

# Dokončovací obrábění termoplastů

Bc. Tomáš Adámek

---

Diplomová práce  
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2007/2008

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš ADÁMEK**  
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Téma práce: **Dokončovací obrábění termoplastů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Teoretická studie na dané téma**
- 2. Experimentální broušení polymerů**
- 3. Určení vlivu technologických podmínek na kvalitu povrchu**
- 4. Statistické vyhodnocení výsledků**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**dle doporučení vedoucího práce**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Ondřej Bílek**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**19. února 2008**

Termín odevzdání diplomové práce:

**23. května 2008**

Ve Zlíně dne 29. ledna 2008



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



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

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku dokončovacího obrábění termoplastů, zejména broušení, a následné měření drsnosti povrchu při změně technologických podmínek. Důraz je kladen na statistické vyhodnocení a vyhodnocení křivek materiálového podílu.

Klíčová slova: broušení, drsnost, statistické vyhodnocení, materiálový podíl

## **ABSTRACT**

This diploma thesis is focus on problems with finishing machining of thermoplastics, especially grinding, and further roughness measurement during variable process specifications. Emphasis is put stress on statistical analysis and Abbott-Firestone curve (Material ratio curve).

Keywords: grinding, roughness, statistical analysis, material ratio curve

Na tomto místě bych chtěl rád poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Ondřeji Bílkovi, za důležité rady, připomínky a čas strávený při mé diplomové práci.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Šálkovi a paní Mgr. Lence Radové, Ph.D za odbornou pomoc při praktické části.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího diplomové práce a vedoucího ústavu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně 23.05.2008

.....

Podpis

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 OBROBITELNOST</b> .....	<b>11</b>
1.1 ROZDĚLENÍ OBROBITELNOSTI .....	11
1.2 OBROBITELNOST PLASTŮ .....	12
<b>2 BROUŠENÍ</b> .....	<b>13</b>
2.1 PODSTATA METODY .....	13
2.2 NÁSTROJE.....	14
2.3 BROUSÍCÍ MATERIÁLY .....	16
2.4 VYVAŽOVÁNÍ A OROVNÁVÁNÍ BRUSNÉHO KOTOUČE .....	17
2.5 METODY BROUŠENÍ .....	18
2.5.1 Vnější axiální broušení do kulata .....	18
2.5.2 Vnitřní axiální broušení do kulata.....	20
2.5.3 Obvodové rovinné broušení .....	20
2.5.4 Broušení tvarových ploch.....	21
2.6 STROJE .....	22
2.6.1 Hrotové brusky .....	22
2.6.2 Brusky na díry .....	24
2.6.3 Bezhroté brusky.....	24
2.6.4 Rovinné brusky .....	25
2.6.5 Nástrojařské brusky .....	25
2.6.6 Pásové brusky.....	26
2.7 ŘEZNÉ PODMÍNKY .....	26
2.8 CHLADÍCÍ KAPALINY .....	26
2.9 OSTŘENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ .....	27
2.10 DOSAHOVANÉ PARAMETRY PŘI BROUŠENÍ.....	28
<b>3 LEŠTĚNÍ</b> .....	<b>29</b>
3.1 PODSTATA METODY .....	29
3.2 MECHANICKÉ LEŠTĚNÍ.....	29
3.2.1 Mechanické leštění kotouči .....	29
3.2.2 Mechanické leštění otáčejícími se kartáči .....	30
3.2.3 Mechanické pásy .....	30

3.3	CHEMICKÉ LEŠTĚNÍ .....	31
3.4	ELEKTROCHEMICKÉ LEŠTĚNÍ .....	31
3.5	NÁSTROJE.....	32
3.6	STROJE .....	33
3.7	DOSAHOVANÉ PARAMETRY .....	34
<b>4</b>	<b>KONTROLA STRUKTURY POVRCHU .....</b>	<b>36</b>
4.1	PROFIL NEROVNOSTI POVRCHU .....	36
4.2	FILTRY PROFILU .....	39
4.3	FILTRY PROFILU .....	41
4.3.1	Výškové parametry.....	41
4.3.2	Délkové parametry .....	43
4.3.3	Tvarové parametry .....	43
4.3.4	Křivky a odpovídající parametry.....	44
4.3.5	Využití křivky lineárního poměru materiálu .....	44
4.3.6	Využití křivky lineárního poměru materiálu .....	46
4.3.7	Využití pravděpodobnostní křivky materiálu (ČSN EN ISO 13565-3) .....	46
4.3.8	Zbytková napětí.....	47
4.4	PRAVIDLA PRO HODNOCENÍ STRUKTURY POVRCHU .....	48
4.4.1	Uplatnění „pravidla 16 %“.....	48
4.4.2	Uplatnění „pravidla maxima“ .....	48
4.5	MĚŘENÍ PARAMETRŮ STRUKTURY POVRCHU .....	49
4.5.1	Princip měření struktury povrchu dotykovými profilometry (dotykovými hrotovými přístroji).....	49
4.5.2	Volba podmínek měření.....	53
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>CHARAKTERISTIKA BROUŠENÝCH MATERIÁLŮ .....</b>	<b>57</b>
6.1	TABULKY CHARAKTERISTICKÝCH HODNOT PLASTŮ .....	60
<b>7</b>	<b>BROUŠENÍ VZORKŮ.....</b>	<b>61</b>
7.1	BRUSKA HORIZONTÁLNÍ A VERTIKÁLNÍ BRH 20.03F .....	62
7.1.1	Kontrola kmitání kotouče.....	63
7.2	PŘÍSTROJ NA MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU MITUTOYO SJ-301.....	65
<b>8</b>	<b>VYHODNOCENÍ MATERIÁLOVÉHO PODÍLU.....</b>	<b>67</b>
8.1	SESTROJENÍ A VYHODNOCENÍ KŘIVKY MATERIÁLOVÉHO PODÍLU DLE NORMY .....	67
8.2	PRAKTICKÉ SESTROJENÍ A VYHODNOCENÍ KŘIVKY MATERIÁLOVÉHO PODÍLU PRO URČITÉ MATERIÁLY .....	69
8.2.1	Křivka materiálového podílu pro PA6GF30 - kotouč č.3 .....	69
8.2.2	Křivka materiálového podílu pro PA66 - kotouč č.3 .....	70
8.2.3	Křivka materiálového podílu pro pryž EPDM - kotouč č.3 .....	71

8.3	POROVNÁNÍ KŘIVEK MATERIÁLOVÉHO PODÍLU PRO RŮZNÉ MATERIÁLY A RŮZNÉ KOTOUČE.....	71
8.3.1	Kotouč č.1 - 99BA 46 J 9 V .....	72
8.3.2	Kotouč č.2 - 96A 46 M 8 V 01 .....	73
8.3.3	Kotouč č.3 - 49C 100 J 10 V .....	74
8.3.4	Kotouč č.4 - 99SA3 60 K 9 V .....	75
8.4	POROVNÁNÍ KŘIVEK MATERIÁLOVÉHO PODÍLU PŘI KONSTANTNÍM ÚBĚRU A KONSTANTNÍ RYCHLOSTI .....	76
8.5	POROVNÁNÍ PARAMETRŮ DRSNOSTI $R_A$ .....	77
<b>9</b>	<b>STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ.....</b>	<b>80</b>
9.1	MODEL ČÍSLO 1 .....	80
9.2	MODEL ČÍSLO 2 .....	82
9.3	VYHODNOCENÍ .....	86
9.3.1	Materiál PA6GF30 .....	87
9.3.2	Materiál pryž EPDM .....	89
9.3.3	Materiál PA66 .....	90
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>91</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>92</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>94</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>97</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>100</b>



## ÚVOD

Broušení se řadí mezi historicky nejstarší metody obrábění. Patří mezi dokončovací metody obrábění, za účelem získání vysoké přesnosti a vysoké jakosti povrchu. U nástrojů pro broušení má každé zrno brusiva jiný geometrický tvar. Zrna jsou v brousícím nástroji umístěna náhodně a jsou spojena pojivem. Mezi zrny a pojivem se vyskytují volná místa – póry. Pro broušení je charakteristické, že je současně v záběru velké množství zrn (břitů), která odebírají třísky velmi malých průřezů různých velikostí. Úhel čela zrna je zpravidla negativní. Řezné rychlosti při broušení jsou mnohonásobně vyšší než u soustružení. Pro dosažení větší jakosti povrchu se používá leštění, kterým se odstraňují drobné nerovnosti, docílí se zrcadlový lesk a vysoká jakost obrobeného povrchu až  $Ra = 0,1 \mu\text{m}$ . Na rozdíl od broušení se jedná o malý úběr materiálu a dochází proto pouze k odstranění vrcholků nerovností po předchozím obrábění.

Broušení se převážně používá k dokončování povrchu u železných a neželezných kovů, sporadicky pro broušení plastů. Vědecké práce na téma broušení plastů a obzvláště termoplastů se vyskytují ojediněle. Tato práce se snaží přinést nové poznatky z této oblasti a klade si za cíl definovat technologické podmínky výrazně ovlivňující jakost povrchu po broušení vybraných plastů.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 OBROBITELNOST

Obrobitelností nazýváme souhrn vlastností jednotlivých materiálů, které komplexně určují, jak snadno a s jakým výsledkem se daný materiál obrábí. Obrobitelnost ovlivňuje řada faktorů, nejvýznamnější jsou chemické složení materiálu, fyzikální a mechanické vlastnosti, struktura materiálu a způsob výroby polotovaru. [16]

Kritéria určující obrobitelnost jsou velikost řezné rychlosti, velikost řezného odporu, jakost opracované plochy, utváření třísek při obrábění, stálost rozměrů.

### 1.1 Rozdělení obrobitelnosti

Podle způsobu a rozsahu hodnocení rozlišujeme absolutní, relativní a komplexní vyjádření obrobitelnosti. Absolutní obrobitelnost je vyjádřena absolutní hodnotou příslušného ukazatele obrobitelnosti. U relativní obrobitelnosti se porovnávají vlastnosti určitého materiálu s vlastnostmi materiálu etylénového nebo základního. Tento vztah poté vyjádříme převodovým číslem nebo indexem obrobitelnosti.

Absolutní obrobitelnost můžeme dále rozdělit na obrobitelnosti kinetickou, dynamickou a mikrogeometrickou. Při určování kinetické obrobitelnosti materiálu nástrojem z RO se využívá úkaz zvaný katastrofální opotřebení (nastává po dosažení určitého průměru při čelním soustružení). Mírou dynamické obrobitelnosti jsou řezná síla, kroutící moment nebo výkon potřebný k úběru obráběného materiálu a teplo. Mikrogeometrická obrobitelnost má význam zejména při dokončovacích operacích, protože na ní závisí jakost obráběného materiálu a přesnost lineárních rozměrů. [16]

## 1.2 Obrobitelnost plastů

Plastické hmoty podobně jako kovy mají rozličné fyzikální a mechanické vlastnosti, a proto mají různou obrobitelnost. Všechny plastické hmoty mají špatnou tepelnou vodivost. Proto je potřeba se v procese řezání postarat o odvádění tepla řezání.

Většina litých plastických hmot se obrábí lehce. Jejich obrobitelnost závisí na druhu plniva.

Hmoty s dřevěným, textilním nebo bavlněným plnivem se obrábí lehce, hmoty

s minerálními plnivými se obrábějí hůře.

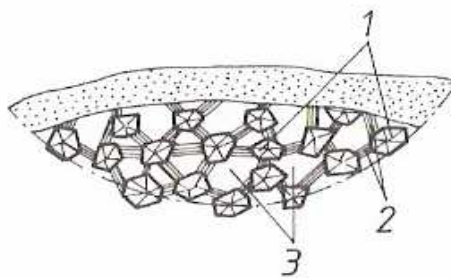
Termoplasty mají většinou vyhovující obrobitelnost. Při práci tupým nástrojem však mohou změkknout a nebo se rozetřít řezným nástrojem, jiné druhy zase praskají.

Vrstevnaté plastické hmoty se obrábějí obvykle velmi dobře. Mají také dostatečnou pevnost. Problémy způsobuje obrábění sklotextilových, azbestových a azbesto-bavlněných plastických hmot. Je třeba je obrábět spékaným karbidem nebo diamantem.

## 2 BROUŠENÍ

Broušení je dokončovací metoda obrábění rovinných, válcových nebo tvarových vnějších a vnitřních ploch nástrojem, jehož břity jsou tvořeny zrny tvrdých materiálů, navzájem spojených vhodným pojivem. [20]

Každé zrno má jiný geometrický tvar. Zrna jsou v brousícím nástroji umístěna náhodně a jsou spojena pojivem. Mezi zrny a pojivem se vyskytují volná místa – póry. Schematicky je struktura brousícího nástroje znázorněna na obr. 1.



Obr. 1. Struktura brousícího nástroje

1 – zrna brusiva, 2 – pojivo, 3 – póry

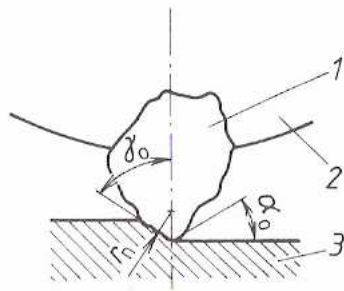
Kromě brousících nástrojů se pro broušení používá také volné brusivo. Volná zrna jsou k broušenému předmětu přitlačována deskou, trnem apod.

### 2.1 Podstata metody

Pro broušení je charakteristické, že je současně v záběru velké množství zrn (břitů), která odebírají třísky velmi malých průřezů různých velikostí. Úhel čela zrna  $\gamma_o$  je zpravidla negativní a poloměr ostří  $r_n$  je u běžných velikostí zrna 5 až 40  $\mu\text{m}$  (obr. 2).

Broušení se v současné strojírenské výrobě používá zejména na dokončovací obrábění ploch s vysokou přesností a vysokou jakostí obrobeneho povrchu, opracování materiálů s vysokou pevností a tvrdostí, kde je obrábění jinými nástroji obtížné, nebo nemožné (kalené oceli, keramické materiály apod.).

S vývojem výkonných brousících strojů a nástrojů se broušení uplatňuje i při hrubovacích operacích, kde objem odebraného materiálu ze jednotku času může být i vyšší, než např. u frézování.



Obr. 2. Tvar zrna  
brousícího kotouče

1 – zrno, 2 – brousící kotouč, 3 – obrobek,  $\alpha_o$  – ortogonální úhel hřbetu,  
 $\gamma_o$  – ortogonální úhel čela,  $r_n$  – poloměr ostří

## 2.2 Nástroje

Nástroje na broušení jsou brousící kotouče, segmenty, kameny a pásy (stále častěji v některých případech nahrazují broušení brousícími kotouči), obsahující zrna brusiva ve vhodném pojivu. [20]

Zrna brusiva jsou:

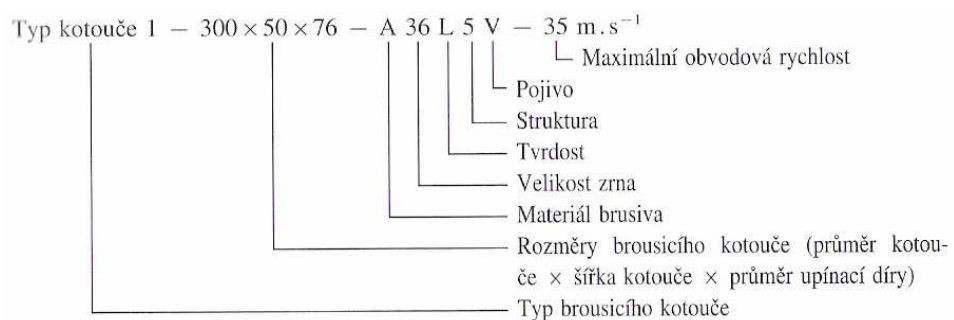
- volná (brousící a leštící pasty a prášky)
- vázaná
  - a) v tuhých nebo pružných tělesech (brousící kotouče, brousící tělíška, superfinišovací a honovací kameny, brousící a obtahovací kameny a segmenty, apod.)
  - b) nanesená a zakotvená na brousících páslech a brousících a leštících plátnech a papírech.

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

Nejčastěji používanými brousícími nástroji jsou brousící kotouče nejrůznějších tvarů a velikostí. Charakteristické vlastnosti kotouče jsou dány jeho označením, které obsahuje:

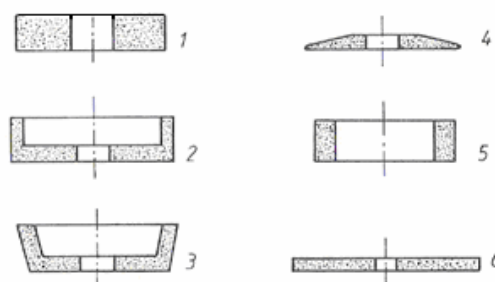
- typ brousícího kotouče (tvar a rozměry),

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



Obr. 3. Příklad označení brousícího kotouče

Příklady tvarů brousících kotoučů jsou uvedeny na obr. 4



Obr. 4. Některé tvary brousících kotoučů

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

### 2.3 Brousící materiály

K výrobě brousících nástrojů se jako řezný materiál používá brusivo a jako tmelící materiál pojivo.

Brusiva (ostřiva) jsou ostrohranná zrna různé velikosti (hrubá, střední, jemná a velmi jemná), jejichž ostré hrany vystupují v různých výškách nad povrch brousícího nástroje a tím vznikají břity s velmi různou geometrií, zpravidla s úhlem  $\delta > 90^\circ$ . Podle původu se brusiva dělí na přírodní a umělá.

Přírodní brusiva (pazourek, pískovec, smirek, křemen apod.) nemají v dnešní době, kromě přírodního diamantu, valný význam a používají se převážně k výrobě brousících plátén.

Umělá (syntetická) brusiva se používají výhradně k výrobě brousících nástrojů. [8]

Nejčastěji používané brousící materiály jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Tab. 1. Brousící materiály [20]

Materiál brusiva	Barva	Označení
<i>Přírodní:</i>		
Granát		G
Smirek		S
Pazourek		P
<i>Umělý:</i>		
Umělý korund $Al_2O_3$	bílý	99A
	růžový	98A
	hnědý	96A
	černý	85A
Karbid křemíku SiC	zelený	49C
	černý	48C
Karbid boru $B_4C$		B
Kubický nitrid boru $N_2B_3$		BN
Diamant (přírodní i umělý)		D

Umělý korund se vyrábí tavením bauxitu v obloukové peci při 2 000 až 2 400 °C, pak se drtí a třídí.

Karbid křemíku se vyrábí z křemičitého písku smíchaného s koksem v obloukové peci při 1 800 až 2 200 °C.

Karbid bóru se vyrábí v elektrických pecích, výchozí surovinou je kyselina boritá a křemík. KNB a syntetický diamant se vyrábějí ve speciálních zařízeních za vysokých teplot a tlaků.



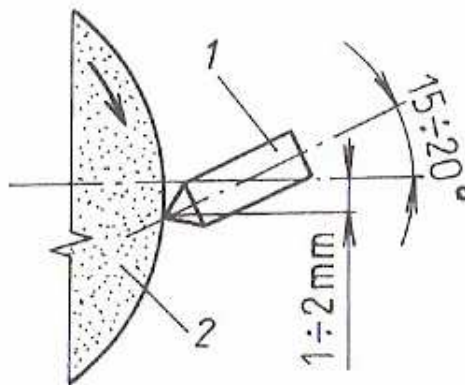
## 2.4 Vyvažování a orovnávání brusného kotouče

Vyvažování brousícího kotouče. Kotouč se otáčí vysokými otáčkami a případná nevyváženost by způsobovala chvění a zhoršení jakosti obrobeného povrchu. Proto se kotouče na trnu ve vyvažovacím stojánu se dvěma vodorovnými lištami staticky vyvažují pomocí pohyblivých vyvažovacích tělísek umístěných v přírubě kotouče. Velké kotouče se vyvažují i dynamicky. [20]

Orovnáváním brousícího kotouče se odstraňují nerovnosti kotouče a odstraňují se opotřebovaná zrna. Kotouč tak získá potřebný tvar a obnoví se jeho řezivost. Orovnáváním obnovujeme také původní geometrickou přesnost válcové plochy kotoučů při broušení obvodem kotouče, popř. rovinný tvar čela kotouče při broušení čelem kotouče. [21]

Používají se různé způsoby orovnávání:

- diamantové orovnávače (monokrystalické, polykrystalické, práškové, orovn. kladky)
- drtící orovnávací nástroje (kolečkové, kladkové)
- orovnávací kameny (SiC s tvrdým povrchem)
- kontinuální orovnávače (orovnávací kladka je trvale ve styku s brousícím kotoučem)



Obr. 5. Princip orovnávání

monokrystalickým diamantovým  
orovnávačem

1 – orovnávač, 2 – brousící kotouč

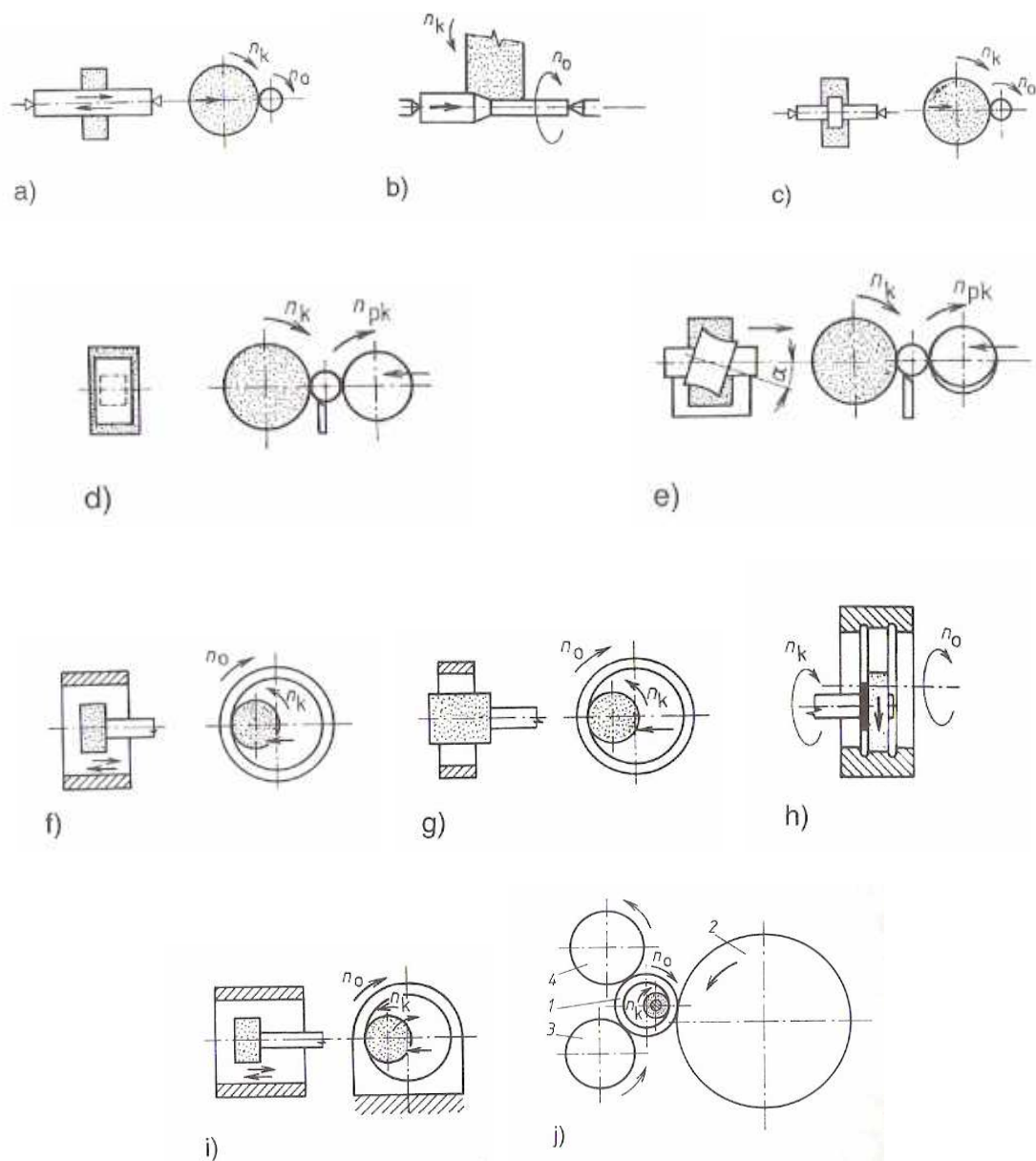
## 2.5 Metody broušení

Z hlediska tvaru broušených ploch a způsobu práce můžeme broušení rozdělit na:

- broušení do kulata vnější axiální (s podélným posuvem),  
axiální hloubkové,  
zápichové,  
bezhroté (zápichové nebo axiální);
- vnitřní axiální (s podélným posuvem),  
zápichové,  
planetové,  
bezhroté;
- broušení rovinné obvodem kotouče,  
čelem kotouče;
- broušení tvarové tvarovými kotouči,  
kopírovacím způsobem,  
na NC a CNC brousících strojích. [20]

### 2.5.1 Vnější axiální broušení do kulata

Je znázorněno na obrázku 6.a. Takto se vyrábí dlouhé součásti. U tuhých obrobků lze odebrat celý přídavek najednou tzv. axiálním hloubkovým broušením (obr. 6.b). V tomto případě musí mít brousící kotouč náběhovou kuželovou část, válcová část obrábí načisto. Podobně jako válcové plochy se brousí táhlé kuželové plochy, pracovní stůl brusky je však potřeba natočit. Zápichovým způsobem se obrábí krátké tuhé součásti (obr. 6.c), kdy se celý přídavek odebírá na jeden příčný posuv. Šířka brousícího kotouče musí být větší, než šířka broušené plochy obrobku. V závěru se přísuv zastaví a dojde k vyjiskření. [20]



Obr. 6. Broušení do kulata a ) axiální b ) axiální hloubkové  
 c ) zápichové d ) bezhroté zápichové e ) bezhroté axiální f ) podélné vnitřní  
 g ) zapichovací vnitřní h ) zapichování drážky i ) planetové j ) vnitřní bezhroté  
 1 – obrobek, 2, 3, 4 – podávací kladky

Bezhroté broušení se užívá při broušení válcových nebo i tvarových ploch. Je velmi produktivní a používá se zejména v sériové výrobě. Součástka není upnuta, ale vkládá mezi brousící a podávací kotouč a je opřena opěrkou. Podávací kotouč se otáčí pomalu tak, aby obvodová rychlost obrobku byla 20 až 40  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ . U součástí kratších, než je šířka brousícího kotouče se provádí bezhroté zápichové broušení. Osy obou kotoučů jsou rovnoběžné

(obr. 6.d). Dlouhé součásti se brousí průběžným broušením. Podávací kotouč má osu natočenou tak, aby vznikla složka síly v ose obrobku, která obrobek posouvá rychlostí asi 25 až 50 mm.s<sup>-1</sup> (obr. 6.e). [20]

### 2.5.2 Vnitřní axiální broušení do kulata

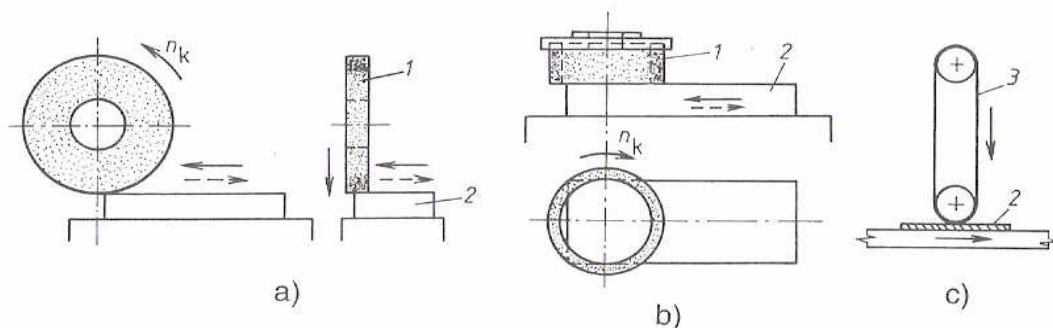
Provádí se brousícím kotoučem, jehož průměr je maximálně 0,9 průměru broušené díry. Obrobek se posouvá podélně ve směru osy (obr. 6.f). Při zápichovém broušení je šířka brousícího kotouče větší, než délka broušené plochy díry (obr. 6.g); užším kotoučem lze brousit i vnitřní drážky (obr. 6.h).

