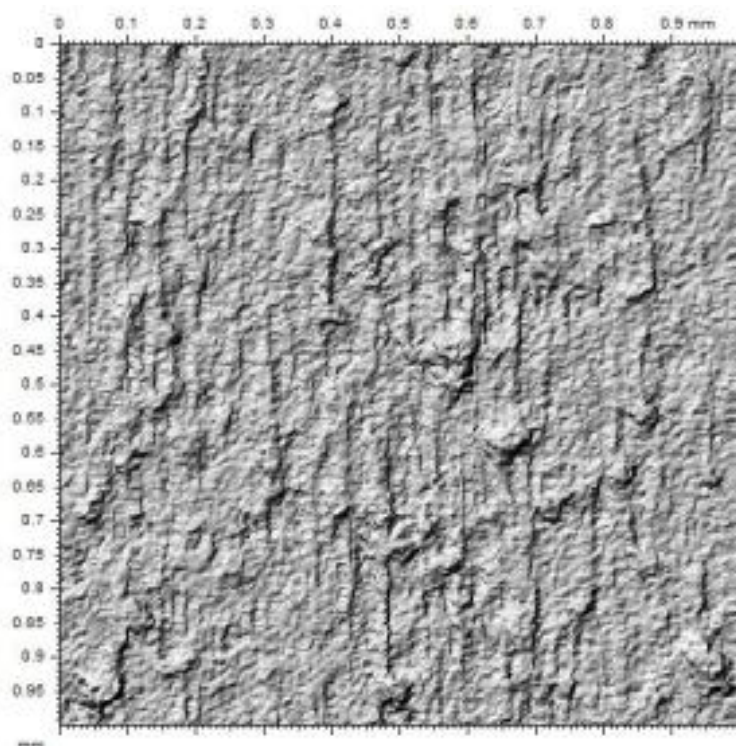


Obr.119 2D zobrazení broušeného povrchu oceli 19 436

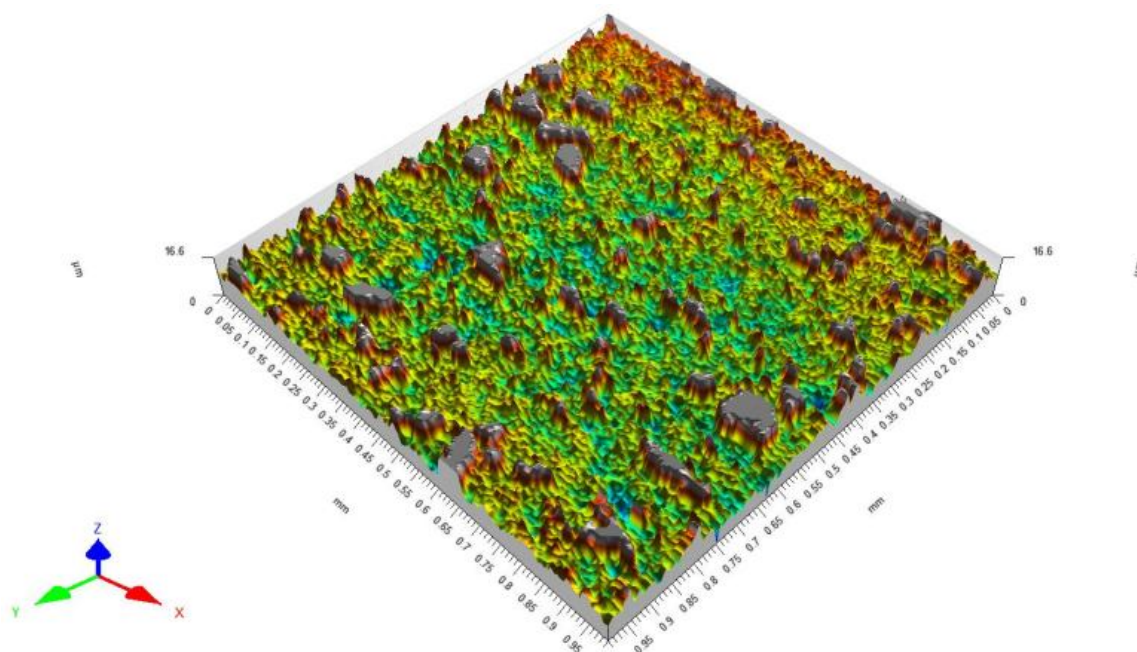


Obr.120 3D zobrazení broušeného povrchu plastu PP

Na obr.120 bylo provedeno uřezání vrcholků nerovností broušeného povrchu PP z důvodů chybného nasnímání zapříčiněné špatnou odrazivostí paprsku.

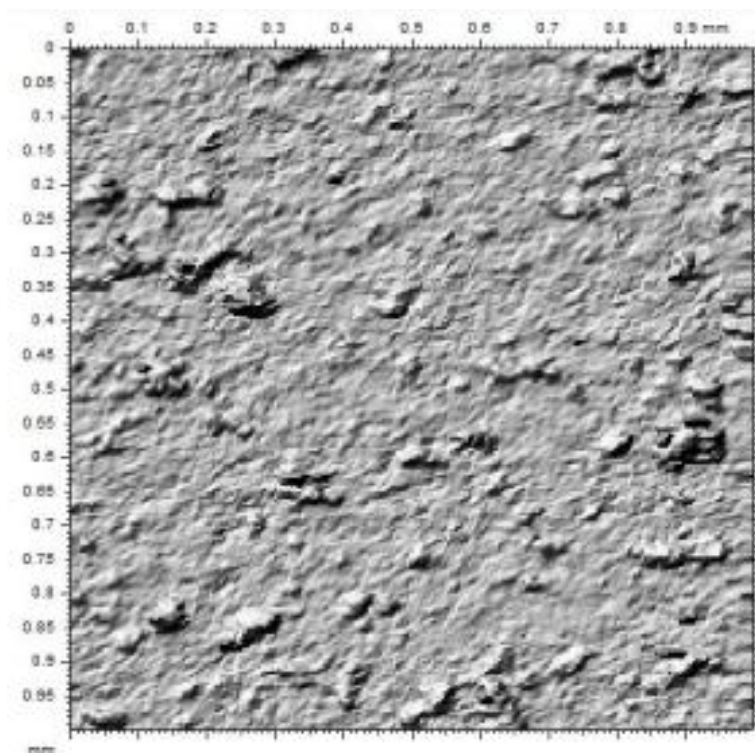


Obr.121 2D zobrazení broušeného povrchu plastu PP

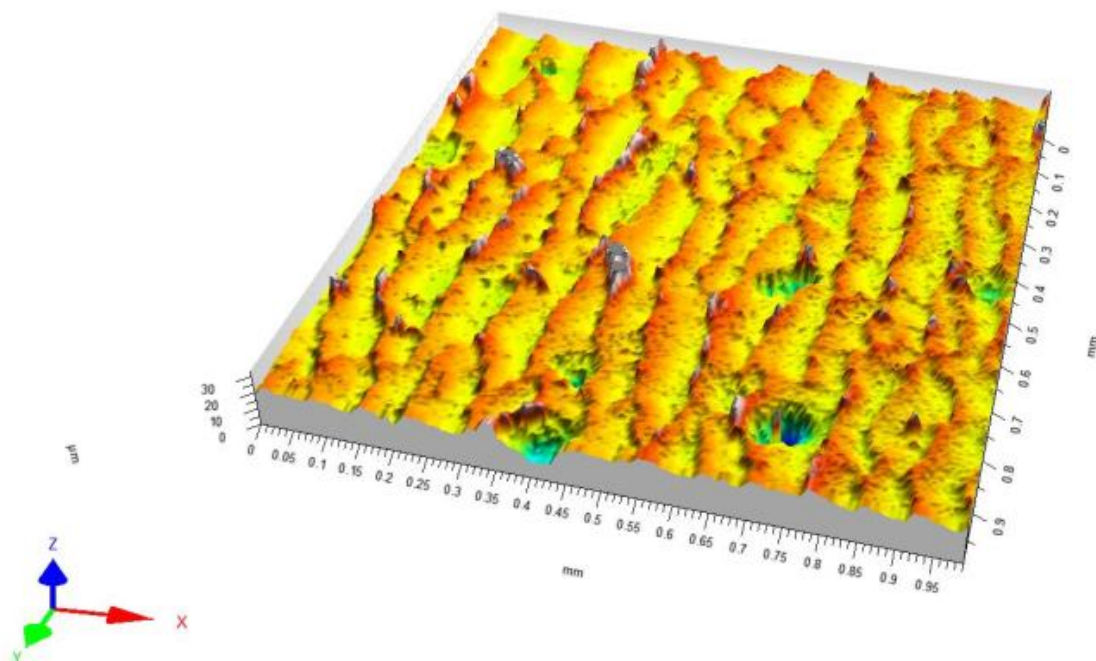


Obr.122 3D zobrazení broušeného povrchu plastu PMMA

Na obr.122 bylo provedeno uřezání vrcholků nerovností broušeného povrchu PMMA z důvodů chybného nasnímání zapříčiněné špatnou odrazivostí paprsku nebo dosud normované parametry textury ještě nepočítají s proměnnou velikostí snímacího bodu paprsku.

