

Vliv dokončovacích operací na životnost dílů plastikářských forem

Bc. Pavel Obadal

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel OBADAL**
Osobní číslo: **T09573**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Téma práce: **Vliv dokončovacích operací na životnost dílů
plastikářských forem**

Zásady pro vypracování:

1. Provedte studium literatury z oblasti teorie a technologie dokončovacích operací
2. Hodnoťte metody měření charakteristik nedokonalostí povrchu s ohledem na životnost výrobků
3. Určete vliv technologických podmínek na jakost ploch
4. Vyhodnoťte vliv technologických podmínek na životnost

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Kocman,K.,Prokop,J.:Technologie obrábění.CERM Brno.2007

Vasilko,K.,Ragan,E.:Teoria výrobných technológií.TU Košice.2007

Neslušan,M.aj.:Experimentálne metódy v trieskovom obrábání.EDIS Žilina.2007

Pernikář,J.,Tykal,M.:Strojírenská metrologie.CERM Brno 2006

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Imrich Lukovics, CSc.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **14. února 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2011**

Ve Zlíně dne 6. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 29.4.2011

.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

V této diplomové práci byla rozebrána teorie a technologie vybraných dokončovacích operací (broušení, superfinišování, leštění) a teorie nedokonalostí povrchu. Hlavním cílem této práce bylo zjistit vliv těchto operací na životnost plastikářských forem. Bylo prováděno experimentální měření vlastností jednotlivých technologií na vybraných materiálech při změnách řezných podmínek. Nakonec byly všechny výsledky vyhodnoceny pomocí programů MINITAB 14 a MS Excel 2007.

Klíčová slova: dokončovací operace, broušení, superfinišování, leštění, MINITAB 14

ABSTRACT

In this thesis was analysed theory and technology of selected finishing operations (grinding, finishing, polishing) and theory of imperfection surface. The main aim of work was to find out influence this operations to life of moulds. It was carried out experimental measurements of the properties of technologies on selected materials for changes to the cutting conditions. In the end were all results evaluated by programs MINITAB 14 and MS Excel 2007.

Keywords: finishing operations, grinding, finishing, polishing, MINITAB 14

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 TEORIE BROUŠENÍ	13
1.1 TECHNOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA BROUŠENÍ	13
1.1.1 Názvosloví běžných broušicích způsobů	13
1.1.2 Tvorba třísky při broušení	15
1.1.3 Kinematika broušení	16
1.1.4 Řezné síly	17
1.2 BROUSICÍ MATERIÁLY	19
1.2.1 Standardní broušicí materiály	19
1.2.2 Diamantové broušicí materiály	20
1.2.3 Broušicí materiály z kubického nitridu boru.....	21
1.3 BROUSICÍ NÁSTROJE	21
1.3.1 Zrnitost	21
1.3.2 Pojivo broušicích zrn.....	22
1.3.3 Tvrdost broušicího nástroje.....	23
1.3.4 Struktura.....	23
1.3.5 Druhy broušicích zrn.....	24
1.3.6 Opotřeбенí broušicích zrn.....	24
2 TEORIE SUPERFINIŠOVÁNÍ	26
2.1 TECHNOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA	26
2.2 SUPERFINIŠOVACÍ NÁSTROJE	28
2.3 SUPERFINIŠOVACÍ STROJE A ZAŘÍZENÍ	28
2.4 ŘEZNÉ KAPALINY POUŽÍVANÉ PŘI SUPERFINIŠOVÁNÍ.....	29
2.5 VÝHODY A OMEZENÍ SUPERFINIŠOVÁNÍ.....	30
2.6 UPLATNĚNÍ V PRAXI	30
3 TEORIE LEŠTĚNÍ	32
3.1 PODSTATA A VŠEOBECNÉ ZÁSADY LEŠTĚNÍ	32
3.2 MECHANICKÉ LEŠTĚNÍ	32
3.3 CHEMICKÉ LEŠTĚNÍ	33
3.4 ELEKTROCHEMICKÉ LEŠTĚNÍ.....	34
3.5 LEŠTĚNÍ ROTUJÍCÍMI KARTÁČI.....	35
3.6 OMÍLÁNÍ.....	35
3.7 LEŠTĚNÍ PÁSY	37
3.8 LEŠTĚNÍ VELKÝCH ROVINNÝCH PLOCH.....	37
4 TEORIE NEDOKONALOSTÍ POVRCHU	38
4.1 CHARAKTER POVRCHU	38
4.2 PARAMETRY STRUKTURY POVRCHU	40
4.2.1 Amplitudové parametry (výstupek a prohloubenina):	40
4.2.2 Křivky a jejich odpovídající parametry.....	41
4.3 KVALITA OBROBENÉHO POVRCHU	42
4.3.1 Zbytková napětí po obrábění.....	43

4.3.2	Zpevnění povrchu.....	44
4.3.3	Trhliny v obrobeném povrchu.....	44
4.3.4	Chemické změny	45
4.3.5	Fázové přeměny	45
II	PRAKTICKÁ ČÁST	46
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	47
6	POUŽITÉ MATERIÁLY A ZAŘÍZENÍ	48
6.1	POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	48
6.1.1	Drsnoměr Mitutoyo SJ-301	48
6.1.2	Vodorovná rovinná bruska BRH 20.03 F	49
6.1.3	Převodová vrtačka B40 GSM.....	50
6.2	CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ	50
6.2.1	Ocel 11600	50
6.2.2	Ocel 14109	50
6.2.3	Ocel 19436	51
6.2.4	Oceli 14109.4 a 19436.4	51
7	TECHNOLOGIE BROUŠENÍ.....	52
7.1	OZNAČOVÁNÍ BROUSICÍCH KOTOUČŮ	53
7.2	POUŽITÉ BROUSICÍ KOTOUČE.....	54
7.3	SINTROVANÝ KORUND	54
7.4	POROVNÁNÍ POUŽITÝCH KOTOUČŮ PŘI STEJNÝCH PODMÍNKÁCH	55
7.4.1	Závislosti R _{mr} , Ra, Rz na a _p	55
7.4.2	Závislosti R _{mr} , Ra, Rz na v _f	64
7.5	POROVNÁNÍ POUŽITÝCH MATERIÁLŮ PŘI STEJNÝCH PODMÍNKÁCH	67
7.5.1	Závislosti R _{mr} , Ra, Rz na a _p	67
7.6	POROVNÁNÍ MATERIÁLOVÉHO POMĚRU RMR V RŮZNÝCH VÝŠKÁCH POSUZOVANÉHO PROFILU	72
8	TECHNOLOGIE LEŠTĚNÍ TEXTILNÍM KOTOUČEM.....	73
8.1	POROVNÁNÍ MATERIÁLŮ PŘI LEŠTĚNÍ TEXTILNÍM KOTOUČEM	73
9	TECHNOLOGIE RUČNÍHO LEŠTĚNÍ (LAPOVÁNÍ).....	77
9.1	POUŽITÉ BROUSICÍ KAMENY	78
9.1.1	Gesswein-1604, zrnitost 600, typ MF	78
9.1.2	Gesswein-2904, zrnitost 900, typ DF.....	79
9.1.3	Gesswein-9004, zrnitost 1200, typ SF	79
9.2	POROVNÁNÍ MATERIÁLŮ PŘI RUČNÍM LEŠTĚNÍ (LAPOVÁNÍ).....	79
10	TECHNOLOGIE SUPERFINIŠOVÁNÍ	83
10.1	ZÁKLADNÍ PARAMETRY SUPERFINIŠOVACÍHO STROJE	83
10.2	ŘEZNÉ PODMÍNKY PŘI SUPERFINIŠOVÁNÍ A SPECIFIKACE NÁSTROJŮ	83
10.3	POUŽITÉ SUPERFINIŠOVACÍ KAMENY	84
10.4	NAMĚŘENÉ HODNOTY	85
11	VLIV TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK NA ŽIVOTNOST	86

11.1	SROVNÁNÍ POUŽITÝCH BROUSICÍCH KOTOUČŮ U JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ.....	86
11.2	SROVNÁNÍ ZKOUMANÝCH TECHNOLOGIÍ U JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ.....	88
11.3	Ekonomické zhodnocení.....	89
ZÁVĚR		90
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		92
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		95
SEZNAM OBRÁZKŮ		97
SEZNAM TABULEK.....		99
SEZNAM PŘÍLOH.....		100

ÚVOD

S ohledem na všeobecný vzestup technické úrovně různých zařízení, kladou se vyšší požadavky na materiály, součástky a výrobky používané ve finálních zařízeních a průmyslu, používají se nové, pevnější a houževnatější materiály, podstatně se rozšiřuje množství součástí, u kterých se vyžaduje vysoká jakost povrchu. Proto se ve výrobní praxi stále častěji setkáváme se součástmi, které jsou tvarově náročné s předepsanou vysokou jakostí povrchu a s úzkými rozměrovými tolerancemi. Objevuje se potřeba opracovávat tvrdé i velmi tvrdé a těžkoobrobitelné materiály s vysokými nároky na rozměrovou a tvarovou přesnost a kvalitu povrchu.

Proto se začali řešit optimální technologie dokončování povrchů a způsoby jemného opracování. Jejich současný význam si vyžaduje účinnější uplatňování teoretických poznatků a výsledků základního i aplikovaného výzkumu.

Technologie dokončování má za cíl dosáhnouti přesných tvarů a rozměrů součástek a finální kvalitu obrobeného povrchu. Požadovaná mikrogeometrie povrchu se dosahuje klasickým obráběním (dokončovací soustružení, frézování atd.), vrháním kuliček, písku atd., chemickým a elektrochemickým působením (vzniká povrch s nedefinovanou geometrií), broušením, leštěním, lapováním, superfinišováním (vzniká povrch s minimálními mikronerovnostmi). Vysokou přesností tvaru a rozměrů se umožnila sériová výroba vyměnitelných součástek. Součástky s kvalitním povrchem lépe snášejí dynamické zatížení, odolávají opotřebení, vzdorují korozi, čímž se zvyšuje funkční způsobilost, spolehlivost a životnost složitých mechanismů, a tím i funkční schopnost a ekonomická výhodnost celých strojů a zařízení.

Základní charakteristiky dokončovacích způsobů obrábění jsou odvozené od fyzikálních zákonů a jejich aplikací v technice. Každá technologická metoda se v podstatě vyznačuje fyzikálním anebo chemickým působením na objekt technologického zpracování. Dokončovací metody se postupně vyvíjí na technologie označované jako nanotechnologie. Pod tímto pojmem rozumíme takové výrobní technologie, při kterých se dosahuje přesnost rozměrů v nanometrech ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), teda při kterých se odebírá anebo tvaruje materiál v rozmezí atomové nebo molekulové struktury. První náznaky takových metod jsou při chemickém leštění a elektrolytickém leštění a obrábění laserovými paprsky. [13,23]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TEORIE BROUŠENÍ

Broušení se používá zejména pro obrábění součástí s vyššími požadavky na přesnost rozměrů a tvarů a jakost povrchu. Dále se broušení uplatňuje při obrábění materiálů, které není možné jinými obráběcími metodami obrobit, nebo je brousicí metoda hospodárnější než jiné. S rozvojem výkonných brousicích nástrojů a strojů se význam broušení rozšiřuje z původní oblasti dokončovacích operací také na produkční obrábění. [16]

1.1 Technologická charakteristika broušení

Brousicí proces má základní charakteristiky podobné jako jiné obráběcí procesy a zvláště je blízký frézování. Při broušení však dochází ke kvantitativním i kvalitativním odlišnostem, které souvisí zejména s vlastnostmi brousicího kotouče a řeznými podmínkami. Broušení se od frézování odlišuje především různorodostí geometrického tvaru brousicích zrn a jejich nepravidelným rozmístěním po ploše brousicího nástroje. Úhel čela zrn se mění a bývá vesměs záporný. Brousicí proces se uskutečňuje při vysokých řezných rychlostech (30 až 100 m.s⁻¹) a při malých průřezech třísky (10⁻³ až 10⁻⁵ mm²).