Díry ve velkých součástech se brousí planetovým způsobem. Součást je nehybná, brousící kotouč se otáčí, jeho osa se otáčí kolem osy díry a podélně se posouvá (obr. 6.i).

V hromadné výrobě, zejména při výrobě ložisek, se brousí vnitřní plochy bezhrotým způsobem. Součást je vedena podávacím kotoučem a dvěma opěrnými kotouči, příp. opěrnými lištami (obr. 6.j). [20]

### 2.5.3 Obvodové rovinné broušení

Je naznačeno na obr. 7.a. Obrobek koná vratný přímočarý pohyb a pokud je širší než brousící kotouč, posouvá se v úvrati ve směru osy kotouče. Pokud je obrobek užší, lze brousit zápichovým způsobem. Při odbrušování větších přídavků na velkých plochách se rovinné plochy brousí čelem kotouče. Vřetenou brusky má svislou osu (obr. 7.b). [20]



Obr. 7. Rovinné broušení

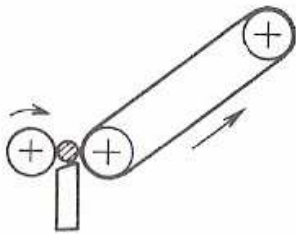
a) obvodem kotouče b) čelem kotouče c) brousícím pásem

1 – brousící kotouč, 2 – obrobek, 3 – brousící pás,  $n_k$  – otáčky brousícího kotouče

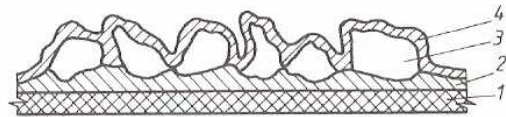
### 2.5.4 Broušení tvarových ploch

Tvarové plochy se brouší zápichovým způsobem tvarovými brousícími kotouči, nebo se musí kotouči udělit pohyb, odpovídající broušenému tvaru – buď kopírovacím způsobem nebo numerickým řízením brusky.

Broušení brousícím pásem je poměrně nová metoda (obr. 8). Umožňuje dosáhnout vysokou produktivitu práce a velmi dobrou jakost obrobeného povrchu. Uplatňuje se při broušení běžných materiálů i součástí z těžkoobrobitelných, vysoce legovaných ocelí a titanových slitin. Struktura pásu je zřejmá u obr. 9.



Obr. 8. Broušení brous. pásem



Obr. 9. Brousící pás

1 – nosný pás, 2 – pojivo, 3 – zrno brusiva, 4 - přetěr

Jako nosný pás se používá papír nebo textil. Brousící pás se vyrábí buď nasypáním brusiva na pás politý pojivem, nebo se brusivo nanáší v elektrostatickém poli. V druhém případě jsou zrna orientována delší osou kolmo k pásu a řezivost se tím zvýší. Pokud se při broušení používá chladící kapalina, je pojivo i přetěr z umělé pryskyřice. Při pásovém broušení se používá v zásadě stejných řezných rychlostí jako u brousících kotoučů. [20]

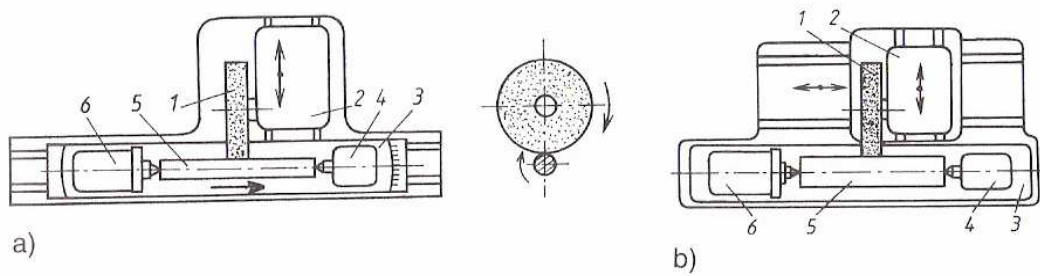
## 2.6 Stroje

Brusky se dělí podle prováděných operací na:

hrotové	s posuvným stolem
	s posuvným vřeteníkem
na díry	
bezhrté	pro vnější broušení
	pro vnitřní broušení
rovinné	jednostojanové pracující obvodem kotouče
	pracující čelem kotouče
	dvoustojanové
nástrojařské	
pásové	
speciální	na jemné broušení
	na závity
	na ozubení
	na klikové hřídele apod. [20]

### 2.6.1 Hrotové brusky

Používají se k broušení rotačních ploch (válcových, kuželových, tvarových) zápichovým nebo axiálním broušením. Vyrábějí se ve dvou typech, buď s posuvným stolem (obr. 10.a) u menších a středních brusek, nebo s posuvným vřeteníkem (obr. 10.b) u velkých brusek.

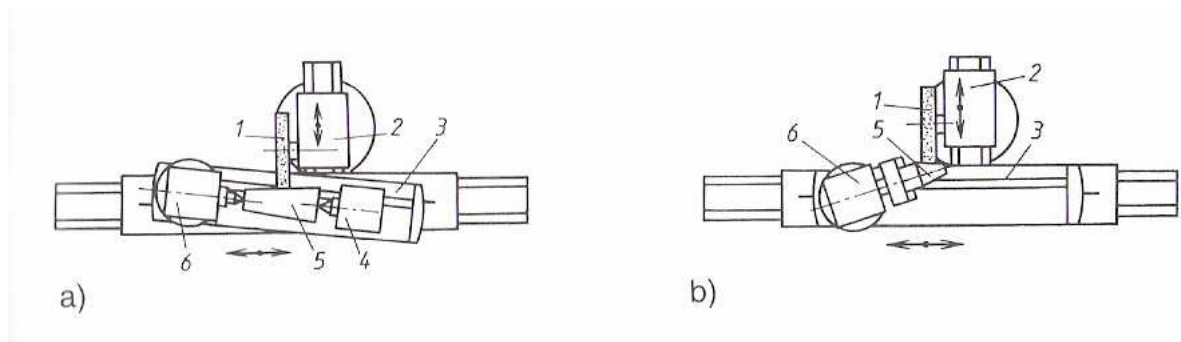


Obr. 10. Hrotové brusky a) s posuvným stolem b) s posuvným vřeteníkem  
 1 – brousící kotouč, 2 – brousící vřeteník, 3 – stůl, 4 – koník, 5 – obrobek, 6 – vřeteník

U brusky s posuvným stolem, na kterém je pracovní vřeteník a koník, koná stůl přímočarý vratný pohyb, brousící vřeteník koná přířuv.

U brusky s posuvným vřeteníkem se obrobek pouze otáčí, posuv a přířuv koná brousící vřeteník.

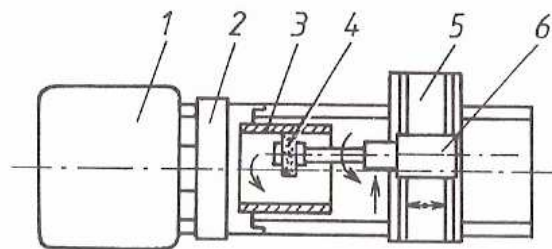
Natočení vrchní části stolu umožňuje brousit dlouhé kuželové plochy (obr. 11.a), natočení vřeteníku krátké kuželové plochy (obr. 11.b). S přídatným zařízením lze na hrotové brusce brousit díry.



Obr. 11. Broušení kuželových ploch  
 a) natočením pracovního stolu b) natočením pracovního vřeteníku  
 1 – brousící kotouč, 2 – brousící vřeteník, 3 – stůl, 4 – koník, 5 – obrobek, 6 – vřeteník

### 2.6.2 Brusky na díry

Umožňují brousit válcové, kuželové i tvarové rotační plochy (obr. 12). Do sklíčidla pracovního vřeteníku se upíná obrobek. Brousící vřeteník má podélný i příčný posuv. Protože je průměr brousícího kotouče malý, jsou otáčky vřetene velmi vysoké. Do 25 000 otáček za minutu se používá pohon vřetene ramenem od elektromotoru, do 120 000 otáček za minutu se používají speciální vysokootáčková vřetena.



Obr. 12. Bruska na díry

1 – pracovní vřeteník, 2 – sklíčidlo, 3 – obrobek, 4- brousící kotouč, 5 – suport,  
6 – brousící vřeteník

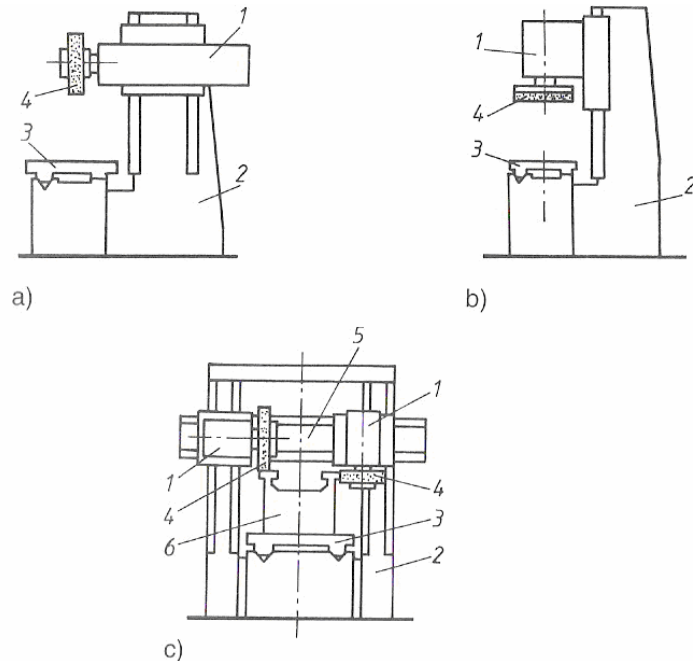
### 2.6.3 Bezhruté brusky

Používají se v sériové a hromadné výrobě na broušení vnějších a vnitřních válcových a tvarových ploch. Jejich princip je zřejmý z obr. 6.d, e . Aby byl obrobek unášen, musí být tření mezi podávacím kotoučem a obrobkem větší, než obvodová síla mezi obrobkem a brousícím kotoučem. Pro vnitřní broušení musí být obrobek předem obroušen na vnějším povrchu. [20]



### 2.6.4 Rovinné brusky

Jsou určeny pro broušení rovinných ploch. Pracují buď obvodem nebo čelem kotouče. Obrobek se upíná na magnetickou upínací desku, nebo na stůl brusky pomocí upínek nebo svěráků. Schematicky jsou typy rovinných brusek znázorněny na obr. 13.



Obr. 13. Rovinné brusky a ) bruska pracující obvodem kotouče  
 b ) bruska pracující čelem kotouče  
 c ) dvoustojanová bruska

1 – vřeteník, 2 – stojan, 3 – pracovní stůl, 4 – brousící kotouč, 5 – příčník, 6 - obrobek

### 2.6.5 Nástrojařské brusky

Jsou určeny pro ostření řezných nástrojů. Brousící vřeteník může konat svislý pohyb a může se natáčet, stůl koná svislý pohyb, podélný a příčný pohyb a může se natáčet. Brusky jsou vybaveny rozsáhlým příslušenstvím. Mezi speciální nástrojařské brusky patří brusky na ostření soustružnických nožů, vrtáků, závitníků a další. [20]

### 2.6.6 Pásové brusky

Používají se pro broušení rovinných, rotačních i tvarových ploch. Jejich výhodou je velký výkon broušení, dobré využití brusiva, malé teplotní ovlivnění broušeného povrchu a snadná výměna brousícího pásu.

## 2.7 Řezné podmínky

Řezná rychlost (obvodová rychlost kotouče) se volí podle způsobu broušení a podle druhu pojiva. U běžného keramického pojiva se pro vnější broušení používá řezných rychlostí 30 až 35 m.s<sup>-1</sup>, u moderních kotoučů do 100 m.s<sup>-1</sup>. U řezacích kotoučů s pryskyřičným pojivem, vyztužených skelnými vlákny, lze použít rychlosti i přes 100 m.s<sup>-1</sup>. Pro rychlostní broušení se vyrábějí speciální kotouče s keramickou vazbou, umožňující brousit rychlostí až 120 m.s<sup>-1</sup>. Podélný posuv obrobku při rotačním broušení se volí 0,3 až 0,5 šířky kotouče, při rovinném broušení až 0,7 šířky kotouče. Radiální přísuv kotouče do řezu se při hrubování volí 0,01 až 0,1 mm na zdvih, při broušení načisto do 0,01 mm.

Pro zpřesnění rozměru broušené plochy se provede tzv. vyjiskřování, kdy se bez přísuvu ještě několikrát obrobek brousícím kotoučem přebrousí. Tím se vyrovnají pružné deformace soustavy stroj – nástroj – obrobek – upínač, způsobené řeznými silami a tepelnou roztažností. Obvodová rychlost obrobku se, v závislosti na materiálu obrobku a požadované jakosti povrchu, volí 20 až 40 m.min<sup>-1</sup>. [20]

## 2.8 Chladící kapaliny

Vysoká řezná rychlost při broušení způsobuje, že v místě řezu vzniká značné množství tepla. Je proto ve většině případů při broušení nutné použít chladící kapalinu, která má tři funkce:

- odvádí část tepla, vzniklého při broušení,
- snižuje tření v místě řezu a tím i množství vzniklého tepla,
- odplavuje vzniklé třísky i odlomené části zrn kotouče.

Chladicí kapalina by měla být přiváděna v dostatečném množství. Při běžném broušení asi 1 litr kapaliny za minutu na 1 mm šířky kotouče. Při rychlostním broušení je třeba přivádět kapalinu pod vysokým tlakem až 2 MPa a ve větším množství.

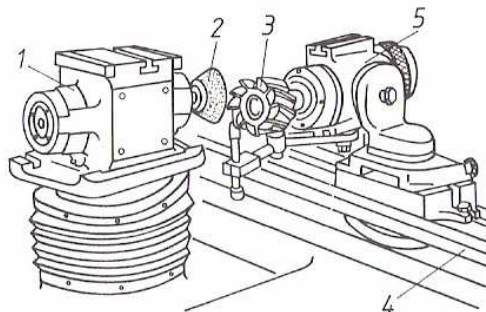
Pro běžné broušení se používá roztoků elektrolytů a emulzí, pro náročnější broušení se používají speciální chladicí kapaliny a řezné oleje určené pro broušení.

## 2.9 Ostření řezných nástrojů

Řezné nástroje se v procesu obrábění otupují, tím mění svůj tvar břítu a zhoršuje se jejich řezivost. Ostřením se řeznému nástroji obnovuje optimální tvar a geometrie břítu. Nástroje se ostří na speciálních bruskách na nástroje, které umožňují i broušení složitých ploch řezných částí nástrojů.

Pro ostření nástrojů z rychlořezných ocelí se používají brousící kotouče z umělého korundu a stále častěji z kubického nitridu boru. Pro ostření nástrojů ze slinutých karbidů se používají brousící kotouče z karbidu křemíku a dnes již velmi často diamantové kotouče. Na obr. 14 je uveden příklad ostření čelních zubů frézy na univerzální nástrojové brusce.

Začínají se používat nástrojové brusky s CNC řízením, umožňující brousit i komplikované tvarové plochy. To umožňuje dále optimalizovat tvary břitů nástrojů a zvyšovat jejich řezivost. S brousícími kotouči z kubického nitridu boru a diamantovými kotouči jsou tyto brusky navíc velmi výkonné. [20]



Obr. 14. Ostření čelních zubů frézy  
na univerzální nástrojové brusce

1 – vřeteník, 2 – brousící kotouč, 3 – ostřený nástroj, 4 – pracovní stůl, 5 – dělicí přístroj

## 2.10 Dosahované parametry při broušení

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

V tab. 2. jsou uvedeny přesnosti rozměrů a jakosti obrobené plochy, dosahované při různých způsobech broušení. [20]

Tab. 2. Přesnost a jakost ploch obrobených broušením

Tvar broušené plochy	Způsob broušení	Přesnost rozměrů IT	Jakost obrobené plochy Ra ( $\mu\text{m}$ )
Rovinná	hrubování	9 až 11	0,8 až 6,3
	čelem	8 až 11	0,8 až 3,2
	obvodem		
	načisto		
Vnitřní válcová	čelem	5 až 7	0,2 až 1,6
	obvodem	5 až 7	0,2 až 1,6
	jemné broušení	3 až 5	0,025 až 0,4
Vnější válcová	hrubování	9 až 11	1,6 až 3,2
	načisto	5 až 7	0,4 až 1,6
	jemné broušení	3 až 6	0,05 až 0,4

### 3 LEŠTĚNÍ

Leštění je operace obrábění, kterou se odstraní drobné nerovnosti, docílí se zrcadlový lesk a vysoká jakost obrobeného povrchu (až  $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ ). Na rozdíl od broušení se jedná o malý úběr materiálu a dochází proto pouze k odstranění vrcholků nerovností po předchozím obrábění. Leštění lze provádět ručně nebo strojně. [20]

#### 3.1 Podstata metody

Při mechanickém leštění je materiál obrobku odebírán mechanickým působením zrn tvrdých brousících materiálů, která jsou pevně uchycena na leštícím nástroji, nebo volně nanesena mezi nástroj a obrobek.

Chemické leštění je založeno na úběru materiálu chemickým působením vhodného roztoku na povrch obrobku. Dochází k chemické reakci, při které je nejdříve odebírán materiál na vrcholcích nerovností povrchu.

Elektrochemické leštění – úběr materiálu se děje elektrochemickým rozpouštěním vrcholků nerovností povrchu. Obráběná součást je anoda ponořená do vhodného elektrolytu mezi vhodně umístěné katody.

#### 3.2 Mechanické leštění

##### 3.2.1 Mechanické leštění kotouči

Před leštěním se povrch kotouče nasytí leštícím prostředkem některým z těchto způsobů:

- nanesením směsi oleje a brusiva,
- přidáním zrn brusiva do základního materiálu kotouče,
- nanesením leštících past,
- poléváním kotouče po dobu leštění leštícím prostředkem.

Parametry ovlivňující výsledek leštění: druh a zrnitost použitého brusiva, obvodová rychlost kotouče, tlak součásti na kotouč, materiál kotouče a jeho vlastnosti, druh a množství mazací nebo chladicí kapaliny.

Obvodová rychlost kotouče  $v_o$  se volí v rozsahu 25 až 40  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , při leštění složitých tvarů je  $v_o = 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , při leštění slitin mědi, hliníku, zinku, olova a kadmia je  $v_o = 18$  až  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

### 3.2.2 Mechanické leštění otáčejícími se kartáči

Optimální pracovní podmínky závisí na charakteru práce, výchozí a požadované jakosti povrchu, materiálu obrobku, druhu kartáče a použitého stroje.

Obvodová rychlost kartáče  $v_o$  se pohybuje v rozmezí 10 až 60  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , maximální hodnota je omezena teplotou na povrchu součásti, která nemá být větší než  $60^\circ\text{C}$ . Nejlepší jakost povrchu se dosahuje při cca 25  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , závisí však na materiálu činné části nástroje. Orientační hodnoty, tab. 3.:

Tab. 3. Orientační hodnoty pro mechanické leštění otáčejícími se kartáči

Materiál činné části nástroje	Obvodová rychlost kartáče $v_o$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
Měkké nekovové kartáče bez leštící pasty	30 až 40
Kovové kartáče pro jemné leštění	20 až 35
Kovové kartáče pro hrubování	15 až 25
Zaoblování ostrých hran kovovými kartáči	50 až 60
Čištění svarů kovovými kartáči	30 až 45

### 3.2.3 Mechanické pásy

Optimální pracovní podmínky závisí na měrném tlaku mezi pásem a leštěným povrchem, na materiálu a rozměrech obrobku, na obvodové rychlosti a šířce pásu.

Obvodová rychlost pásu  $v_o$  se volí v rozsahu 11 až 40  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , optimální hodnota  $v_o=25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Měrný tlak mezi pásem a leštěným povrchem se volí v rozsahu 0,05 až 0,0075 MPa. Rozměry leštícího pásu: šířka 50 až 250 mm, délka 1 500 až 3 100 mm. Leštění pásy je dokonalejší a výkonnější než leštění kotouči. [20]

### 3.3 Chemické leštění

Průběh a výsledek chemického leštění závisí na dokonalém očištění povrchu obrobku, složení a koncentraci roztoku, na jeho teplotě, času leštění a množství kovu rozpuštěného v roztoku.

Optimální teplota lešticího roztoku závisí na materiálu obrobku a pohybuje se v rozmezí 70 až 90°C. Materiál se rozpouští na všech plochách rovnoměrně, přičemž vznikají plyny, které musí mít možnost volně z roztoku odcházet. Proto je třeba pozorně volit polohu obrobku v roztoku.

Chemické leštění se používá u součástí se složitými a členitými tvary, zejména při sériové a hromadné výrobě. Výhodou je jednoduché zařízení a rychlost leštění. Nevýhodou práce je s chemikáliemi, vysoké náklady na regeneraci roztoku a na výrobní zařízení. [20]

### 3.4 Elektrochemické leštění

Postup: odmaštění povrchu organickým (benzin, aceton) nebo alkalickým rozpouštědlem (vídeňské vápno) – upevnění v lešticím zařízení – elektroodmaštění v alkalickém roztoku – mytí v horké a studené vodě – vlastní leštění – mytí ve studené tekoucí vodě – neutralizace v alkalickém roztoku – mytí v teplé a studené vodě – sušení.

Leštit lze rovinné, vnější i vnitřní rotační a tvarové plochy. Leští se lopatky turbín, dutiny forem a zápustek, střížné a lisovací nástroje, ruční nástroje (kleště, klíče apod.), ozubená kola, součásti armatur, vačkové hřídele, klikové hřídele, nádobí, jídelní příbory, kapesní nože, dekorativní předměty, medaile, apod.

Leštit lze předměty zhotovené z hliníkových slitin, korozivzdorných ocelí, kalených nástrojových ocelí, konstrukčních ocelí, mosazi, bronzů a dalších kovových materiálů.

Součásti se leští:

- pro zlepšení vzhledu povrchu,
- před další úpravou povrchu ( např. před nanášením různých povlaků ),
- po galvanicky vyloučeném povlaku s cílem získání vysoce lesklého povrchu.

Volba způsobu leštění dané součásti a výběr pracovních podmínek se řídí materiálem součásti, stavem povrchu před leštěním, tvarem, rozměry a hmotností součásti, počtem leštěných součástí, požadavkem na kvalitu vyleštěné plochy a použitým strojem.

### 3.5 Nástroje

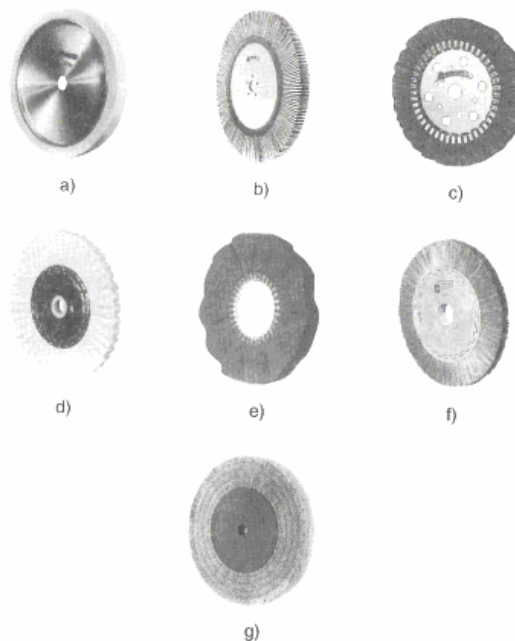
Nástroj pro mechanické leštění se skládá z leštícího nástroje a leštícího prostředku, který je mezi povrchem nástroje a povrchem obrobku.

Jako leštící prostředky se používají zrna tvrdých brousících materiálů, která jsou buď pevně uchycena na činné ploše nástroje, nebo se volně pohybují mezi povrchem nástroje a povrchem obrobku. Leštící prostředky: kysličník hlinitý, karbid křemíku, křída, oxid chromitý, oxid železitý, vídeňské vápno, tripolit, stearín, vosk, parafin, lůj, kaolin, oxid olovnatý.

Zrnitost brousících zrn bývá u leštících kotoučů 8; 6,5 a 4, nebo se jedná o mikroprášky, u leštících pásů se používá zrnitost 80 až 5. Leštící prostředky se dodávají buď jako volná zrna, nebo ve formě speciálně připravovaných leštících past. [20]

Leštící nástroje jsou kotouče, kartáče, pásy a speciální nástroje.

Leštící kotouče jsou zhotoveny z plsti, skládaných tkanin, bavlny kůže, gumy, dřeva, korku, papíru, lisované bavlny, kovu apod. (obr. 15).

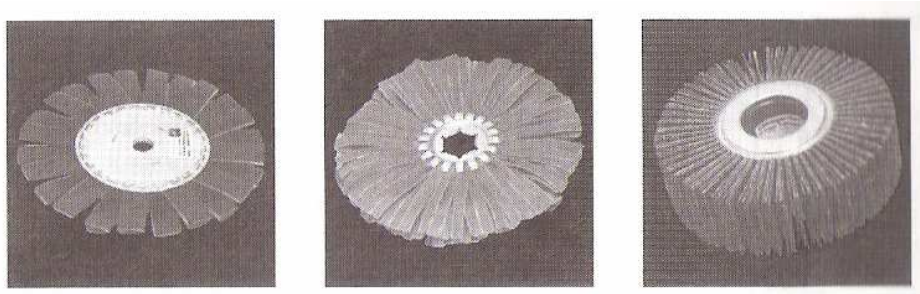


Obr. 15. Leštící kotouče

a), b) bavlna, c) guma, d) příze, e) nylonová tkanina, f) nylonová vlákna, g) vlněná tkanina



Leštící kartáče, prstence a válce mají střed kotouče vyroben z kovu, dřeva, plastu, popř. z gumy, do kterého jsou pevně uchycena vlákna z ocelového drátu (průměr 0,1 až 1,2 mm), kapronu, nylonu, silonu, přírodních vlasů nebo žíní, vlákniny, bavlněné příze, drátů z bronzu, ze zvířecích štětín apod. Uspořádání vláken může být radiální, tangenciální, v řadách, ve šroubovici nebo nahodilě nepravidelné (obr. 16).