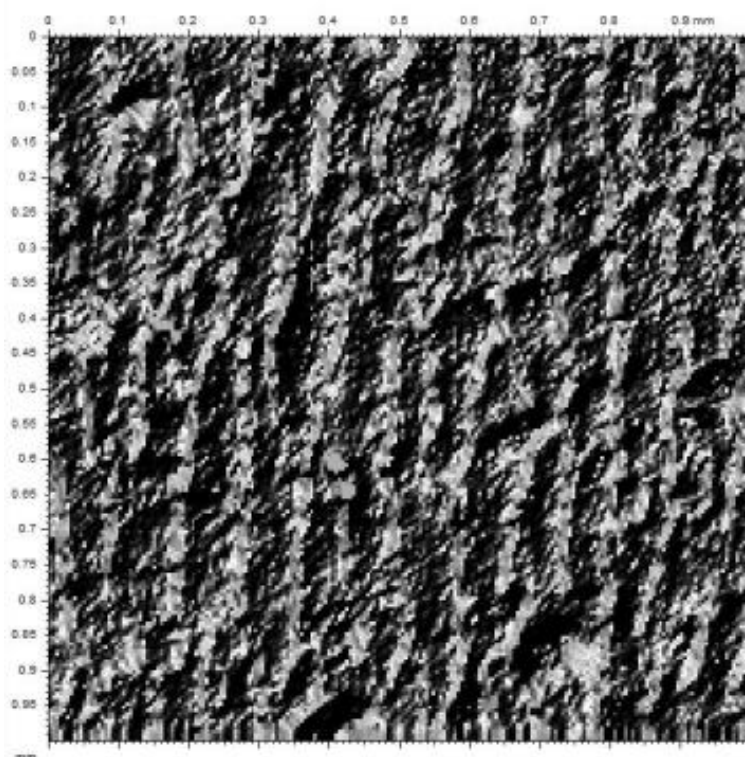


Obr.123 2D zobrazení broušeného povrchu plastu PMMA



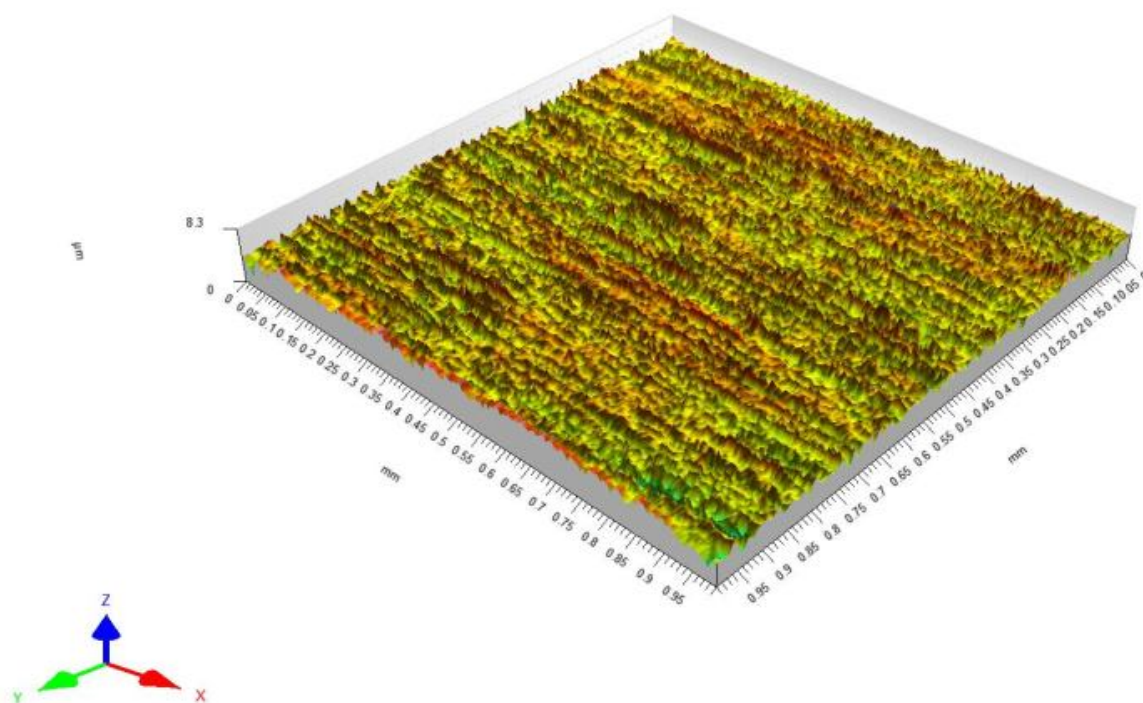
Obr.124 3D zobrazení broušeného povrchu pryže NBR+BR

Na obr.124 můžeme vidět prohlubně, které jsou způsobené vniknutím a následným ulomením brousícího zrna z brousícího kotouče.

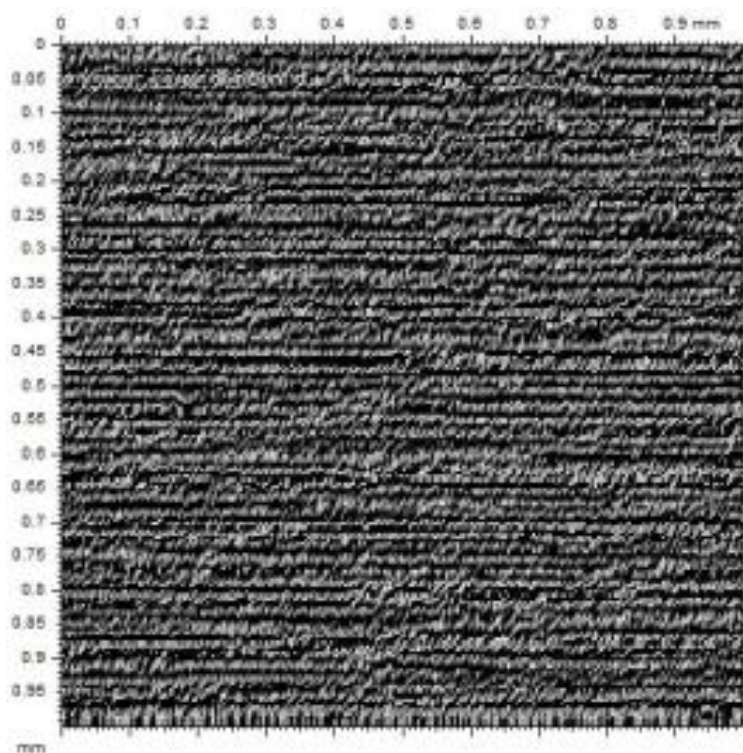


Obr.125 2D zobrazení broušeného povrchu pryže NBR+BR

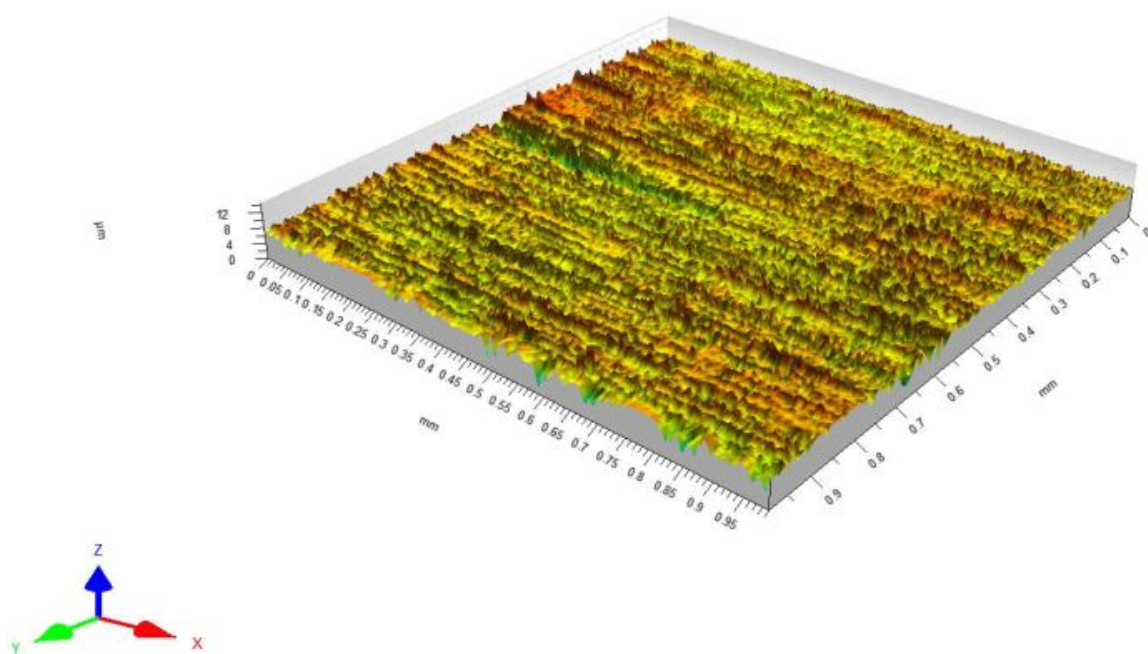
8.5.2 Kotouč č.2 49C 60 K 9 V



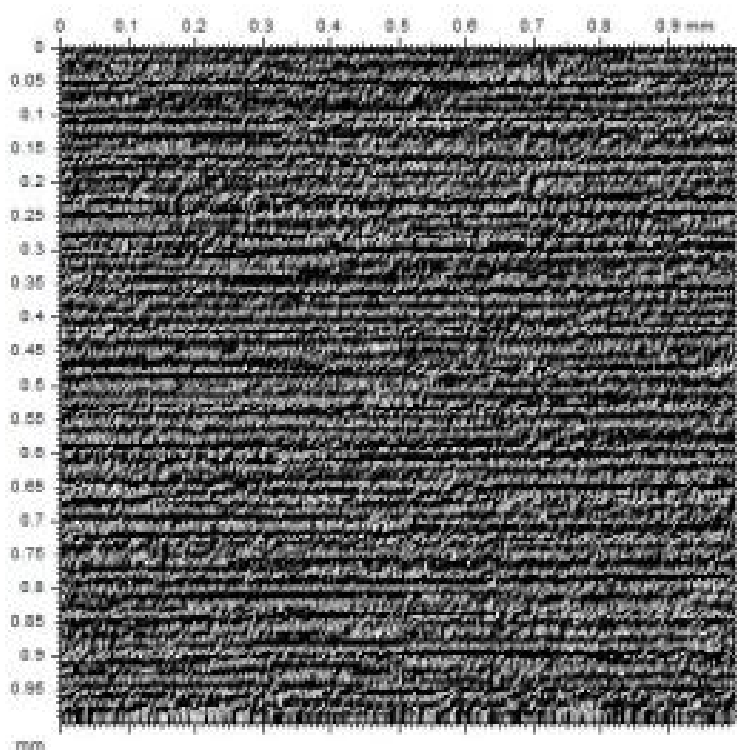
Obr.126 3D zobrazení broušeného povrchu oceli 11 600



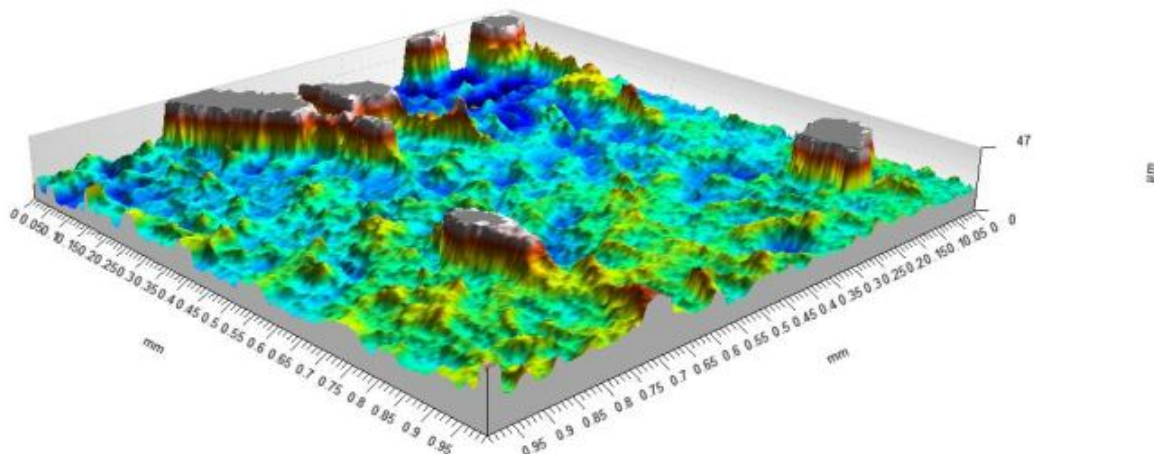
Obr.127 2D zobrazení broušeného povrchu oceli 11 600