Od jiných způsobů obrábění se práce brousicího kotouče liší schopností tzv. samoostření. Tato vlastnost brousicího kotouče souvisí s poměrně málo pevným zakotvením brousicího zrna ve vazbě kotouče. V důsledku zvýšení řezných sil na otupených zrnech se tato vylomí a jejich funkci přebírají zrna neotupená. [16]

1.1.1 Názvosloví běžných brousicích způsobů

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

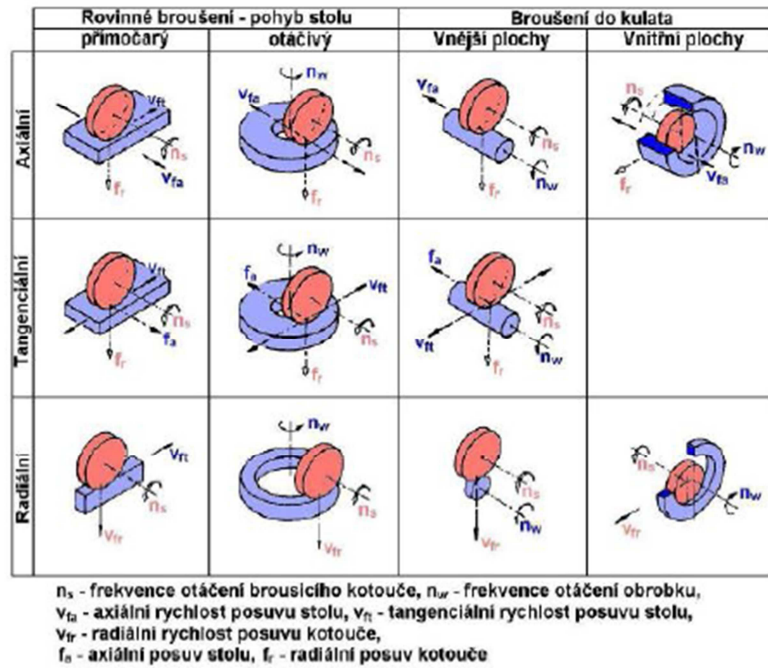
Podle tvaru obrobeného povrchu a způsobu jeho vytváření se rozliší: [16]

- Rovinné broušení - výsledkem je rovinná plocha
- Broušení do kulata – výsledkem je rotační povrch
- Broušení na otáčivém stole – broušení s rotačním posuvem
- Tvarovací broušení – broušení závitů, ozubených kol apod.
- Kopírovací broušení – broušení s řízenou změnou posuvu, NC stroje

- Broušení tvarovými broušícími kotouči – profil broušícího kotouče určuje konečný profil obrobku

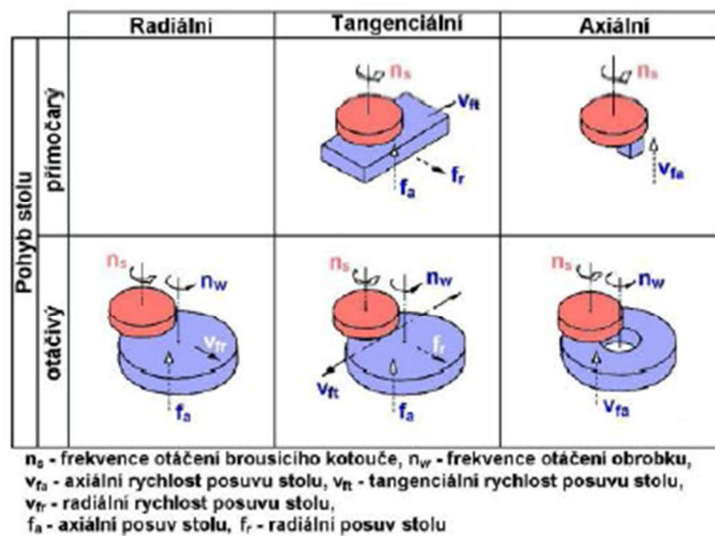
Podle aktivní části broušícího kotouče se specifikuje: [16]

- Obvodové broušení – broušení obvodem kotouče



Obr. 1. Vybrané způsoby obvodového broušení [17]

- Čelní broušení – broušení čelem kotouče kolmým k jeho ose



Obr. 2. Vybrané způsoby čelního broušení [17]

Podle vzájemné polohy broušícího kotouče a obrobku se charakterizuje: [16]

- Vnější broušení – broušení vnějšího povrchu obrobku
- Vnitřní broušení – broušení vnitřního povrchu obrobku

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

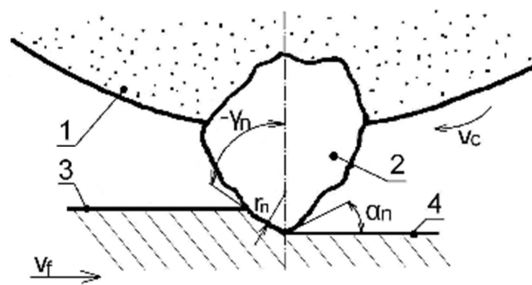
[16]

- Axiální broušení – hlavní posuv stolu je rovnoběžný s osou kotouče
- Tangenciální broušení – hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě D
- Radiální broušení – hlavní posuv stolu ve zvoleném bodě D je radiální vzhledem ke kotouči
- Obvodové zápichové broušení – posuv stolu je plynulý radiální
- Čelní zápichové broušení – posuv stolu je plynulý axiální

1.1.2 Tvorba třísky při broušení

Broušení jako obráběcí metoda je charakterizováno specifickými podmínkami tvorby třísky a vzniku obrobeného povrchu. V důsledku velkých plastických deformací a vnějšího i vnitřního tření se určitá část třísky ohřeje natolik, že se roztaví a vytvoří kapky kovu nebo shoří (jiskření). Model záběru vázaného zrna brusiva je na obr. 3.

Jednotlivá broušící zrna mají nepravidelný geometrický tvar, vysokou tvrdost, odolnost proti teplotě, nepravidelné poloměry zaoblení ostří r_n řádu několika tisícín milimetrů. Broušící zrna mají zpravidla negativní úhel čela γ_n a poměrně velký úhel hřbetu α_n . Za řeznou rychlost při broušení se považuje obvodová rychlost broušícího kotouče, která je vzhledem k ostatním metodám obrábění relativně vysoká. Rychlost posuvů obrobku nebo kotouče mají na rychlost řezného pohybu v_e zanedbatelný vliv. [16]

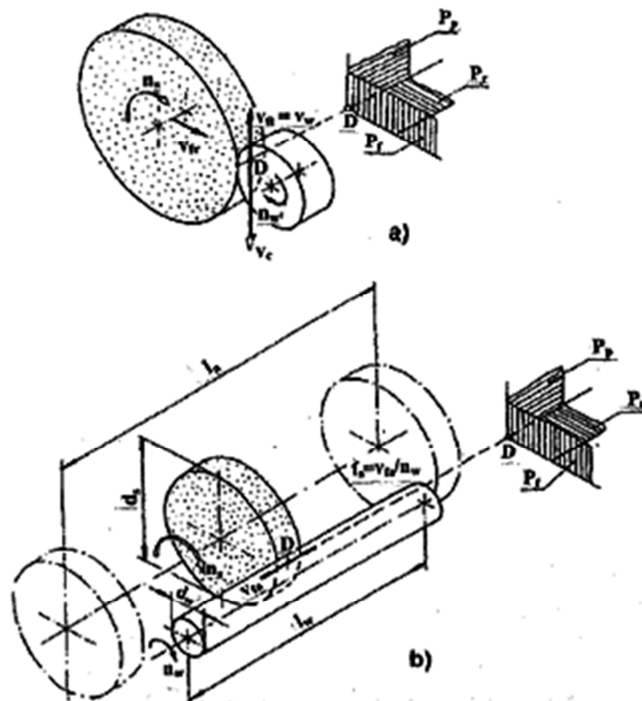


Obr. 3. Model záběru brousicího zrna [16]

v_c – řezná rychlost, v_f – posuvová rychlost, γ_n – normální úhel čela, α_n – normální úhel hřbetu, r_n – poloměr zaoblení ostří, 1 – brousící kotouč, 2 – brousící zrna, 3 – obráběná plocha, 4 – obrobená plocha

1.1.3 Kinematika broušení

Pohyby a rychlosti při broušení se identifikují pro jednotlivé brousící způsoby. V rámci dané problematiky je dále charakterizováno obvodové vnější broušení do kulata.



Obr. 4. Pohyby a souřadnicové soustavy rovin pro obvodové vnější broušení do kulata, a) radiální, b) axiální [16]

d_s – průměr brousicího kotouče, d_w – průměr obrobku, n_s – frekvence otáčení brousicího kotouče, n_w – frekvence otáčení obrobku, n_s – frekvence otáčení brousicího kotouče, v_{fa} – axiální rychlost posuvu stolu, v_{ft} – radiální rychlost posuvu stolu, f_a – axiální posuv stolu, D – hlavní bod při broušení, P_f – nástrojová rovina boční, P_p – nástrojová rovina zadní, P_r – nástrojová rovina základní, l_a – délka axiální dráhy brousicího kotouče, l_w – délka obrobku

Řezná rychlost v_c se vyjádří vztahem:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (1)$$

d_s – průměr brousicího kotouče [mm], n_s – frekvence otáčení brousicího kotouče [min^{-1}]

Řezná rychlost při běžném broušení je 30 až 35 $m \cdot s^{-1}$. Při rychlostním broušení je nutná aplikace kotouče se speciálním druhem pojiva a řezná rychlost zpravidla přesahuje 80 $m \cdot s^{-1}$, ve zvláštních případech až 180 $m \cdot s^{-1}$. Obvodová rychlost obrobku v_w je dána závislostí:

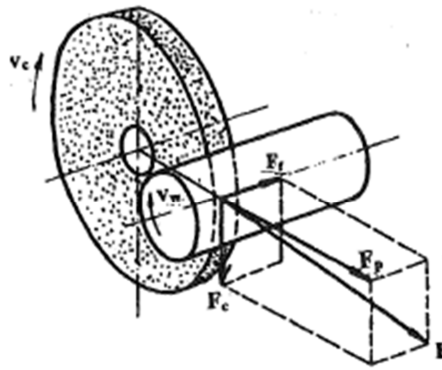
$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} \quad [m \cdot min^{-1}] \quad (2)$$

d_w – průměr obrobku [mm], n_w – frekvence otáčení obrobku [min^{-1}]

Poměr rychlosti q je dán poměrem mezi řeznou rychlostí a posuvovou rychlostí. Při broušení do kulata $q=60 v_c/v_w [-]$ a při rovinném broušení $q=60 v_c/v_{ft} [-]$. [16]

1.1.4 Řezné síly

Celková řezná síla F působící v obecném směru mezi brousicím kotoučem a obrobkem se rozkládá do tří vzájemně kolmých směrů. Ve směru řezné rychlosti leží řezná síla F_c , pasivní síla F_p je kolmá k broušené ploše a posuvová síla F_f působí ve směru podélného posuvu, tzn, kolmo na rovinu otáčení kotouče. Při broušení platí, že $F_p > F_c > F_f$ a $F_p/F_c = 1,2 \div 3$.