*Obr. 16. Leštící kartáče – příklady uspořádání leštících elementů*

Leštící pásy jsou vyráběny z kapronu, bavlněné tkaniny, gumy, silonu, rostlinných tkanin apod.

U chemického leštění je nástrojem chemický roztok různého složení a koncentrace. Základní složky jsou kyselina sírová, dusičná, chlorovodíková, fosforečná apod.

### **3.6 Stroje**

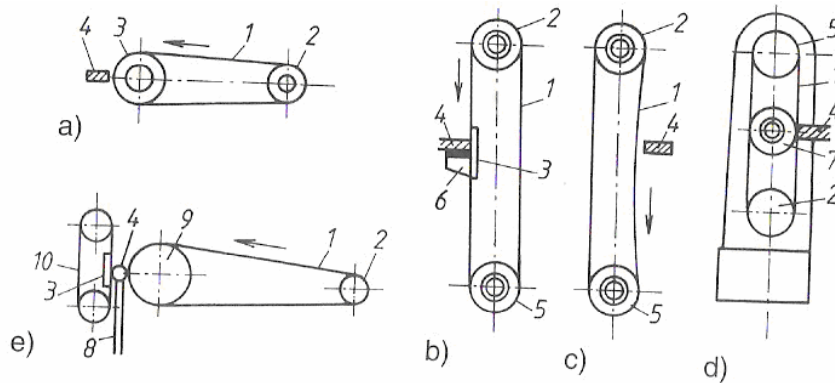
Mechanické leštění může být strojní nebo ruční.

Při ručním leštění se buď obrobek drží v ruce a leštící nástroj je upevněn na hřídeli stroje (např. leštění vzorků pro metalografii), nebo je leštící nástroj upnut v ruční elektrické nebo pneumatické brusce (používá se především při leštění velkých součástí). [20]

Stroje pro strojní leštění jsou:

- univerzální leštičky (pro kartáče lze použít bezhroté brusky), princip na obr. 17,
- speciální jedoučelové leštičky s poloautomatickým nebo plně automatickým pracovním cyklem,
- leštící linky složené z jednotlivých pracovních jednotek.

U chemického leštění je strojem speciální vana o obsahu 5 až 1 500 litrů, jejíž vnitřní stěny jsou opatřeny povlakem (z olova, smaltu, plastu, okna, porcelánu, keramiky, kameniny apod.), který odolává působení chemického roztoku.



Obr. 17. Principy strojů s leštícími pásy

a) kontaktní leštění, b) leštění s opěrnou deskou, c) leštění volným pásem,  
d) tvarové kontaktní leštění, e) bezhroté leštění

1 – leštící pás, 2 – napínací kladka, 3 – opěrný váleček, 4 – obrobek, 5 – hnací kladka,  
6 - prac. stůl, 7 – tvarový elastický váleček, 8 – opěrka, 9 – kontaktní váleček,  
10 – pomocný pás

### 3.7 Dosahované parametry

Mechanické leštění:

- jakost vyleštěného povrchu  $Ra = 0,1$  až  $0,4 \mu\text{m}$ ,
- přesnost rozměrů: válcové součásti max.  $0,01 \mu\text{m}$ ,  
velké tvarové součásti max.  $0,1 \mu\text{m}$ ,  
rovinné plochy max.  $0,05 \mu\text{m}$ ,  
při bezhrotém leštění max.  $0,02 \mu\text{m}$ ,
- střední úběr materiálu 20 mm za 15 s.

Chemické leštění:

- jakost vyleštěného povrchu  $R_a = 0,2$  až  $0,4 \mu\text{m}$ ,
- střední intenzita rozpuštěného kovu: korozivzdorné oceli (CrNi)  $0,2$  až  $0,3 \text{ g.dm}^{-3}$ ,  
hliníkové slitiny  $1 \text{ mm.min}^{-1}$ ,
- nezlepšuje geometrický tvar obrobku,
- nelze vytvořit ostré hrany a přechody mezi dvěma plochami,
- úběr probíhá rovnoměrně ve všech směrech. [20]

Tab. 4. Dosahované parametry při leštění

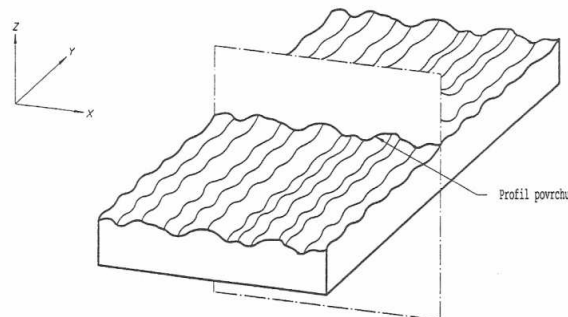
Druh obrábění	Drsnost povrchu $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Stupeň přesnosti IT	Rychlost obrábění ( $\text{m.min}^{-1}$ )	Specifický tlak nástroje (MPa)	Teplota povrchu ( $^{\circ}\text{C}$ )	Přídavek na průměr ( $\mu\text{m}$ )
Leštění kotouči	0,1 až 0,4	4 až 7	600 – 1 800	0,1 až 0,4	30 až 80	20 až 100
Leštění pásy	0,1 až 0,4	3 až 6	600 – 2 400	do 0,1	30 až 70	10 až 50
Chemické leštění	0,1 až 0,4	5 až 8	–	–	20 až 150	20 až 200
Elektrochemické leštění	0,1 až 0,8	6 až 9	–	–	30 až 90	30 až 300

## 4 KONTROLA STRUKTURY POVRCHU

Kontrola struktury povrchu je obecně velmi složitá a správnost výsledků kontroly je závislá na splnění řady předpokladů. Provádění kontroly mimo rámec definovaných v GPS (Geometrical Product Specifications - geometrické požadavky na výrobky) může poskytnout pouze informativní výsledky. [18]

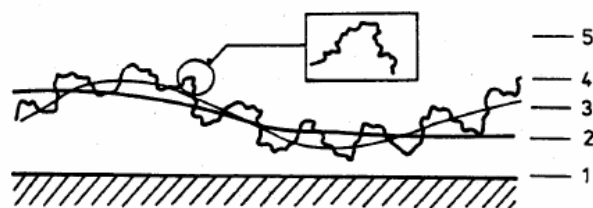
### 4.1 Profil nerovnosti povrchu

Libovolná technologická metoda, použitá při realizaci povrchu technických ploch zanechává nerovnosti, které mají zásadní význam při funkci těchto ploch. Nerovnosti na povrchu představují prostorový útvar, který by bylo velmi obtížné posuzovat. Problém posuzování nerovností (struktury povrchu) se řeší redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu (obr. 18). V rovině řezu se získá profil, který je základním zdrojem informace pro posuzování struktury povrchu.



Obr. 18. Profil povrchu

Reálné součásti a tělesa mají odchylky tvaru, polohy a drsnost, viz obr. 19.



Obr. 19. Schématické znázornění geometrie povrchu [24]

1 – ideálně rovný povrch, 2 – odchylky tvaru a polohy, 3 – vlnitost povrchu,  
4 - mikroskopické nerovnosti, 5 – submikroskopické nerovnosti

Metodika objektivního posuzování a hodnocení nejdůležitější složky struktury povrchu – drsnosti povrchu má delší historii. Nejdříve byl využíván sinusový model nerovností, kdy parametrem pro hodnocení byla veličina  $H_{sk}$  (analogie efektivní hodnoty střídavého proudu). V další etapě vývoje byla přednostně zaveden parametr  $R_a$  (analogie střední hodnoty střídavého proudu) spolu s některými dalšími parametry.

V souvislosti s novým pojetím geometrické specifikace výrobků (GPS) byl vytvořen dokonalejší systém posuzování a hodnocení struktury povrchu. Systém je ošetřen sadou norem, které jsou v jednotlivých odstavcích uvedeny.

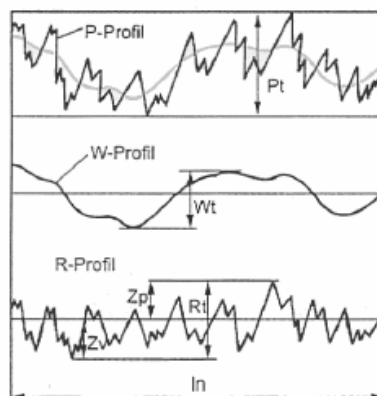
Struktura povrchu je členěna na složky podle rozteče příslušných nerovností. Jedná se o složku s nejmenší roztečí tvořící drsnost povrchu, složku nazvanou vlnitost povrchu a složku s největší roztečí nerovností určenou základním profilem.

Norma ČSN EN ISO 4287 definuje následující geometrické parametry: [18]

***P*** – parametr - parametr vypočítaný ze základního profilu. Je to nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými mezními přímkami z nefiltrovaného profilu povrchu uvnitř měřené délky  $l_n$ .

***R*** – parametr - parametr vypočítaný z profilu drsnosti. Je to svislá vzdálenost od nejvyšší špičky k nejhlubší rýze filtrovaného profilu drsnosti uvnitř měřené délky  $l_n$ .

***W*** – parametr - parametr vypočítaný z profilu vlnitosti. Je to vzdálenost mezi nejvyšším a nejhlubším bodem vyrovnaného profilu vlnitosti (drsnost odfiltrována) uvnitř měřené délky  $l_n$ .



Obr. 20. Parametry *P*, *R*, *W* [24]

V novém systému je základním zdrojem informace profil (jedná se o profilovou metodu).

Jsou definovány:

Profil povrchu – jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny.

Snímaný profil – jako geometrické místo středů snímacího hrotu stanovených parametrů.

Od tohoto profilu jsou odvozeny všechny ostatní profily.

Referenční profil – jako dráha, po které se snímač, podél vedení, pohybuje v rovině řezu.

Úplný profil – jako číslíková forma snímaného profilu vzhledem k referenčnímu profilu.

Základní profil – jako úplný profil po aplikaci krátkovlnného filtru  $\lambda_S$ . Základní profil reprezentuje základnu pro číslíkové zpracování profilu pomocí filtrů profilu a pro výpočet parametrů profilu.

Základní profil – je základem pro hodnocení parametrů základního profilu. Tvar získaný specifikovaným typem metody nejmenší čtverců není základního profilu a měl by být vyloučen před filtrací.

Zbytkový profil – jako základní profil získaný snímáním ideálně hladkého a rovného povrchu (optická rovina). Zbytkový profil je složen z úchylek vedení, vnějších a vnitřních poruch a z úchylek vzniklých při přenos profilu.

Profil drsnosti – jako profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu  $\lambda_C$ . Profil drsnosti je základem pro hodnocení parametrů profilu drsnosti.

Profil vlnitosti – jako profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu  $\lambda_f$  a filtru profilu  $\lambda_C$  na základní profil. [18]

## 4.2 Filtry profilu

Jsou definovány (obr. 21):

Filtr profilu – jako filtr rozdělující profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky.

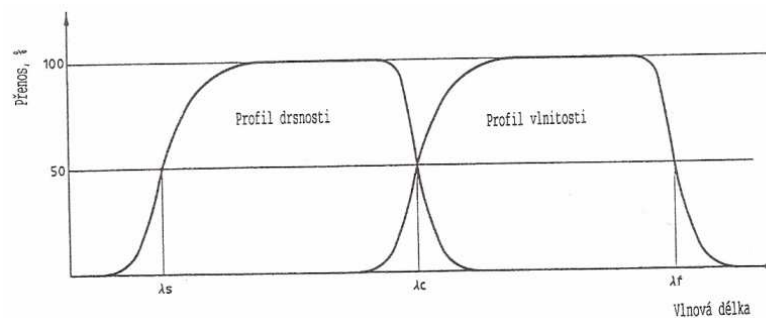
$\lambda_s$  filtr profilu – jako filtr definující rozhraní mezi drsnostmi a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu.

$\lambda_c$  filtr profilu – jako filtr určující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti.

$\lambda_f$  filtr profilu – jako filtr určující rozhraní mezi vlnitostmi a delšími složkami vln přítomnými na povrchu.

Fázově korigovaný filtr profilu – jako filtr povrchu, který nezpůsobuje fázový posuv vedoucí k asymetrickému zkreslení povrchu.

Z uvedeného vyplývá, že základním prvkem prostředků na měření parametrů struktury povrchu je filtr profilu, jehož charakteristiky bezprostředně ovlivňují číselné hodnoty výsledků měření. Dosud byl normalizován filtr profilu typu 2RC (jedná se o dvojitý analogový RC filtr s oddělenými články, se sklonem charakteristiky 12 dB/oct, s fázovým posuvem  $60^\circ$  na hodnotě cut-off a s přenosem 0,707 na hodnotě cut-off nebo o číslicovou implementaci téže charakteristiky). Nedostatkem tohoto typu filtru je velké zkreslení způsobené zejména fázovým posuvem. Nedostatky lze odstranit použitím fázově korigovaného profilu. [18]



Obr. 21. Filtr profilu

Fázově korigovaný filtr, zavedený normou ČSN ISO 11562. Váhová funkce fázově korigovaného filtru má rovnici Gaussovy funkce hustoty. Přenosová charakteristika filtru pro

dlouhovlnné složky profilu (střední čáry) odpovídá Fourierově transformaci váhové funkce. Přenosová charakteristika krátkovlnných složek profilu je doplňkem přenosové charakteristiky dlouhovlnných složek profilu.

Pro fázově korigované filtry nejsou udány žádné hodnoty tolerance přenosu. Místo tolerancí se uvádí grafické znázornění úchylek realizovaného filtru od Gaussova filtru v procentuálních hodnotách, v rozsahu vlnových délek od  $0,01 \lambda_{CO}$  do  $100 \lambda_{CO}$ . [18]

K zavedení fázově korigovaného filtru a k jeho normalizaci vedly následující důvody:

- eliminace ignorování oscilujících váhových funkcí
- filtrovaný profil není zkreslován v důsledku fázového posuvu
- parametry v oblasti mezní vlnové délky se stávají měřitelné s větší věrohodností
- výrobci přístrojů musí dodat grafickou reprezentaci realizovaného filtru
- nový filtr musí být kompatibilní s existujícím 2RC filtrem

Profil drsnosti generovaný za použití filtru definovaného v normě ČSN EN ISO 11562 vykazuje některá nežádoucí zkreslení, sestává-li povrch z poměrně hlubokých prohlubní pod mnohem jemněji dokončenými ploškami, s velmi malými nerovnostmi. Tento typ povrchu je velmi obvyklý, např. u vložek válců spalovacích motorů. V normě ČSN EN ISO 13565-1 je popsána metoda filtrace vhodná pro takový typ povrchu. Tato filtrace potlačuje vliv prohlubní na referenční čáru.

Proces filtrace je uskutečněn v několika stupních, poskytujících modifikované profily. První střední čára je určena předběžnou filtrací základního profilu fázově korigovaným filtrem za použití odpovídající mezní vlnové délky (cut-off)  $\lambda_C$ . Všechny části profilu, tvořené prohlubněmi, ležící pod touto střední čarou jsou vypuštěny. V oněch místech je základní profil nahrazen křivkou střední čáry. Tentýž filtr je opětovně použit na upraveném profilu s vpuštěnými prohlubněmi. Takto získaná druhá střední čára je referenční čára, ke které je provedeno posouzení parametru profilu. Tato referenční čára je přenesena na původní základní profil a profil drsnosti je získán jako rozdíl mezi základním profilem a referenční čarou. [18]



Střední čáry (čáry, od kterých jsou podle ČSN EN ISO 4287 odměřovány pořadnice profilu):

Střední čára profilu drsnosti – čára odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu  $\lambda_C$ .

Střední čára profilu vlnitosti – čára odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu  $\lambda_f$ .

Střední čára základního profilu – čára nejmenších čtverců přiléhající jmenovitému tvaru základního profilu.

Základní délka,  $l_p$ ,  $l_r$ ,  $l_w$  – délka ve směru osy x (viz obr. 18), použitá pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil. Základní délka pro drsnost  $l_r$  a pro profil vlnitosti  $l_w$  jsou číselně rovné charakteristické vlnové délce profilovaného filtru  $\lambda_C$  a  $\lambda_f$ . Základní délka pro základní profil  $l_p$  se rovná vyhodnocované délce.

Vyhodnocovaná délka,  $l_n$  – délka ve směru osy x použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu. Vyhodnocovaná délka může obsahovat jednu nebo více základních délek. [18]

### 4.3 Filtry profilu

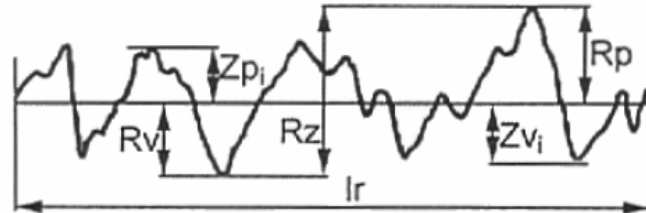
Norma ČSN EN ISO 4287 zavádí následující definice parametrů profilu:

#### 4.3.1 Výškové parametry

Největší výška výstupku profilu,  $P_p$ ,  $R_p$ ,  $W_p$  - jako výška  $Z_p$  (ve směru osy z, viz obr. 18) nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky.

Největší hloubka prohlubně profilu,  $P_v$ ,  $R_v$ ,  $W_v$  - jako hloubka  $Z_v$  nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky.

Největší výška profilu,  $P_z$ ,  $R_z$ ,  $W_z$  - jako součet výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky.

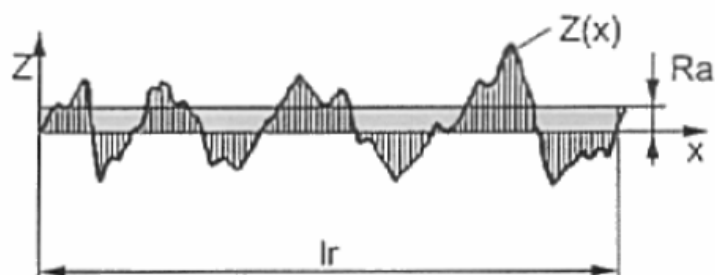


Obr. 22. Schématické vyjádření maximální výšky profilu  $R_z$  [24]

Průměrná výška prvků profilu,  $P_c$ ,  $R_c$ ,  $W_c$  - jako průměrná hodnota výšek  $Z_t$  prvků profilu v rozsahu základní délky.

Celková výška profilu,  $P_t$ ,  $R_t$ ,  $W_t$  - jako součet výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky.

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu,  $P_a$ ,  $R_a$ ,  $W_a$  - jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky. [18]

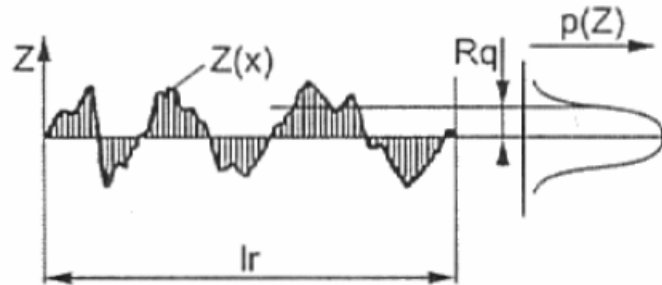


$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (1)$$

Obr. 23. Schématické vyjádření střední aritmetické hodnoty drsnosti  $R_a$  [24]

Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu,  $P_q$ ,  $R_q$ ,  $W_q$  - jako průměrná kvadratická hodnota pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky. [18]

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^2(x) dx} \quad (2)$$



Obr. 24. Schématické vyjádření

střední kvadratické hodnoty drsnosti  $R_q$  [24]

Šikmost posuzovaného profilu (skewness),  $P_{sk}$ ,  $R_{sk}$ ,  $W_{sk}$  - jako podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic  $Z(x)$  a třetí mocniny hodnoty  $P_q$ ,  $R_q$  nebo  $W_q$  v rozsahu základní délky.

Špičatost posuzovaného profilu (kurtosis),  $P_{ku}$ ,  $R_{ku}$ ,  $W_{ku}$  - jako podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic  $Z(x)$  a čtvrté mocniny hodnoty  $P_q$ ,  $R_q$  nebo  $W_q$  v rozsahu základní délky.

#### 4.3.2 Délkové parametry

Průměrná šířka prvků profilu,  $P_{Sm}$ ,  $R_{Sm}$ ,  $W_{Sm}$  - jako průměrná hodnota šířek  $X_s$  prvků profilu v rozsahu základní délky.

#### 4.3.3 Tvarové parametry

Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu,  $P_{dq}$ ,  $R_{dq}$ ,  $W_{dq}$  - jako průměrná kvadratická hodnota sklonů pořadnic  $dZ/dX$  v rozsahu základní délky. [18]

#### 4.3.4 Křivky a odpovídající parametry

Materiálový poměr profilu (nosný podíl),  $P_{mr}(c)$ ,  $R_{mr}(c)$ ,  $W_{mr}(c)$  - jako poměr délky materiálu prvků profilu  $MI(c)$  na dané úrovni  $c$ , k vyhodnocované délce.

Rozdíl výšky úseku profilu,  $P_{dc}$ ,  $R_{dc}$ ,  $W_{dc}$  - jako vzdálenost mezi úrovněmi dvou úseků daného materiálového poměru.

Vzájemný materiálový poměr,  $P_{mr}$ ,  $R_{mr}$ ,  $W_{mr}$  - jako materiálový poměr určený na úrovni části profilu  $R_{dc}$  vztažený k úrovni  $CO$ .

Křivka rozdělení výšek profilu - jako hustota pravděpodobnosti pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu vyhodnocované délky.

Struktura povrchu kontrolovaných ploch se může jevit jako homogenní nebo může být na jednotlivých plochách zcela rozdílná. V případě, kdy se struktura povrchu jeví jako homogenní, budou pro porovnání s požadavky použity hodnoty parametrů z celého povrchu.

Pro požadavky specifikované horní mezí parametru budou použity ty jednotlivé plochy na povrchu, u nichž je zřejmé, že mají největší hodnoty parametru. [18]

#### 4.3.5 Využití křivky lineárního poměru materiálu

Norma ČSN EN ISO 13565-2 popisuje proces hodnocení pro určení parametrů z lineárního vyjádření křivky materiálového poměru (Abbottova křivka), která popisuje vzrůst materiálového podílu se stoupající velikostí hloubky profilu drsnosti. Parametry jsou určeny jako pomocný prostředek k posuzování provozního chování mechanicky velmi namáhaných povrchů. [18]

Jsou definovány (obr. 25):

Jádro profilu drsnosti - jako profil drsnosti s vyloučením vyčnívajících vrcholů a hlubokých prohlubní.

Hloubka jádra drsnosti,  $R_k$  - jako hloubka jádra profilu drsnosti.

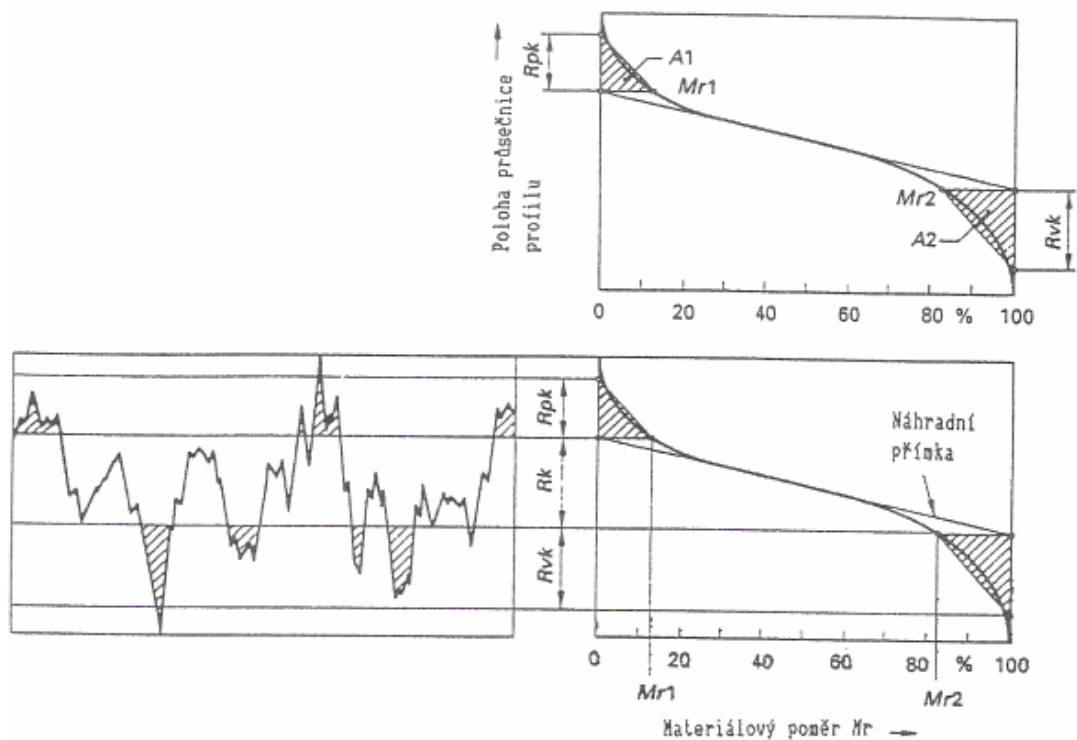
Materiálový podíl,  $Mr_1$  - jako úroveň, vyjádřená v procentech, určená průsečíky přímkou oddělující vyčnívající výstupky od jádra profilu drsnosti.

Materiálový podíl,  $Mr_2$  - jako úroveň, vyjádřená v procentech, určená průsečíky přímkou oddělující hluboké prohlubně od jádra profilu drsnosti.

Redukovaná výška výstupků,  $R_{pk}$  - jako průměrná výška výstupků vyčnívajících nad jádrem profilu drsnosti.

Redukovaná hloubka prohlubní,  $R_{vk}$  - jako průměrná hloubka prohlubní profilu pod jádrem profilu drsnosti.

Výpočet parametrů  $R_k$ ,  $Mr_1$  a  $Mr_2$  se provede pomocí náhradní přímkou a výpočet parametrů  $R_{pk}$  a  $R_{vk}$  předepsaným postupem jako výška trojúhelníku, který má stejnou plochu, jako je plocha výstupků (prohlubní) nad (pod) jádrem profilu. [18]



Obr. 25. Určení parametrů z křivky lineárního poměru materiálu

#### 4.3.6 Využití křivky lineárního poměru materiálu

Pro hodnocení drsnosti a vlnitosti byla vypracována metoda „motif“, kdy nejsou použity filtry profilu. Způsob zpracování profilu při této metodě je analogií mechanické filtrace, která je způsobena konečným poloměrem zaoblení snímacího hrotu nebo je záměrně realizována poloměrem kluzné opěry snímače.