Obr.128 3D zobrazení broušeného povrchu oceli 19 436

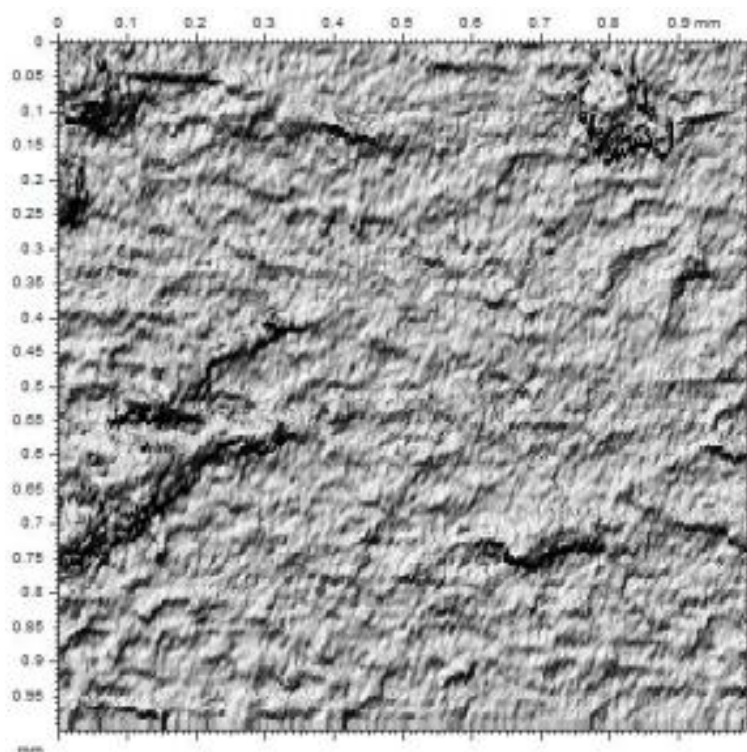


Obr.129 2D zobrazení broušeného povrchu oceli 19 436

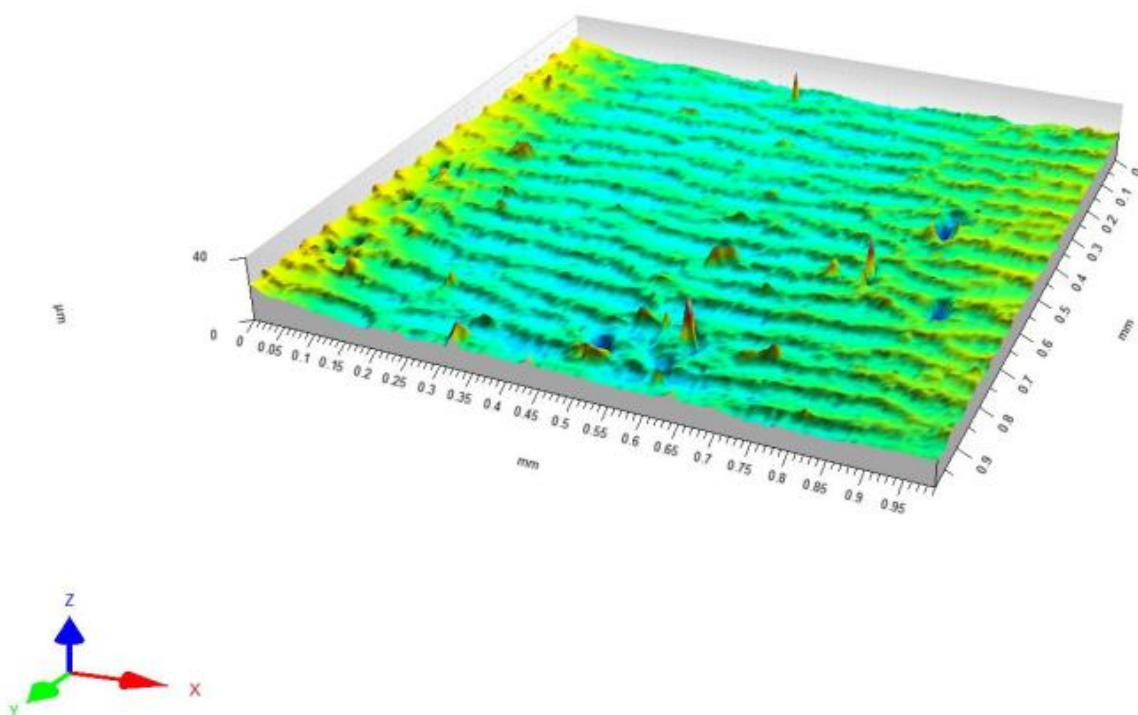


Obr.130 3D zobrazení broušeného povrchu plastu PP

Na obr. 130 bylo provedeno uřezání vrcholů nerovností broušeného povrchu PP z důvodů chybného nasnímání, zapříčiněné špatnou odrazivostí paprsku nebo dosud normované parametry textury ještě nepočítají s proměnnou velikostí snímacího bodu paprsku.

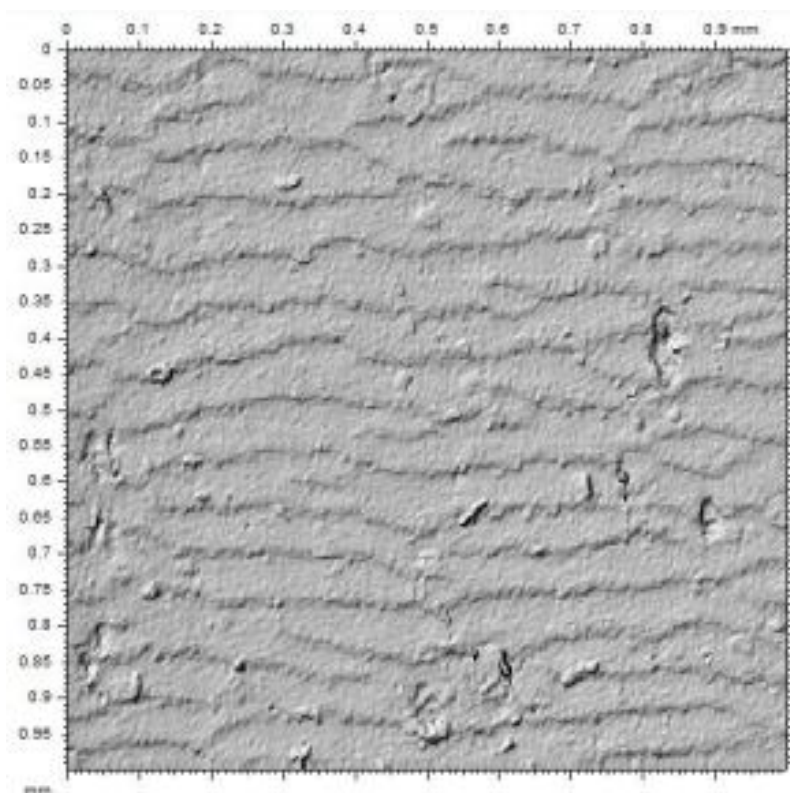


Obr.131 2D zobrazení broušeného povrchu plastu PP



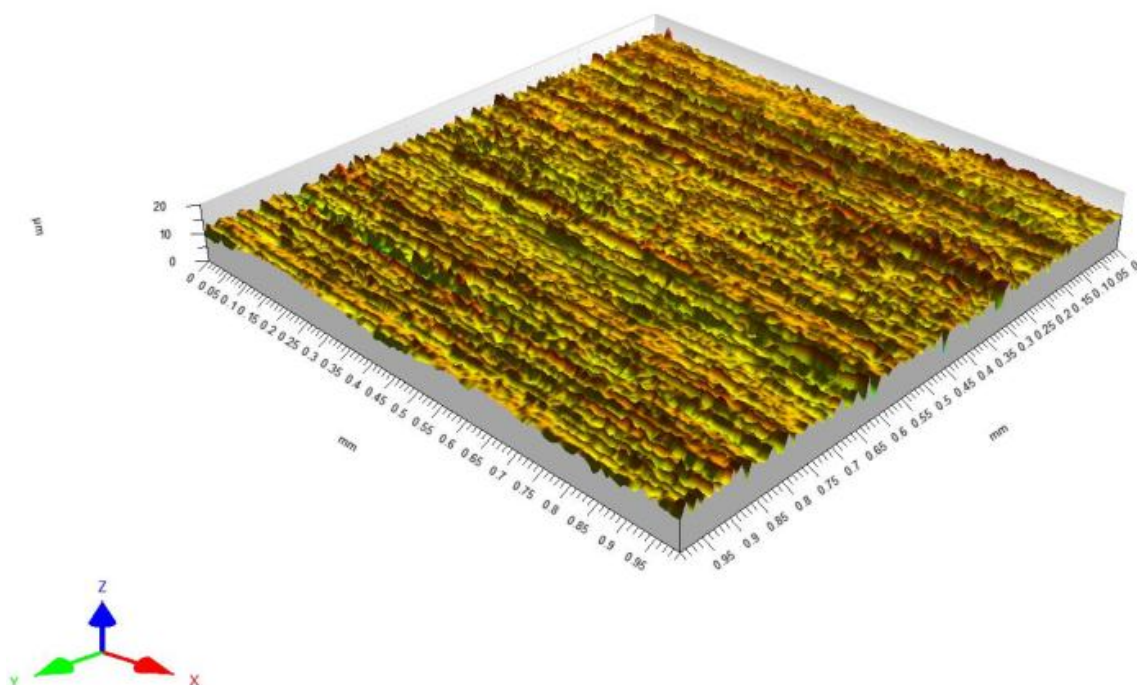
Obr.132 3D zobrazení broušeného povrchu pryže NBR+BR

Na obr.132 můžeme vidět prohlubně, které jsou způsobené vniknutím a následným ulomením brousícího zrna z brousícího kotouče a taktéž výstupky způsobené nečistotami.