Obr. 5. Rozložení řezných sil při obvodovém axiálním broušení do kulata [16]

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

I když jsou řezné síly při broušení malé, výkon v důsledku vysokých rychlostí brusného kotouče je velký. Studie umožňují definovat vliv některých technologických činitelů na velikost řezných sil při broušení:

- Při použití řezných kapalin je řezná síla F_c asi o 20% menší než při práci bez chlazení. Tento vliv je mimořádně výrazný při práci s kotoučem, který má otupené zrna.
- Řezné síly při velkém otupení vzrůstají 2 až 2,5-krát.
- Síla F_p nemá stálou hodnotu. To proto, že se počet řezných zrn a s nimi i odřezávaná plocha v jednotkové délce ustavičně mění.
- Při broušení tvrdými broušícími kotouči jsou obvykle větší i řezné síly. Se zvětšováním pórovitosti se řezná síla připadající na jedno zrn zvětší, čím celková síla o něco poklesne.
- Při broušení kotouči s organickým pojivem, vznikají větší řezné síly než při broušení podobnými kotouči s keramickým pojivem.
- Na řezné síly při broušení má velký vliv způsob orovnávaní kotoučů. Při orovnávaní diamantem, který přereže zrna je velký počet zrn v záběru, což vede k nárůstu řezných sil. Kotouče orovnávané odvalováním mají hned po orovnávaní řezné síly menší. [16, 22]

1.2 Broušící materiály

K výrobě broušících 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 broušícího nástroje a tím vznikají břity s velmi různou geometrií, zpravidla s úhlem řezu $\delta > 90^\circ$. Podle původu se brusiva dělí na přírodní a umělá.

Přírodní brusiva (pazourek, pískovec, smírek, křemen apod.) nemají dnes, kromě přírodního diamantu, valný význam a používají se převážně k výrobě broušících plátén.

Umělá (syntetická) brusiva se používají výhradně k výrobě broušících nástrojů. Jsou to:

- Umělý korund
- Karbid křemíku
- Karbid boru
- Kubický nitrid boru
- Syntetický diamant
- Oxid hlinitý
- Oxid ceričitý

V technické praxi se používají standardní broušící materiály (na bázi kysličníku hlinitého Al_2O_3 a na bázi karbidu křemíku), diamantové broušící materiály a broušící materiály z kubického nitridu boru. [14, 16]

1.2.1 Standardní broušící materiály

Umělý korund je tavený oxid hlinitý (Al_2O_3). Běžný umělý korund obsahuje 85 až 98 % Al_2O_3 a má hnědou až černou barvu podle čistoty surovin. Umělý korund, vyráběný z čistého Al_2O_3 , má barvu bílou, s přísadou oxidu chromu se získá korund růžové barvy, tzv. korund rubínový.

Karbid křemíku (SiC) se vyrábí redukcí oxidu křemičitého velmi čistým koksem. Má vyšší tvrdost než korund, ale je i křehčí. Barvu má světle zelenou, z méně čistých surovin až tmavě zelenou.

Karbid boru (B_4C). Výchozí surovinou je kyselina boritá a velmi čistý koks. Produktem jsou malé, kovově lesklé krystalky o vysoké tvrdosti. Jeho výroba je velmi drahá, používá se jako náhrada za diamantové brusivo. [14, 16]

Tab. 1. Druhy brousících materiálů [16]

Charakteristika	Vyjádření	Označení	
		ČSN 22 4501	ČSN ISO 525 (22 4502)
Druh	SiC černý	C 48	C
	SiC zelený	C 49	
	Al ₂ O ₃ bílý	A 99 B	A
	Al ₂ O ₃ barevný	A 99	
	Al ₂ O ₃ růžový	A 94	
	Al ₂ O ₃ manganový	A 98 M	
	Al ₂ O ₃ hnědý	A 96	
	Al ₂ O ₃ zirkonový	A 97 E	
	Al ₂ O ₃ mikrokrytalický	A 97 M	
	Al ₂ O ₃ polokřehký	A 97 P	

1.2.2 Diamantové brousící materiály

Diamantové brousící materiály jsou obvykle nasazeny na pracovní část brousícího nástroje jako diamantový prášek (zrna) propojený pojivem.

Pro diamantové nástroje se používají pojiva kovová a pryskyřičná. K základním charakteristikám diamantových brousících materiálů patří základní surovina diamantových zrn, druh diamantového prášku, zrnitost a koncentrace diamantů v nástroji. Základní surovinou je nejčastěji diamant syntetický – DS, nebo v omezeném rozsahu diamant přírodní – D. Zrnitost diamantového prášku se vyjadřuje mezními rozměry zrn základní frakce brusiva v μm . Zapisuje se zlomkem, kde v čitateli je horní a ve jmenovateli dolní mezní rozměr – ČSN 22 4015.

Diamantové brousící nástroje jsou určeny pro broušení tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů. Využívají se pro jemné dokončovací broušení a ostření řezných nástrojů se slinutými karbidy, pro dokončovací broušení a lapování. [14, 16]

1.2.3 Brousicí materiály z kubického nitridu boru

Prášek (zrna) kubického nitridu boru je nanesen na pracovní část brousicího nástroje. Brousicí zrna jsou spojena vhodným pojivem. K základním charakteristikám patří zrnitost, koncentrace, druh pojiva a tvrdost brousicího materiálu. Zrnitost a koncentrace kubického nitridu boru se vyjadřuje analogicky jako u diamantových brousicích nástrojů. Pojiva se používají: O – organická, M – kovová, K – keramická, popř. doplněná číselným označením modifikace pojiva.

Tvrdost se vyjadřuje jako M3 – měkký, SK1, SM2 – středně měkký, S1, S2 – střední, ST1, ST2, ST3 – středně tvrdý, T1, T2 – tvrdý, VT1 – velmi tvrdý.

Brousicí nástroje z kubického nitridu boru se používají pro ostření řezných nástrojů, pro broušení tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů, pro tvarové broušení zplna apod. [14, 16]

1.3 Brousicí nástroje

Brousicí nástroje tvoří zrna brusiva pevně vázaná v tuhých či pružných tělesech různých velikostí a tvarů, jako jsou brousicí, řezací a drážkovací kotouče, brousicí tělíška, superfinišovací a honovací kameny, brousicí obtahovací kameny a segmenty, brousicí pilníky, nebo jsou nanášena a zakotvena na brousicích plátcích a papírech. V rámci brousicích nástrojů představují největší rozsah brousicí kotouče. [16]

1.3.1 Zrnitost

Zrnitost charakterizuje velikost zrna brusiva. Číslo zrnitosti udává max. počet ok (posledního) síta na palec (inch) délky hrany síta, kterým bylo zrno proseto. U diamantu a nitridu boritého odpovídá označení zrnitosti vzdálenosti ok síta v μm . Nejjemnější brusiva se oddělují plavením a sedimentací. Zrnitost brusiva musí být tím jemnější (menší zrno), čím menší má být hloubka drsnosti broušeného povrchu a čím ostřejší mají být břity broušených nástrojů. [10, 16]

Tab. 2. Zrnitost brousicích kotoučů [16]

Charakteristika	Vyjádření	Označení	
		ČSN 22 4501	ČSN ISO 525 (22 4502)
Zrnitost	Velmi hrubá	250, 200, 160	Není
	Hrubá	125, 100, 80, 63	4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 22, 24
	Střední	50, 40, 32, 25	30, 36, 40, 46, 54, 60
	Jemná	20, 16, 12, 10	70, 80, 90, 100, 120, 150, 180
	Velmi jemná	8, 6,6	220, 240, 280, 320, 360, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200
	Zvláště jemná	4, 3, M32, M22, M15	Není

1.3.2 Pojivo brousicích zrn

Úlohou pojiva je držet pohromadě brousicí nástroj a zrna na jeho povrchu udržet, dokud se neotupí a pak musí pojivo povolit, aby se otupené zrno vylomilo. Brousicí kotouče s keramickým pojivem jsou porézní a dobře se orovňávají diamantovým orovňovacím nástrojem. Pojiva z umělých pryskyřic chrání svou pružností zrna brusiva před přetížením a umožňují dosáhnout větších řezných sil. Aktivní břity zrn se však zahřívají méně než při keramickém pojivu. [10, 16]

Tab. 3. Pojivo brousicích kotoučů [16]

Charakteristika	Vyjádření	Označení	
		ČSN 22 4501	ČSN ISO 525 (22 4502)
Pojivo	Keramické	V	V
	Silikátové	S	Není
	Pryžové	R	R
	Pryžové s výztuží	RF	RF
	Umělá pryskyřice	B	B
	Umělá pryskyřice s výztuží	BF, BF – Flex	BF
	Šelakové	E	E
	Magneziové	Mg	Mg
	Polyuretanové	U	Není

1.3.3 Tvrdost brousicího nástroje

Tvrdostí brousicího kotouče není myšlena tvrdost jeho brousicích zrn, ale soudržnost kotouče, tj. mechanický odpor proti vylamování zrn. Při broušení tvrdých materiálů může být při velkém otěru zrn zajištěno samoobrušování jen při měkkém (pružném) pojivu, které zabrání velkým rázovým silám vylamujícím celá zrna.

Tab. 4. Tvrdost brousicích kotoučů [16]

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

Broušení měkkých materiálů vyžaduje velkou třísku, velkou řeznou sílu a tedy tvrdé kotouče. Příliš měkké kotouče se velmi rychle opotřebovávají a přijdou tedy velmi drahé. V příliš tvrdých kotoučích se dlouho drží tupá zrna, která mažou a leští materiál obrobku. [10, 16]

1.3.4 Struktura

Struktura označuje poměr brusiva, pojiva a volného prostoru (pórů) v objemové struktuře brousicího nástroje. Póry tvoří prostory pro třísky a podporují chlazení při broušení. Jsou-li póry příliš malé, stoupá tlak a teplota při broušení. [10]

Tab. 5. Struktura brousicích kotoučů [16]

Charakteristika	Vyjádření	Označení	
		ČSN 22 4501	ČSN ISO 525 (22 4502)
Struktura	Velmi hutný	1, 2	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 atd.
	Hutný	3, 4	
	Polohutný	5, 6	
	Pórovitý	7, 8	
	Velmi pórovitý	9, 10	
	Zvlášt' pórovitý	11, 12, 13	

1.3.5 Druhy brousicích zrn

Špičatá zrna s ostrými hroty se hodí k obrábění materiálů s dlouhou třískou. Zrna s převážně tupými úhly břitů jsou trvanlivější při broušení tvrdých křehkých materiálů. Monokrystalická zrna (tvořená jedním krystalem) mají velkou pevnost, používají se proto pro broušení nejtvrdějších materiálů jako skla a keramiky. Polykrystalická zrna tvoří při broušení svým rozlamováním mnoho nových řezných hran, než se úplně rozpadnou. Zrna jsou tak lépe využita při broušení tvrdých kovů (obr. 6). [10]

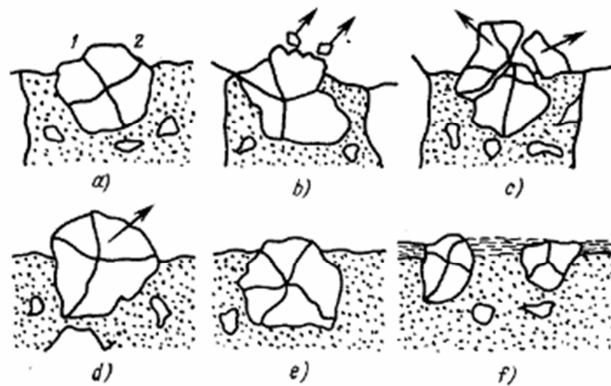


Obr. 6. Druhy brousicích zrn [10]

1.3.6 Opatření brousicích zrn

Při velkých řezných silách převažuje rozlamování a vylamování zrn z kotouče. Při menších řezných silách stoupá s opotřebením řezné hrany otěrem její zatížení a dochází k vylamování drobných částí zrna. Vylamováním částí nebo celých zrn vznikají na kotouči nové aktivní břity. Brusný kotouč si tak sám obnovuje ostří. Podle podmínek broušení (fyzikálně

mechanické vlastností zrna, obráběného materiálu a pojiva, řezných podmínek atd.), rozlišujeme tyto základní druhy opotřebení: (obr. 7).