Parametry metody motif pro profil drsnosti:

Průměrná hloubka prvků motif drsnosti,	R
Největší hloubka profilu nerovnosti,	R <sub>x</sub>
Průměrná rozteč prvků motif drsnosti,	AR

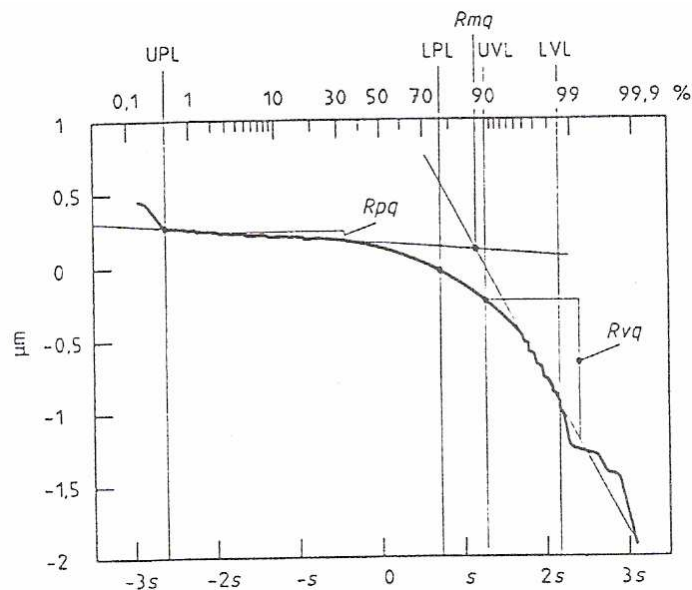
Parametry metody motif pro profil vlnitosti:

Průměrná hloubka prvků motif vlnitosti,	W
Největší hloubka vlnitosti,	W <sub>x</sub>
Průměrná rozteč prvků motif vlnitosti,	AW
Celková hloubka vlnitosti,	W <sub>te</sub>

#### 4.3.7 Využití pravděpodobnostní křivky materiálu (ČSN EN ISO 13565-3)

Podrobnější popis charakteru stratifikovaných profilů (u povrchů vzniklých dvěma po sobě následujícími operacemi; obvykle broušením a posléze honováním) lze získat pomocí pravděpodobnostní křivky materiálu. Zpracovává a vyhodnocuje se profil filtrovaný podle ČSN EN ISO 13565-1. Způsob je obsahem normy ČSN EN ISO 13565-3.

U profilu drsnosti využívá parametry R<sub>pq</sub>, R<sub>vq</sub>, R<sub>mq</sub> (obr. 26), u základního profilu využívá parametry P<sub>pq</sub>, P<sub>vq</sub> a P<sub>mq</sub>. [18]



Obr. 26. Odvození parametrů drsnosti povrchu z pravděpodobnostní křivky materiálu

#### 4.3.8 Zbytková napětí

Mechanické napětí a deformace představují odezvu materiálu na jeho vnější zatížení. Pro jejich stanovení se používají především odporové tenzometry, které umožňují měření statických a dynamických deformací v širokém rozsahu zatížení, teplot i podmínek měření.

Specifickou veličinou je zbytkové napětí, které je definováno jako napětí vyskytující se v materiálu bez působení vnějšího zatížení. Vzniká v důsledku technologie výroby a následného zpracování materiálu. Zbytkové napětí se vyskytuje prakticky ve všech technických materiálech a výrazným způsobem ovlivňuje jejich mechanické, únavové a další vlastnosti. [9]

Jedna z nejpoužívanějších experimentálních metod pro měření zbytkových napětí je odvrtávací metoda. Odvrtávací metodu lze použít pro většinu technických materiálů. Umožňuje měřit zbytková napětí v rovině povrchu materiálu, lze stanovit hluboký profil napětí. Vzhledem k malým rozměrům otvoru (hloubka ~ poloměr ~ cca 1 mm), které bývají v rozsahu technologických přídavek materiálu je tato metoda nazývána semidestruktivní.

Odvrtávací metoda je založena na uvolnění zbytkových napětí vytvořením malého otvoru v povrchu materiálu, které je provázáno deformacemi v okolí útvaru. Tyto deformace jsou

měřeny a na základě jejich rozboru je stanoveno původní zbytkové napětí při povrchu materiálu. [9]

## 4.4 Pravidla pro hodnocení struktury povrchu

### 4.4.1 Uplatnění „pravidla 16 %“

Pro parametry specifikované horní mezí parametru jsou povrchy považovány za přijatelné, jestliže hodnotu uvedenou na výrobní dokumentaci přesáhne maximálně 16 % všech naměřených hodnot vybraných parametrů zjišťovaných na vyhodnocované délce.

Pro parametry specifikované dolní mezí parametru jsou povrchy považovány za přijatelné, jestliže hodnotu uvedenou na výrobní dokumentaci nedosáhne maximálně 16 % všech naměřených hodnot vybraných parametrů zjišťovaných na vyhodnocované délce.

Při stanovení horní a dolní meze parametru se používá značka parametru bez indexu „max“. [18]

### 4.4.2 Uplatnění „pravidla maxima“

Při požadavcích specifikovaných největší hodnotou parametru nesmí v průběhu kontroly žádná z měřených hodnot parametru na celém kontrolovaném povrchu přestoupit hodnotu uvedenou na výrobní dokumentaci.

Při stanovení největší dovolené hodnoty parametru se značka parametru doplňuje indexem „max“ (např.  $Rz1_{max}$ ).

Pro dokázání shody nebo neshody se specifikací se měřené hodnoty parametrů porovnávají se specifikovanými limitními hodnotami s uvážením nejistot měření podle pravidel daných v ISO 14253-1. V případě porovnávání výsledků měření s horními a dolními mezemi jsou nejistoty měření odhadovány bez uvážení nehomogenit povrchu které jsou už započítávány přídatkem 16 %.



## 4.5 Měření parametrů struktury povrchu

Nerovnosti příslušející drsnosti povrchu mají současně deterministický i stochastický charakter v poměru odpovídajícím metodě obrábění použité při realizaci plochy. Pro hodnocení drsnosti povrchu se využívá kritérium středního prvku (střední čára profilu - čára nejmenších čtverců). [18]

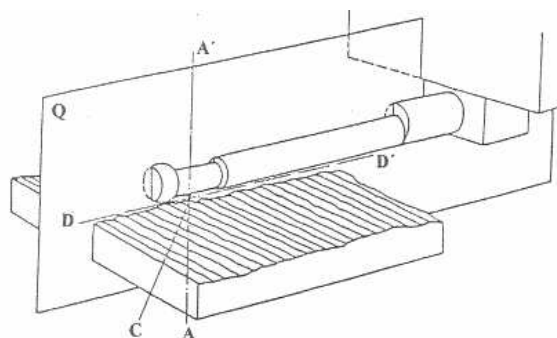
### 4.5.1 Princip měření struktury povrchu dotykovými profilometry (dotykovými hrotovými přístroji)

Pro praktické zjišťování hodnot charakteristik drsnosti povrchu existuje řada metod, z nichž zatím nejdokonalejší je metoda dotyková, využívající ostrého hrotu, který se v daném směru posouvá po povrchu a umožňuje získat informace o jeho profilu (obr. 27).

Jako všechny ostatní, i dotyková metoda naráží na celou řadu limitujících faktorů, které vyplývají většinou z požadavků její konkrétní realizace. Vyskytují se zcela protichůdné požadavky, které vyžadují řešení kompromisem.

Metoda umožňuje zjišťovat číselné hodnoty normalizovaných a nenormalizovaných charakteristik drsnosti povrchu a lze ji využít i pro nejmodernější statistická a spektrální hodnocení nerovností povrchu.

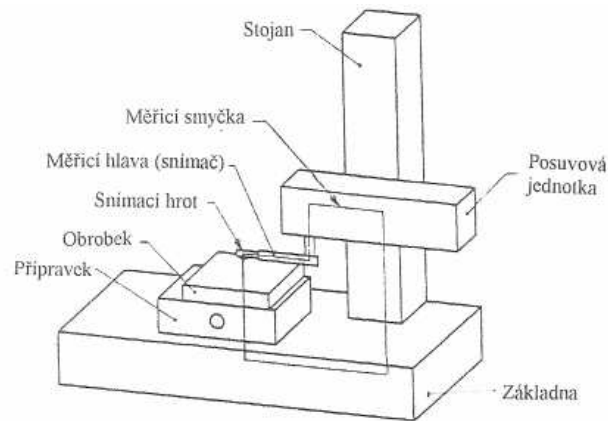
Realizaci metody zabezpečuje dotykový profilometr, který se skládá z mechanické a elektronické části. Měřící smyčka dotykového profilometru je uvedena na obr. 28.



Obr. 27. Dotyková metoda snímání profilu

$A-A'$  – osa snímacího hrotu,  $C$  – kontakt hrotu s povrchem,

$D-D'$  – základní směr pohybu,  $Q$  – rovina řezu



Obr. 28. Měřicí smyčka dotykového profilometru

Mechanický signál, generovaný snímacím hrotem sledujícím nerovnosti povrchu měřené plochy, je v indukčním převodníku polohy transformován na signál elektrický, který je dále zpracováván a interpretován jako číselná hodnota zvolené charakteristiky drsnosti povrchu, případně jako grafický záznam profilu nerovnosti povrchu. [18]

Snímání profilu měřeného povrchu může být provedeno:

- jako snímání absolutní – (přednostně, viz ČSN EN ISO 4287, 4288) kdy měřící základnou je velmi přesná přímá nebo tvarová dráha snímače.
- jako snímání relativní – kdy měřící základnou je dráha generovaná kluznou patkou klouzající po měřeném povrchu.

Pohyb dotykového hrotu podél měřeného povrchu musí být velmi přesný co do přímosti i co do rovnoměrnosti (generovaný elektrický signál není jen funkcí snímaných nerovností ale také parametrů pohybu). Jeho rychlost musí být volena s ohledem na dynamické vlastnosti snímacího systému tak, aby při měření hrot nezanechával stopu na měřeném povrchu a aby nerovnosti povrchu věrně sledoval. Snímaná dráha (délka) začíná v počátečním bodě, zahrnuje rozběh, vyhodnocovanou délku (standardně zahrnuje pětinašobek základní délky  $\lambda$ ) a doběh; končí v koncovém bodě. Snímač se poté vrací zvýšenou rychlostí do počátečního bodu.

Snímací systém svými vlastnostmi ovlivňuje získaný profil.

Kritické jsou zejména:

- poloměr zaoblení snímacího hrotu (2  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ ),
- vrcholový úhel snímacího hrotu (60°, 90°),
- měřicí (přítláčná) síla (0,00075 N),
- rychlost změny měřicí síly.

Významný vliv má také:

- poloměr zaoblení kluzné patky snímače (při relativním snímání),
- celkové geometrické uspořádání systému snímače. [18]

Pro zabezpečení správnosti a srovnatelnosti výsledků měření drsnosti povrchu jsou některé hodnoty většiny ovlivňujících parametrů normalizovány (viz ČSN EN ISO 3274).

Mechanický signál, generovaný příčným (vertikálním) pohybem hrotu snímače, představuje sejmутý profil nerovností povrchu vzhledem k základně dané způsobem snímání (absolutní, relativní). Tento signál se mění na signál elektrický, který je v příslušných elektronických obvodech dále zpracováván.

Při vlastním hodnocení sejmутého profilu formou číselných hodnot parametrů struktury povrchu se uplatňují základny tvořené použitým typem filtru, který slouží k oddělení frekvenčních složek nerovností profilu. (Jedná se o složky signálu různých vlnových délek, příslušející základnímu profilu, profilu vlnitosti povrchu a drsnosti povrchu.)

Při aplikaci dotykové metody měření struktury povrchu se pohybem dotykového hrotu přes nerovnosti na povrchu získá mechanický signál. Signál je vytvořen sejmутím všech nerovností. [18]

Tyto nerovnosti tvořící strukturu povrchu jsou obecně děleny na:

- nerovnosti základního profilu,
- vlnitost povrchu,
- drsnost povrchu.

Jednotlivé druhy nerovností jsou vyhodnocovány odděleně. To předpokládá vydělit ze směsi signálu složky příslušející jednotlivým druhům nerovností. Složky signálu se od sebe liší svoji vlnovou délkou. Vydělení složek signálu lze provést filtrací.

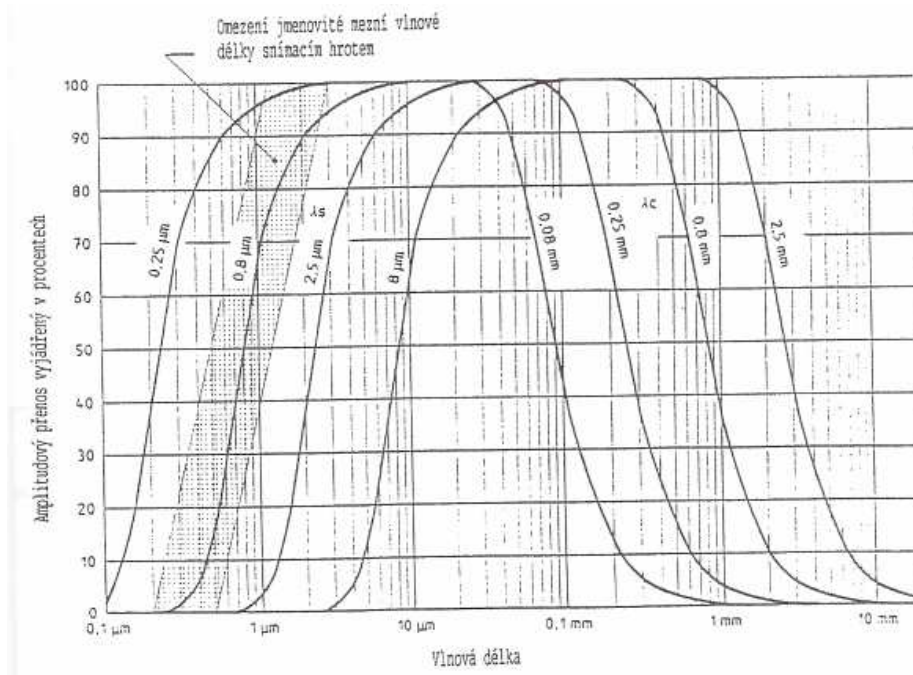
Ze spektra vlnových délek se část příslušející drsnosti povrchu odděluje vlnovým filtrem (viz kapitolu 4.2 Filtry profilu).

Ideální filtr tohoto typu propouští pouze vyšší kmitočty (malé vlnové délky); ostatní kmitočty, počínaje mezním kmitočtem (cut-off) nepropustí. Filtr takových vlastností však nelze realizovat.

Vlastnosti reálných filtrů způsobují zejména nedokonalé oddělení složek, které se projeví tím, že složky drsnosti povrchu jsou potlačovány ještě před mezním kmitočtem, zatímco složky, které měly být úplně odříznuty, ještě filtrem (sice potlačeny) dále pronikají.

Ani fázové charakteristiky reálných filtrů nejsou dokonalé a způsobují nerovnoměrný fázový posuv jednotlivých částí kmitočtového spektra. To způsobuje, že signál po průchodu filtrem je zkreslen.

Filtr vytváří základnu, od které je hodnocen sejmутý profil nerovností povrchu. Nedokonalost filtrů způsobuje, že základna nemá jmenovitý tvar a tím je hodnocení negativně ovlivňováno. Mimo to charakteristiku profilometru ovlivňuje poloměr zaoblení snímacího hrotu. Charakteristika profilometru je na straně malých hodnot délky omezena poloměrem zaoblení snímacího hrotu, na rozhraní s vlnitostí hodnotami cut-off (obr. 29). [18]



Obr. 29. Přenosová charakteristika profilometru s Gaussovým filtrem

#### 4.5.2 Volba podmínek měření

K objektivnímu určení číselných hodnot parametrů drsnosti povrchu je nezbytně nutné dodržovat určité podmínky, které vyplývají ze základních vlastností posuzovaného povrchu. Je však obtížné takové podmínky formulovat, protože provedené měření potřebné informace teprve následně přináší. V takových případech musí posloužit zkušenost shrnutá do příslušných doporučení.

Při hodnocení drsnosti povrchu není potřeba vymezovat vlnitost povrchu a úchyly tvaru odděleně; lze oddělit obě složky společně. Reálné (omezené) možnosti filtrů a zejména neznalost mezních hodnot vlnových délek jednotlivých složek signálu činí objektivní měření drsnosti povrchu obtížné.

Volba číselné hodnoty základního parametru vlnového filtru cut-off je kritická pro získání správných hodnot parametrů drsnosti povrchu. Determinuje s jakou amplitudou a s jakým fázovým zpožděním (při daném typu filtru) signál hodnoceného profilu filtrem projde. To přímo ovlivní číselné hodnoty jednotlivých parametrů drsnosti povrchu, které jsou vyhodnocovány z filtrovaného profilu. [18]

Teoreticky lze odvodit vliv filtrace daného typu na jednotlivé parametry drsnosti povrchu; výsledky analýzy však platí jen pro přesně definované podmínky, obvykle jen pro modelové případy.

Pro praktické měření hodnot parametrů drsnosti povrchu je nezbytné správně volit základní délku (u dotykového profilometru hodnotu cut-off), tak, aby zahrnovala dostatečný počet nerovností profilu charakterizujících jeho drsnost a vyloučila ovlivnění nerovnostmi s větší roztečí (vlnovou délkou) nepříslušející drsnosti.

Pro srovnatelnost výsledků měření drsnosti povrchu jsou hodnoty základní délky (cut-off) určeny normou. Jmenovité hodnoty mezních délek filtru profilu (cuton) se vybírají z následující řady: .... mm; 0,08 mm; 0,25 mm; 0,8 mm; 2,5 mm; 8 mm; .... mm,

K získání dostatečně přesných hodnot parametrů drsnosti povrchu se doporučuje volit vyhodnocovanou délku jako několikanásobek základní délky (obvykle pětinasobek).

[18]

## II. PRAKTICKÁ ČÁST

## 5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

V teoretické části této diplomové práce byla vypracována literární studie na téma dokončovací obrábění termoplastů.

V praktické části budu řešit následující problémy:

- Praktické broušení plastových vzorků při různých technologických podmínkách
- Vyhodnocení materiálového podílu
- Statistické vyhodnocení

Cílem diplomové práce je blíže popsat problematiku při broušení plastů při definovaných technologických podmínkách (mění se hloubka řezu, posuvová rychlost a různé brousící nástroje). Z plastů byly vybrány tyto materiály: PP, PA6GF30, PTFE, PC, PVC, PA66 a pryž EPDM.



## 6 CHARAKTERISTIKA BROUŠENÝCH MATERIÁLŮ

### Polypropylen PP

Má nízkou hustotu 0,90 až 0,92 g.cm<sup>-3</sup>. Vzhledem ke své krystalinitě je neprůhledný. Teplota tání čistého isotaktického PP je 176°C, obchodní typy 160 - 170°C. Podobně jako PE vykazuje PP výborné elektroizolační vlastnosti a chemickou odolnost. Proto je použitelný pro tepelně náročnější aplikace (krátkodobě 135°C, dlouhodobě 100°C). Ve srovnání s HDPE má vyšší pevnost v tahu i tlaku, vyšší tvrdost a odolnost proti oděru, lepší odolnost vůči korozi za napětí a menší propustnost pro plyny. Z méně výhodných vlastností můžeme jmenovat křehkost při teplotách pod 0°C a nižší odolnost vůči atmosférické oxidaci. Použití např. v automobilovém průmyslu jsou to nejrůznější vstřikované dílce, přístrojové desky, ventilátory apod. Ve spotřebním průmyslu díly domácích spotřebičů, kufrů, hračky, zahradní nábytek apod. V chemickém průmyslu trubky pro kanalizační odpady. Dílce injekčních stříkaček – možnost sterilizace. Dvousměrně orientované fólie (mikroten) se široce uplatňují v obalové technice při balení potravin. Velmi široké aplikace skýtá využití textilních PP vláken a orientovaných pásků. [11]

### Polyvinylchlorid PVC

Je amorfní termoplast s vyšší tuhostí, pevností a s nízkou tažností, houževnatostí, zejména za nižších teplot (pod - 5°C) a velmi dobrý elektrický izolant. Tepelná odolnost je nízká (asi 60°C trvale). Má dobrou odolnost proti povětrnosti a korozi za napětí. PVC není navlhavý a jeho chemická odolnost proti kyselinám, alkoholům, olejům a tukům je velmi dobrá. Houževnaté typy mají nižší tuhost a pevnost; jsou však odolnější proti UV záření a povětrnosti. PVC se zpracovává na tvrdé výrobky jako neměkčený PVC (Novodur) ve formě tyčí, desek, trubek a jiného profilovaného materiálu nebo jako tzv. měkčený PVC s přísadou změkčovadel (ftaláty nebo fosfáty) na širokou škálu výrobků ve formě fólií, hadic, měkkých profilů apod. PVC má široké použití, je to dáno univerzálností fyzikálních a chemických vlastností. [11], [22]

## **Polyamidy PA**

Jsou semikrystalické termoplasty s krystalickým podílem 20-40%. Jsou tuhé a pevné, přitom však s výraznou mezí kluzu a vysokou houževnatostí. Mají poměrně vysoké hodnoty tečení. Trvalá teplotní odolnost je kolem 80°C. Odolnost proti UV záření a povětrnosti je nižší. Navlhavost se u jednotlivých typů PA liší. Vlastnosti PA bývají obvykle udávány pro rovnovážný stav vody v prostředí 20°C a 65% relativní vlhkosti. Polyamidy neodolávají kyselinám, glykolům, horké vodě. Jednotlivé druhy PA se označují číslicemi, které udávají počet uhlíkových atomů ve výchozích monomerech. Mechanické vlastnosti jsou závislé na typu PA, molekulové hmotnosti a obsahu vody.

### *PA66*

PA 66 má ve srovnání s PA 6 výhodu ve vyšší teplotě tání, poněkud vyšší pevnosti a nižší navlhavosti. PA 66 slouží v širokém měřítku jako konstrukční termoplast i jako materiál pro výrobu vláken a fólií.

### *PA6GF30*

Ve srovnání s jednoduchým PA 66 má tento materiál (vyztužený 30% skleněných vláken) zvýšenou pevnost, tuhost, odolnost proti tečení, odolnost proti opotřebení, rozměrová stálost, dobrá stálost proti UV záření. [11], [22]

## **Polykarbonát PC**

Je amorfní termoplast střední tuhosti a vyšší pevnosti; s teplotou se jeho mechanické vlastnosti mění jen málo. Rázová a vrubová houževnatost je vysoká, tečení malé. Trvale je tepelně odolný do 100°C. PC jsou transparentní s propustností světla až 85%. Mají dobrou rozměrovou stabilitu do 140°C, vysokou mechanickou pevnost, odolnost proti povětrnostním vlivům a korozi za napětí je poněkud nižší. Navlhavost je zanedbatelná. PC odolává slabým kyselinám, benzínu, olejům. Neodolává luhům, rozpouštědlům. Důležitým uplatněním polykarbonátů je výroba kompaktních disků (CD). [11], [22]

### **Polytetrafluoretylen PTFE (teflon)**

Je velmi významným plastem ze široké skupiny fluorových polymerů. PTFE je krystalický polymer bílé barvy, parafinového vzhledu, je nerozpustný ve všech známých rozpouštědlech, nehořlavý a zdravotně nezávadný. Vyznačuje se vysokou molekulovou hmotností a obsahuje pouze atomy uhlíku a fluoru s vysokou pevností vazby. Tepelná odolnost je  $-260^{\circ}\text{C}$  až  $+250^{\circ}\text{C}$  (měkne až při  $327^{\circ}\text{C}$ ). PTFE má vynikající chemickou odolnost, výbornou odolnost proti vysokým teplotám, výborné dielektrické vlastnosti, odolnost proti stárnutí, dobré kluzné vlastnosti. Použití např. součástí armatur pro silně korozivní nebo tepelně náročná prostředí, k výrobě trubek, pístních kroužků, samomazných ložisek, k výrobě izolací pro dráty a kabely, atd. [5]

### **Přez EPDM**

Přez je elastomer, vznikající chemickou reakcí, vulkanizací. Vulkanizace je fyzikálně-chemický děj, při němž působením vulkanizačního činidla nebo energie dochází ke strukturálním změnám elastomeru. Dochází k zesíťování struktury (vznik příčných vazeb nebo můstků mezi řetězci). Vlastnosti vulkanizátu jsou závislé na koncentraci příčných vazeb, na pravidelnosti jejich rozložení a na jejich stabilitě. [11]

Složení polymeru (elastomeru) EPDM je ethylen-propylen-dien terpolymer. Jedná se o velmi kvalitní polymer, s výbornou odolností vůči vysokým teplotám, ozonu a venkovnímu prostředí. Také velmi dobrá odolnost vůči chemikáliím, minimální olejivzdornost. Použití např. obuvnický průmysl, na vysoce teplovzdorné a přitom zdravotně nezávadné výrobky, těsnění sterilizátorů v potravinářském průmyslu, atd.

## 6.1 Tabulky charakteristických hodnot plastů

Tab. 5. Tabulka orientačních fyzikálně - mechanických vlastností použitých materiálů – část 1

materiál	struktura	hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	modul pružnosti v tahu [MPa]	mez pevnosti [MPa]
<b>PP</b>	semikrystalická	0,92	1 100 – 1 600	22 – 32
<b>PVC</b>	amorfní	1,39	3 000 – 3400	55
<b>PTFE</b>	semikrystalická	2,15	350 – 700	25 – 36
<b>pryž EPDM</b>	amorfní	0,86		12
<b>PA66</b>	semikrystalická	1,14	1 700 – 2 000	60 – 85
<b>PA6-GF30</b>	semikrystalická	1,36	6 500 – 9 000	110 – 180
<b>PC</b>	amorfní	1,2	2 000 – 2 400	65

Tab. 6. Tabulka orientačních fyzikálně - mechanických vlastností použitých materiálů – část 2

materiál	teplota skelného přechodu T <sub>g</sub> [°C]	teplota tání T <sub>m</sub> [°C]	tvrdost [Shore D]
<b>PP</b>	-15	170	70
<b>PVC</b>	87	75	50-55
<b>PTFE</b>	120	327	55
<b>pryž EPDM</b>	-54	–	68 Shore A
<b>PA66</b>	50	260	74 – 84
<b>PA6-GF30</b>	60	220	86
<b>PC</b>	150	147	95

## 7 BROUŠENÍ VZORKŮ

Pro broušení byly použity plastové vzorky ve tvaru kvádrů o rozměrech 50x50x20mm, které byly připevněny k pracovnímu stolu brusky BRH 20.03F.

Typ broušení byl s vyjiskřováním (přejezd tam i zpět), těsně před vyjiskřováním proběhlo rovnaní brusného kotouče. Po broušení bylo provedeno měření drsnosti povrchu, u každého vzorku vždy na 10-ti různých místech, přičemž desáté měření bylo převedeno do počítače pro pozdější zpracování.

Pozdější zpracování zahrnovalo – statistické zpracování, sestrojení křivky materiálového podílu, sestrojení histogramu.