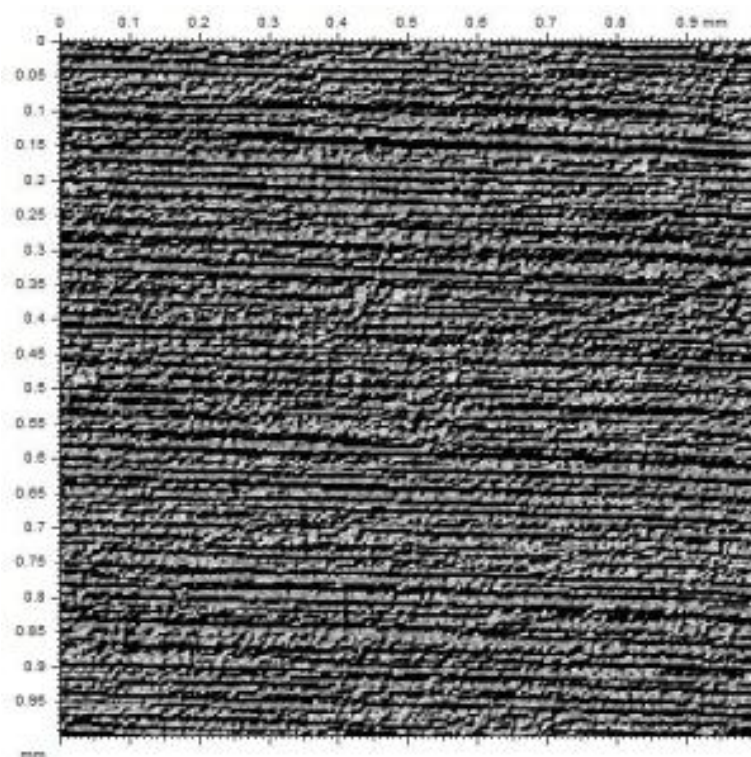


Obr.133 2D zobrazení broušeného povrchu pryže NBR+BR

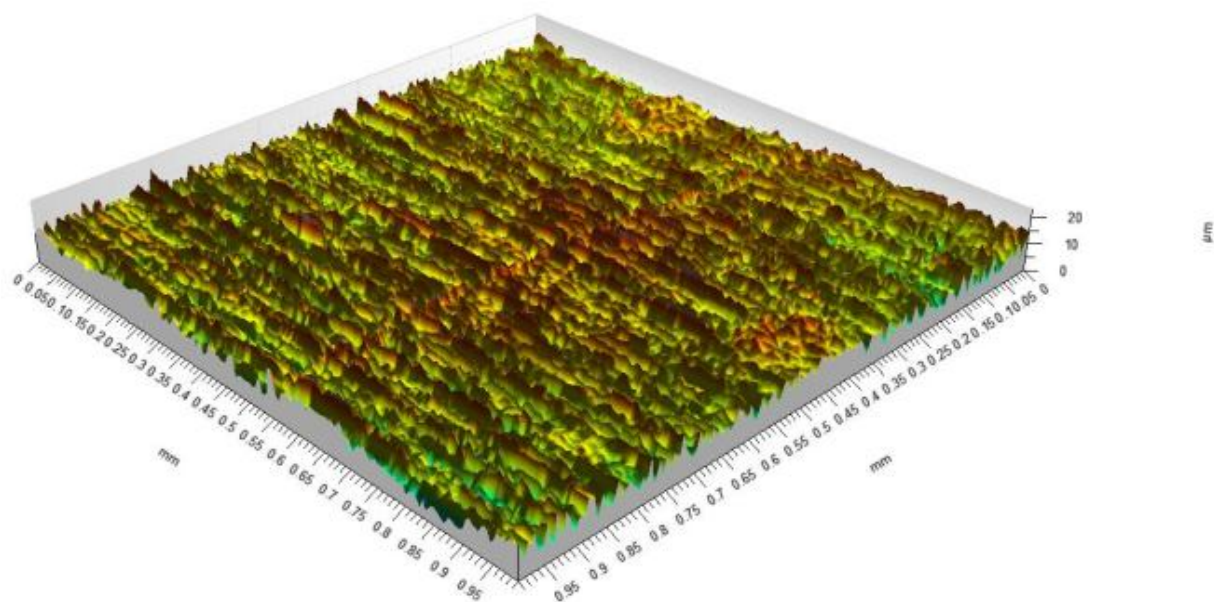
8.5.3 Kotouč č.3 99BA 46 J 9 V



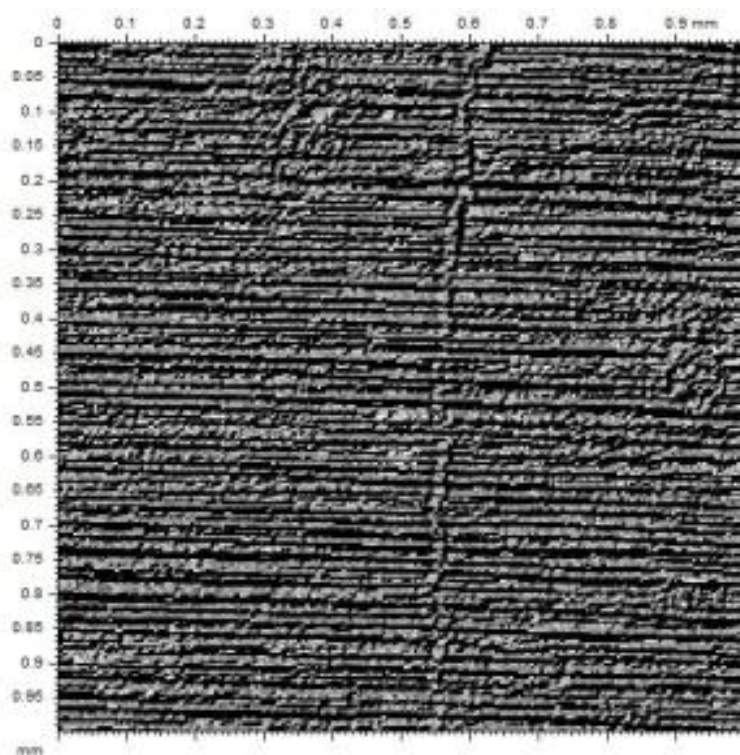
Obr.134 3D zobrazení broušeného povrchu oceli 11 600



Obr.135 3D zobrazení broušeného povrchu oceli 11 600

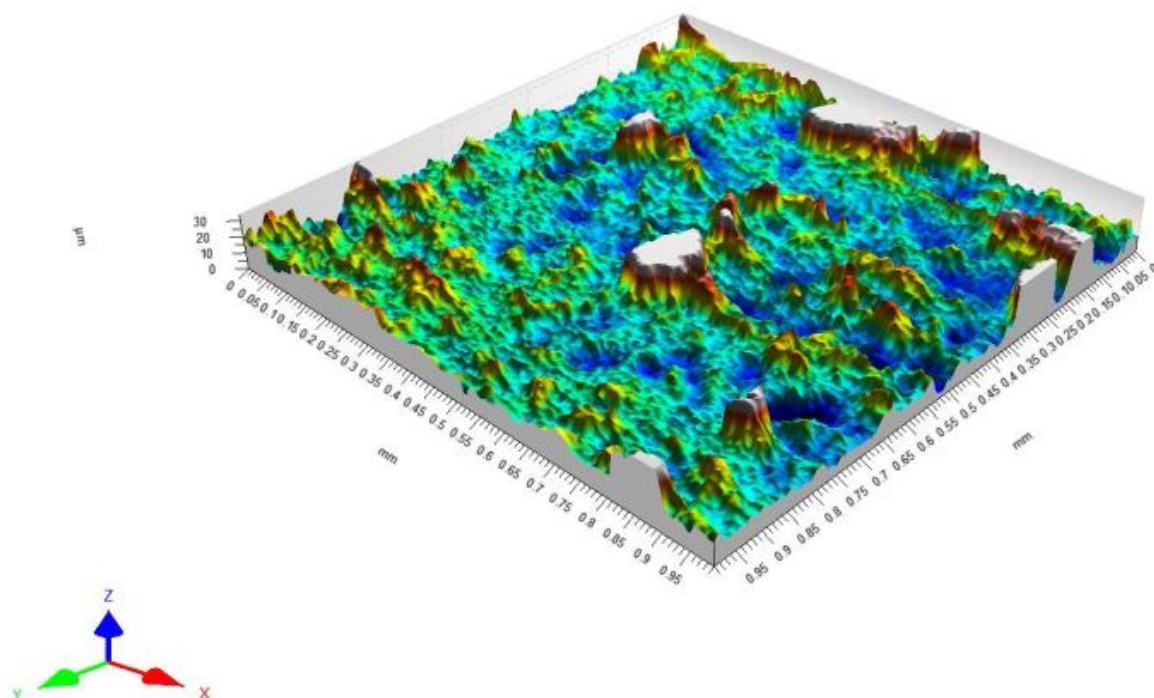


Obr.136 3D zobrazení broušeného povrchu oceli 19 436



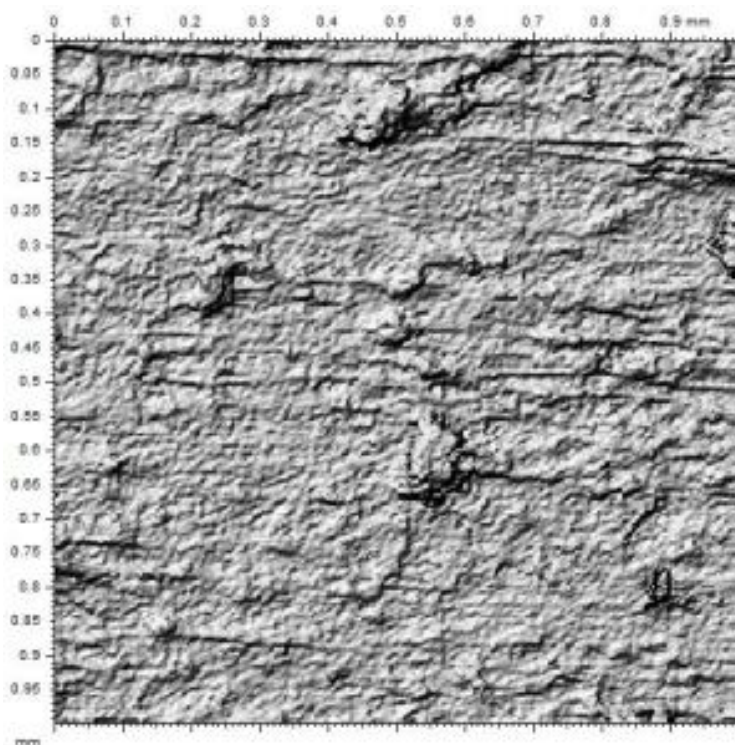
Obr.137 2D zobrazení broušeného povrchu oceli 19 436

Na obr.137 můžeme vidět příčnou rýhu proti směru posuvu broušícího kotouče, která byla patrně způsobena zpevněním povrchové vrstvy.

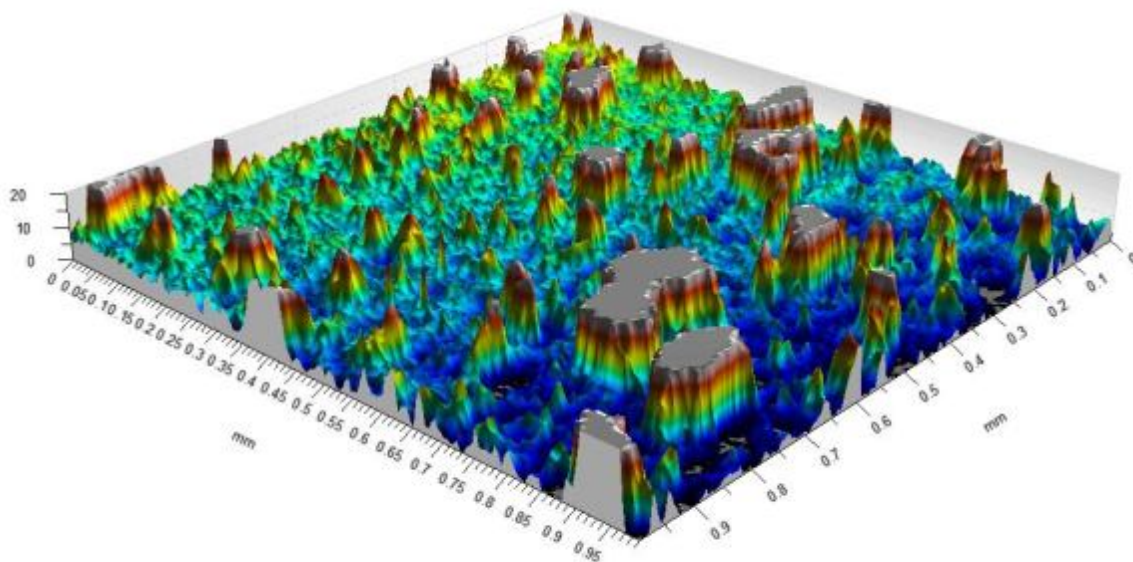


Obr.138 3D zobrazení broušeného povrchu plastu PP

Na obr. 138 bylo provedeno uřezání vrcholků nerovností broušeného povrchu PP z důvodů chybného nasnímání, zapříčiněné špatnou odrazivostí paprsku nebo dosud normované parametry textury ještě nepočítají s proměnnou velikostí snímacího bodu paprsku.