Obr. 7. Základní způsoby opotřebení brousícího kotouče [7]

a) Otěr řezných částí zrn brusiva se vznikem více či méně hladkých plošek, **b)** Mikroskopické porušování (štěpení zrn) – s oddělováním malých úlomků, **c)** Porušování celých zrn – s oddělováním celých částí zrna, **d)** Úplné vylamování zrna z pojiva, **e)** Porušování působením chemických vlivů ve styčném pásmu zrna a obráběného materiálu, **f)** Difuzní a adhezní opotřebení, **g)** Zanášení prostoru mezi zrny třískami a brousícím odpadem

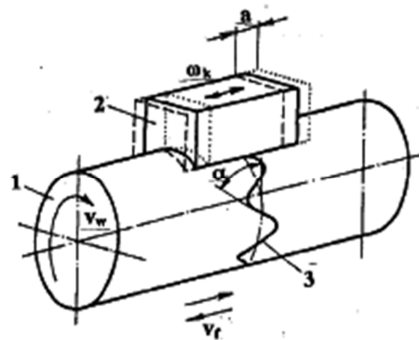
[10, 16, 7]

2 TEORIE SUPERFINIŠOVÁNÍ

2.1 Technologická charakteristika

Superfinišování je vysoce produktivní metoda dokončovacího obrábění vnějších a vnitřních rotačních, tvarových a rovinných ploch. Nejvíce se uplatňuje při dokončování valivých ložisek a součástí v automobilovém průmyslu. Superfinišují se součásti z kalené i nekalené oceli, litiny, slitin těžkých kovů a plastů.

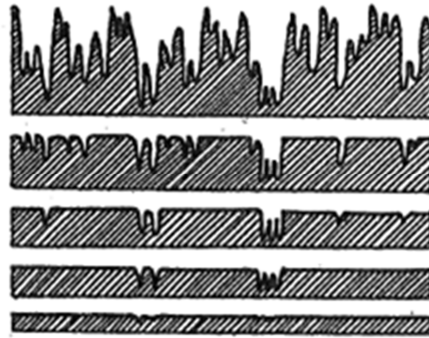
Superfinišování je zvláštní druh broušení, při němž se z dokončovaného povrchu odřezávají vrcholky nerovností velmi jemnými zrna brousicího nástroje (superfinišovacího kamene). Superfinišování je charakterizováno kmitavým pohybem superfinišovacího kamene, definovanou silou vyvolávající nízký tlak na obráběnou plochu a malými řeznými rychlostmi – obr. 8.



Obr. 8. Kinematické schéma superfinišování [16]

1 – obrobek, 2 – superfinišovací kámen, 3 – stopa po jednom zrnu brusiva, v_w – rychlost otáčení obrobku, v_f – rychlost podélného posuvu obrobku, a – amplituda, ω_k – frekvence kmitavého pohybu, α – úhel sklonu stopy po jednom zrnu brusiva

Řezný pohyb vzniká superpozicí rotačního pohybu součásti o rychlosti v_w (10 až 80 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) a kmitavého pohybu superfinišovacího nástroje o frekvenci ω_k (500 až 3000 min^{-1}), který zpravidla kolmý na směr rotačního pohybu součásti. Amplituda a superfinišovacích kamenů je 0,1 až 10 mm. Rychlost kmitavého pohybu se určí podle vztahu $v_k = a \omega_k / 1000$ a volí se 2 až 15 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Superfinišovací kameny jsou na obráběnou plochu přitlačovány tlakem $p_k = 0,1$ až 0,4 MPa, který během superfinišování zvětšováním nosného podílu poklesne tak, že proces dále nepokračuje – obr. 9.



Obr. 9. Průběh superfinišovacího procesu – zvětšování nosného podílu [16]

Největšího úběru se dosáhne při $\alpha = 40$ až 60° , ale obrobený povrch je matný. Při úhlech $\alpha < 40^\circ$ se snižuje řezivost kamene a povrch získá vysoký lesk.

Průběh superfinišování ovlivňuje především rychlost kmitavého pohybu, obvodová rychlost obrobku, velikost tlaku a viskozita řezné kapaliny. Superfinašování má dvě fáze. Hrubovací a leštící, pro které je důležitý poměr rychlosti kmitavého pohybu nástroje a obvodové rychlosti obrobku, který určuje úhel křížení drah brusiva 2α , přičemž platí $\text{tg} = v_k/v_w$.

Předcházející operace před superfinašováním je nejčastěji broušení, případně jemné soustružení nebo vyvrtávání. Výchozí parametry superfinašované plochy jsou rozhodující pro volbu řezných podmínek – tab. 6.

Tab. 6. Řezné podmínky a přídávky pro superfinašování [16]

Drsnost povrchu Ra [μm]		Přídavek [μm]	Operace	Úhel křížení stop 2α [$^\circ$]	Poměr v_w/v_k
Požadovaná	Výchozí				
0,16	1,6	10 až 12	1	80 až 110	0,8 až 1,2
0,08	0,8	5 až 8	2	40 až 70	1,5 až 2,5
0,04	0,4	4 až 5	3	20 až 40	3 až 12
0,02	0,2	2 až 3	4	Méně než 20	12 až 28

Operace: 1 a 2 – hrubovací fáze superfinašování, 3 a 4 – jemné superfinašování

Podle výchozí drsnosti se volí odpovídající operace. [16]

2.2 Superfinašovací nástroje

Superfinašovacími nástroji jsou držáky s přilepenými brousicími (superfinašovacími) kameny, diamantovými lištami anebo tyčinkami z jiných brousicích materiálů, přitlačované pružinami k superfinašovací ploše. Držák vykonává kmitavý pohyb způsobený mechanickým, pneumatickým, hydraulickým, elektromagnetickým, případně jiným zdrojem kmitů.

Superfinašovací kameny se používají s brusivem z umělého korundu a keramickou, nebo bakelitovou vazbou pro superfinašování oceli, z brusiva karbidu křemíku pro superfinašování litiny a ocelí nižších pevností, nerezavějících ocelí, neželezných kovů a slitin.

Pro superfinašování vysoce legovaných ocelí se používá kubický nitrid boru v keramické vazbě, pro slinuté karbidy syntetický diamant v organické vazbě. Na hladící superfinašování, které dává zrcadlově lesklý povrch, jsou však výhodnější kameny s bakelitovým pojivem.

Při volbě tvrdosti superfinašovacích kamenů se řídíme všeobecně známou zákonitostí dokončovacích brousicích procesů, podle které tvrdší kameny volíme na obrábění měkčích materiálů a naopak. Při hrubší zrnitosti používáme měkčí kameny, při jemnější zrnitosti tvrdší kameny.

Tvar kamenů bývá hranolovitý, válcovitý a miskovitý. Před začátkem superfinašování se kameny nejprve orovňávají podle profilu obráběného povrchu brousicím plátnem navinutým na obrobek, anebo volným brusivem na trnu za současného kmitavého pohybu. Pracovním stykem s hrubým povrchem součástky se kameny při práci definitivně orovňají samy a získají tak přesný tvar obráběné plochy. [16,13]

2.3 Superfinašovací stroje a zařízení

Superfinašovací kameny se upevňují do držáků samonastavitelných hlav a obvykle je přitlačuje pružina na obráběnou plochu. Tyto hlavy bývají většinou zdrojem nebo nosičem superfinašovacích kmitů, přenášených na kameny. Hlavy mohou být součástí stroje nebo částí jiných přídavných zařízení, které se upínají na soustruh, brusku, karusel, vyvrtávací stroj anebo jiný vhodný obráběcí stroj.

Superfinašovací stroje lze rozdělit na dvě skupiny, a to na univerzální a speciální stroje. Univerzální jsou vhodné na dokončování vícero součástek daného typorozměru. Speciální

stroje výrobce obvykle dodává na základě speciální objednávky na dokončování určité součástky v podmínkách sériové nebo hromadné výroby.

Podle principu práce lze superfinišovací stroje rozdělit na:

- Hrotové superfinišovací stroje
- Bezhrtové superfinišovací stroje
- Superfinišovací stroje, pracující čelem nebo obvodem kotouče

Rozdělení superfinišovacích hlav:

- Hlavy s pneumatickým pohonem
- Hlavy elektromagnetickým pohonem
- Hlavy s mechanickým pohonem [13]

2.4 Řezné kapaliny používané při superfinišování

Řezná kapalina působí při superfinišování podobně jako i při ostatních dokončovacích způsobů obrábění a sice maže, čistí a chladí místo řezu. Protože vlivem nižšího specifického tlaku nástrojů a menších řezných rychlostí nevzniká řezným procesem mnoho tepla, chladicí účinek řezné kapaliny není ani tak důležitý. Od řezné kapaliny při superfinišování se požaduje, aby měla dobrý čistící a mazací účinek.

Jako řezná (vyplachovací) kapalina se nejčastěji používá petrolej, směs petroleje s 10 až 15 % minerálního oleje nebo oleje s aditivy. Pro jemné superfinišování (dosažení vysokého lesku) a měkké materiály je vhodná kapalina s vyšší viskozitou (olej), pro větší úběry jsou vhodné kapaliny s nižší viskozitou.

Na úběr materiálu, opotřebování kamenů a konečnou drsnost povrchu má vliv složení řezných kapalin. Vhodnou volbou řezné kapaliny můžeme zvýšit úběrové hodnoty až na trojnásobek anebo podobně zvýšit kvalitu povrchu.

Řezná kapalina spolu se zvolenými parametry kinematiky a dynamiky procesu v podstatné míře ovlivňuje výsledné hodnoty řezného procesu. Proto se nesmí problematika řezných kapalin podceňovat a pro každý konkrétní případ určit nejvhodnější složení kapaliny.

[13, 16]

2.5 Výhody a omezení superfinišování

Výhody:

1. Opracování při nízké teplotě součástky a jejich povrchových vrstev, protože intenzivní chlazení, malé specifické tlaky a nízké řezné rychlosti nevytvářejí podmínky pro vznik velkého množství tepla v oblasti řezání. Proto při superfinišování nejsou deformované žádné povrchové vrstvy.
2. Snížení deformovaných vrstev předcházejícího opracování a ponechání malých mikrojamek, které se pracovním procesem strojových součástek chovají jako zásobníky oleje a zvyšují tím životnost i otěruvzdornost superfinišovaných povrchů.
3. Nenáročnost na strojové zařízení, protože v podmínkách kusové výroby je možné superfinišovat jednoduchými zařízeními i na běžném obráběcím stroji.