Během broušení jsme měnili technologické podmínky, a to:

- hloubku odebírané plochy – 0,01 ; 0,02 ; 0,03 a 0,04 mm
- rychlost posuvu – 8 ; 12 ; 16 a 24 m/min

V průběhu broušení byly také měněny brousící kotouče dle tabulky č.7:

Tab. 7. Charakteristické vlastnosti brousících kotoučů

kotouč č.	typ kotouče	materiál brusiva	zrnitost	tvrdost	struktura	pojivo
1.	99BA 46 J 9 V	umělý korund bílý	střední	měkká	velmi pórovitá	keramické
2.	96A 46 M 8 V 01	umělý korund hnědý	střední	střední	pórovitá	keramické
3.	49C 100 J 10 V	zelený karbid křemíku	jemná	měkká	velmi pórovitá	keramické
4.	99SA3 60 K 9 V	umělý korund mikrokrystalický	střední	měkká	velmi pórovitá	keramické

Z tabulky č.7 je tedy patrné, že brousící kotouče se lišily zejména v typu zrna (materiálu brusiva) a tudíž tím i svým použitím. Ostatní parametry se lišily nepatrně. Pojivo kotoučů bylo vždy keramické, struktura byla velmi pórovitá nebo pórovitá, tvrdost byla měkká nebo střední, zrnitost byla jemná nebo střední.

Tab. 8. Použití brousících kotoučů

kotouč č.	typ kotouče	použití kotouče zejména na broušení:
1.	99BA 46 J 9 V	standardní oceli
2.	96A 46 M 8 V 01	pro hrubování
3.	49C 100 J 10 V	slinuté karbidy a tvrdokovy
4.	99SA3 60 K 9 V	tvrdé materiály

### 7.1 Bruska horizontální a vertikální BRH 20.03F

Broušení bylo prováděno na brusce BRH 20.03F. Bruska BRH 20.03F je rovinná bruska s horizontálním vřetenem a pravouhlým stolem. Je určena pro broušení rovinných a tvarových ploch součástek z ocelí, litiny a ostatních kovových materiálů, u kterých se vyžaduje dosažení vysoké přesnosti a kvality zpracování. Brousí se převážně obvodem brusného kotouče. Broušené součástky podle svých rozměrů a tvaru mohou být upínané na elektromagnetickou desku a nebo přímo, nebo prostřednictvím vhodných upínačů na upínací plochu stolu.

Bruska pracuje v uzavřeném automatickém pracovním cyklu. K řízení automatického cyklu je bruska vybavena číslicovou indikací NV 300E fy FAGOR, které slouží k odměřování dráhy svislého a příčného posuvu při práci v ručním režimu a k řízení posuvu v automatickém pracovním cyklu. [19]

Tab. 9. Technické údaje brusky BRH 20.03F

Pracovní plocha stolu	200 x 630 mm
Rozměry brousícího kotouče	250 x 20 – 50 x 76 mm
Rychlost stolu plynule regulovatelná	1 – 30 m.min <sup>-1</sup>
Otáčky brousícího vřetena	2 550 min <sup>-1</sup>

Z hlediska koncepce se bruska BHV 20.03F vyznačuje tím, že stůl vykonává podélný pohyb po vedení vyhotoveném na předním loži a příčný posuv vykonává brusný vřeteník spolu se stojanem, ve kterém je vedení pro jeho svislý posuv. Hydraulický agregát a skříň elektriky tvoří samostatné celky umístěné mimo stroj.

Bruska také může pracovat s ruční obsluhou v uzavřeném nebo neuzavřeném automatickém cyklu. [19]



Obr. 30. Bruska rovinná horizontální BRH 20.03F

### 7.1.1 Kontrola kmitání kotouče

Pro kotouč č.3 - 49C 100 J 10 V (zelený karbid křemíku s keramickým pojivem) byla provedena kontrola kmitání kotouče. Tedy jak velký vliv má kmitání kotouče na jakost broušených vzorků.

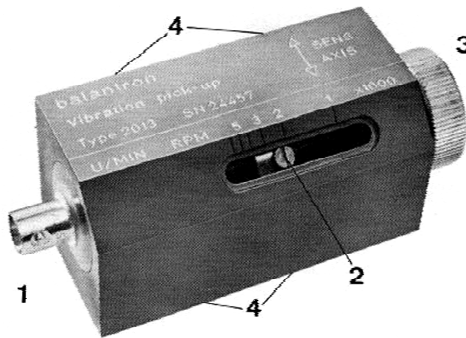
Bylo použito přístroje značky Balatron typ 2001, jedná se o vyvažovací zařízení.



Obr. 31. Popis měřícího zařízení

Balaton 2001 – ovládací část

1 – indikátor, 2 – ovládací jednotka, 3 – síťová jednotka, 4 – rozsah hodnot, 5 – citlivost, 6 – fázová inverze, 7 – kontrolka



Obr. 32. Popis měřícího zařízení

Balatron 2001 – snímací část

1 – připojení kabelu, 2 – regulátor otáček, 3 – ladící prvek, 4 – magnetické uchycení

Tab. 10. Tabulka naměřených hodnot kmitání kotouče

<b>Rychlost 8 [m/min]</b>	<b>úběr 0,01 [mm]</b>	<b>úběr 0,02 [mm]</b>	<b>úběr 0,03 [mm]</b>	<b>úběr 0,04 [mm]</b>
max. odchylka [ $\mu\text{m}$ ]	1,5	2,5	3,5	7
<b>Rychlost 12 [m/min]</b>	<b>úběr 0,01 [mm]</b>	<b>úběr 0,02 [mm]</b>	<b>úběr 0,03 [mm]</b>	<b>úběr 0,04 [mm]</b>
max. odchylka [ $\mu\text{m}$ ]	7	9,5	11	13
<b>Rychlost 16 [m/min]</b>	<b>úběr 0,01 [mm]</b>	<b>úběr 0,02 [mm]</b>	<b>úběr 0,03 [mm]</b>	<b>úběr 0,04 [mm]</b>
max. odchylka [ $\mu\text{m}$ ]	6	9	10,5	13,5
<b>Rychlost 24 [m/min]</b>	<b>úběr 0,01 [mm]</b>	<b>úběr 0,02 [mm]</b>	<b>úběr 0,03 [mm]</b>	<b>úběr 0,04 [mm]</b>
max. odchylka [ $\mu\text{m}$ ]	7	10	12,5	15,5

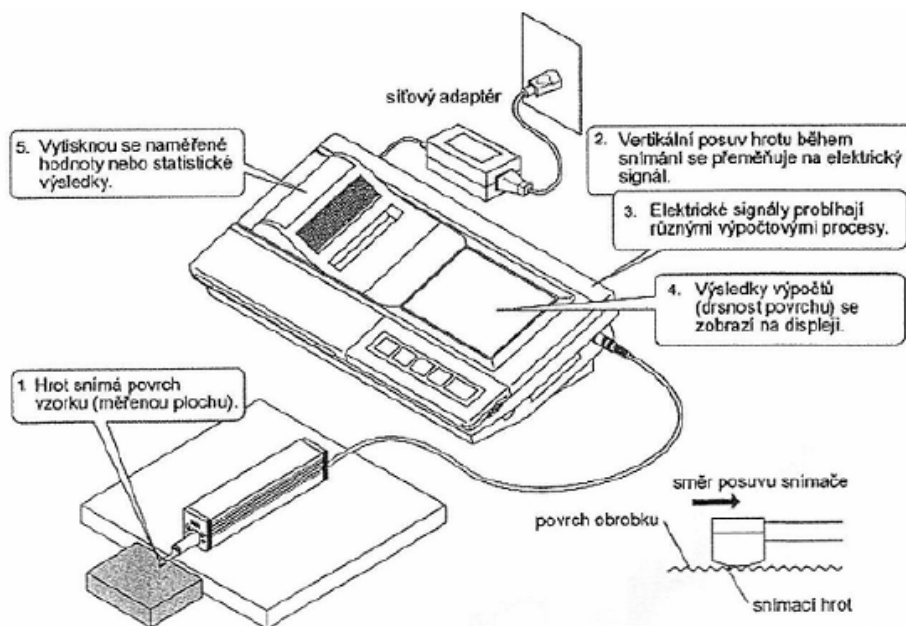
Dle tabulky je patrné, že hodnoty kmitání brusného kotouče jsou nízké. Z toho vyplývá, že kmitání má malý vliv (oproti dalším faktorům) na jakost broušených vzorků.



## 7.2 Příklad na měření drsnosti povrchu Mitutoyo SJ-301

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

Příklad má zdvih (rozsah osy Z) 350  $\mu\text{m}$ , posuv (rozsah osy X) 12,5 mm a lze na něm získat až 37 parametrů. Výsledky měření se zobrazí digitálně a graficky na speciální na dotek citlivé ovládací obrazovce a pomocí vestavěné tiskárny se mohou průběhy drsnosti i s jeho hodnotami vytisknout (obr. 33). [15]



Obr. 33. Příklad na měření drsnosti povrchu Mitutoyo SJ-301 - popis

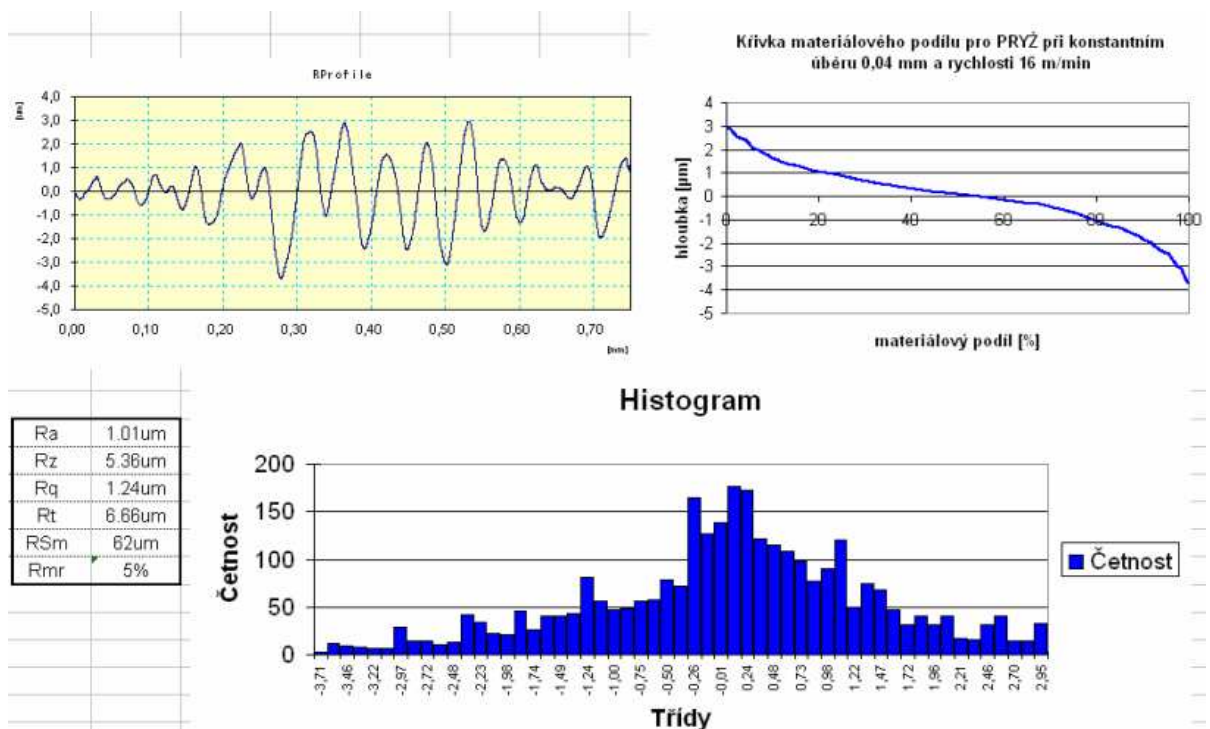
Snímací hrot přístroje zaznamenává i nejjemnější nepravidelnosti povrchu vzorku. Drsnost povrchu se vypočítá z vertikálního posuvu snímacího hrotu, ke kterému dochází, když snímací hrot přejíždí přes nepravidelnosti povrchu. Poloha snímacího hrotu vůči obrobku musí být zajištěna tak, aby posuv při měření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



*Obr. 34. Přístroj na měření drsnosti Mitutoyo SJ-301*

## 8 VYHODNOCENÍ MATERIÁLOVÉHO PODÍLU

Pro každý materiál a různé technologické podmínky je zpracována drsnost povrchu R, křivka materiálového podílu, odpovídající histogram a parametry ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$ ,  $R_t$ ,  $R_{Sm}$ ,  $R_{mr}$ ). Vzhledem k velkému rozsahu měření, které čítalo přes 300 měření, byly přílohy vloženy na CD nosič. Obrázek č. 35 ukazuje příklad vyhodnocení pro dané podmínky.



Obr. 35. Příklad vyhodnocení v programu Excel pro každý materiál

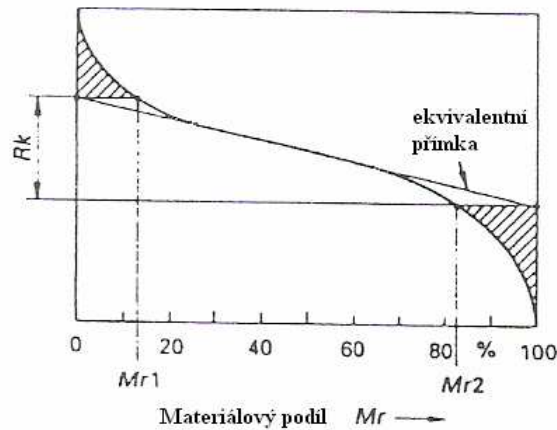
### 8.1 Sestrojení a vyhodnocení křivky materiálového podílu dle normy

Postup sestrojení a vyhodnocení dle [17].

Výpočet parametrů  $R_k$ ,  $M_{r1}$ ,  $M_{r2}$ :

- na křivce materiálového podílu hledáme ekvivalentní přímku (sečnu) s nejmenším sklonem
- ekvivalentní přímka protíná souřadnice v  $M_r = 0\%$  a  $M_r = 100\%$
- z těchto bodů se vedou dvě přímky rovnoběžně s osou x, které vymezí jádro profilu drsnosti, oddělením přesahujících výstupky a prohlubně profilu

- vertikální vzdálenost mezi těmito přímkami je hloubka jádra drsnosti  $R_k$  a jejich průsečíky s křivkou nosného podílu definuje podíl materiálu  $Mr_1$  a  $Mr_2$

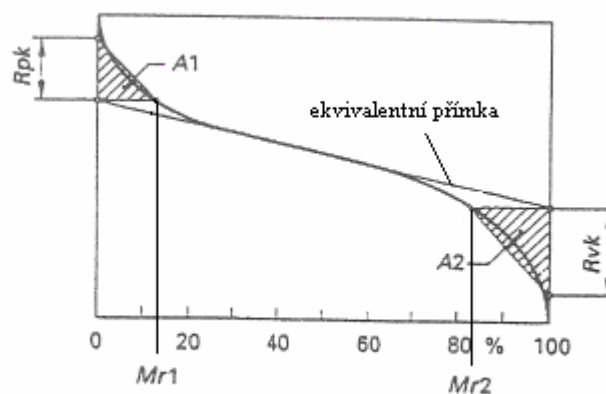


Obr. 36. Výpočet  $R_k$ ,  $Mr_1$ ,  $Mr_2$

Výpočet parametrů  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$ :

Plochy nad a pod oblastí křivky materiálového podílu, které omezují jádro profilu drsnosti  $R_k$ , jsou na obrázku č. 37 šrafovány. Ty odpovídají ploše příčného řezu výstupků a prohlubní povrchu, které přesahují jádro profilu drsnosti.

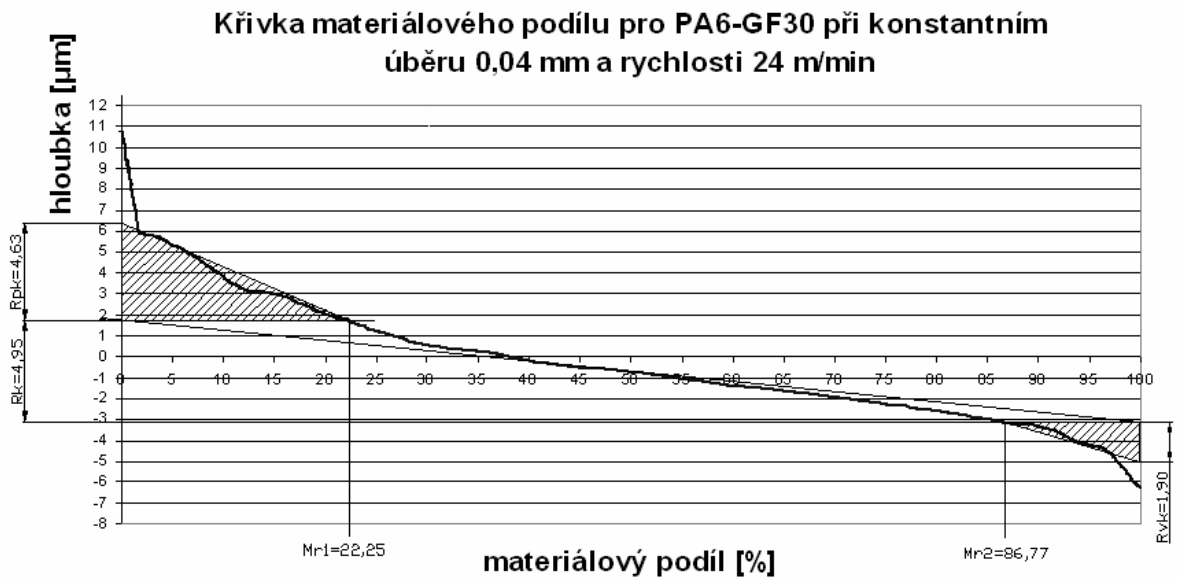
Každý z parametrů  $R_{pk}$  a  $R_{vk}$  se počítá jako výška pravoúhlého trojúhelníka sestaveného tak, že mají tu samou plochu jako „plocha výstupků“, resp. „plocha prohlubní“. Pravoúhlý trojúhelník odpovídající „ploše výstupků A1“ má základnu  $Mr_1$  a trojúhelník odpovídající „ploše prohlubní A2“ má základnu  $100\% - Mr_2$ .



Obr. 37. Výpočet parametrů  $R_{pk}$  a  $R_{vk}$

## 8.2 Praktické sestavení a vyhodnocení křivky materiálového podílu pro určité materiály

### 8.2.1 Křivka materiálového podílu pro PA6GF30 - kotouč č.3



Obr. 38. Určení parametrů  $R_k$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$  pro PA6GF30 pomocí programu AUTOCAD

Vypočítané hodnoty z programu AUTOCAD:

$$R_{pk} = 4,63 \mu\text{m} ; R_k = 4,95 \mu\text{m} ; R_{vk} = 1,90 \mu\text{m} ; A_1 = 51,51 \mu\text{m}^2 ; A_2 = 12,57 \mu\text{m}^2 ;$$

$$Mr_1 = 22,25 \% ; Mr_2 = 86,77 \%$$

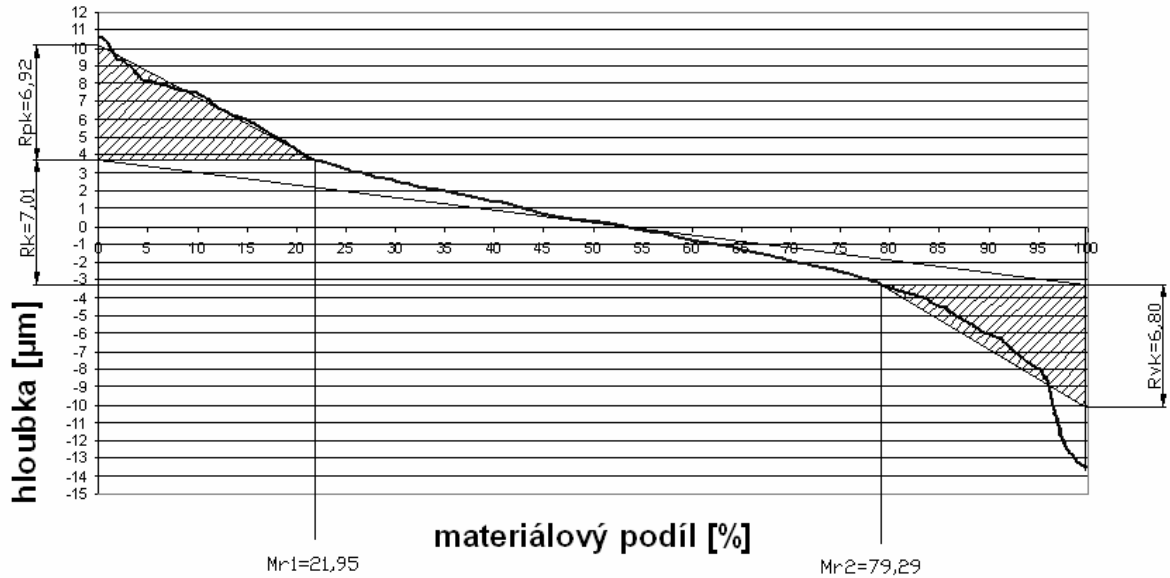
Kontrolní přepoččet:

$$A_1 = \frac{1}{2} \cdot R_{pk} \cdot Mr_1 = \frac{1}{2} \cdot 4,63 \cdot 22,25 = 51,51 \mu\text{m}^2$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \cdot R_{vk} \cdot (100\% - Mr_2) = \frac{1}{2} \cdot 1,90 \cdot (100 - 86,77) = 12,57 \mu\text{m}^2$$

## 8.2.2 Křivka materiálového podílu pro PA66 - kotouč č.3

Křivka materiálového podílu pro PA66 při konstantním  
úběru 0,04 mm a rychlosti 24 m/min



Obr. 39. Určení parametrů  $R_k$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$  pro PA66 pomocí programu AUTOCAD

Vypočítané hodnoty z programu AUTOCAD:

$R_{pk} = 6,92 \mu\text{m}$  ;  $R_k = 7,01 \mu\text{m}$  ;  $R_{vk} = 6,80 \mu\text{m}$  ;  $A_1 = 75,95 \mu\text{m}^2$  ;  $A_2 = 70,41 \mu\text{m}^2$  ;

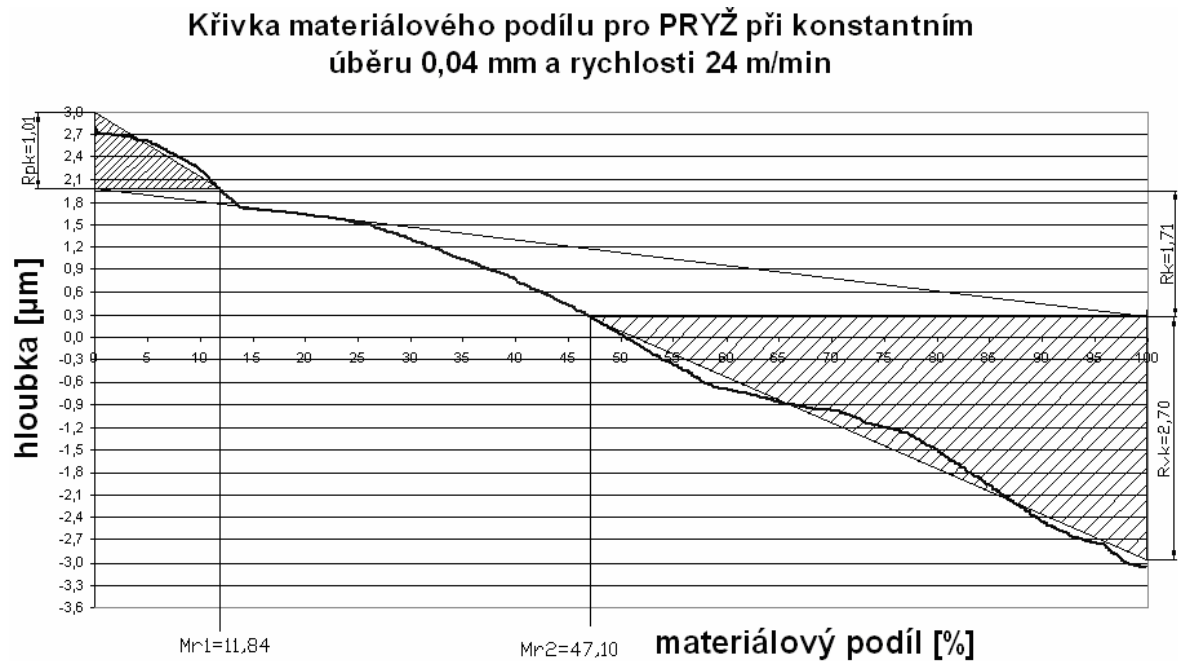
$Mr_1 = 21,95 \%$  ;  $Mr_2 = 79,29 \%$ .

Kontrolní přepoččet:

$$A_1 = \frac{1}{2} \cdot R_{pk} \cdot Mr_1 = \frac{1}{2} \cdot 6,92 \cdot 21,95 = 75,95 \mu\text{m}^2$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \cdot R_{vk} \cdot (100\% - Mr_2) = \frac{1}{2} \cdot 6,80 \cdot (100 - 79,29) = 70,41 \mu\text{m}^2$$

### 8.2.3 Křivka materiálového podílu pro pryž EPDM - kotouč č.3



Obr. 40. Určení parametrů  $R_k$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$  pro PRYŽ pomocí programu AUTOCAD

Vypočítané hodnoty z programu AUTOCAD:

$R_{pk} = 1,01 \mu\text{m}$  ;  $R_k = 1,71 \mu\text{m}$  ;  $R_{vk} = 2,70 \mu\text{m}$  ;  $A_1 = 5,98 \mu\text{m}^2$  ;  $A_2 = 71,42 \mu\text{m}^2$  ;

$Mr_1 = 11,84 \%$  ;  $Mr_2 = 47,10 \%$ .

Kontrolní přepoččet:

$$A_1 = \frac{1}{2} \cdot R_{pk} \cdot Mr_1 = \frac{1}{2} \cdot 1,01 \cdot 11,84 = 5,98 \mu\text{m}^2$$

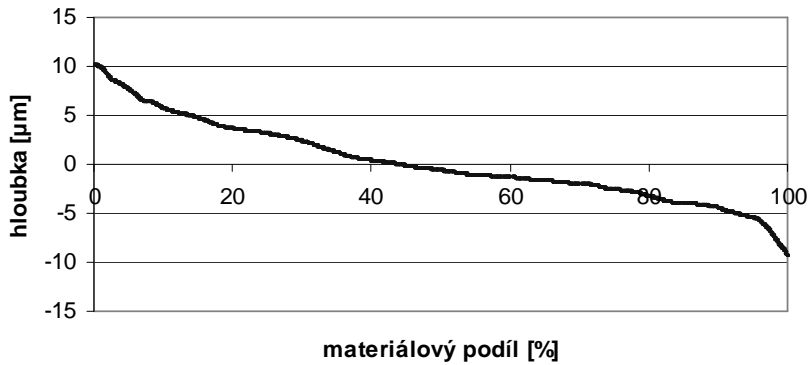
$$A_2 = \frac{1}{2} \cdot R_{vk} \cdot (100\% - Mr_2) = \frac{1}{2} \cdot 2,70 \cdot (100 - 47,10) = 71,42 \mu\text{m}^2$$

### 8.3 Porovnání křivek materiálového podílu pro různé materiály a různé kotouče

V této kapitole se podíváme na některé materiály - jejich naměřené hodnoty drsnosti a křivky materiálového podílu. Byly brány maximální hodnoty během broušení, tj. rychlost posuvu  $24 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , a velikost úběru 0,04 mm. V pravé části obrázků tedy uvidíme jednotlivé naměřené hodnoty a v levé části pak vyhodnocená křivka materiálového podílu.