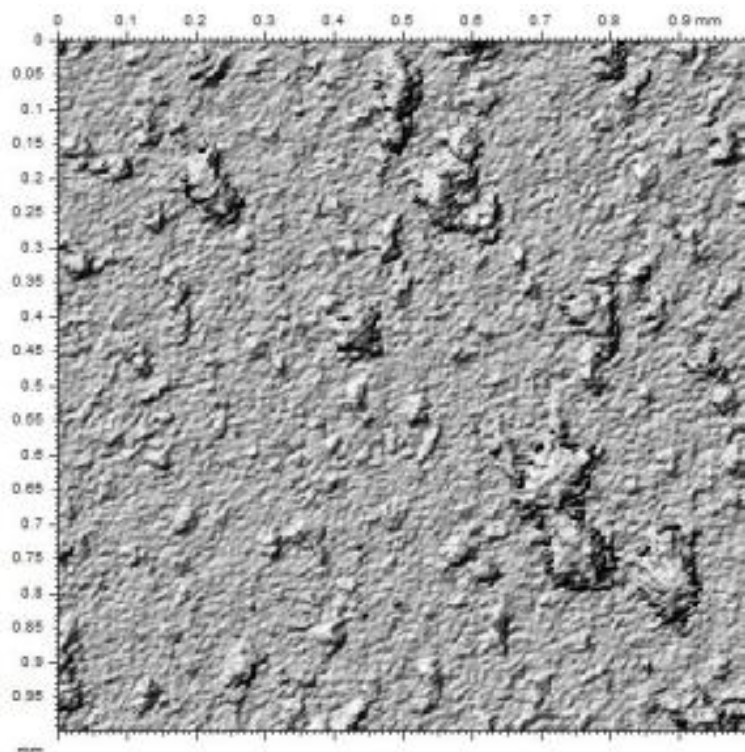


Obr.139 2D zobrazení broušeného povrchu plastu PP

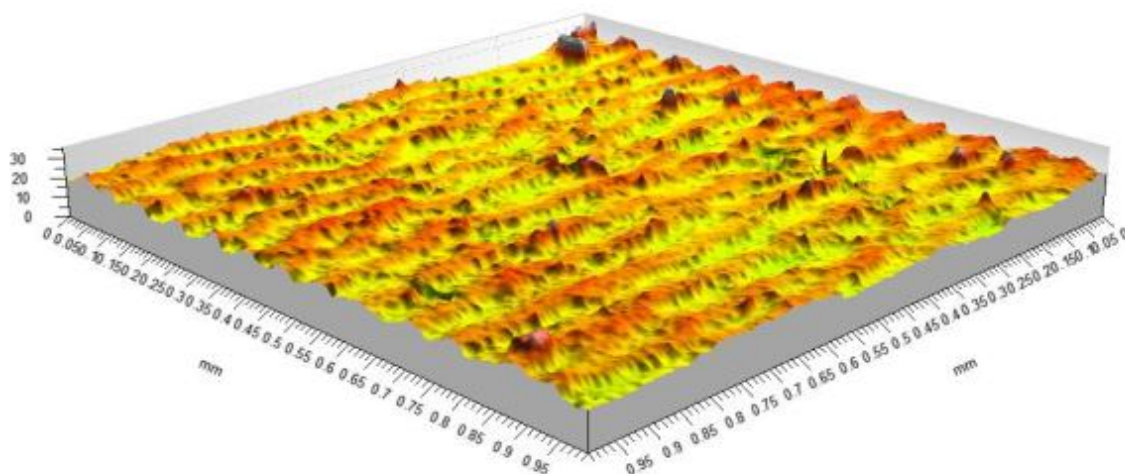


Obr.140 3D zobrazení broušeného povrchu plastu PMMA

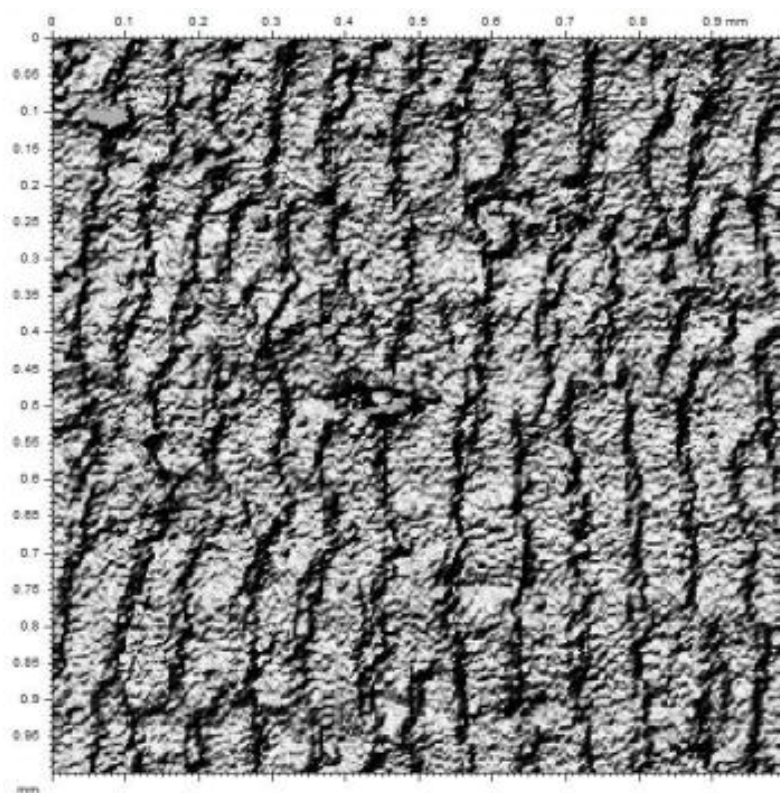
Na obr.140 bylo provedeno uřezání vrcholků nerovností broušeného povrchu PMMA z důvodů chybného nasnímání, zapříčiněné špatnou odrazivostí paprsku nebo dosud normované parametry textury ještě nepočítají s proměnnou velikostí snímacího bodu paprsku.



Obr.141 2D zobrazení broušeného povrchu plastu PMMA



Obr.142 3D zobrazení broušeného povrchu pryže NBR+BR

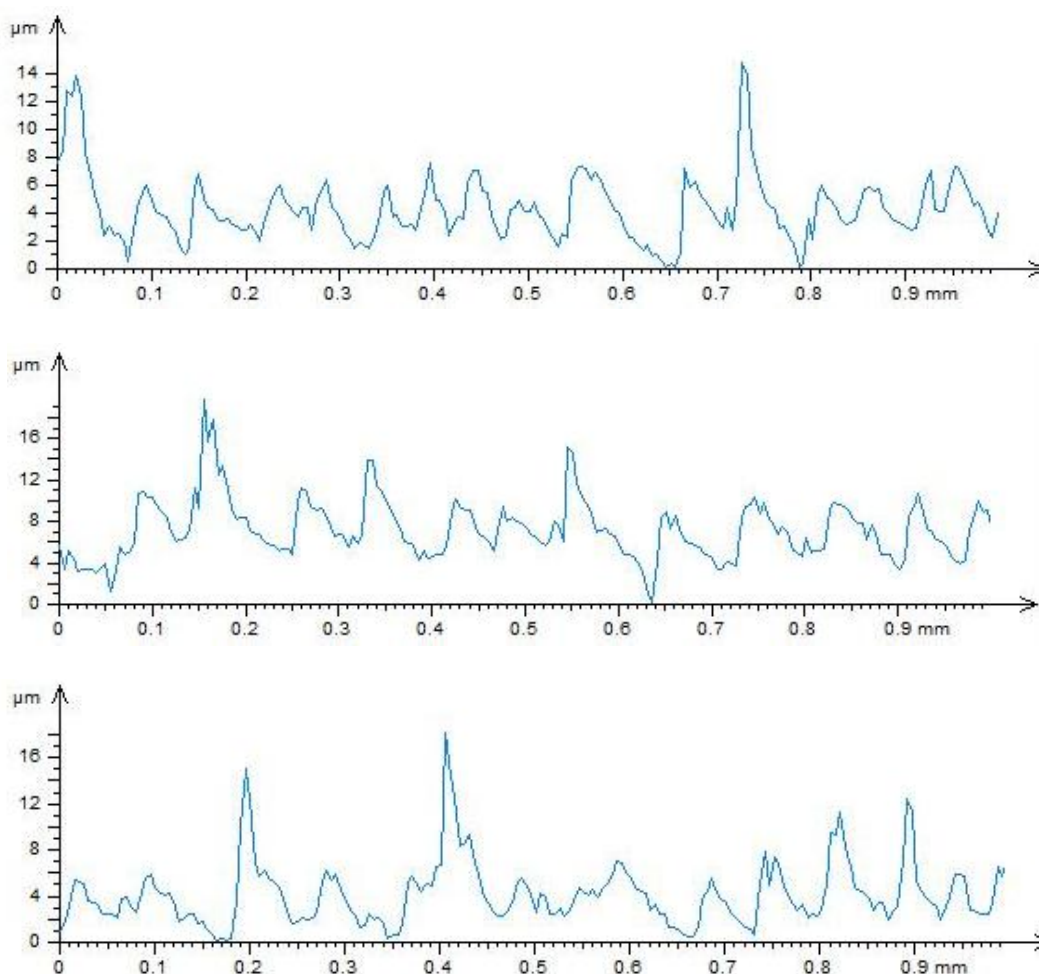


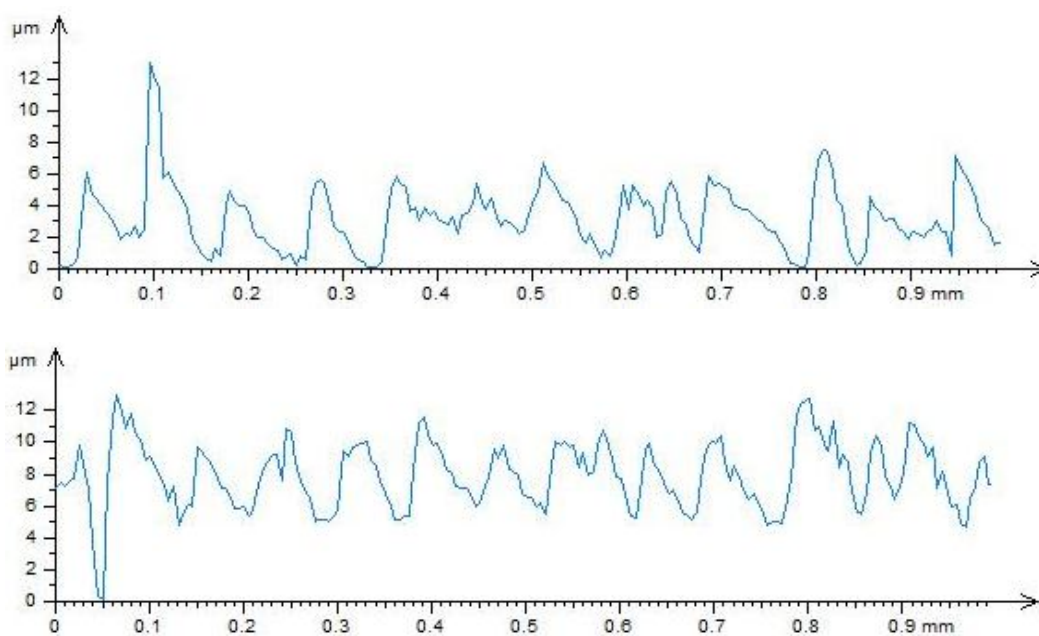
Obr.143 2D zobrazení broušeného povrchu pryže NBR+BR

8.6 Základní profil pryžových vzorků

Tyto 2D profily byly zhotovovány na třech pryžových vzorcích shodného materiálu (pryž NBR+BR). Tyto pryžové vzorky se odlišovali aplikací brousicích kotoučů (kotouč č.1, 2, 3). Vytváření 2D řezů broušených povrchů pryžových vzorků přístrojem Talysurf CLI 500, bylo prováděno za stejných podmínek a to takových, že každá zaznamenaná broušená plocha byla ve stavu úběru materiálu $a_e = 0,01$ mm a posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min. Na každém pryžovém vzorku bylo zhotoveno na jedné vyšetřované ploše 5 podélných řezů s krokem 0,2 mm.