Superfinišování má však i určité omezení. Mezi ně patří nemožnost úběru větších přídavků, což stěžuje přesné rozměrové opracování, opravu nepřesností geometrického tvaru předcházejícího opracování a odstranění celé deformované vrstvy materiálu. Ani úběrové hodnoty, vyjádřené v objemových jednotkách nejsou takové, jaké dosahujeme jemným broušením anebo honováním. Příznivější výsledky můžeme však dosáhnout, pokud výrobnost při superfinišování posuzujeme velikostí opracované plochy a ne objemem odebraného množství materiálu. Podle toho má superfinišování svoje opodstatnění, jen pokud jde o dokončovací opracování povrchů, na které jsou kladeny nejpřísnější jakostní požadavky a pokud jsme geometrickou přesnost, mikrogeometrii i minimální hloubku deformované vrstvy dosáhli už předcházejícími pracovními operacemi. [13]

2.6 Uplatnění v praxi

Superfinišování je osobitý způsob dokončovacího obrábění strojních součástek se složitou kinematikou řezného procesu. Díky němu získáme dokonale rovný nosný válcový, kuželový, kulovitý i rovinný povrch. Strojové časy jsou velmi krátké. Proto se superfinišování používá při dokončování součástek, pracujících v podmínkách tření, na povrch, kde se kladou vysoké požadavky z hlediska drsnosti, přesnosti rozměrů a tvaru i kvality povrchové vrstvy.

Pokud výrobnost procesu posuzujeme podle velikosti obrobenej plochy, superfinišování patří mezi dokončovací procesy s největší výrobností i efektivností. Širokou oblast použití nachází ve strojírenském, automobilovém, leteckém, elektrotechnickém i spotřebním průmyslu, při výrobě speciální techniky, v dopravě, montážních pracích apod. Je možné ho uplatnit v kusové, sériové i hromadné výrobě.

V kusové výrobě je možné superfinišování zavést pomocí různých přídavných zařízení a superfinišovacích hlav, nastavených na běžných obráběcích strojích.

V sériové výrobě je třeba zavést vhodné superfinišovací stroje. Při menší sériovosti vystačíme s univerzálními stroji, při větších sériích jsou potřeba speciální jednorúčelové superfinišovací stroje, vhodné na dokončovací konkrétní součástky. Náklady na takový stroj jsou značně vysoké, ale ekonomický rozbor většinou ukáže, že jeho nasazení do výroby je vysoce efektivní a návratnost investic je vysoká.

Superfinišovací povrch výborně vzdoruje korozi, opotřebením třením i dynamickému zatížení. Často bývá levnější než povrch dokončený jiným způsobem, protože práce je velmi rychlá. Obvykle nehrozí žádné nebezpečí špatných výrobků, proces je reprodukovatelný, získané povrchy jsou rovnoměrné. Superfinišované součástky jsou spolehlivé a mají větší životnost. Superfinišování v mnoha případech nahrazuje drahé zabíhání nosných povrchů. Při nedostatečné kvalitě povrchů čepu v kluzném ložisku se vrcholky mikronerovností odlomí, roztaví anebo zatlačí do sousedních mikrojamek a čep se může zadřít. Zkoušky ukazují, že pro vřetenou obráběcího stroje a jeho ložisko je potřebná drsnost povrchu $R_a = 0,025$ až $0,1\mu\text{m}$, Takový dokonalý povrch vytvoříme jen superfinišováním, kterým získáme až zrcadlový lesk. [13]

3 TEORIE LEŠTĚNÍ

3.1 Podstata a všeobecné zásady leštění

Leštění je dokončovací operace opracování povrchu, kterou se odstraní drobné nerovnosti, docílí zrcadlový lesk a vysoká jakost povrchu ($R_a = 0,012$ až $0,2 \mu\text{m}$). Podle způsobu práce rozdělujeme leštění na: mechanické, chemické, elektro-chemické.

Volba vhodného způsobu leštění konkrétních součástek a výběr nejvhodnějších režimů zvoleného způsobu leštění závisí na materiálu součástky, stavu povrchu před leštěním, tvaru, rozměrů a hmotnosti součástky, velikosti série, požadavků na kvalitu vyleštěného povrchu, potřebného zařízení apod.

Součásti leštíme na zlepšení vzhledu povrchu nebo před přípravou na další povrchovou úpravu (např. pokovování). Pracovní pomůckou při mechanickém leštění bývá jemná broušící nebo leštící pasta, vídeňské vápno, leštící zeleň (kysličník chromitý) apod. Při vysokých nárocích na kvalitu povrchu leštíme dvojestupňově a to tak, že součástku nejprve předleštíme a poté dokončíme doleštěním. Na rozdíl od broušení při leštění je jen nepatrný úběr materiálu na zahladění stop po předchozím mechanickém opracování. Leštit můžeme buď jednoduchými univerzálními leštičkami, pomocí různých podávacích přípravků, anebo speciálními jednoúčelovými stroji. Leštící kotouče bývají z látky, kůže, gumy, dřeva, korku, papír apod. Rychlost kotoučů bývá 30 až $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. [13]

3.2 Mechanické leštění

Je to proces, kterým se dosahuje vysoká hladkost povrchu, vyznačující se někdy až zrcadlovým leskem. Podstatou procesu je mechanické působení leštícího nástroje na obráběný povrch. Leštit můžeme kotouči, kartáči, pásy, speciálními leštícími nástroji, v bubnech vibračních a odstředivých zařízeních.

Leštění kotouči je nejrozšířenější způsob leštění, který je možné vykonávat ručně, ale i strojně s určitým stupněm mechanizace, případně s úplně automatizovaným cyklem procesu. Při leštění součástku tlakem přitlačíme na obvod rychle se otáčejícího kotouče, na který jsme předtím nanесли leštící materiál (brusný prášek nebo pastu). Po styku leštícího kotouče s povrchem součástky, a rychlým pohybem, jeho elementů s částicemi leštících materiálů po mikronerovnostech kovového povrchu a jejich jemného úběru nastává vyhlazení až na

zrcadlový lesk. Leštící kotouče bývají z různých materiálů a různých konstrukcí. Je možné je rozdělit na tyto hlavní skupiny:

- a) Lisované bavlněné kotouče
- b) Skládané sešívané látkové kotouče
- c) Široké, z jednotlivých elementů složené látkové kotouče
- d) Lístkové látkové kotouče
- e) Plstěné kotouče
- f) Kotouče na bázi celulózy a dřeviny
- g) Kovové kotouče s nanesenou leštící vrstvou
- h) Ohybné kotouče na bázi kaučuku

Hlavními faktory, které mají vliv na pracovní schopnost a efektivnost kotouče jsou: druh a zrnitost naneseného broušícího prášku anebo jiného leštícího materiálu, obvodová rychlost kotouče, tlak součástky na kotouč, základní materiál kotouče a jeho vlastnosti, druh a množství maziva anebo chladicí kapaliny. [13]

3.3 Chemické leštění

Chemické leštění je nový způsob dokončování kovových povrchů, který se principiálně odlišuje od mechanického leštění. Kvalitní, hladké a lesklé povrchy dosahujeme při tomto způsobu působením aktivních chemických látek. Při chemickém leštění součást ponoříme na určitý čas do nádrže s chemicky aktivním roztokem. Po ponoření začnou probíhat chemické a místní elektrochemické procesy, kov se začne rozpouštět a kvalita povrchu se postupně zlepšuje. Součást přitom získává vysoký lesk.

Typový technologický postup chemického leštění se skládá z několika operací, a to:

1. Odmaštění povrchu
2. Promývání v tekoucí chladné vodě
3. Chemické leštění v příslušném roztoku
4. Promývání v tekoucí chladné vodě
5. Promývání v teplé vodě (60 až 90°C)
6. Sušení

Na chemické leštění se používají roztoky různého složení. Každá skupina kovů si vyžaduje roztok jiného složení. Většina roztoků se tvoří na bázi silných kyselin, menší část na bázi zásaditých roztoků.

Během leštění se složení roztoků mění, protože se nasycují soli rozpuštěného kovu, a tím se snižuje jejich aktivita. Proto se musí během leštění periodicky kontrolovat složení roztoku a korigovat ho přidáváním aktivních látek, anebo roztok vyměnit za nový.

Chemické leštění se používá hlavně jako vhodná a levná povrchová úprava obrobků z ocelí, neželezných kovů a slitin. Výrobní náklady na regeneraci leštících roztoků, na výrobní a bezpečnostní zařízení jsou však vysoké. Proto se tyto postupy uplatňují hlavně v sériové a hromadné výrobě při součástkách složitých anebo členitých tvarů. Při leštění vznikají na povrchu součástky plynné zplodiny chemických reakcí. Proto musí být obrobek v koupeli umístěný tak, aby se plyny nehromadily v dutinách a roztok mohl nerušeně působit na celý leštěný povrch. Při leštění se materiál rozpouští rovnoměrně ve všech směrech. Úběr do hloubky i do stran je přibližně stejný. Proto chemickým leštěním obvykle nemůžeme zlepšovat geometrický tvar obrobku. Rovněž je nemožné vytvářet ostré hrany a přechody dvou ploch. Při chemickém leštění se vytvoří ostré hrany a přechody obvykle se zaoblením, jehož poloměr se rovná hloubce odebrané vrstvy. Výhodou chemického leštění je rychlost a jednoduchost procesu. Pracnost operace tvoří asi jen čtvrtinu normočasu, potřebného na mechanické leštění. Proto je chemické leštění výhodným způsobem racionalizace výrobního procesu ve výrobních závodech. [13]

3.4 Elektrochemické leštění

Elektrochemické leštění je dokončovací proces povrchu obrobku kovů, kterým se dosahuje vysoká jakost povrchu a zrcadlový lesk elektrochemickým úběrem materiálu.

Přechodem jednosměrného proudu se elektrochemicky (anodicky) rozpouštějí povrchové vrstvy materiálu. Rozpouštění je nejintenzivnější na výstupcích mikronerovností, pomalejší v mikrojamkách. V důsledku toho se drsnost postupně zlepšuje, mikronerovnosti se vyrovnávají a povrch součástky se stává hladký a lesklý. Tento proces ovlivňuje různá hloubka anodické vrstvičky oxidů, která klade odpor přechodu proudu. Vrstvička v mikrojamkách je hrubší, na mikrovyvýšeninách jemnější. [13]

3.5 Leštění rotujícími kartáči

Leštění rotujícími kartáči je technologický proces, který má v technické praxi velmi širokou oblast použití. Tímto způsobem čistíme povrchy součástek od opalu, okovů, rzi, barvy, odstraňujeme otřepy, zaoblujeme ostré hrany, leštíme povrchy anebo je mechanicky zpevňujeme. Svou podstatou má tento způsob nejbližší k mechanickému leštění.

Kartáče se podobají leštícím nebo brousicím kotoučům. Složené jsou z jednotlivých jemných vláken, hustě zachycených v pevném jádře a délkově i tvarově upravených tak, že vytváří podobu leštícího kotouče. Vyrábějí se z ocelového drátu, přírodních a syntetických štětín (nylon), přírodních vlasů, rostlinných vláken atd. Jsou dost měkké, proto dobře přiléhají k leštěným plochám i tvarovým. Jednotlivé vlákna kartáčů vnikají do jamek mikroprofilu povrchu a přitom vyrovnávají mikronerovnosti a čistí i dno jamek. Odstraněním ostrých úhlů a hran kartáčováním se snižují napětí, koncentrované v ostrých hranách, což snižuje vznik trhlin na povrchu součástek. Tím se zvyšuje únavová pevnost materiálu. Velkou předností této technologie je jednoduchost procesu a jeho vysoká produktivita.