## 8.3.1 Kotouč č.1 - 99BA 46 J 9 V

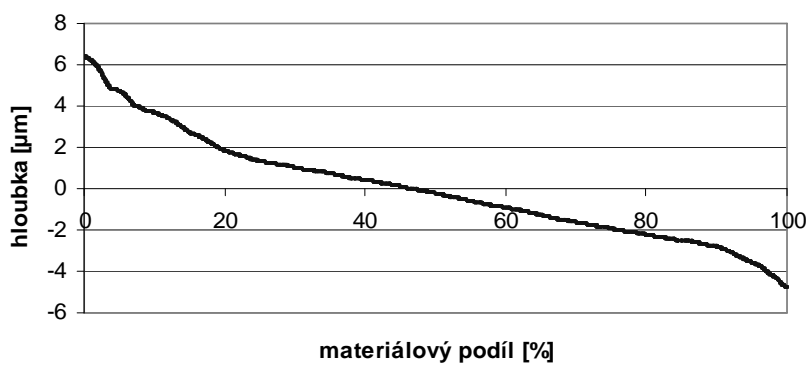
Křivka materiálového podílu pro PA6-GF30 při konstantním  
úběru 0,04 mm a rychlosti 24 m/min



Ra	3.22 µm
Rz	13.56 µm
Rq	3.75 µm
Rt	19.45 µm
RSm	109 µm
Rmr	4%

Obr. 41. Křivka materiálového podílu pro PA6GF30 – kotouč č.1

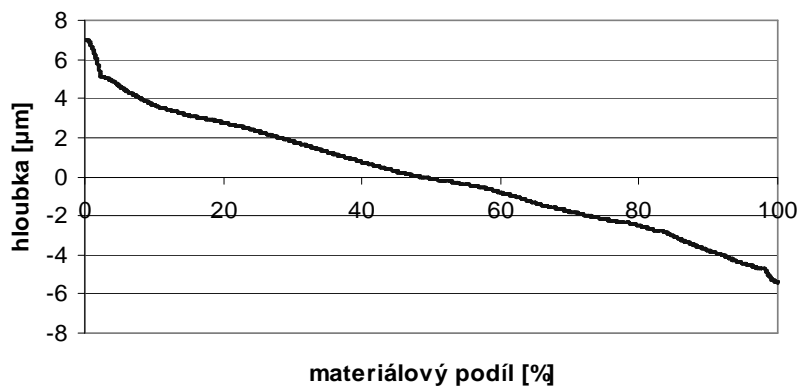
Křivka materiálového podílu pro PA66 při konstantním  
úběru 0,04 mm a rychlosti 24 m/min



Ra	1.98 µm
Rz	9.13 µm
Rq	2.36 µm
Rt	11.18 µm
RSm	94 µm
Rmr	3%

Obr. 42. Křivka materiálového podílu pro PA66 – kotouč č.1

Křivka materiálového podílu pro PRYŽ při konstantním  
úběru 0,04 mm a rychlosti 24 m/min

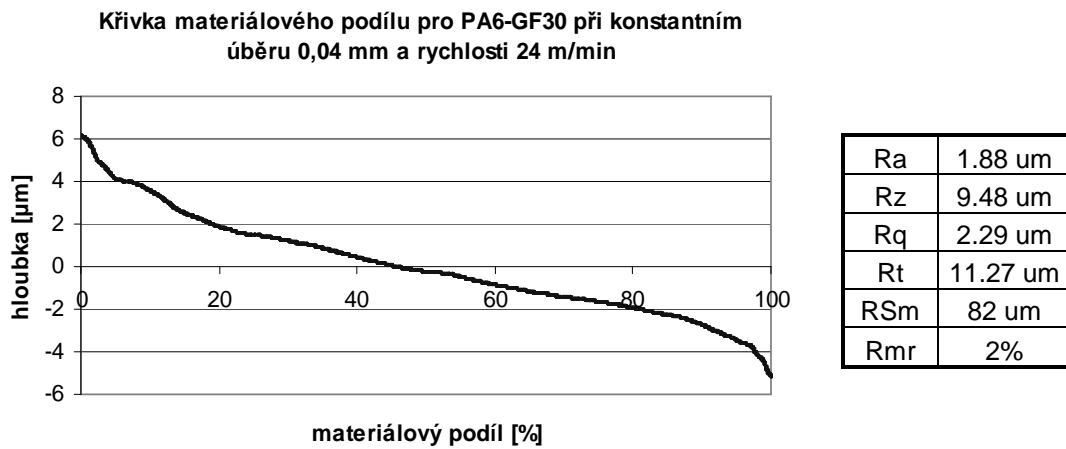


Ra	2.33 µm
Rz	10.46 µm
Rq	2.76 µm
Rt	12.44 µm
RSm	104 µm
Rmr	2%

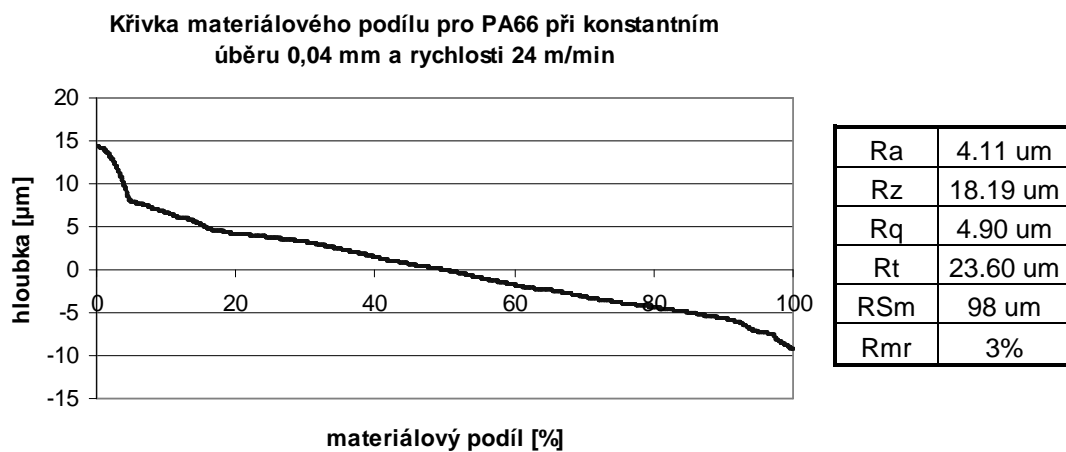
Obr. 43. Křivka materiálového podílu pro pryž EPDM – kotouč č.1



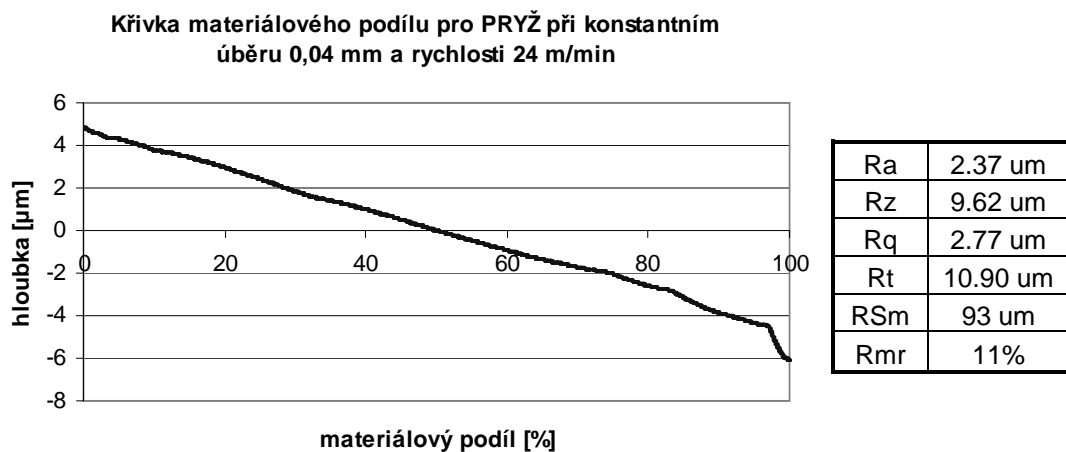
## 8.3.2 Kotouč č.2 - 96A 46 M 8 V 01



Obr. 44. Křivka materiálového podílu pro PA6GF30 – kotouč č.2

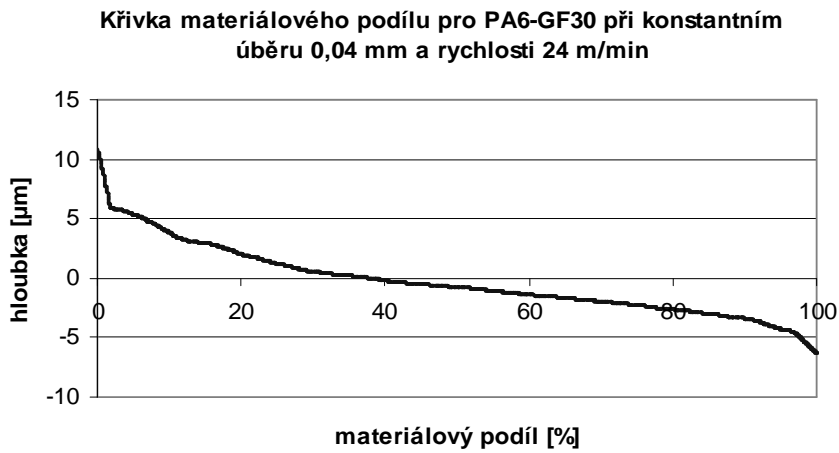


Obr. 45. Křivka materiálového podílu pro PA66 – kotouč č.2

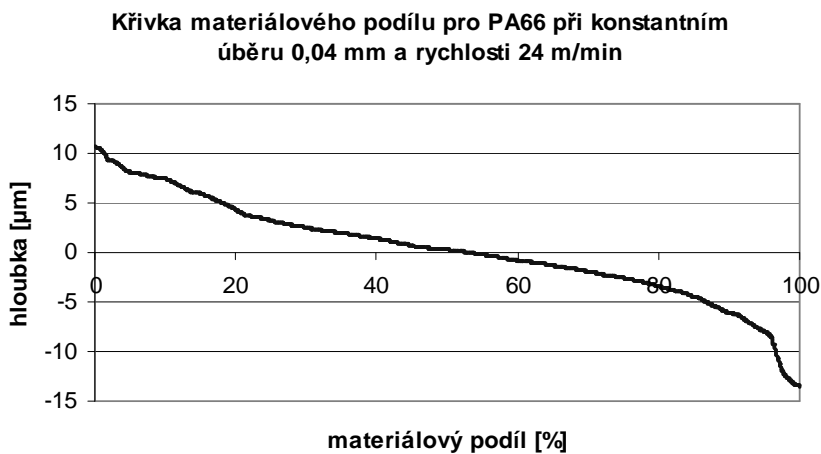


Obr. 46. Křivka materiálového podílu pro pryž EPDM – kotouč č.2

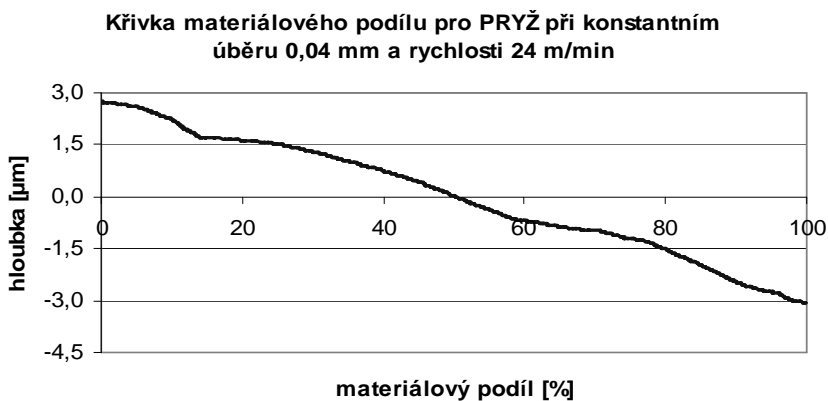
8.3.3 Kotouč č.3 - 49C 100 J 10 V



Obr. 47. Křivka materiálového podílu pro PA6GF30 – kotouč č.3

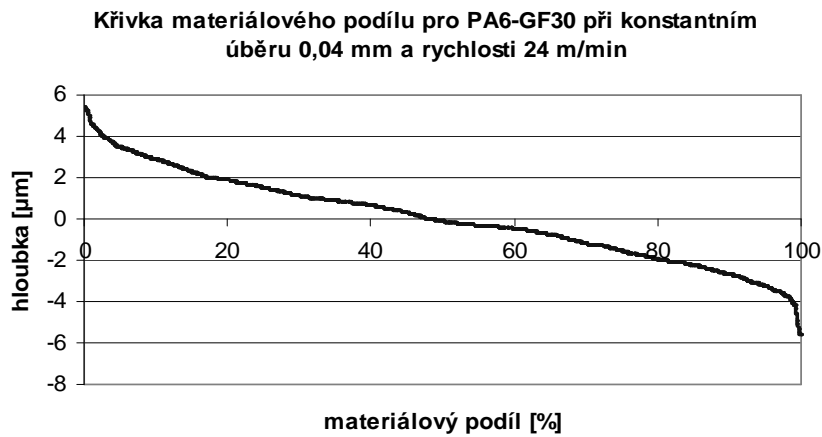


Obr. 48. Křivka materiálového podílu pro PA66 – kotouč č.3

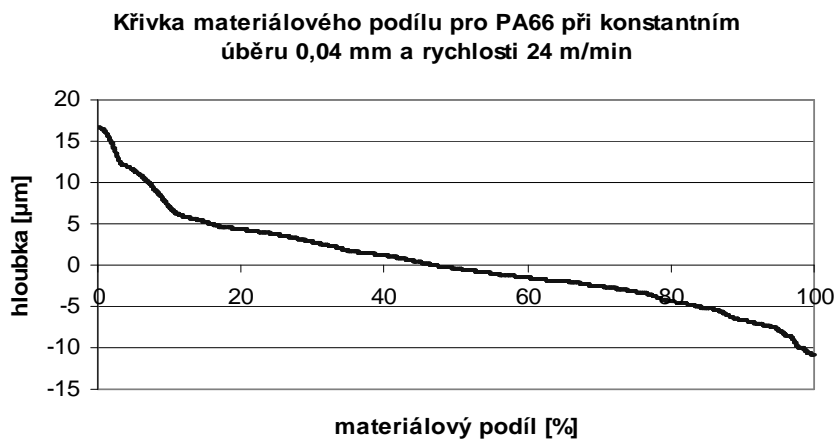


Obr. 49. Křivka materiálového podílu pro PRYŽ – kotouč č.3

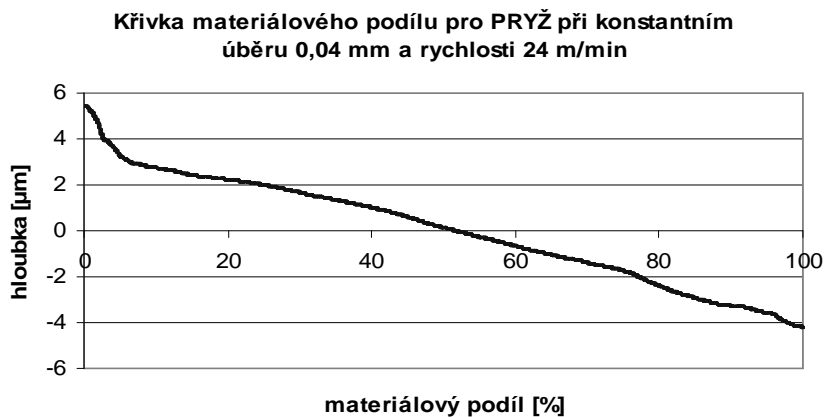
## 8.3.4 Kotouč č.4 - 99SA3 60 K 9 V



Obr. 50. Křivka materiálového podílu pro PA6GF30 – kotouč č.4



Obr. 51. Křivka materiálového podílu pro PA66 – kotouč č.4

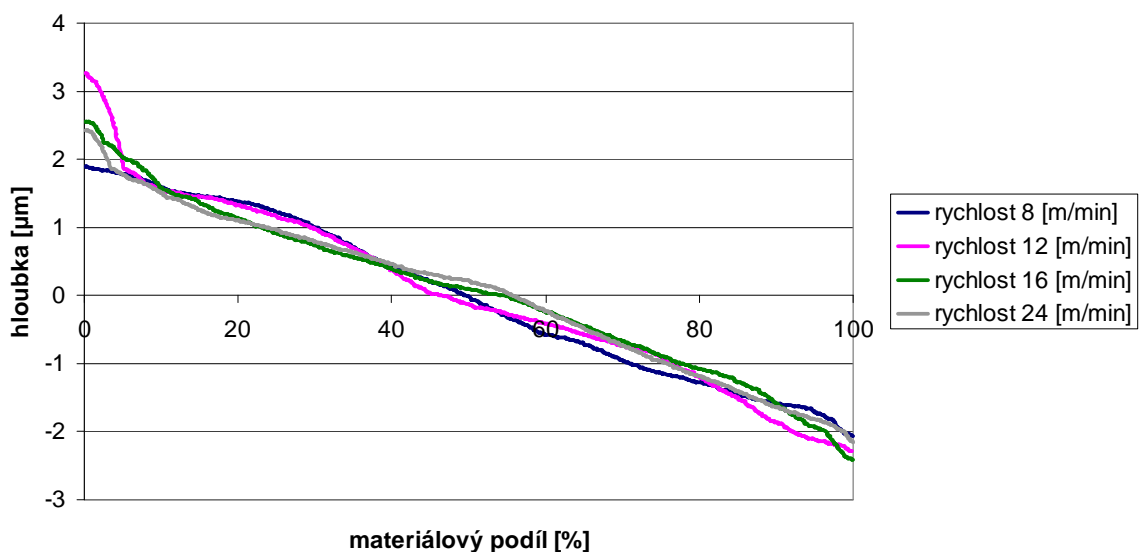


Obr. 52. Křivka materiálového podílu pro pryž EPDM – kotouč č.4

## 8.4 Porovnání křivek materiálového podílu při konstantním úběru a konstantní rychlosti

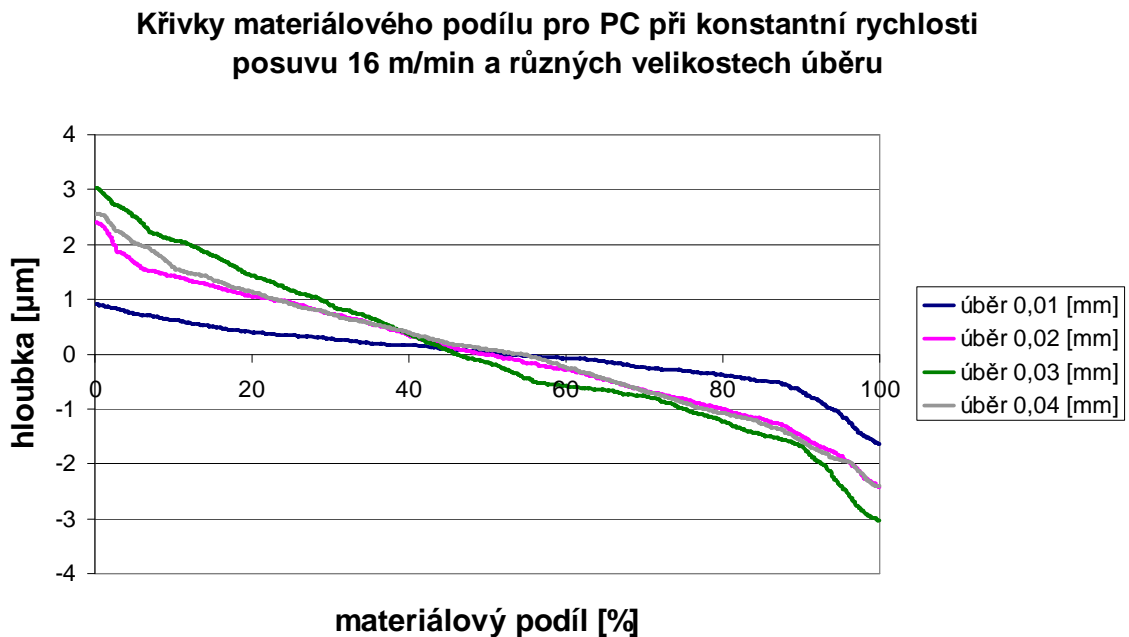
V této kapitole se podíváme na bližší porovnání křivek materiálového podílu, jednou při konstantním úběru materiálu, jednou při konstantní rychlosti posuvu. Hodnoty použity z naměřených hodnot pro kotouč č.3 - 49C 100 J 10 V.

**Křivky materiálového podílu pro PC při konstantním úběru 0,04 mm a různých rychlostech**



Obr. 53. Křivky materiálového podílu pro PC při konstantním úběru a různých posuvech

Na obrázku č. 53 jsou vidět křivky materiálového podílu při konstantním úběru 0,04 mm a různých rychlostech posuvu. Z grafu je patrné, že posuv nemá vliv na parametr drsnosti  $R_a$ . Jednotlivé křivky jsou si podobné, ale např. při rychlosti posuvu 24 m/min jsme dosáhli lepší drsnosti povrchu než při rychlostech posuvu 12 resp. 16 m/min. Dle literatury by měla s rostoucí rychlostí posuvu růst drsnost, ale to zde neplatí.



Obr. 54. Křivky materiálového podílu pro PC při konstantním posuvu a různých úběrech

Na obrázku č. 54 jsou vidět křivky materiálového podílu při konstantní rychlosti 16 m/min a různých velikostech úběru. Z grafu je patrné, že hloubka úběru má vliv na parametr drsnosti  $R_a$ . S rostoucí velikostí úběru parametr drsnosti roste.

## 8.5 POROVNÁNÍ PARAMETRŮ DRSNOSTI $R_a$

V této kapitole nalezneme přehledně uspořádané, naměřené průměrné hodnoty parametru drsnosti  $R_a$  u jednotlivých měření. Názorně tedy vidíme, jak se měnila drsnost povrchu při různých podmínkách (měnící se brousící kotouče, hloubka úběru a posuvová rychlost). Hodnoty v tabulce jsou proloženy také barevným odstínem, světlejší udává hodnotu nižší, tmavší odstín udává hodnotu vyšší.