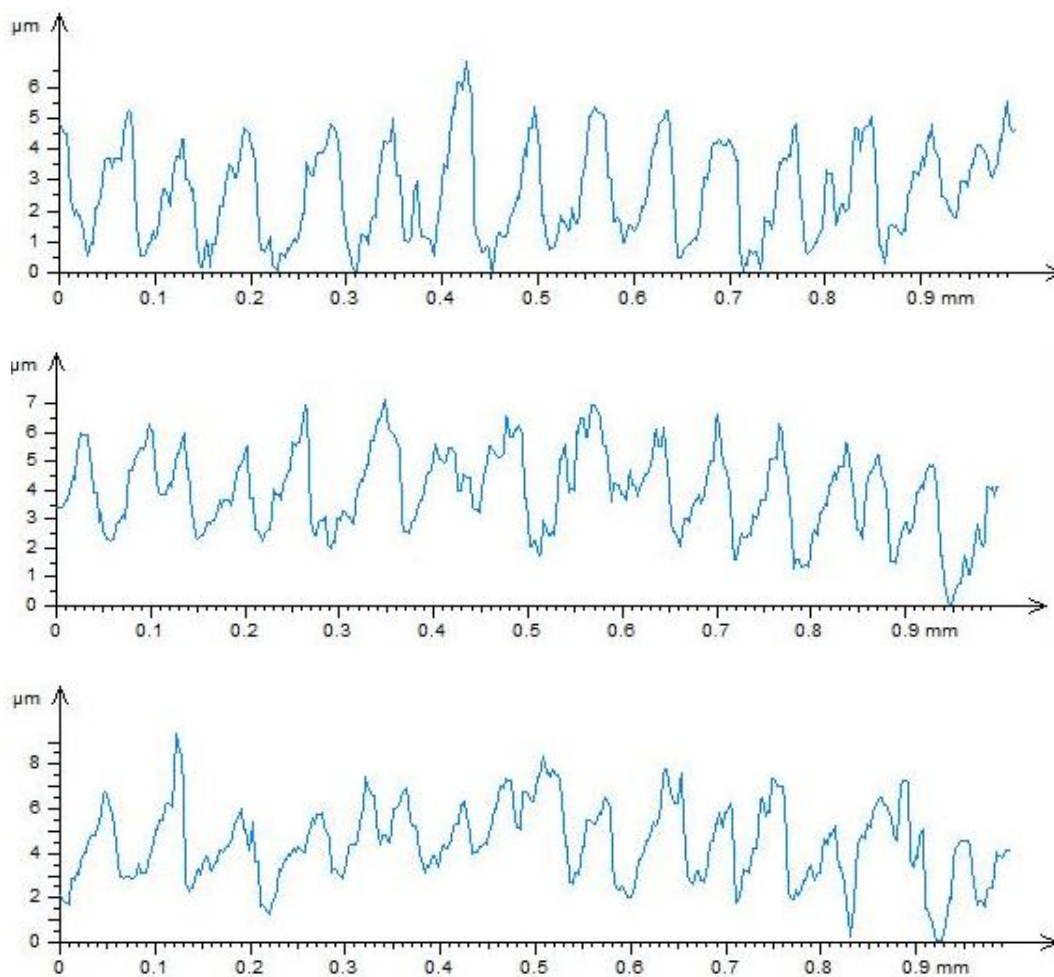
8.6.1 Základní profil pryžového vzorku, aplikace kotouče 99A 60 J 12 V

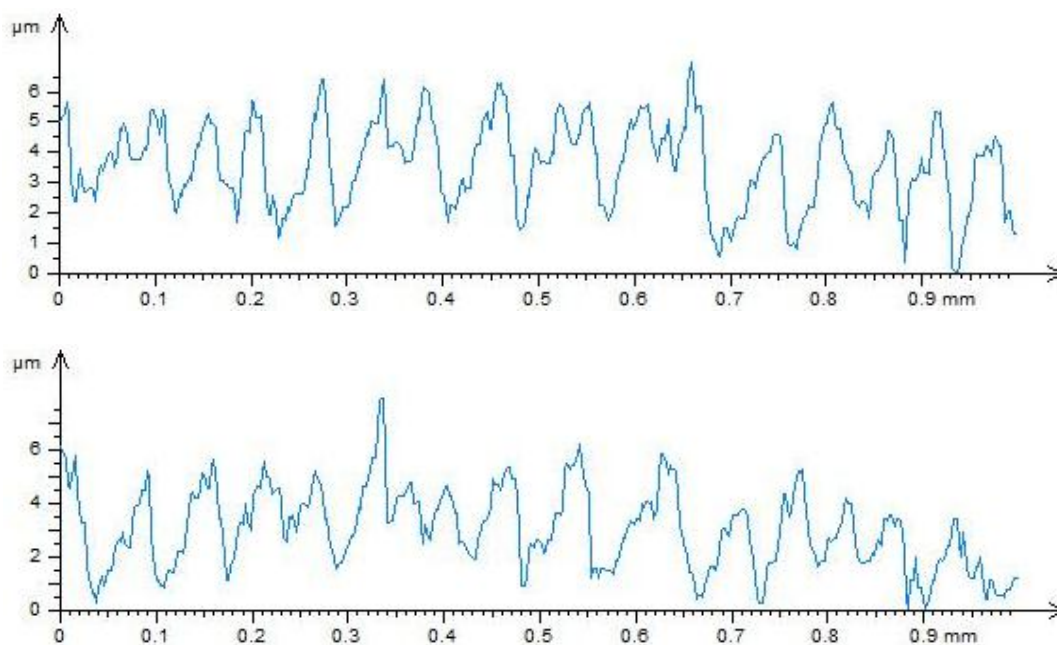




Obr.144 Základní profil pryžového vzorku č.1

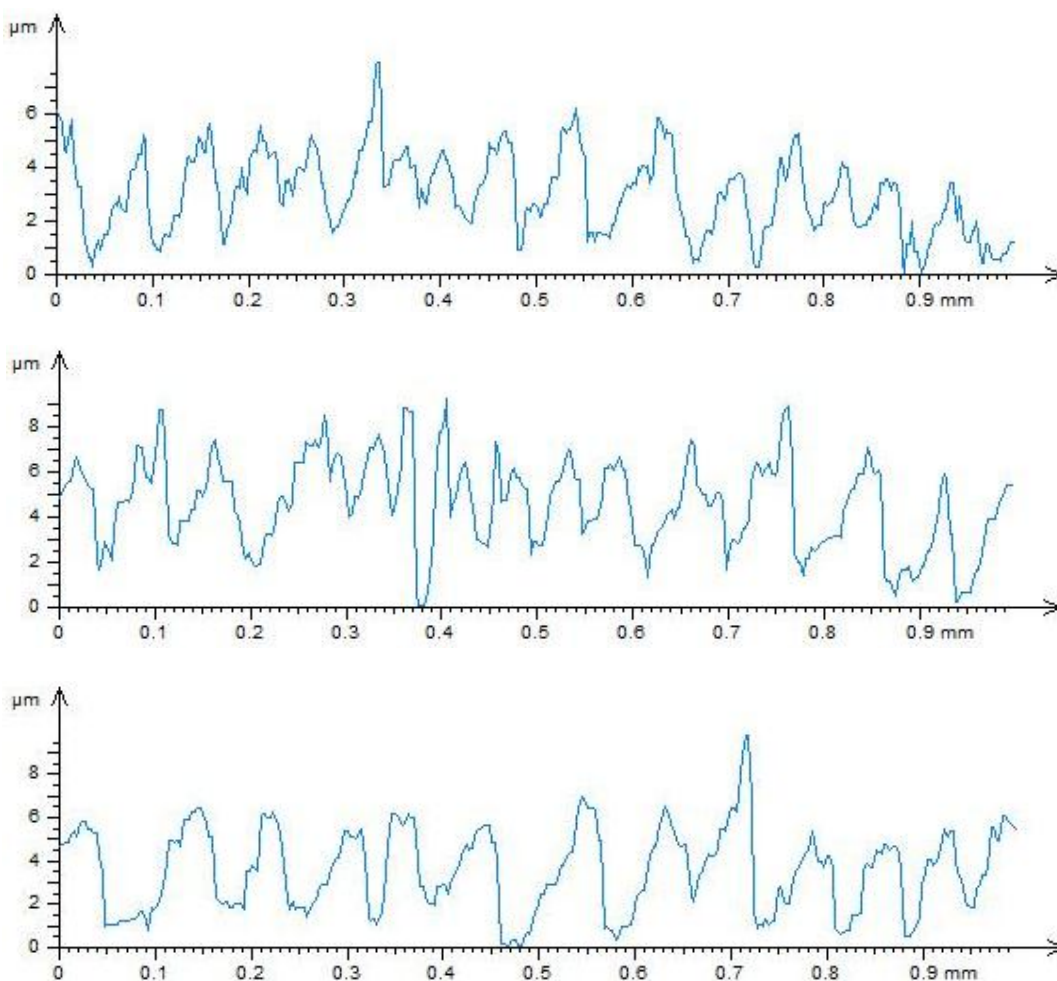
8.6.2 Základní profil pryžového vzorku, aplikace kotouče 49C 60 K 9 V

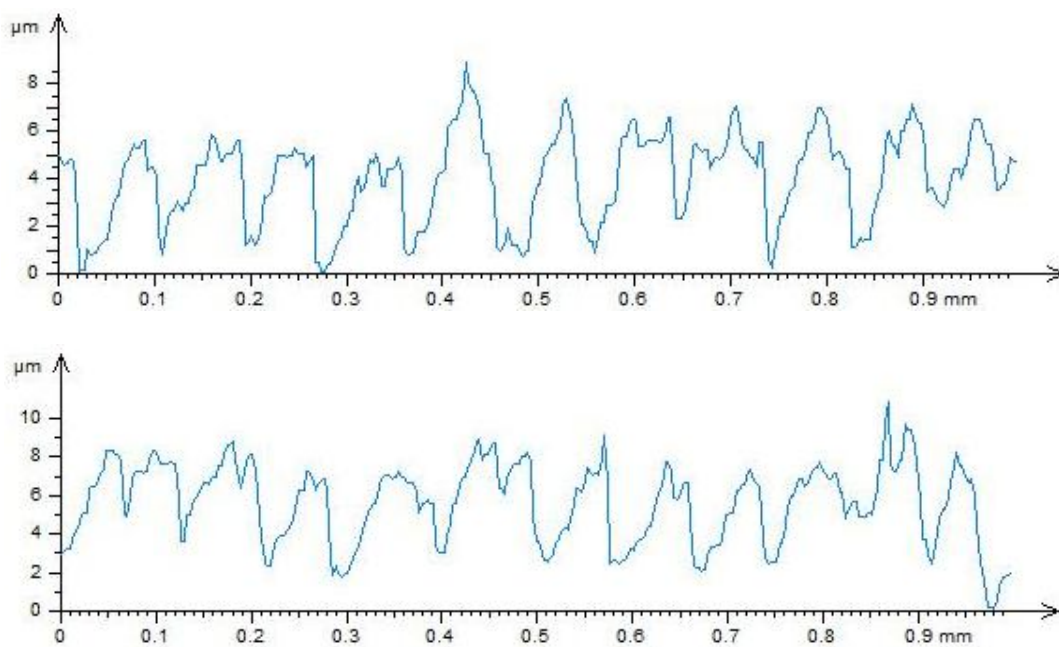




Obr.145 Základní profil pryžového vzorku č.2

8.6.3 Základní profil pryžového vzorku, aplikace kotouče 99BA 46 J 9 V





Obr.146 Základní profil pryžového vzorku č.3

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá hodnocením jakosti broušené plochy při proměnných technologických podmínkách a při aplikaci různých druhů broušicích kotoučů.

Pro hodnocení broušených povrchů byly měřeny vybrané parametry drsnosti Ra a Rz dle ČSN EN ISO 4287-1997, a také parametr Rm(r) na 20% hloubce profilu drsnosti založený na křivce materiálového podílu dle ČSN EN ISO 13 565.

Při aplikaci kotoučem **99A 60 J 12 V** u oceli 11 600 dosahuje broušená plocha nejnižší drsnosti při posuvové rychlosti $v_f = 14$ m/min, kdy následně se dalším narůstáním hodnot posuvu se parametry drsnosti Ra a Rz postupně zvyšují. U oceli 19 436 dosahuje broušená plocha nejvyšší drsnosti při posuvové rychlosti $v_f = 21$ m/min.

U plastu PMMA dosahuje broušená plocha nejvyšší drsnosti při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min a nejnižší $v_f = 14$ m/min, kdy dalším narůstáním hodnot posuvů se parametry drsnosti Ra a Rz postupně zvyšují. U plastu PP dosahuje nejvyšší drsnosti povrchu při posuvové rychlosti $v_f = 7$ a 14 m/min s hloubkou řezu $a_e = 0,03$ a 0,04 mm. Velikost drsnosti u broušených ploch s hloubkou řezu $a_e = 0,01$ a 0,02 mm má stejnou tendenci jako u plastu PMMA.

U pryží NBR+BR a SBR naopak s rostoucí rychlosti posuvu v_f klesají parametry drsnosti Ra a Rz do hodnoty rychlosti posuvu $v_f = 23$ m/min. Rozdíl mezi těmito pryžemi je, že pryž NBR+BR dosahuje nižších hodnot parametrů drsnosti Ra a Rz při stejných technologických podmínkách.

Dále s klesajícími hodnotami parametrů drsnosti Ra a Rz, roste materiálový podíl Rm(r) jak u všech materiálů.