Nejčastěji používaným materiálem kartáčů je ocelový drát o průměru 0,1 až 1,2 mm. Jemnější drát (0,3 až 0,4 mm) se používá na čisté opracování povrchů, hrubší drát (1,2 mm) je vhodný na čišťení svarů, odstraňování okovů a jiné hrubší práce.

Druhy kartáčů:

- Kotoučové
- Válcové
- Čelní

Obvodová rychlost kotoučů bývá v rozmezí 10 až 60 m.s⁻¹. Vyššími obvodovými rychlostmi nabývají kartáče vyšší tuhost a dosahuje se při nich vyšší produktivita, nižší rychlosti způsobují pokles produktivity. Na velikosti obvodové rychlosti, použité při práci má vliv i požadovaná drsnost povrchu. Nejvyšší povrch dosahujeme při obvodové rychlosti 25 m.s⁻¹. Nižší nebo vyšší hodnoty rychlostí od optimální hodnoty zhoršují parabolicky kvalitu povrchu. [13]

3.6 Omílání

Omílání je leštící proces, při kterém se součástky s leštícími materiály dostávají do nuceného vzájemného pohybu a třením i nárazy leštících materiálů o povrch součástky se po-

stupně vyhlazuje povrch součástek. Můžeme ho rozdělit na omílání v otáčivých a vibračních bubnech. Omíláním se dokončují povrchy takových součástek, které není možné leštit mechanicky nebo tehdy, kdy by bylo leštění velmi pracné a drahé. Omíláním je možné zlepšit kvalitu povrchu o 2 až 3 třídy. Běžná drsnost povrchu je $R_a = 0,4 \mu\text{m}$, při speciálních podmínkách až $0,1 \mu\text{m}$. Přestože úběr povrchových vrstev při omílání je velmi nerovnoměrný, je nemožné tímto způsobem dosáhnout zvýšené přesnosti rozměrů nebo tvarů. Proto má tento proces svoje opodstatnění jen při součástkách, při kterých se vyžaduje hladkost povrchu, ale nevyžaduje se přesnost tvaru.

Základním zařízením omílání v omílacích bubnech je otáčející se buben, do kterého se vkládají leštěné součástky s leštící směsí (drobný brusný prášek, úlomky porcelánu atd.) a aktivní kapalinou. Omílací bubny bývají svařované z oceli nebo dřevěné. Ocelové mají obvykle obložení z gumy, dřeva nebo plastů. Podle tvaru se rozdělují na válcové, kuželové a několikahrané. Nejčastěji se používají osmi a šestihrané bubny, ve kterých je intenzita leštění vyšší než na hladkých válcových bubnech. Bubny s menším množstvím hran (5, 4, 3) se nepoužívají, neboť vzniká nebezpečí poškození součástek vzájemnými údery. Podle konstrukce jsou bubny konzolové, hermetické a perforované.

Leštící směs na ocelové součástky tvoří porcelánové úlomky 5 až 40 mm, korundový mikroprášek, vídeňské vápno, kalená ocelová drť, odřezky měkké kůže, dřevěné piliny apod. Mýdlo, používané při omílání, má být neutrální, s vysokou pěnivostí a lehkým rozpouštěním při teplotě 30 až 35 °C. Nejlepší výsledky při omílání dosahujeme, pokud náplň součástek tvoří 60 až 65 % objemu bubnu.

Správná rychlost otáčení bubnu má být taková, aby součástky po stěně bubnu klouzaly, smýkaly se a nepadaly shora do náplně. Při nízké obvodové rychlosti se snižuje produktivita, při vysoké rychlosti vlivem pádů a úderů se objevují na součástkách nepřijatelné deformace. Optimální obvodová rychlost bubnu je 55 až 60 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Proces trvá déle než při ostatních leštících způsobech od 2 do 6 hodin.

Kromě mechanicky se otáčejících omílacích bubnů existují i jiné konstrukce bubnů. K nim patří vibrační bubny, hydrodynamické bubny, magneticko – hydroabrazivní bubny apod.

[13]

3.7 Leštění pásy

Leštění pásy, pokrytými brousicími zrny nebo pastami je v podstatě mechanické leštění, při kterém rychle se pohybující zrna upevněné na poddajný podklad, odebírají vrcholky mikronerovností, a tak leští povrch součástky. Tímto způsobem leštíme součástky se složitými profily, vyráběné z tvrdých ocelí. V porovnání s leštěnými kotouči je tento proces dokonalejší, výhodnější a produktivnější. Nekonečný leštící pás bývá z kapronu, bavlněné nebo jiné tkaniny, gumy a podobných látek, které jsou dostatečně pevné a přitom elastické, umožňující dobrý kontakt s leštěným povrchem. Na vnější straně pásu je vrstva brousicích, diamantových, případně jiných prášků. V tvaru nekonečného prstence se natahuje na dva kotouče, ze kterých je jeden hnací. Leštěné součástky přitlačujeme k pohybujícímu se pásu buď v místě obepínání kotouče kontaktním válečkem, nebo k volně visící větvi pásu.

Při leštění se používají pásy buď hladké, na které se v procesu leštění nanášejí leštící pasty, nebo pásy s nanesenou vrstvou leštících materiálů (brousicích prášků). Vrstva bývá hrubá do 3 mm. Nanáší se na pás mechanicky (ručně nebo strojově), případně v elektrostatickém poli. Pásy leštíme několika způsoby. Z hlediska polohy pásu a samotné leštěné součástky je možné leštění pásy rozdělit do několika základních skupin: [13]

- a) Kontaktní leštění
- b) Leštění s opěrnou plotnou
- c) Leštění volným pásem
- d) Tvarové kontaktní leštění
- e) Bezhrotové leštění
- f) Leštění válcovité
- g) Leštění pásem, svinutým do kotouče

3.8 Leštění velkých rovinných ploch

Na leštění velkých rovinných ploch je možné použít téměř všech uvedených způsobů leštění. Volba vhodného způsobu závisí na druhu materiálu, požadované jakosti povrchu, dostupného zařízení, velikosti a tvaru ploch a jiných činitelů. Většinou používáme mechanický způsob leštění pásy, kartáči, v elektromagnetickém poli, méně častější pak chemické a elektrochemické leštění. Omíláním velké plochy dokončovat není možné. [13]

4 TEORIE NEDOKONALOSTÍ POVRCHU

Hodnocení charakteru povrchu vychází z profilové metody, tj. hodnotí se povrch z profilu povrchu, čáry, která vznikne řezem skutečného povrchu definovanou plochou. Základní profilové parametry se definují normou ISO 4287: 1997.

Profily povrchu:

- **Zesnímaný profil** je definovaný jako geometrické místo středu hrotu dotyku, který má ideální tvar (kužel s gumovým zakončením), jmenovité rozměru a při pohybu po povrchu v rovině řezu na něj působí jmenovitá síla.
- **Úplný profil** je digitální forma zesnímaného ve formě vertikálních a horizontálních, navzájem si odpovídajících souřadnic.
- **Primární profil** se získá z úplného profilu po aplikacích filtru s krátkou vlnovou drážkou, označovanou λ_s . Reprezentuje základ na výpočet parametrů profilu podle EN ISO 4287: 1997.
- **Profil drsnosti** se odvozuje z primárního profilu potlačením složek s dlouhou vlnovou délkou filtrem profilu λ_s . Přenosové pásmo profilu drsnosti je potom definované filtry profilu λ_s a λ_c . Tento profil je základem na určení parametrů profilu drsnosti ze strany kratších vlnových délek.
- **Profil vlnitosti** je získaný z primárního profilu použitím profilových filtrů λ_c a λ_f . Filtr λ_f potlačí složky s dlouhými vlnovými délkami a filtr λ_c potlačí složky s krátkými délkami.

Možnosti hodnocení povrchu rozšiřuje EN ISO 4287 tím, že skoro všechny parametry v ní definované je možné aplikovat na primární profil, profil drsnosti a profil vlnitosti. Vztahy pro jejich výpočet jsou stejné, jen se aplikují na jiných profilech. Při označení se potom tyto parametry odlišují prvním znakem, např. střední aritmetická odchylka profilu drsnosti je R_a , primárního profilu P_a a profilu vlnitosti W_a . [19, 20]

4.1 Charakter povrchu

Souřadnicový systém, ve kterém jsou definované parametry charakteru povrchu, je pravoúhlý souřadnicový systém, ve kterém osy vytvářejí pravotočivý kartézský systém kde:

- Os X leží ve směru snímání a souhlasí se střední čarou profilu,
- Os Y nominálně leží taky na skutečném povrchu
- Os Z směřuje z materiálu ven do okolního prostředí

Filtr profilu - filtr, který rozděluje profily na profily s dlouhými vlnovými délkami a krátkými vlnovými délkami (STN EN ISO 11562:2000)

V přístrojích se používají tři filtry na měření parametrů drsnosti, vlnitosti a primárního profilu. Všechny mají stejnou charakteristiku přenosu, definovanou v ISO 11 562, ale různé mezní (základní) vlnové délky.

Střední čáry:

- **Střední čára profilu drsnosti** – čára profilu, ve kterém jsou potlačené dlouhé vlnové délky filtrem profilu λ_c
- **Střední čára profilu vlnitosti** – čáry profilu, ve kterém jsou potlačené dlouhé vlnové délky filtrem profilu λ_f
- **Střední čáry primárního profilu** – čára jmenovitého tvaru, určená z primárního profilu metodou nejmenších čtverců

Základní délka l_p , l_r , l_w je délka ve směru osy X, která se používá na identifikování nepravidelností, které charakterizují profil, který se hodnotí. Základní délky pro drsnost l_r a vlnitost profilu l_w jsou číselně rovné vlnovým délkám filtrů profilů λ_c a λ_f . Základní délka primárního profilu l_p se rovná vyhodnocované délce.

Vyhodnocovaná délka l_n – délka ve směru osy X, na které se vyhodnocuje profil. Vyhodnocovaná délka může obsahovat jednu anebo víc základních délek.

Výstupek profilu – část profilu spojující jeho dva sousední průsečíky se střední čarou profilu, uvažovaná směrem ven z materiálu (z materiálu do okolního prostředí).

Prohloubenina profilu – část profilu spojující jeho dva sousední průsečíky se střední čarou profilu, uvažovaná směrem do materiálu (z okolního prostředí do materiálu).

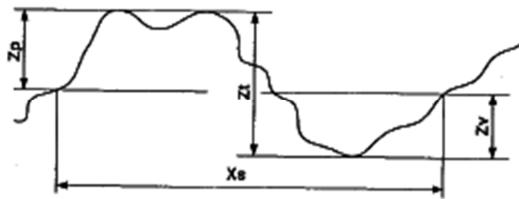
Výška souřadnice - $Z_{(x)}$ – výška profilu v libovolné poloze X.

Výška výstupku profilu – Z_p – vzdálenost mezi střední čarou profilu a nejvyšším bodem výstupku profilu.

Hloubka prohloubeniny – Z_v – vzdálenost mezi střední čarou profilu a nejnižším bodem prohloubeniny profilu.