Tab. 11. Průměrné hodnoty parametru drsnosti Ra pro kotouč č.1

rychlost posuvu 8 ; 12 ; 16 ; 24 [m.min<sup>-1</sup>]

	8	12	16	24		8	12	16	24		
<b>PA6GF30</b>	<b>0,01</b>	0,59	0,63	0,45	0,54	<b>PA66</b>	<b>0,01</b>	1,01	1,08	1,09	1,12
	<b>0,02</b>	0,53	0,58	0,49	0,58		<b>0,02</b>	1	1,05	1,05	1
	<b>0,03</b>	0,56	0,52	0,73	0,56		<b>0,03</b>	1,16	1,56	1,27	1,37
	<b>0,04</b>	0,53	0,5	0,63	0,54		<b>0,04</b>	1,47	1,08	1,41	1,24
<b>PC</b>	<b>0,01</b>	0,68	0,86	0,57	0,67	<b>PP</b>	<b>0,01</b>	0,9	0,88	0,75	0,92
	<b>0,02</b>	0,64	0,77	0,7	0,69		<b>0,02</b>	0,81	0,93	0,84	0,91
	<b>0,03</b>	0,73	0,65	0,72	0,75		<b>0,03</b>	0,81	1,05	0,8	1,03
	<b>0,04</b>	0,98	0,8	0,89	0,68		<b>0,04</b>	0,85	1,06	0,91	1,1
<b>pryž EPDM</b>	<b>0,01</b>	0,79	0,94	0,84	0,84	<b>PTFE</b>	<b>0,01</b>	0,39	0,6	0,51	0,72
	<b>0,02</b>	0,84	1,09	0,97	0,87		<b>0,02</b>	0,55	0,63	0,52	0,53
	<b>0,03</b>	0,9	0,95	0,97	0,86		<b>0,03</b>	0,54	0,78	0,61	0,65
	<b>0,04</b>	1	0,93	0,9	0,79		<b>0,04</b>	0,61	0,56	0,66	0,65
<b>PVC</b>	<b>0,01</b>	0,56	0,6	0,6	0,67						
	<b>0,02</b>	0,73	0,79	0,68	0,57						
	<b>0,03</b>	0,67	1,18	0,63	0,67						
	<b>0,04</b>	0,66	0,77	0,55	0,52						

hloubka úběru 0,01 ; 0,02 ; 0,03 ; 0,04 [mm]

Tab. 12. Průměrné hodnoty parametru drsnosti Ra pro kotouč č.2

rychlost posuvu 8 ; 12 ; 16 ; 24 [m.min<sup>-1</sup>]

	8	12	16	24		8	12	16	24		
<b>PA6GF30</b>	<b>0,01</b>	0,72	0,89	1,12	0,76	<b>PA66</b>	<b>0,01</b>	2,01	2,94	3,44	2
	<b>0,02</b>	2,31	2,39	2,09	1,86		<b>0,02</b>	3,1	2,62	3,62	3,47
	<b>0,03</b>	1,68	2,39	1,85	1,88		<b>0,03</b>	2,32	2,65	3,71	3,83
	<b>0,04</b>	2,64	2,39	2,38	1,96		<b>0,04</b>	2,8	2,79	3,47	4,2
<b>PC</b>	<b>0,01</b>	0,36	0,76	0,85	0,61	<b>PP</b>	<b>0,01</b>	2,44	2,51	2,71	2,34
	<b>0,02</b>	0,91	0,69	0,87	0,91		<b>0,02</b>	2,6	2,05	2,14	2,6
	<b>0,03</b>	0,48	0,77	0,58	1,06		<b>0,03</b>	2,39	2,74	2,84	2,33
	<b>0,04</b>	0,66	1,13	0,86	1,07		<b>0,04</b>	2,06	3,06	2,7	2,48
<b>pryž EPDM</b>	<b>0,01</b>	0,51	0,92	0,83	0,88	<b>PTFE</b>	<b>0,01</b>	0,92	0,1	0,65	0,15
	<b>0,02</b>	0,85	1	1,17	1,66		<b>0,02</b>	0,89	0,07	0,46	0,31
	<b>0,03</b>	0,6	1,07	1,02	1,55		<b>0,03</b>	0,78	0,4	0,34	0,45
	<b>0,04</b>	0,71	1,09	1,31	2,26		<b>0,04</b>	0,81	0,49	0,4	0,51
<b>PVC</b>	<b>0,01</b>	0,38	0,37	0,4	0,39						
	<b>0,02</b>	0,9	0,46	0,49	0,67						
	<b>0,03</b>	0,63	0,43	0,57	0,68						
	<b>0,04</b>	0,68	0,74	0,74	0,74						

hloubka úběru 0,01 ; 0,02 ; 0,03 ; 0,04 [mm]

Tab. 13. Průměrné hodnoty parametru drsnosti Ra pro kotouč č.3

rychlost posuvu 8 ; 12 ; 16 ; 24 [m.min<sup>-1</sup>]

	8	12	16	24		8	12	16	24		
<b>PA6GF30</b>	<b>0,01</b>	0,49	0,64	0,66	0,73	<b>PA66</b>	<b>0,01</b>	2,61	2,69	2,77	1,29
	<b>0,02</b>	2,5	2,52	1,3	1,5		<b>0,02</b>	6,11	2,64	2,61	1,85
	<b>0,03</b>	1,55	1,28	0,62	0,71		<b>0,03</b>	5,26	2,72	2,84	3,15
	<b>0,04</b>	2,31	2,49	2,4	2,49		<b>0,04</b>	5,61	5,31	5,35	4,14
<b>PC</b>	<b>0,01</b>	0,41	0,41	0,47	0,87	<b>PP</b>	<b>0,01</b>	2,95	1,76	2,81	3,06
	<b>0,02</b>	0,8	0,98	0,84	0,87		<b>0,02</b>	3,92	2,39	3,03	3,04
	<b>0,03</b>	1,2	1,22	1,36	0,84		<b>0,03</b>	3,97	2,25	3,42	3,14
	<b>0,04</b>	1,05	1,2	1,11	1,01		<b>0,04</b>	4,2	3,62	3,72	3,45
<b>pryž EPDM</b>	<b>0,01</b>	0,26	0,36	0,39	0,54	<b>PTFE</b>	<b>0,01</b>	0,13	0,17	0,14	0,23
	<b>0,02</b>	0,4	0,5	0,91	0,8		<b>0,02</b>	0,34	0,29	0,14	0,29
	<b>0,03</b>	0,45	0,93	0,93	1,12		<b>0,03</b>	0,31	0,27	0,31	0,32
	<b>0,04</b>	0,69	1,03	1,02	1,64		<b>0,04</b>	0,32	0,45	0,42	0,4
<b>PVC</b>	<b>0,01</b>	0,38	0,38	0,36	0,29						
	<b>0,02</b>	0,48	0,43	0,35	0,33						
	<b>0,03</b>	0,5	0,46	0,41	0,62						
	<b>0,04</b>	0,5	0,52	0,5	0,99						

hloubka úběru 0,01 ; 0,02 ; 0,03 ; 0,04 [mm]

Tab. 14. Průměrné hodnoty parametru drsnosti Ra pro kotouč č.4

rychlost posuvu 8 ; 12 ; 16 ; 24 [m.min<sup>-1</sup>]

	8	12	16	24		8	12	16	24		
<b>PA6GF30</b>	<b>0,01</b>	1,01	0,63	0,49	0,44	<b>PA66</b>	<b>0,01</b>	3,95	3,67	2,16	1,8
	<b>0,02</b>	1,54	1,07	1,06	1,84		<b>0,02</b>	3,92	3,84	1,77	3,48
	<b>0,03</b>	1,99	1,3	1,39	0,69		<b>0,03</b>	3,28	3,19	2,73	3,92
	<b>0,04</b>	1,99	1,73	1,62	1,45		<b>0,04</b>	2,77	2,98	3,22	4,22
<b>PC</b>	<b>0,01</b>	0,38	0,65	0,62	0,79	<b>PP</b>	<b>0,01</b>	1,9	1,53	1,59	1,3
	<b>0,02</b>	0,48	0,66	0,71	0,97		<b>0,02</b>	2,15	2,08	1,33	1,98
	<b>0,03</b>	0,54	1,04	1,11	0,98		<b>0,03</b>	2,54	2,25	2,19	2,08
	<b>0,04</b>	0,98	1,16	0,99	1,01		<b>0,04</b>	2,48	2,93	2,52	2,32
<b>pryž EPDM</b>	<b>0,01</b>	0,5	0,65	0,76	0,47	<b>PTFE</b>	<b>0,01</b>	0,29	0,26	0,21	0,21
	<b>0,02</b>	0,54	1,17	1,15	0,98		<b>0,02</b>	0,4	0,26	0,48	0,38
	<b>0,03</b>	0,64	1,27	1,38	1,49		<b>0,03</b>	0,49	0,25	0,54	0,38
	<b>0,04</b>	1,02	1,48	0,92	1,87		<b>0,04</b>	0,58	0,52	0,62	0,59
<b>PVC</b>	<b>0,01</b>	0,46	0,29	0,29	0,34						
	<b>0,02</b>	0,55	0,65	0,46	0,71						
	<b>0,03</b>	0,61	0,52	0,46	0,75						
	<b>0,04</b>	0,51	0,57	0,55	0,81						

hloubka úběru 0,01 ; 0,02 ; 0,03 ; 0,04 [mm]

## 9 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

Pro statistické vyhodnocení byl použit program STATISTICA, školní verze, za odborné spolupráce s Mgr. Lenkou Radovou, Ph.D.

### 9.1 Model číslo 1

Do modelu č.1 byly vloženy všechny naměřené data. Jako závislé proměnné byly zvoleny hloubka řezu  $a_e$ , posuv  $v_p$ , a dále typ zrna, zrnitost, tvrdost a pórovitost.

Dostali jsme tyto výsledky:

Parametr drsnosti  $R_a$  *neovlivňují* statisticky významně tyto parametry a kombinace:

hloubka řezu

zrnitost \* posuv

broušený materiál \* posuv

typ zrna \* hloubka řezu

zrnitost \* hloubka řezu

tvrdost \* hloubka řezu

posuv \* hloubka řezu

zrnitost \* broušený materiál \* posuv

zrnitost \* broušený materiál \* hloubka řezu

pórovitost \* broušený materiál \* hloubka řezu

zrnitost \* posuv \* hloubka řezu

pórovitost \* posuv \* hloubka řezu

broušený materiál \* posuv \* hloubka řezu

typ zrna \* tvrdost \* broušený materiál \* posuv

zrnitost \* broušený materiál \* posuv \* hloubka řezu



Parametr drsnosti Ra *ovlivňují* statisticky významně tyto parametry a kombinace:

typ zrna

zrnitost

tvrdost

broušený materiál

posuv

typ zrna \* broušený materiál

zrnitost \* broušený materiál

tvrdost \* broušený materiál

typ zrna \* posuv

tvrdost \* posuv

broušený materiál \* hloubka řezu

pórovitost \* broušený materiál \* posuv

typ zrna \* posuv \* hloubka řezu

typ zrna \* tvrdost \* broušený materiál \* posuv

### **Korelace**

Silně korelují: pórovitost \* zrnitost

tvrdost \* typ zrna

středně korelují: zrnitost \* typ zrna

tvrdost \* pórovitost

Model č.1 nebyl správně zvolený, z výsledků je patrné, že bylo vloženo příliš vstupních závislých proměnných. Proto jsme zvolili model číslo 2.

## 9.2 Model číslo 2

Do modelu č.2 byly vloženy všechny naměřené data. Jako závislé proměnné byly zvoleny hloubka řezu  $a_e$ , posuv  $v_p$  a typ zrna.

Výsledky získané z programu STATISTICA:

- posuv málo ovlivňuje parametr drsnosti
- korelační koeficient mezi  $R_a$  a  $R_z$  je statisticky významný na hladině  $p < 10^{-3}$
- korelační koeficient  $r = 0,97$

Parametr drsnosti  $R_a$  **neovlivňují** statisticky významně tyto parametry a kombinace:

posuv

broušený materiál (pouze PA6GF30)

typ zrna \* broušený materiál (pouze PA6GF30)

Je zajímavé, že posuv neovlivňuje (nebo jen částečně ovlivňuje) parametr drsnosti. U kovových materiálů literatura a praxe uvádějí vliv posuvové rychlosti na drsnost. Avšak u zkoumaných plastových vzorků se zde tato závislost neprojevuje (nebo jen částečně projevuje). K potvrzení této hypotézy je ale potřeba dalšího a širšího zkoumání.

Parametr drsnosti  $R_a$  **ovlivňují** statisticky významně tyto parametry a kombinace:

hloubka řezu

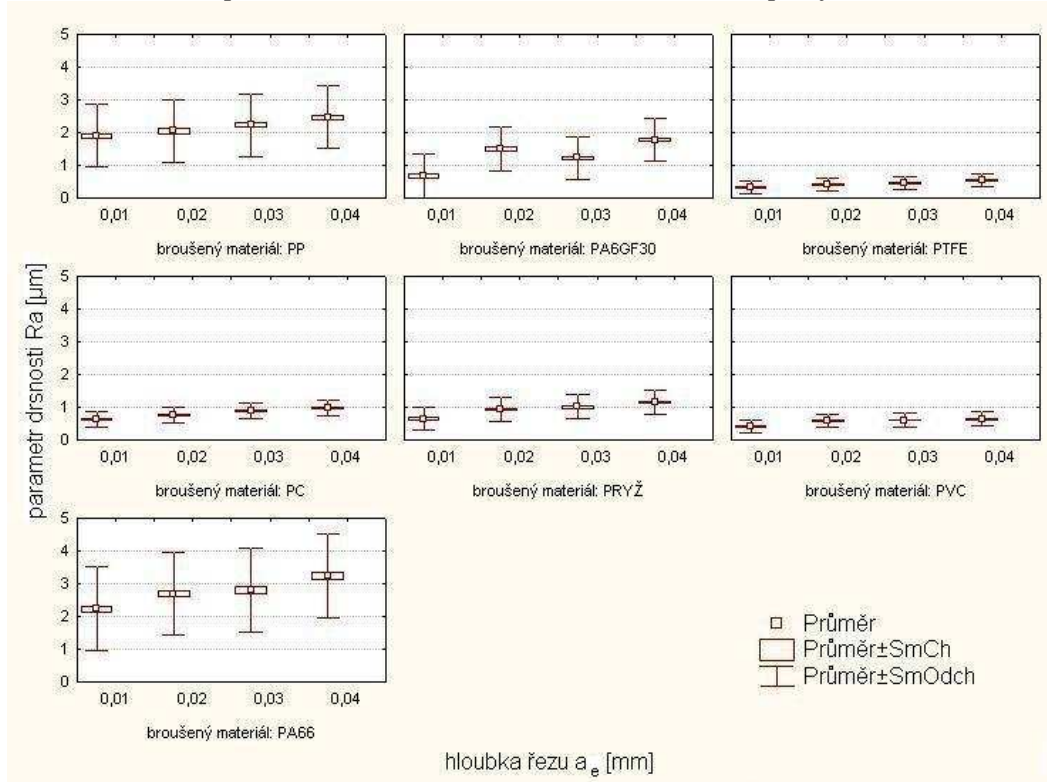
typ zrna

broušený materiál

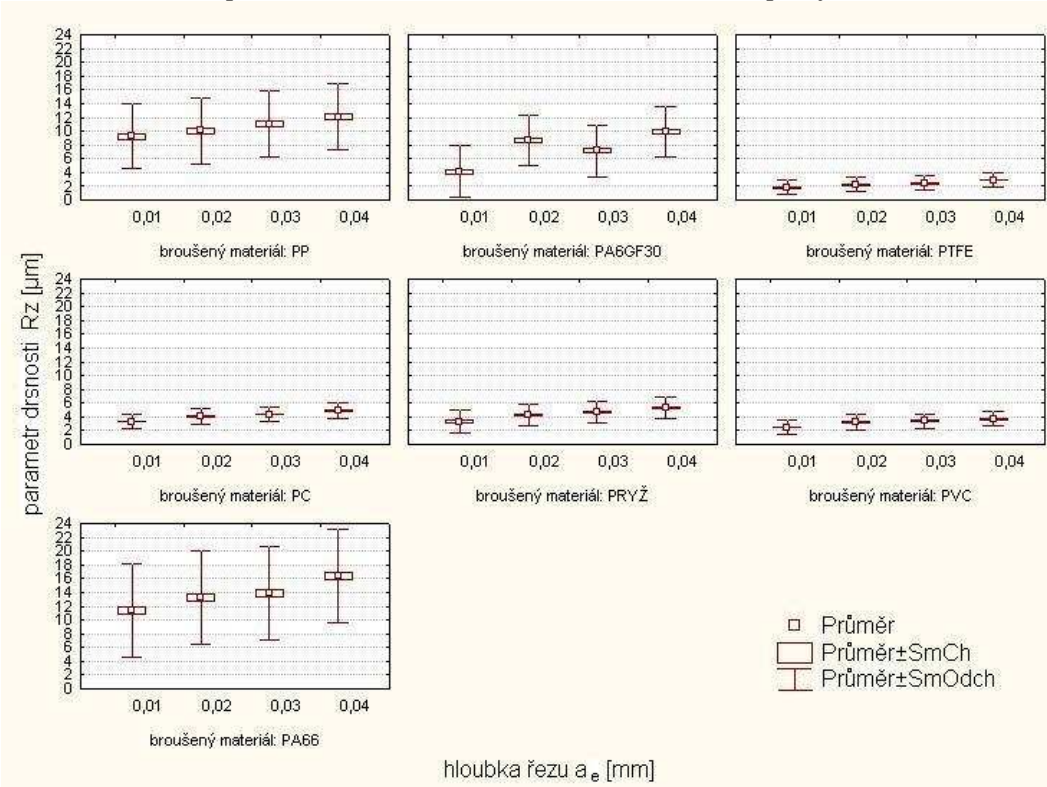
typ zrna \* broušený materiál

Další informace viz následující tabulky.

Tab. 15. Závislost parametru drsnosti Ra na hloubce řezu  $a_e$  pro jednotlivé materiály

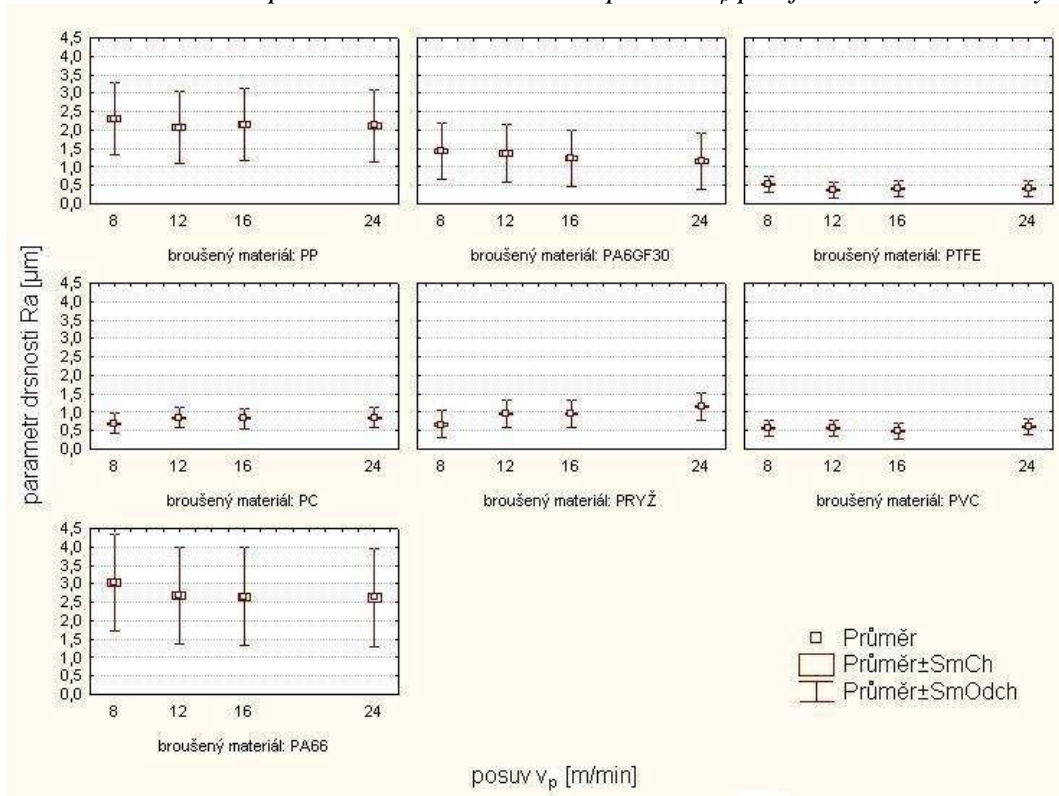


Tab. 16. Závislost parametru drsnosti Rz na hloubce řezu  $a_e$  pro jednotlivé materiály

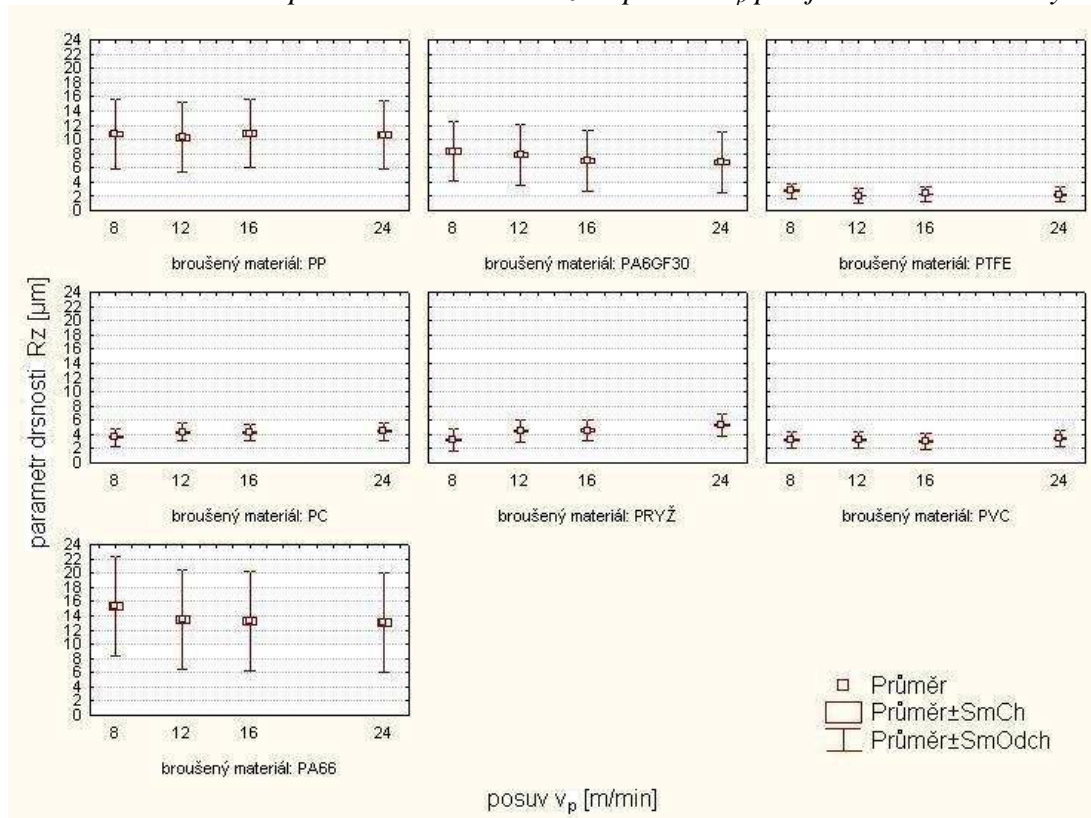


Z tabulek je tedy patrné, že hloubka řezu  $a_e$  **ovlivňuje** parametry drsnosti Ra i Rz. S rostoucí hloubkou řezu parametry drsnosti rostou.

Tab. 17. Závislost parametru drsnosti Ra na posuvu  $v_p$  pro jednotlivé materiály

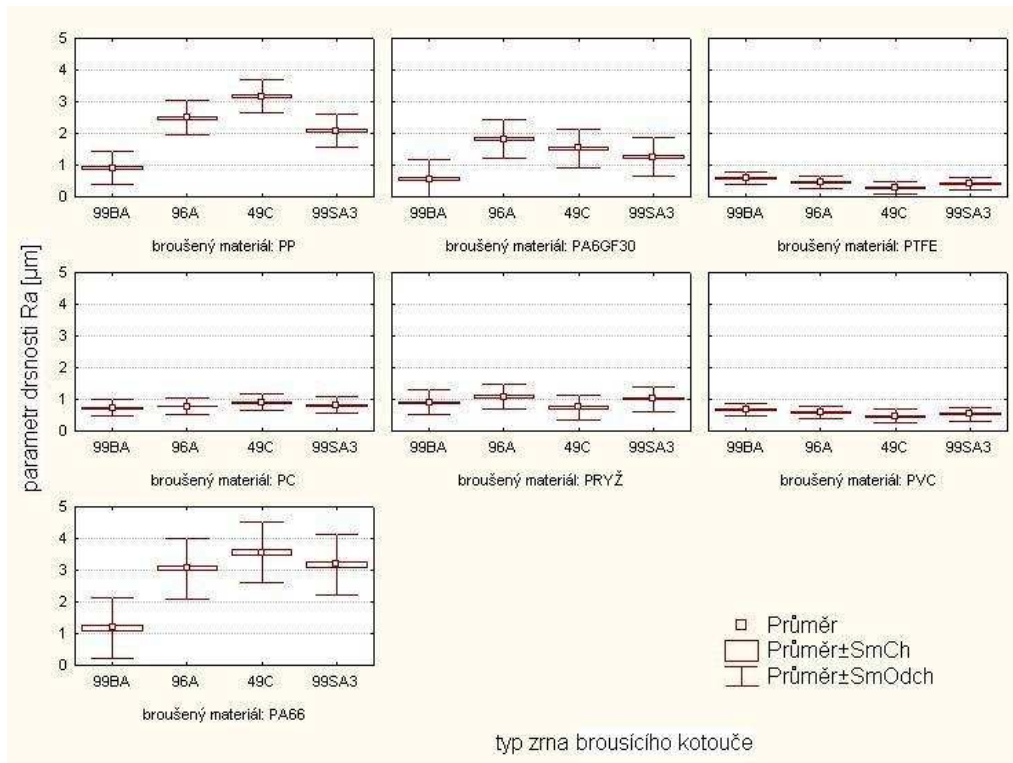


Tab. 18. Závislost parametru drsnosti Rz na posuvu  $v_p$  pro jednotlivé materiály

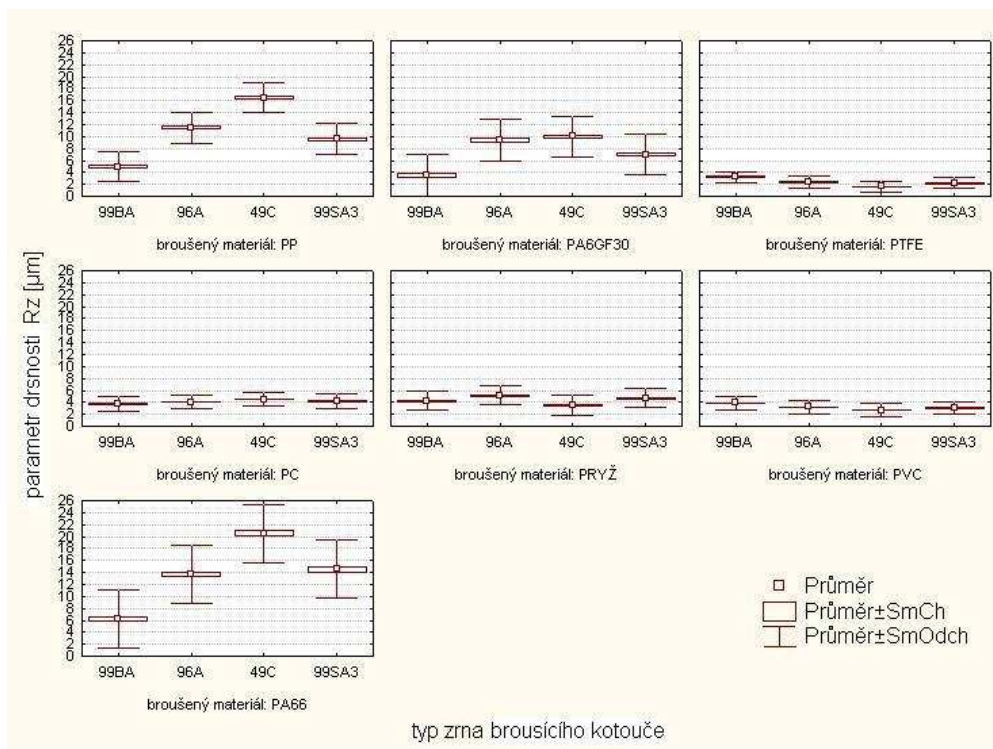


Z tabulek je patrné, že posuv  $v_p$  málo ovlivňuje parametry drsnosti Ra i Rz.

Tab. 19. Závislost parametru drsnosti Ra na typu zrna brousícího kotouče pro jednotlivé materiály



Tab. 20. Závislost parametru drsnosti Rz na typu zrna brousícího kotouče pro jednotlivé materiály



Z tabulek je patrné, že typ zrna brousícího kotouče **ovlivňuje** parametry drsnosti Ra i Rz.

Výsledky patrné z tabulek:

- kotouč č.3 - 49C 100 J 10 V – materiály PP a PA66 vykazují nejhorší výsledky při broušení tímto kotoučem. Naopak materiály PTFE a PVC vykazují nejlepší hodnoty při broušení tímto kotoučem.
- kotouč č.1 - 99BA 46 J 9 V – materiály PP a PA66 vykazují nejlepší výsledky při broušení tímto kotoučem.
- ostatní materiály vykazují prakticky stejné hodnoty při broušení všemi kotouči.

### 9.3 Vyhodnocení

Na základě naměřených a vyhodnocených dat můžeme dojít k následujícím závěrům. Materiály jsou seřazeny podle hodnot drsnosti Ra, od nejmenší po největší.

**PTFE** – tento materiál vykazuje nejmenší hodnoty drsnosti při všech třech proměnných (posuv, hloubka řezu, typ zrna). Hodnoty drsnosti Ra se pohybují v rozmezí 0,2 až 0,6  $\mu\text{m}$ . Také můžeme říct, že přibližně přímo úměrně s rostoucí hloubkou řezu parametr drsnosti roste. Zajímavostí je zahřívání tohoto materiálu při broušení, protože teplota je mnohem větší než u ostatních materiálů.

**PVC** – materiál s podobnými hodnotami při broušení jako PTFE. Hodnoty drsnosti Ra se pohybují v rozmezí 0,4 až 0,8  $\mu\text{m}$ .

**PC** – další z materiálů řadící se do skupiny velmi dobře broušitelných. Hodnoty drsnosti Ra se pohybují v rozmezí 0,6 až 1,0  $\mu\text{m}$ . I zde můžeme říct, že přibližně přímo úměrně s rostoucí hloubkou řezu parametr drsnosti roste.