Při aplikaci kotoučem **49C 60 K 9 V** u oceli 11 600 dosahuje broušená plocha nejnižší drsnosti při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min a nejvyšší $v_f = 21$ m/min u hloubky řezů $a_e = 0,01$ a 0,02 mm. U hloubky řezu 0,03 a 0,04 mm dosahuje broušená plocha nejnižší drsnosti při posuvové rychlosti $v_f = 14$ m/min a nejvyšší $v_f = 7$ m/min. U oceli 19 436 dosahuje broušená plocha nejnižší drsnosti při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min a nejvyšší $v_f = 21$ m/min.

U plastu PMMA dosahuje broušená plocha nejnižší drsnosti při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min kdy dalším narůstáním hodnot posuvů se parametry drsnosti Ra a Rz postupně zvyšují. U plastu PP dosahuje nejvyšší drsnosti povrchu při všech posuvových rychlostech při

hloubkách řezů $a_e = 0,03$ a $0,04$ mm a nejnižší při $v_f = 23$ m/min hloubkách řezů $a_e = 0,01$ a $0,02$ mm.

U pryže NBR+BR s rostoucí rychlosti posuvu v_f , rostou parametry drsnosti Ra a Rz do hodnoty rychlosti posuvu $v_f = 23$ m/min při hloubkách řezu $a_e = 0,03$ a $0,04$ mm. Při hloubkách řezů $a_e = 0,01$ a $0,02$ mm je dosažena nejvyšší drsnost při rychlostech posuvu $v_f = 14$ a 21 m/min. U pryže SBR dosahovaly hodnoty parametrů drsnosti Ra, Rz nějak nezávisle na měnících se technologických podmínkách.

Při aplikaci kotoučem **99BA 46 J 9 V** u oceli 11 600 dosahuje broušená plocha nejnižší drsnosti při posuvové rychlosti $v_f = 7$ a 23 m/min a nejvyšší drsnosti povrchu při posuvové rychlosti $v_f = 21$ m/min. U oceli 19 436 dosahuje broušená plocha nejnižší drsnosti při posuvové rychlosti $v_f = 14$ m/min a nejvyšší $v_f = 21$ m/min.

U plastu PMMA dosahuje broušená plocha nejnižší drsnosti povrchu při posuvové rychlosti $v_f = 23$ m/min při hloubkách řezů $a_e = 0,01$ a $0,02$ mm. Při hloubkách řezů $a_e = 0,03$ a $0,04$ mm dosahuje broušená plocha nejnižší drsnosti povrchu při posuvové rychlosti $v_f = 14$ m/min. U plastu PP dosahuje nejvyšší drsnosti povrchu při všech posuvových rychlostech při hloubkách řezů $a_e = 0,03$ a $0,04$ mm. Nejnižší při $v_f = 7$ m/min, hloubce řezu $a_e = 0,01$ mm a při $v_f = 21$ m/min a hloubce řezu $a_e = 0,02$ mm.

U pryže NBR+BR s rostoucí rychlosti posuvu v_f , rostou parametry drsnosti Ra a Rz do hodnoty rychlosti posuvu $v_f = 23$ m/min při hloubkách řezu $a_e = 0,03$ a $0,04$ mm. Při hloubkách řezů $a_e = 0,01$ a $0,02$ mm je dosažena nejvyšší drsnost při rychlostech posuvu $v_f = 14$ a 21 m/min.

U pryže SBR dosahovaly hodnoty parametrů drsnosti Ra, Rz nějak nezávisle na měnících se technologických podmínkách.

Na základě porovnání naměřených výsledků parametrů drsnosti broušených povrchů zkoušených materiálů lze konstatovat:

U ocelí 11 600 a 19 436 bylo dosaženo nejnižších hodnot parametrů drsností Ra a Rz při aplikaci kotoučem **49C 60 K 9 V** a nejvyšších hodnot při aplikaci kotoučem **99A 60 J 12 V** za stejných technologických podmínek, tudíž pro broušení ocelí je vhodnější brousící kotouč s nižší pórovitostí.

U plastů PMMA a PP a u pryží NBR+BR a SBR bylo dosaženo nejnižších hodnot parametrů drsností Ra a Rz při aplikaci kotoučem **99A 60 J 12 V** za stejných technologických podmínek, tudíž pro broušení plastů a pryží je vhodnější brousicí kotouč s vyšší pórovitostí.

Dále pak můžu konstatovat, že s rostoucí hodnotou drsnosti, klesala hodnota materiálového podílu $R_m(r)$.

Naměřené hodnoty parametrů drsnosti Ra a Rz získané dotykovým a bezdotykovým způsobem se do jisté míry nezhodovaly. Tento fakt byl způsobem několika faktory. Jednou takovou příčinou mohl být například tlak na hrotu snímače dotykového profilometru, kdy u méně tvrdých materiálů (pryž, plast) může vzniknout v povrchové vrstvě elastická deformace, která může způsobit zkreslení naměřených výsledků. Další důvod může být přítomnost malých nepravidelností jako výstupky s malým poloměrem vrcholků nebo trhliny nebo také sklony textury povrchu, které mohou být pro odrazivost paprsku kritickým místem měření. Dalšími důvody může být fakt, že normované parametry textury povrchu ještě nepočítají s proměnnou velikostí snímacího bodu při aplikaci bezdotykového přístroje. [20]

Na základě výsledků základních profilů základní délky vzorků pryže NBR+BR můžu říci:

Při aplikaci kotoučem **99A 60 J 12 V**, dosahoval parametr největší výšky základního profilu **Pz** hodnot pohybující se v rozmezí **14 – 16** μm .

Při aplikaci kotoučem **49C 60 K 9 V**, dosahoval parametr největší výšky základního profilu **Pz** hodnot pohybující se v rozmezí **6 – 8** μm .

Při aplikaci kotoučem **99BA 46 J 9 V**, dosahoval parametr největší výšky základního profilu **Pz** hodnot pohybující se v rozmezí **7 – 9** μm .

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOCMAN,K.;PROKOP,J.:*Technologie obrábění*. Akademické nakladatelství CERM,ISBN 80-214-3068-0
- [2] VASILKO,K.; BOKUČAVA,G.: *Brúsenie kovových materiálov*. Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Bratislava
- [3] BUMBÁLEK,B.; ODVODY,V.; OŠŤÁDAL,B.: *Drsnost povrchu*. SNTL Praha,1989
- [4] ČERNÝ,F.; TRMAL,J.; MARŠÁLEK,J.:*Brusky a broušení*. SNTL Praha,1970
- [5] KLOCKE,F.: *Manufacturing Processes2-Grinding,Honing,Lapping*. Springer Berlin,2009, ISBN 978-3-540-92258-2
- [6] VASILKO,K.: *Analytická teória trieskového obrábania*. Prešov 2007, ISBN 978-80-8073-759-7
- [7] NOVÁK,Z.: *Prostorové hodnocení textury povrchu*. Studie 2006
- [8] MÁDL,J; KAFKA,J.; VRABEC,M; DVOŘÁK,R.: *Technologie obrábění. 1.díl.* České vysoké učení technické v Praze. Praha 2000
- [9] BEŇO,J.: *Teória rezania kovov*. Vienaľa Košice, 1999
- [10] ČSN ISO 3002-3 (22 0014) Rezné nástroje. Základné veličiny při rezání a brúsení. Část : *Geometrické a kinematické veličiny při rezání*. Český normalizační institute. Praha. 1993
- [11] TYKAL,M.: *Příspěvek k hodnocení drsnosti povrchu s ohledem na ověřování měřicích přístrojů*. Brno 1972
- [12] TYKAL,M.; Melichar,M.: *Získávání profilu povrchu na rotačních plochách*. Sborník VAAZ č.1. Brno 1979
- [13] TYKAL,M.: *Principy a charaktistiky dotkových profilometrů, volba základních délek pro měření drsnosti povrchu*. České Budějovice, ČSVTS 1981
- [14] VASILKO,K.; MICHEL,D.; HRUBEC,J.: *Brúsenie a ostrenie rezných nástrojov*. Bratislava 1984
- [15] KOCMAN,K.; PROKOP,J.: *Technologické aspekty přesnosti obrobené plochy*. In.: *Sborník přednášek ICPM 2001: Ústí nad Labem, ČR, 5.- 7. Zář 2001 s. 45 – 54*

- [16] LUKOVICS,I.; SÝKOROVÁ,L.: *Stanovení řezivosti brousicích kotoučů pro vysokovýkonné broušení*. In.: *Sborník Mezinárodní conference Nástroje 99*: Zlín, ČR, 1999, s. 96 - 102
- [17] TRMAL,G.J.; HOLEŠOVSKY,F.: *Wave-shift and its effect on surface quality in super-abrasive grinding*, In: *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 979-989
- [18] Kolektiv autorů, *Terminologie obrábění a montáže*, UJEP Ústí nad Labem, ÚTRV, 2004
- [19] WHITEHOUSE D.: *Surfaces and their Measurement*, Kogan Page Science, 2004
- [20] NOVÁK, Z. *Prostorová charakteristika textury povrchu*. *Průmyslové spektrum*, 2009, no. 10, p. 64.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

n_s, n_k	frekvence otáčení brousicího kotouče
n_w, n_o	frekvence otáčení obrobku
v_{fa}	axiální rychlost posuvu stolu
v_{ft}	tangenciální rychlost posuvu stolu
v_{fr}	radiální rychlost posuvu brousicího kotouče
f_a	axiální posuv stolu
f_r	radiální posuv brousicího kotouče
a_e	hloubka úběru materiálu
v_c	řezná rychlost brousicího kotouče kolem své osy
v_v	řezná rychlost brousicího kotouče kolem osy obrobku
v_w	řezná rychlost obrobku
b_s	šířka brousicího kotouče
l_w	šířka obrobku
n_{pk}	frekvence otáčení podávacího kotouče
n_{nk}	frekvence otáčení upínacího kotouče
n_{ok}	frekvence otáčení opěrného kotouče
h_{eq}	ekvivalentní tloušťka úběru materiálu
Q_w	rychlost odebrání materiálu (objemový výkon)
Al_2O_3	Umělý korund (oxid uhličitý)
TiO_2	Kysličník titaničitý
SiC	Karbid křemíku
B_4C	Karbid bóru
BN	Kubický nitrid bóru
CO	Oxid uhelnatý
WC	Karbid wolframu

TiC	Karbid titanu
n	celočíselný poměr
φ	úhel pootočení brousicího kotouče
R_z	výška nerovností profilu z 10 vrcholů
R_a	průměrná aritmetická úchylka drsnosti povrchu
y_{pmi}	hodnota 5 nejvyšších výšek nerovnosti profilu povrchu
y_{vmi}	hodnota 5 nejvyšších prohlubní nerovnosti profilu povrchu
R_{m5}	střední hodnota 5 nejvyšších výšek a prohlubní profilu povrchu
R_v	největší hloubka prohlubní profilu
$Rm(r)$	vzájemný materiálový poměr
λ_c	délka posuvu (cut off)
N	počet měření na vyšetřované délce
a_e	hloubka řezu
v_f	posuvová rychlost
PP	Polypropylen
PMMA	Polymethylmethakrylát
NBR	Butadien-akrylonitrilový kaučuk
BR	Polybutadienový kaučuk
SBR	Butadien-styrenový kaučuk