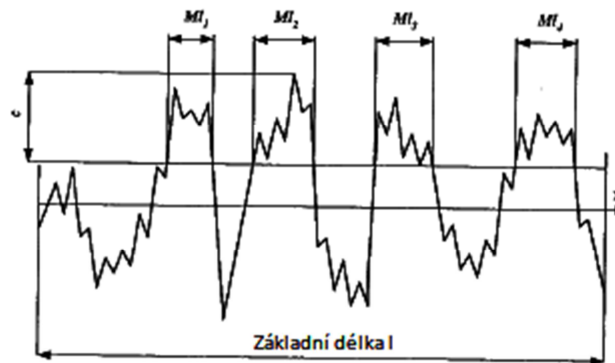
Výška profilu – Z_t – součet výšky výstupku a hloubky prohloubeniny prvku profilu.

Šířka prvku profilu – X_s – délka úseku střední čáry profilu obsahující prvek profilu.



Obr. 10. Prvek profilu [19]

Nosné délka profilu na úrovni C, $MI(c)$ – součet délek úseků vytvořených řezem rovnoběžným se střední čarou profilu na úrovni C oddělením výstupků profilu v rozsahu základní délky ($MI(c) = MI_1 + MI_2 + MI_3 + MI_4 + \dots + MI_n$). [19, 20]

Obr. 11. Nosná délka profilu na úrovni c $MI(c)$
[19]

4.2 Parametry struktury povrchu

4.2.1 Amplitudové parametry (výstupek a prohloubenina):

- **Výška největšího výstupku profilu** – P_p, R_p, W_p největší výška výstupku profilu Z_p v rozsahu základní délky
- **Hloubka největší prohloubeniny profilu** – P_v, R_v, W_v největší hloubka prohloubeniny profilu Z_v v rozsahu základní délky
- **Největší výška profilu** – P_z, R_z, W_z součet největší výšky profilu Z_p a největší prohloubeniny profilu Z_v v rozsahu základní délky

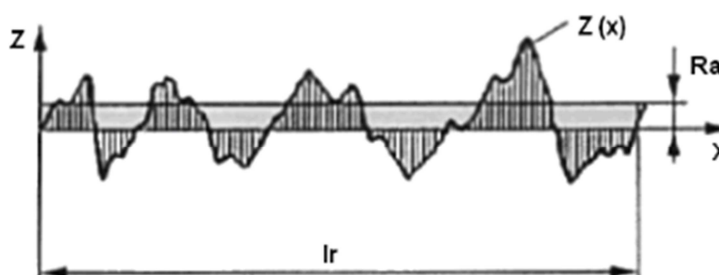


Obr. 12. Amplitudové parametry – R_p , R_v , R_z [19]

- **Střední výška prvku profilu** – P_c , R_c , W_c střední hodnota prvků profilu Z_i v rozsahu základní délky

$$P_c, R_c, W_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{t_i} \quad (3)$$
- **Celková výška profilu** – P_t , R_t , W_t součet největší výšky profilu Z_p a největší prohloubeniny profilu Z_v na vyhodnocované délce.
- **Střední aritmetická odchylka posuzovaného profilu** - P_a , R_a , W_a – střední aritmetická hodnota absolutních odchylek profilu $Z_{(x)}$ v rozsahu základní délky, [19, 20]

$$P_a, R_a, W_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx, \text{ pro } l = l_p, l_r \text{ anebo } l_w. \quad (4)$$



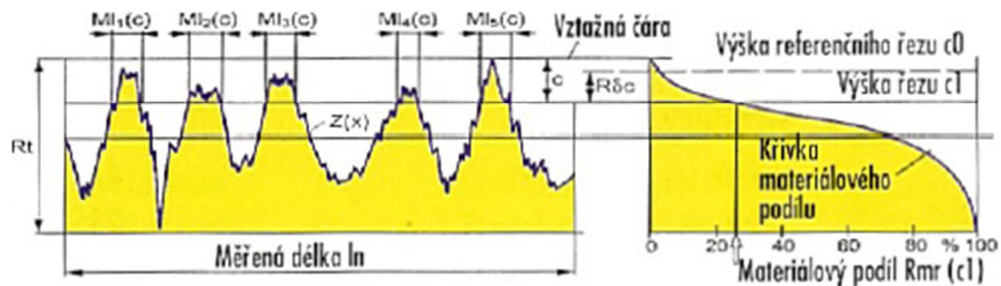
Obr. 13. Střední aritmetická hodnota drsnosti R_a [25]

4.2.2 Křivky a jejich odpovídající parametry

- **Materiálový poměr profilu (nosný podíl) $P_{mr(c)}$, $R_{mr(c)}$, $W_{mr(c)}$** - podíl materiálem zaplněných prvků profilu $Ml(c)$, v dané poloze c k vyhodnocované délce,

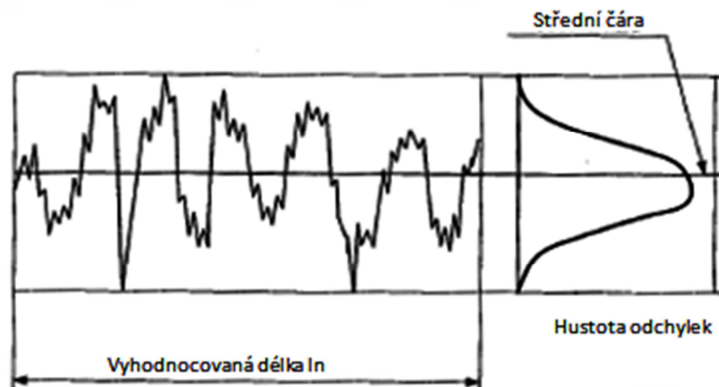
$$P_{mr}(c), R_{mr}(c), W_{mr}(c) = \frac{Ml(c)}{ln} \quad (5)$$

- **Křivka materiálového poměru (Abbot Firestone curve)** – křivka reprezentující materiálový podíl profilu v závislosti od polohy c . Vyjadřuje kumulativní součet rozložení odchylek profilu $Z(x)$ na vyhodnocované délce. Používá se velmi často při hodnocení povrchu a také grafická interpretace průběhu křivky. Je měřidlem příčného řezu plochy, teda přechod přes odměřený povrch od nejvyššího výstupku k nejnižší prohloubenině.



Obr. 14. Křivka materiálového poměru drsnosti povrchu [5]

- **Rozdělení hustoty odchylek profilu** – funkce hustoty pravděpodobnosti ordinát profilu $Z(x)$ v rozsahu vyhodnocované délky, [19, 20]



Obr. 15. Hustota odchylek profilu [19]

4.3 Kvalita obrobeneho povrchu

Geometrie obrobene součástky se liší od ideální geometrie zadané výkresem. Na obrobene ploše jsou mikronerovnosti. Silovým účinkem nástroje se tenká povrchová vrstva pod obrobenu plochou deformuje. V důsledku deformace a ohřívání povrchové vrstvy teplem, které vždy vzniká při obrábění, vznikají v této vrstvě napětí a mění se i její fyzikálně - mechanické vlastnosti.

Kvalita povrchu, jako integrovaná charakteristika strojních součástí, je charakterizovaná:

- a) Geometrií obrobku – rozměrová přesnost obrobků, odchylky geometrického tvaru a polohy, vlnitost a drsnost
- b) Fyzikálně – mechanickými vlastnostmi povrchové vrstvy – tvrdost, zpevnění a zbytkové napětí
- c) Fyzikálně – chemickým stavem povrchu

Stav a kvalita povrchové vrstvy obrobku mají vliv na únavovou pevnost, odolnost proti opotřebení, protikorozní stabilitu, na kvalitu lícování apod. Stav a kvalita povrchové vrstvy jsou velmi důležité aspekty, především pro dynamicky namáhané součástky, které se začínají porušovat zpravidla od povrchu.

Do kvality povrchu charakterizovaného fyzikálně – mechanickými vlastnostmi povrchové vrstvy a fyzikálně – chemickým stavem povrchu patří: [19]

- Zbytkové napětí
- Zpevnění obrobku dané mikrotvrdostí
- Vznik trhlinek v obrobku
- Strukturální změny
- Změny chemického složení
- Plastická deformace atd.

4.3.1 Zbytková napětí po obrábění

U takových způsobů obrábění, které se vyznačují velkým mechanickým zařízením při nízkých teplotách povrchové vrstvy obrobku, např. při hrubování, převažuje vliv plastických deformací nad teplotou a v povrchové vrstvě obrobku vzniká zbytkové tlakové pnutí. U obrábění, kde teplota povrchových vrstev dosahuje vysoké hodnoty, např. při obrábění na čisto SK (700 až 1 100 °C) a při broušení (až 1 200 °C), její účinek převládá. Ohřátá povrchová vrstva má při svém ochlazení tendenci zmenšovat svůj objem, ale spodní vrstvy, které si zachovaly nízkou teplotu, svůj objem nemění a brání smršťování povrchových vrstev. Následkem toho vzniká v povrchové vrstvě zbytkové tahové napětí. Ve skutečnosti je mechanismus zbytkových napětí podstatně složitější, protože jsme nebrali v úvahu účinky způsobené změnou strukturních složek materiálu vlivem teploty. Napětí v povrchových vrstvách obrobku následkem obrábění má značný vliv na vlastnosti obrobku. Je jimi ovlivněna především mez únavy.

Tlaková (záporná) napětí mez únavy zvyšují a naopak tahová (kladná) napětí mez únavy snižují a jsou příčinou únavových trhlin a lomů.

Povrchová napětí po hrubování, zejména u obrobků s jednostranným přídavkem na obrábění, se sníží žíháním ještě před obráběním na čisto při teplotách pod A_{c1} , (tj. 600 až 650 °C). Pokud je nutné snížit povrchová napětí až po obrábění na čisto, je možné provést povrchové tváření, jehož následkem je vznik záporného, pro obrobenou plochu výhodnějšího, povrchové napětí. [14, 19]

4.3.2 Zpevnění povrchu

Deformace povrchové vrstvy po obrábění vyvolávají kromě tvorby mikrone rovností na povrchu i změnu mikrostruktury a změnu jejich některých fyzikálně – mechanických vlastností. Obvykle mluvíme o její zpevnění (ztvrdnutí). Zaužívané je charakterizovat zpevnění obrobeného povrchu stupněm ztvrdnutí a hloubkou vrstvy, která má vyšší tvrdost oproti základnímu materiálu.

Pokud se použije měření mikrotvrdosti na zjištění hloubky zpevnění povrchové vrstvy, vzniká problém metodiky měření vzhledem na malou hloubku deformované vrstvy (0,01 až 0,1 mm). Podle hloubky vrstvy se použije některá z následujících metod: [19]

- Metoda postupného odleptávání povrchových
- Metoda kolmých řezů
- Metoda šikmých řezů

4.3.3 Trhliny v obrobeném povrchu

Vznik trhlinek v obrobeném povrchu je především tepelně indukovaný proces spojený s tepelným poškozením obrobeného povrchu. Trhlinky na povrchu vznikají v důsledku relaxace tahových zbytkových napětí, v případě, že jejich velikost překročí mez pevnosti materiálu (ne vždy, když zbytkové napětí překročí mez pevnosti obráběného materiálu, dochází ke vzniku trhlin). Trhlinky na povrchu obrobku jsou z hlediska jeho funkčnosti jako strojní součásti nežádoucí a neakceptovatelné. Jsou výsledkem nevhodně zvolené technologie obrábění, funkcí opotřebení nástroje apod. Často jsou viditelné nejen pod mikroskopem, ale můžou být viditelné i volným okem. Na indikaci povrchových trhlin jsou nejvhodnější magnetoindukční metody, metoda vířivých proudů a kapilární metody. [19]

4.3.4 Chemické změny

Chemické změny v obrobených plochách jsou způsobené difuzí v souvislosti s vysokými teplotami v zóně řezání a existencí chemického potenciálu mezi nástrojem a třískou. Obvykle jsou spojeny s aplikací spékaných karbidů jako nástrojového materiálu. Teplotní stabilita nástrojů z rychlořezné oceli je jen do oblasti přibližně 650 °C, což je teplota nedostatečná na difuzní pochody. Naproti tomu keramické nástrojové materiály jsou chemicky velmi stálé.