**pryž EPDM** – hodnoty drsnosti Ra se pohybují v rozmezí 0,8 až 1,2  $\mu\text{m}$ . U tohoto materiálu také platí, že přibližně přímo úměrně s rostoucí hloubkou řezu a také s rostoucím posuvem, parametr drsnosti roste.

**PA6GF30** – materiál spadající do skupiny středně broušitelných. Hodnoty drsnosti Ra se pohybují v rozmezí 0,7 až 2,5  $\mu\text{m}$ . Při broušení ale vznikl problém, popsany v kapitole 9.3.1.

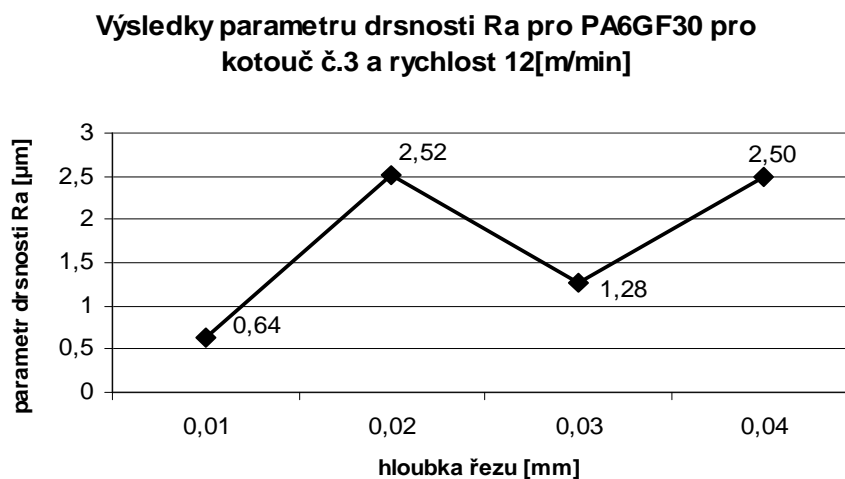
**PP** – špatně brouitelný materiál. Hodnoty drsnosti Ra se pohybují v rozmezí 2,0 až 3,2  $\mu\text{m}$ . Měření drsnosti bylo ovlivněno povrchem vzorku po broušení – zůstatek brousících zrn v materiálu – obtížněji měřitelné. Více v **kapitole 9.3.2**.

**PA66** – špatně brouitelný materiál, z naší skupiny nejhůře brouitelný. Hodnoty drsnosti Ra se pohybují v rozmezí 2,5 až 4,0  $\mu\text{m}$ . Dle tabulek je patrné, že přibližně přímo úměrně s rostoucí hloubkou řezu parametr drsnosti roste. Více v **kapitole 9.3.3**.

Obrázky struktur povrchu jednotlivých materiálů (zvětšeny 40krát, 100krát) jsou uloženy v přílohách na CD.

### 9.3.1 Materiál PA6GF30

Materiál PA6GF30 je polyamid 6 vyztužený 30% skleněných vláken. Při měření drsnosti po broušení byla zjištěna zajímavá skutečnost. Od určitého momentu měly výsledky skokový průběh, viz obrázek č. 55, přičemž standardní průběh má být přibližně lineárně stoupající.

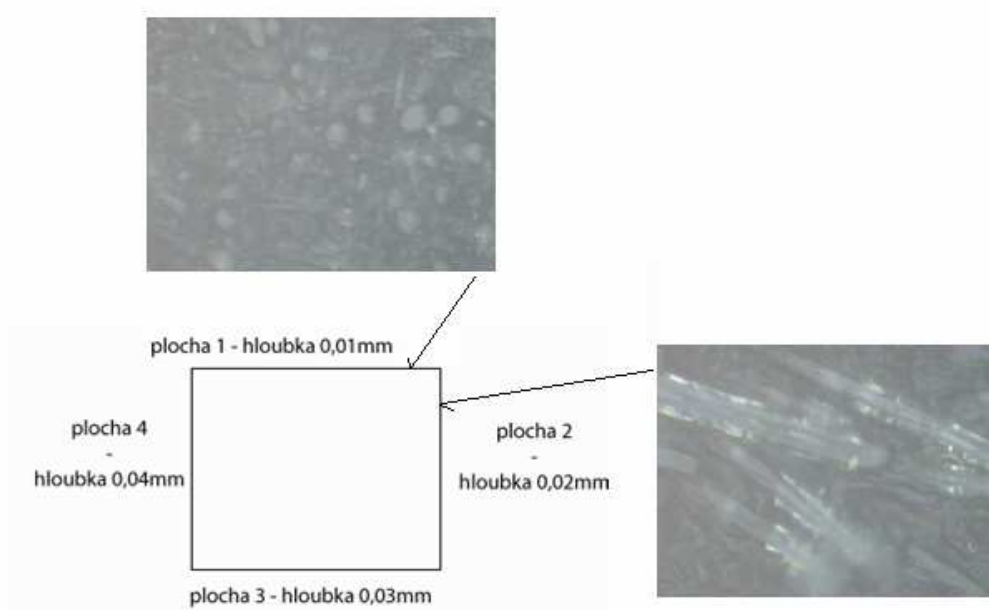


Obr. 55. Závislost parametru drsnosti Ra na hloubce řezu

Naší snahou bylo zjistit, proč je zde taková skoková změna. S největší pravděpodobností je to dáno orientací skleněných vláken při výrobě, kterými je PA vyztužen.

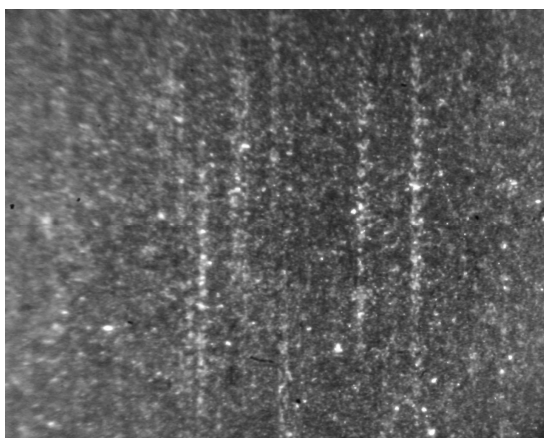
Plochy číslo 1 a 3, jsou totiž otočeny o 90° oproti plochám 2 a 4. Z toho pak vyplývá, že při broušení jsou vlákna na plochách č. 1 a 3 uřezávána, kdežto na plochách č. 2 a 4 jsou vlákna vytrhávána, viz obrázky č. 57 a 58.

Na zvětšení struktury povrchu obrázku č. 56 byl použit inverzní metalografický mikroskop XPJ6 - 6A s max. zvětšením 1200x, příslušenství – použito přídavné kamery EQ350/P.

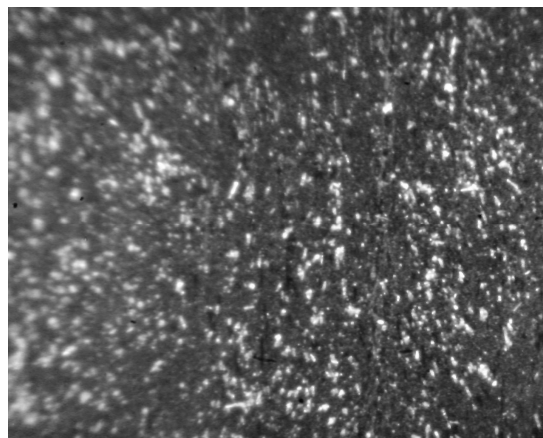


Obr. 56. Označení ploch při broušení a mikroskopické snímky

Následující obrázky č.57 a č.58 jsou pořízeny z přístroje ProScope HR, CSI Advance Lab-Kit, BODELIN Technologies – jedná se o velmi kvalitní fotokameru. Zvětšení u obrázků je 100krát.



Obr. 57. Povrch PA6GF30 - plocha č. 3



Obr. 58. Povrch PA6GF30 - plocha č. 4

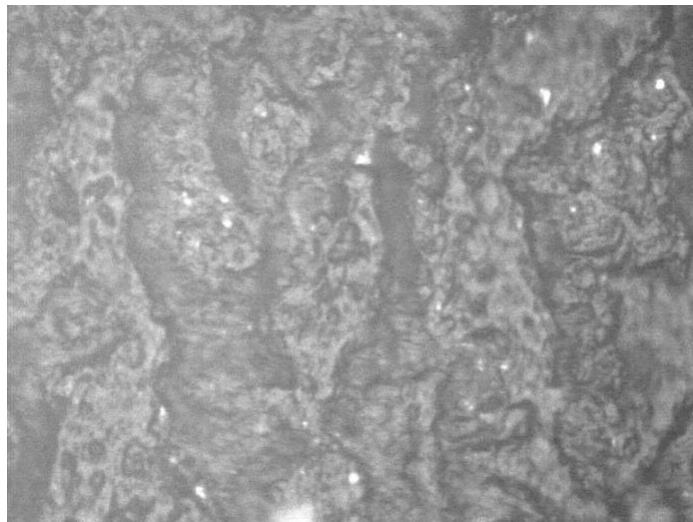


### 9.3.2 Materiál pryž EPDM

Vlivem tření dochází ke generování tzv. Schallamachových vln, které mají vliv na parametr drsnosti  $R_a$  a při mikroskopickém pozorování se jeví jako vlny, viz obrázek č. 45.

V roce 1971 Schallamach zjistil, že třením měkkého elastomeru po tuhé ploše pak na rozhraní často dominuje výskyt a šíření elastických nestabilit v podobě povrchových vln → tzv. Schallamachovy vlny. Přítomnost těchto vln může vést k výrazným změnám v frikčních vlastnostech. Schallamachovy vlny se skládají z malých pravidelných lomů (vrstev) napříč směrem posuvu. Schallamachovy vlny se utvářejí na elastomeru, když tvrdé těleso nebo válec se pohybuje přes povrch elastomeru kritickou rychlostí. Schallamachovy vlny neobrušují ani neopotřebovávají povrch elastomeru.

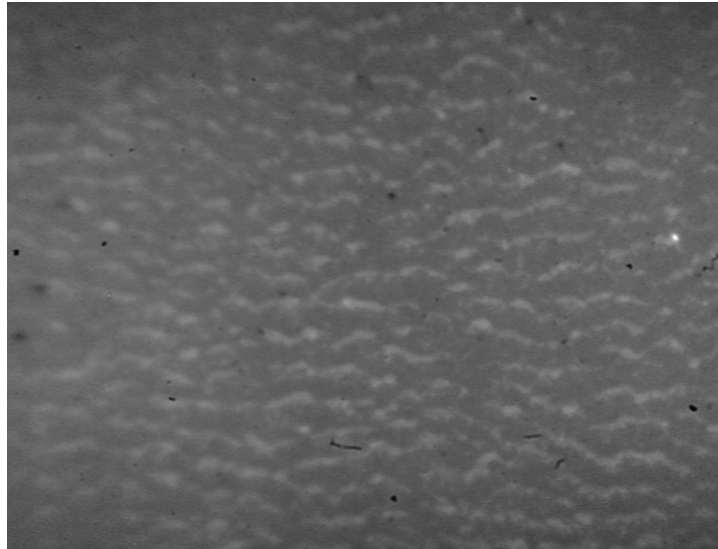
Přestože výskyt Schallamachových vln byl zkoumán posledních několik desetiletí, obecná mapa týkající základních materiálových vlastností, geometrie, a provozní podmínky (tj. rychlost a teplota) nebyla stanovena.



*Obr. 59. Pozorování Schallamachových vln na EPDM*

### 9.3.3 Materiál PA66

Při broušení dochází k natavování třísek na kotouč a také k natavování brousících zrn do povrchu materiálu (také u PP), což má negativní vliv na měření drsnosti povrchu. Také samotné měření pomocí přístroje je tím pádem složitější. PA66 je nevhodný pro broušení.



*Obr. 60. Povrchová struktura u PA66 zvětšená 100krát*

## ZÁVĚR

Broušení jako metoda dokončování povrchu se primárně používá pro obrábění kovů. Na základě praktické zkušenosti, získané během experimentálního měření lze konstatovat, že opracování plastů broušením je z větší části obtížné. Nevýhodou při broušení plastů je fakt, že parametry drsnosti závisí jak na typu daného polymeru, tak i na použitém brousícím kotouči. Proto je důležitá správná volba technologických podmínek v závislosti na daném plastu.

Bylo zjištěno, že výrobcem doporučený kotouč pro broušení plastů 99BA 46 J 9 V dosahuje lepší jakosti povrchu při broušení plastů jako PP a PA66. Ukázalo se ale, že kotouč 49C 100 J 10 V používaný pro broušení tvrdých materiálů (tvrdokovů a slinutých karbidů) má příznivý vliv na jakost povrchu po broušení plastů jako PTFE a PVC. Vysvětlení lze hledat pravděpodobně v různých typech zrna brousících kotoučů.

Jakost povrchu po broušení experimentálních plastových vzorků byla nejlepší u PTFE. Parametrů drsnosti s nejvyššími hodnotami bylo dosahováno u PA66. Na výslednou jakost povrchu mělo vliv i natavování mikrotřísek na povrch součásti, zanášení brousícího kotouče a vznik Schallamachových vln při broušení pryže. Práce ukazuje také vliv orientace skelných vláken po broušení. Ve směru vláken docházelo k vytrhávání struktury, a při broušení, kdy skelná vlákna byla orientována vertikálně, docházelo k uřezávání. Toto chování výrazně ovlivňovalo parametry jakosti.

Naměřená data pro sedm plastových vzorků byla statisticky zpracována. Statistický model neprokázal vliv posuvové rychlosti při broušení na parametr drsnosti  $R_a$ .

Pro všechna měření byla zpracována technická přílohová dokumentace, uložená na CD nosiči. Obsahuje vyhodnocení profilu povrchu u všech měřených materiálů a kotoučů, za různých technologických podmínek. Byly určeny parametry drsnosti ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$ ,  $R_t$ ,  $R_{Sm}$ ), sestaven materiálový podíl a diagram četnosti.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČERNÝ, F.; TRMAL, J.; MARŠÁLEK, J. *Brusky a broušení*. Nakladatelství technické literatury, Praha, 1970.
- [2] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha : Český normalizační institut, 1999.
- [3] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha : Český normalizační institut, 1999.
- [4] ČSN EN ISO 11562. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Metrologické charakteristiky fázově korigovaných filtrů*. Praha : Český normalizační institut, 1999.
- [5] EBK ERET BERNARD, s.r.o. [online]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.ebk.cz/technicke-plasty/ptfe-teflon.html>>.
- [6] *Characterization of engineered surfaces*, 7<sup>th</sup> International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, 2005.
- [7] *Characterizing Surface Quality: Why Average Roughness is Not Enough*. Veeco Instruments Inc., Tucson USA.
- [8] HLUCHÝ, M.; HANĚK, V. *Strojírenská technologie 2 - 2.díl*. 1.vyd. Praha: Scientea, 1999. ISBN 80-7183-127-1.
- [9] HONNER, M.; ŠVANTNER, M. *Měření napětí a zbytkových napětí* [online]. Plzeň : Západočeská univerzita. Dostupný z WWW:  
<[http://tftp.zcu.cz/files/pdf/IL\\_CZ\\_08\\_Zbytkova\\_napeti.pdf](http://tftp.zcu.cz/files/pdf/IL_CZ_08_Zbytkova_napeti.pdf)>.
- [10] HUTLOVÁ, V. Bakalářská práce, *Obrobitelnost plastů broušením*, UTB Zlín 2002.
- [11] KLUČÁKOVÁ, M. *Základy makromolekulární chemie* [online]. Brno: VUT. Dostupný z WWW: <<http://www.fch.vutbr.cz/home/klucakova/web14.doc>>.

- [12] KOČMAN, K. *Speciální technologie: obrábění*. Brno : Cerm, 2004.  
ISBN 80-214-2562-8.
- [13] KOŠEK, V.; MALÝ, V.; ZAHŘÁDKA, K. *Broušení a leštění brusnými pásy*.  
Praha, 1962.
- [14] MÁDL, J.; ZELENKA, A.; VRABEC, M. *Technologičnost konstrukce: obrábění  
a montáže*. 1.vyd. Praha : ČVUT, 2005. ISBN 8001032884.
- [15] Mitutoyo SJ – 301, Přístroj na měření drsnosti povrchu. Návod k použití.
- [16] MUSÍLKOVÁ; ROSA *Teorie obrábění*. 2.vyd. Praha : ČVUT, 1970.
- [17] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1.vyd. Žilina : EDIS, 2007.  
ISBN 978-80-8070-711-8.
- [18] PERNÍKÁŘ, J.; TYKAL, M.; VAČKÁŘ, J. *Jakost a metrologie, část: Metrologie*.  
Brno : Cerm, 2001. ISBN 80-214-1997-0.
- [19] PULCOVÁ, T. Bakalářská práce, *Dynamická obrobiteľnosť plastů při broušení*,  
UTB Zlín 2006.
- [20] ŘASA, J.; GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 - 1.díl*. 2.vyd. Praha : Scien-  
tea, 2005. ISBN 80-7183-337-1.
- [21] ŘÍČKA, J.; BULLA, V. *Technologie obrábění a montáže*. 2.vyd. Brno : VUT,  
1982. ISBN 411-33264.
- [22] ŠUBA, O. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. 2.vyd. Zlín : Academia  
centrum, 2006. ISBN 80-7318-431-1.
- [23] Technologické inženýrstvo, časopis, Žilina, 2/2007, ISSN 1336-5967.
- [24] *Tribologie* [online]. Liberec : TU, . Dostupný z WWW:  
<[http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/ttv/tribologie.pdf](http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf)>.
- [25] VASILKO,K.; BOKUČAVA,G. *Brúsenie kovových materiálov*. Bratislava, 1988

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$\alpha$	úhel natočení podávacího kotouče
$\alpha_o$	ortogonální úhel hřbetu
$\gamma_o$	ortogonální úhel čela
$\lambda_C, \lambda_S, \lambda_f$	filtry profilu
$Al_2O_3$	umělý korund
A1	plocha výstupků
A2	plocha prohlubní
AR	průměrná rozteč prvků motif drsnosti
AW	průměrná rozteč prvků motif vlnitosti
$B_4C$	karbid bóru
EPDM	ethylen-propylen-dien terpolymer
$n_o$	otáčky obrobku
$n_k$	otáčky brousícího kotouče
$n_{pk}$	otáčky podávacího kotouče
GPS	geometrické požadavky na výrobky
ln	vyhodnocovaná délka
lp, lr, lw	základní délka
Mr1, Mr2	materiálový podíl
$N_2B_3, KNB$	kubický nitrid bóru
Pc, Rc, Wc	průměrná výška prvků profilu
Pdc, Rdc, Wdc	rozdíl výšky úseku profilu
Pdq, Rdq, Wdq	průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu
Pku, Rku, Wku	špičatost posuzovaného profilu
Pmr, Rmr, Wmr	vzájemný materiálový poměr

Pmr(c), Rmr(c), Wmr(c)	materiálový poměr profilu (nosný podíl)
Pp, Rp, Wp	největší výška výstupku profilu
Pq, Rq, Wq	průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu
Psk, Rsk, Wsk	šikmost posuzovaného profilu
Pt, Rt, Wt	celková výška profilu
Pv, Rv, Wv	největší hloubka prohlubně profilu
Pz, Rz, Wz	největší výška profilu
PA66	polyamid 66
PA6GF30	polyamid 6 plněný 30% skleněných vláken
PC	polykarbonát
PP	polypropylen
PTFE	polytetrafluoretylen
PVC	polvinylchlorid
PSm, RSm, WSm	průměrná šířka prvků profilu
$r_n$	poloměr ostří
R	průměrná hloubka prvků motif drsnosti
Ra	střední aritmetická hodnota drsnosti
Rk	hloubka jádra drsnosti
Rpk	redukovaná výška výstupků
Rq	střední kvadratická hodnota drsnosti
Rz	maximální výška profilu
Rvk	redukovaná hloubka prohlubní
Rx	největší hloubka profilu nerovnosti
SiC	karbid křemíku
$v_o$	obvodová rychlost kotouče

W	průměrná hloubka prvků motif vlnitosti
W <sub>x</sub>	největší hloubka vlnitosti
W <sub>te</sub>	celková hloubka vlnitosti



**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. Struktura brousícího nástroje.....	13
Obr. 2. Tvar zrna brousícího kotouče.....	14
Obr. 3. Příklad označení brusného kotouče.....	15
Obr. 4. Některé tvary brousících kotoučů.....	15
Obr. 5. Princip orovnávání monokrystalickým diamantovým orovnávačem.....	17
Obr. 6. Broušení do kulata.....	19
Obr. 7. Rovinné broušení .....	20
Obr. 8. Broušení brousícím pásem.....	21
Obr. 9. Brousící pás.....	21
Obr. 10. Hrotové brusky.....	23
Obr. 11. Broušení kuželových ploch.....	23
Obr. 12. Bruska na díry.....	24
Obr. 13. Rovinné brusky.....	25
Obr. 14. Ostření čelních zubů frézy na univerzální nástrojové brusce.....	27
Obr. 15. Leštící kotouče.....	32
Obr. 16. Leštící kartáče – příklady uspořádání leštících elementů.....	33
Obr. 17. Principy strojů s leštícími pásy.....	34
Obr. 18. Profil povrchu.....	36
Obr. 19. Schématické znázornění geometrie povrchu.....	36
Obr. 20. Parametry P, R, W.....	37
Obr. 21. Filtr profilu.....	39
Obr. 22. Schématické vyjádření maximální výšky profilu Rz.....	42
Obr. 23. Schématické vyjádření střední aritmetické hodnoty drsnosti Ra.....	42
Obr. 24. Schématické vyjádření střední kvadratické hodnoty drsnosti Rq.....	43

Obr. 25. Určení parametrů z křivky lineárního poměru materiálu.....	45
Obr. 26. Odvození parametrů drsnosti povrchu z pravděpodobnostní křivky materiálu.....	47
Obr. 27. Dotyková metoda snímání profilu.....	49
Obr. 28. Měřicí smyčka dotykového profilometru.....	50
Obr. 29. Přenosová charakteristika profilometru s Gaussovým filtrem.....	53
Obr. 30. Bruska rovinná horizontální BRH 20.03F.....	63
Obr. 31. Popis měřícího zařízení Balatron 2001 – ovládací část.....	63
Obr. 32. Popis měřícího zařízení Balatron 2001 – snímací část.....	64
Obr. 33. Přístroj na měření drsnosti Mitutoyo SJ-301 - popis.....	65
Obr. 34. Přístroj na měření drsnosti Mitutoyo SJ-301.....	66
Obr. 35. Příklad vyhodnocení v programu Excel pro každý materiál.....	67
Obr. 36. Výpočet $R_k$ , $Mr_1$ , $Mr_2$ .....	68
Obr. 37. Výpočet parametrů $R_{pk}$ a $R_{vk}$ .....	68
Obr. 38. Určení parametrů $R_k$ , $R_{pk}$ , $R_{vk}$ pro PA6GF30 pomocí programu AUTOCAD...	69
Obr. 39. Určení parametrů $R_k$ , $R_{pk}$ , $R_{vk}$ pro PA66 pomocí programu AUTOCAD.....	70
Obr. 40. Určení parametrů $R_k$ , $R_{pk}$ , $R_{vk}$ pro PRYŽ pomocí programu AUTOCAD.....	71
Obr. 41. Křivka materiálového podílu pro pryž PA6GF30 – kotouč č.1.....	72
Obr. 42. Křivka materiálového podílu pro PA66 – kotouč č.1.....	72
Obr. 43. Křivka materiálového podílu pro EPDM – kotouč č.1.....	72
Obr. 44. Křivka materiálového podílu pro PA6GF30 – kotouč č.2.....	73
Obr. 45. Křivka materiálového podílu pro PA66 – kotouč č.2.....	73
Obr. 46. Křivka materiálového podílu pro pryž EPDM – kotouč č.2.....	73
Obr. 47. Křivka materiálového podílu pro PA6GF30 – kotouč č.3.....	74
Obr. 48. Křivka materiálového podílu pro PA66 – kotouč č.3.....	74
Obr. 49. Křivka materiálového podílu pro PRYŽ – kotouč č.3.....	74

---

Obr. 50. Křivka materiálového podílu pro PA6GF30 – kotouč č.4.....	75
Obr. 51. Křivka materiálového podílu pro PA66 – kotouč č.4.....	75
Obr. 52. Křivka materiálového podílu pro pryž EPDM – kotouč č.4.....	75
Obr. 53. Křivky materiálového podílu pro PC při konstantním úběru a různých posuvech .....	76
Obr. 54. Křivky materiálového podílu pro PC při konstantním posuvu a různých úběrech.. .....	77
Obr. 55. Závislost parametru drsnosti Ra na hloubce řezu.....	87
Obr. 56. Označení ploch při broušení a mikroskopické snímky.....	88
Obr. 57. Povrch PA6GF30 - plocha č. 3.....	88
Obr. 58. Povrch PA6GF30 - plocha č. 4.....	88
Obr. 59. Pozorování Schallamachových vln na EPDM.....	89
Obr. 60. Povrchová struktura u PA66 zvětšená 100krát.....	90

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Brousící materiály.....	16
Tab. 2. Přesnost a jakost ploch obrobených broušením.....	28
Tab. 3. Orientační hodnoty pro mechanické leštění otáčejícími se kartáči.....	30
Tab. 4. Dosahované parametry při leštění.....	35
Tab. 5. Tabulka orientačních fyzikálně - mechanických vlastností použitých materiálů – část 1.....	60
Tab. 6. Tabulka orientačních fyzikálně - mechanických vlastností použitých materiálů – část 2.....	60
Tab. 7. Charakteristické vlastnosti kotoučů.....	61
Tab. 8. Použití brousících kotoučů.....	62
Tab. 9. Technické údaje brusky BRH 20.03F.....	62
Tab. 10. Tabulka naměřených hodnot kmitání kotouče.....	64
Tab. 11. Průměrné hodnoty parametru drsnosti Ra pro kotouč č.1.....	78
Tab. 12. Průměrné hodnoty parametru drsnosti Ra pro kotouč č.2.....	78
Tab. 13. Průměrné hodnoty parametru drsnosti Ra pro kotouč č.3.....	79
Tab. 14. Průměrné hodnoty parametru drsnosti Ra pro kotouč č.4.....	79
Tab. 15. Závislost parametru drsnosti Ra na hloubce řezu $a_e$ pro jednotlivé materiály.....	83
Tab. 16. Závislost parametru drsnosti Rz na hloubce řezu $a_e$ pro jednotlivé materiály.....	83
Tab. 17. Závislost parametru drsnosti Ra na posuvu $v_p$ pro jednotlivé materiály.....	84
Tab. 18. Závislost parametru drsnosti Rz na posuvu $v_p$ pro jednotlivé materiály.....	84
Tab. 19. Závislost parametru drsnosti Ra na typu zrna brousícího kotouče pro jednotlivé materiály.....	85
Tab. 20. Závislost parametru drsnosti Rz na typu zrna brousícího kotouče pro jednotlivé materiály.....	85