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Perspektivy rozvoje broušení.....	10
Obr. 2. Schéma vzájemné interakce broušícího kotouče s broušeným materiálem.....	13
Obr. 3. Vybrané způsoby obvodového broušení.....	15
Obr. 4. Vybrané způsoby čelního broušení.....	16
Obr. 5. Podélné broušení válcových ploch.....	17
Obr. 6. Hloubkové broušení válcových ploch.....	17
Obr. 7. Zapichovací broušení.....	18
Obr. 8. Broušení válcových ploch sadou kotoučů.....	19
Obr. 9. Vnitřní broušení – podélné a planetové broušení.....	16
Obr. 10. Schéma vnitřního bezhrotého broušení.....	20
Obr. 11. Tvary broušících kotoučů.....	21
Obr. 12. Označování a specifikace broušících kotoučů.....	22
Obr. 13. Broušící materiály a jejich označení.....	23
Obr. 14. Tvrdost broušících materiálů.....	25
Obr. 15. Pojiva broušících nástrojů.....	25
Obr. 16. Značení slohu broušících kotoučů.....	28
Obr. 17. Stupně tvrdosti broušících kotoučů.....	29
Obr. 18. Struktura broušících kotoučů.....	29
Obr. 19. Pohyby a souřadnicové soustavy rovin pro obvodové vnější broušení do kulata..	30
Obr. 20. Ekvivalentní tloušťka při obvodovém radiálním broušení do kulata vnější.....	32
Obr. 21. Ekvivalentní tloušťka při rovinném obvodovém tangenciálním broušení.....	32
Obr. 22. Geometrie broušícího nástroje.....	33
Obr. 23. Obraz 3D-topografie povrchu kalené oceli.....	35
Obr. 24. Příčná a podélná drsnost.....	35
Obr. 25. Broušení s celočíselným poměrem rychlostí.....	37

Obr. 26. Broušení bez celočíselného poměru.....	38
Obr. 27. Vyjádření hodnoty R_a	39
Obr. 28. Vyjádření hodnoty R_z	40
Obr. 29. Křivka materiálového poměru drsnosti povrchu.....	40
Obr. 30. Klasifikace metod a přístrojů pro měření drsnosti.....	41
Obr. 31. Princip mechanicko-optických profilometrů.....	43
Obr. 32. Pákový model funkce snímačů drsnosti povrchu generátorového typu.....	44
Obr. 33. Pákový model funkce snímačů drsnosti povrchu impedančního typu.....	44
Obr. 34. Schéma elektromagnetického snímače.....	45
Obr. 35. Schéma elektrodynamického snímače.....	46
Obr. 36. Schéma piezoelektrického snímače.....	46
Obr. 37. Schéma elektroinduktivního snímače.....	47
Obr. 38. Schéma elektrokapacitního snímače.....	48
Obr. 39. Zobrazení 3D abrazivního povrchu.....	49
Obr. 40. Zobrazení 3D povrchu brousícího kotouče.....	50
Obr. 41. Bruska BHV 20.03F pohled 1.....	53
Obr. 42. Bruska BHV 20.03F pohled 2.....	54
Obr. 43. Technické parametry stroje 1.....	54
Obr. 44. Technické parametry stroje 2.....	55
Obr. 45. Schéma stroje.....	55
Obr. 46. Drsnoměr Mitutoyo SJ-301 – popis.....	56
Obr. 47. Drsnoměr Mitutoyo SJ-301.....	56
Obr. 48. Skenovací stroj COMAGRAV.....	57
Obr. 49. Technické údaje stroje pro dotykové či bezdotykové skenování.....	58
Obr. 50. Talysurf CLI 500.....	59
Obr. 51. Kotouč č.1 – 99A 60 J 12 V.....	60

Obr. 52. Obrázek struktury kotouče 99A 60 J 12 V.....	60
Obr. 53. Kotouč č.2 – 49C 60 K 9 V.....	61
Obr. 54. Obrázek struktury kotouče 49C 60 K 9 V.....	61
Obr. 55. Kotouč č.3 – 99BA 46 J 9 V.....	62
Obr. 56. Obrázek struktury kotouče 99BA 46 J 9 V.....	63
Obr. 57. Kotouč č.1 – pohled 1.....	63
Obr. 58. Kotouč č.1 – pohled 2.....	64
Obr. 59. Kotouč č.2 – pohled 1.....	64
Obr. 60. Kotouč č.2 – pohled 2.....	64
Obr. 61. Kotouč č.3 – pohled 1.....	65
Obr. 62. Kotouč č.3 – pohled 2.....	65
Obr. 63. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e=0,01$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 99A 60 J 12 V.....	69
Obr. 64. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e =0,01$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 49C 60 K 9 V.....	69
Obr. 65. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e =0,01$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 99BA 46 J 9 V.....	70
Obr. 66. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e =0,02$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 99A 60 J 12 V.....	70
Obr. 67. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e =0,02$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 49C 60 K 9 V.....	70
Obr. 68. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e =0,02$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 99BA 46 J 9 V.....	71
Obr. 69. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e =0,03$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 99A 60 J 12 V.....	71
Obr. 70. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e =0,03$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 49C 60 K 9 V.....	71

Obr. 71. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 99BA 46 J 9 V.....	72
Obr. 72. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 99A 60 J 12 V.....	72
Obr. 73. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 49C 60 K 9 V.....	72
Obr. 74. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na parametr drsnosti R_a kotouče 99BA 46 J 9 V.....	73
Obr. 75. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,01$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 99A 60 J 12 V.....	73
Obr. 76. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,01$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 49C 60 K 9 V.....	74
Obr. 77. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,01$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče B9 BA 46 J 9 V.....	74
Obr. 78. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,02$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 99A 60 J 12 V.....	74
Obr. 79. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,02$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 49C 60 K 9 V.....	75
Obr. 80. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,02$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 99BA 46 J 9 V.....	75
Obr. 81. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 99A 60 J 12 V.....	75
Obr. 82. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 49C 60 K 9 V.....	76
Obr. 83. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 99BA 46 J 9 V.....	76
Obr. 84. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na parametr drsnosti R_z kotouče 99A 60 J 12 V.....	76

Obr. 85. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na parametr drsnosti Rz kotouče 49C 60 K 9 V.....	77
Obr. 86. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na parametr drsnosti Rz kotouče 99BA 46 J 9 V.....	77
Obr. 87. Záznam profilu oceli 11 600 při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min.....	78
Obr. 88. Záznam profilu oceli 11 600 při posuvové rychlosti $v_f = 23$ m/min.....	78
Obr. 89. Záznam profilu polypropylenu PP při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min.....	78
Obr. 90. Záznam profilu polypropylenu PP při posuvové rychlosti $v_f = 23$ m/min.....	78
Obr. 91. Záznam profilu pryže NBR+BR při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min.....	79
Obr. 92. Záznam profilu pryže NBR+BR při posuvové rychlosti $v_f = 23$ m/min.....	79
Obr. 93. Záznam profilu oceli 11 600 při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min.....	79
Obr. 94. Záznam profilu oceli 11 600 při posuvové rychlosti $v_f = 23$ m/min.....	79
Obr. 95. Záznam profilu polypropylenu PP při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min.....	79
Obr. 96. Záznam profilu pryže NBR+BR při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min.....	80
Obr. 97. Záznam profilu pryže NBR+BR při posuvové rychlosti $v_f = 23$ m/min.....	80
Obr. 98. Záznam profilu oceli 11 600 při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min.....	80
Obr. 99. Záznam profilu oceli 11 600 při posuvové rychlosti $v_f = 23$ m/min.....	80
Obr. 100. Záznam profilu polymethylmethakrylátu PMMA při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min.....	81
Obr. 101. Záznam profilu polymethylmethakrylátu PMMA při posuvové rychlosti $v_f = 21$ m/min.....	81
Obr. 102. Záznam profilu pryže NBR+BR při posuvové rychlosti $v_f = 7$ m/min.....	81
Obr. 103. Záznam profilu pryže NBR+BR při posuvové rychlosti $v_f = 23$ m/min.....	81
Obr. 104. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,01$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 99A 60 J 12 V.....	82
Obr. 105. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní hloubce řezu $a_e = 0,01$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 49A 60 K 9 V.....	82

Obr. 106. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní. hloubce řezu $a_e = 0,01$ mm na parametr drsnosti Rz kotouče 99BA 46 J 9 V.....	83
Obr. 107. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní. hloubce řezu $a_e = 0,02$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 99A 60 J 12 V.....	83
Obr. 108. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní. hloubce řezu $a_e = 0,02$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 49C 60 K 9 V.....	83
Obr. 109. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní. hloubce řezu $a_e = 0,02$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 99BA 46 J 9 V.....	84
Obr. 110. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní. hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 99A 60 J 12 V.....	84
Obr. 111. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní. hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 49C 60 K 9 V.....	84
Obr. 112. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní. hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 99BA 46 J 9 V.....	85
Obr. 113. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní. hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 99A 60 J 12 V.....	85
Obr. 114. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní. hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 49C 60 K 9 V.....	85
Obr. 115. Vliv posuvové rychlosti v_f při konstantní. hloubce řezu $a_e = 0,04$ mm na materiálový podíl $R_m(r)$ kotouče 99BA 46 J 9 V.....	86
Obr. 116. 3D zobrazení broušeného povrchu oceli 11 600.....	87
Obr. 117. 2D zobrazení broušeného povrchu oceli 11 600.....	87
Obr. 118. 3D zobrazení broušeného povrchu oceli 19 436.....	88
Obr. 119. 2D zobrazení broušeného povrchu oceli 19 436.....	88
Obr. 120. 3D zobrazení broušeného povrchu plastu PP.....	89
Obr. 121. 2D zobrazení broušeného povrchu plastu PP.....	89
Obr. 122. 3D zobrazení broušeného povrchu plastu PMMA.....	90
Obr. 123. 2D zobrazení broušeného povrchu plastu PMMA.....	90

Obr. 124. 3D zobrazení broušeného povrchu pryže NBR+BR.....	91
Obr. 125. 2D zobrazení broušeného povrchu pryže NBR+BR.....	91
Obr. 126. 3D zobrazení broušeného povrchu oceli 11 600.....	92
Obr. 127. 2D zobrazení broušeného povrchu oceli 11 600.....	92
Obr. 128. 3D zobrazení broušeného povrchu oceli 19 436.....	93
Obr. 129. 2D zobrazení broušeného povrchu oceli 19 436.....	93
Obr. 130. 3D zobrazení broušeného povrchu plastu PP.....	94
Obr. 131. 2D zobrazení broušeného povrchu plastu PP.....	94
Obr. 132. 3D zobrazení broušeného povrchu pryže NBR+BR.....	95
Obr. 133. 2D zobrazení broušeného povrchu pryže NBR+BR.....	95
Obr. 134. 3D zobrazení broušeného povrchu oceli 11 600.....	96
Obr. 135. 2D zobrazení broušeného povrchu oceli 11 600.....	96
Obr. 136. 3D zobrazení broušeného povrchu oceli 19 436.....	97
Obr. 137. 2D zobrazení broušeného povrchu oceli 19 436.....	97
Obr. 138. 3D zobrazení broušeného povrchu plastu PP.....	98
Obr. 139. 2D zobrazení broušeného povrchu plastu PP.....	98
Obr. 140. 3D zobrazení broušeného povrchu plastu PMMA.....	99
Obr. 141. 2D zobrazení broušeného povrchu plastu PMMA.....	99
Obr. 142. 3D zobrazení broušeného povrchu pryže NBR+BR.....	100
Obr. 143. 2D zobrazení broušeného povrchu pryže NBR+BR.....	100
Obr. 144. Základní profil pryžového vzorku č.1.....	102
Obr. 145. Základní profil pryžového vzorku č.2.....	103
Obr. 146. Základní profil pryžového vzorku č.3.....	104

SEZNAM PŘÍLOH

- P I: Naměřené hodnoty parametrů drsnosti Ra, Rz a materiálového podílu Rm(r) zkoušených materiálů za použití broušícího kotouče A99 60 J 12 V
- P II: Naměřené hodnoty parametrů drsnosti Ra, Rz a materiálového podílu Rm(r) zkoušených materiálů za použití broušícího kotouče C49 60 K 9 V
- P III: Naměřené hodnoty parametrů drsnosti Ra, Rz a materiálového podílu Rm(r) zkoušených materiálů za použití broušícího kotouče BA99 46 J 9 V

Přílohy naleznete na nosiči CD ve složce Přílohy.