Na analýzu chemických změn je možné využívat následující metody: [19]

- Rentgenová spektroskopie
- Hmotnostní spektroskopie
- Chemická analýza
- Elektronová mikroanalýza
- Augurova spektroskopie

4.3.5 Fázové přeměny

Fázové přeměny v obrobených površích jsou indukované především při broušení, pro které je charakteristická vysoká teplota v kontaktu broušícího kotouče a obrobku. Fázové přeměny mohou být samozřejmě indukované i jinými metodami obrábění. Můžou se např. vyskytovat při broušení kalených ocelí, nebo vrtání opotřeбенým nástrojem. Většinou jde o nežádoucí jev, i když v současnosti existují metody, které využívají intenzivní ohřev povrchových vrstev při broušení na jeho povrchové zakalení (tzv. termofrikční broušení). Nejvhodnější metoda na identifikaci fázových přeměn v obrobených površích je studie prostřednictvím světelné mikroskopie. [19]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Teoretická část:

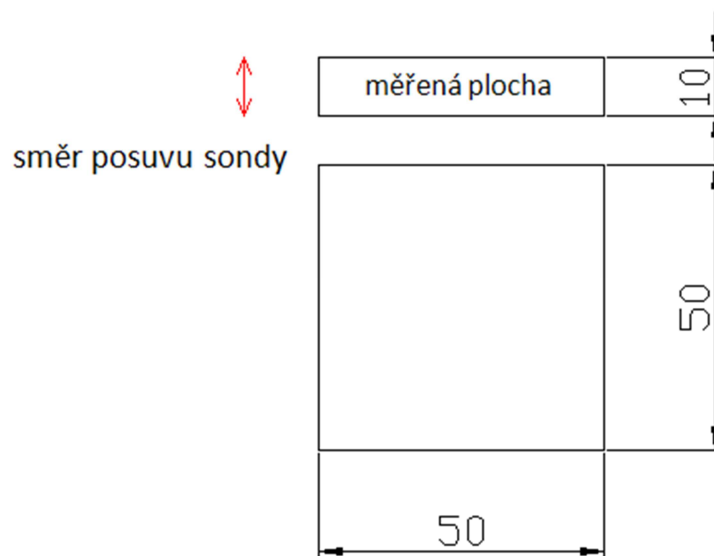
- První cíl teoretické části je zaměřen na rozebrání teorie dokončovacích operací, převážně se jedná o broušení, leštění a superfinišování.
- Dalším cílem je seznámit se s hodnocením charakteristik nedokonalostí povrchu.

Praktická část:

- Prvním cílem praktické části bylo zaměřit se na technologii broušení. Zkoumat jak se bude chovat broušená plocha v závislosti na měněných technologických podmínkách.
- Následně experimentálně zkoumat jak se chovají různé materiály při technologii leštění (leštění textilním kotoučem a ruční leštění).
- Dalším cílem této části je věnovat se technologii superfinišování.
- Posledním úkolem je vyhodnotit vliv technologických podmínek na životnost.
- Všechny experimentální měření statisticky vyhodnotit.

6 POUŽITÉ MATERIÁLY A ZAŘÍZENÍ

Při zkoumání zadaných technologií bylo použito pěti různých materiálů (19436, 19436.4, 14109, 14109.4, 11600). Oceli třídy 19 i třídy 14 byly použity v kaleném i nekaleném stavu, aby při vzájemném srovnání byly vidět rozdíly mezi kaleným a nekaleným materiálem. Materiál 11600 byl použit z toho důvodu, že se jedná o etalonový materiál. Všechny použité materiály byly zkoumány ve formě destiček o rozměrech 50x50x10 mm.

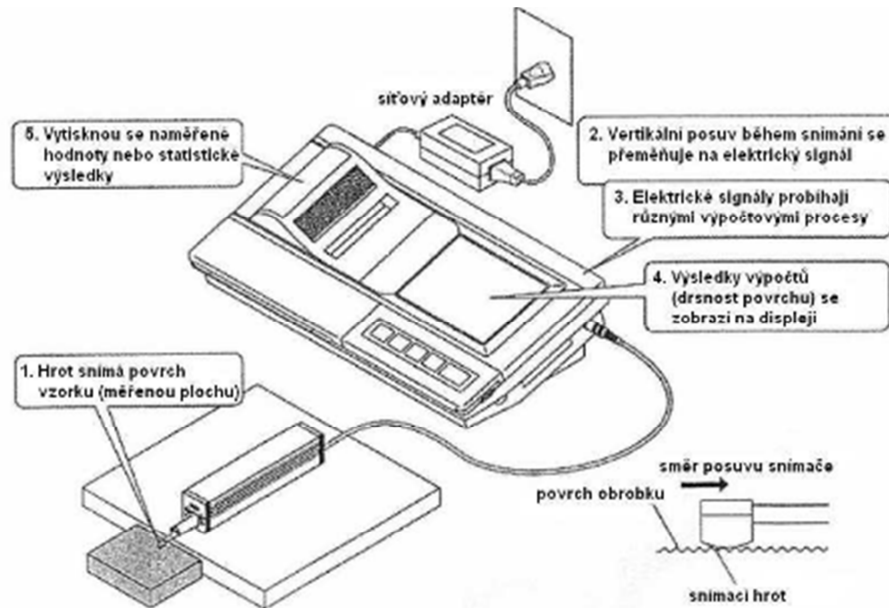


Obr. 16. Měřený vzorek

6.1 Použité měřicí přístroje

6.1.1 Drsnoměr Mitutoyo SJ-301

MITUTOYO SJ-301 je přístroj na měření drsnosti povrchu pro použití v dílenském prostředí. Snímací hrot přístroje SJ-301 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. Výsledky měření se zobrazí digitálně a graficky na speciální na dotek citlivé ovládací obrazovce a pomocí vestavěné tiskárny se vytisknou. [27]



Obr. 17. Schéma přístroje Mitutoyo[27]

6.1.2 Vodorovná rovinná bruska BRH 20.03 F

Brusky BRH 20.00 představují stavebnicovou řadu rovinných brusek s horizontálním vřetenem a pravoúhlým stolem. Jsou určeny pro broušení rovinných a tvarových ploch součástí z ocelí, litiny a ostatních kovových materiálů, u kterých se vyžaduje dosažení vysoké přesnosti a kvality zpracování. Brousí se převážně obvodem broušícího kotouče. Broušené součástky podle svých rozměrů a tvaru mohou být upínané na elektromagnetickou desku anebo přímo, či prostřednictvím vhodných upínačů na upínací plochu stroje. [26]

Tab. 7. Základní parametry brusky [26]

Výška stroje [mm]	2240
Hmotnost stroje [kg]	1860
Pracovní plocha stolu [mm]	200 x 630
Rozměry broušícího kotouče [mm]	250 x 20-50 x 76
Rychlost stolu plynule regulovatelná [m/min]	1-23
Otáčky broušícího vřetena [min⁻¹]	2550

6.1.3 Převodová vrtačka B40 GSM

Tab. 8. Základní parametry vrtačky [28]

Velikost stolu [mm]	560x560
Max. vzdálenost vřeteno-stůl [mm]	780
Výška stroje [mm]	2220
Otáčky vřetene [min^{-1}]	50-1450
Počet stupňů	18
Hmotnost stroje [kg]	460

6.2 Charakteristika použitých materiálů

6.2.1 Ocel 11600

Oceli třídy 11 jsou uhlíkové (nelegované) konstrukční oceli se zaručenou čistotou, zaručeným obsahem fosforu a síry, zaručenou minimální pevností v tahu, mezí kluzu a tažností.

Ocel 11600 je neušlechtilá konstrukční ocel obvyklé jakosti s vyšším obsahem uhlíku-0,5% C. Vhodná na strojní součásti namáhané staticky i dynamicky, u nichž se nevyžaduje svařitelnost. Je také vhodná pro součásti vystavené velkému měrnému tlaku.

Příklady použití:

Hřídele, osy, ozubená kola, řetězová kola, páky, čepy, pístnice, kolíky, podpěry, držátka, objímky, šrouby a matice, klíny, pera, kluzné kameny, ozubené hřebeny, kladky, spojky, segmenty a vložky axiálních ložisek, distanční kroužky, různé upínací elementy, tělesa fréz apod. Pásky a pruhy ke tvarování ohybem. [31]

6.2.2 Ocel 14109

Oceli třídy 14 jsou legovány chromem, popř. chromem a manganem či křemíkem a hliníkem. Jsou to nejvíce používané slitinové oceli, které umožňují dosáhnout velmi dobrých vlastností bez použití nedostatkových prvků. Obvykle se cementují, zušlechťují, kalí, některé jsou určeny k nitridování např. 14 340. Chromové oceli jsou vhodným materiálem na součásti kuličkových a válečkových ložisek. Na tyto oceli (např. 14 109 určená k výrobě valivých ložisek) je kladen velký požadavek, co se týká mikročistoty materiálu. Sleduje se hlavně velikost a tvar nekovových vměstků, zejména siřníků a oxidů, hlavně Al_2O_3 .

Ocel 14109 obsahuje 1% C a 1,5% Cr. Její tvárnost za tepla a obrobitelnost je dobrá a odolnost proti korozi je normální. Ocel je vhodná pro výrobu kuliček do průměru 25 mm, válečků a kuželíků do průměru 18 mm a kroužků valivých ložisek do tloušťky stěny 16 mm. Při kalení do vody se teplota pohybuje v rozmezí 790 až 820 °C, při kalení do oleje 820 až 840 °C, popouštění probíhá za teplot 120 až 170 °C a žíhání na měkko za teplot 720 až 780 °C. [31]

6.2.3 Ocel 19436

Oceli třídy 19 se nazývají nástrojové. Lze je rozdělit na nelegované a legované. Z legovaných nástrojových ocelí se vyrábějí téměř všechny druhy řezacích, stříhacích, tvářecích a jiných nástrojů. Oproti nelegovaným ocelím jsou legované charakteristické zejména větší prokalitelností a zvýšenou odolností proti popouštění, avšak jsou náročnější na tepelné zpracování.

Ocel 19436 je vysoce legovaná chromová ocel s obsahem 2% C a až 12% Cr. Rozsah teplot při kalení do oleje je 930 až 960 °C a při kalením termálním 950 až 980 °C.

Příklady použití:

Složité lisovadla, hlubokotažné nástroje, trny pro lisování za studena, závitové nástroje řezné i tlačné, pevné i stavitelné výstružníky, protahovací trny, frézy (s jemnými zuby), strojní pilky, formy pro lisování porcelánu, pravítka bezhrotých brusek, kladiva drtičů, vrtáky na mramor, soustružnické nože, nástroje na vysekávání zubů pil na dřevo v kaleném stavu. [31]

6.2.4 Oceli 14109.4 a 19436.4

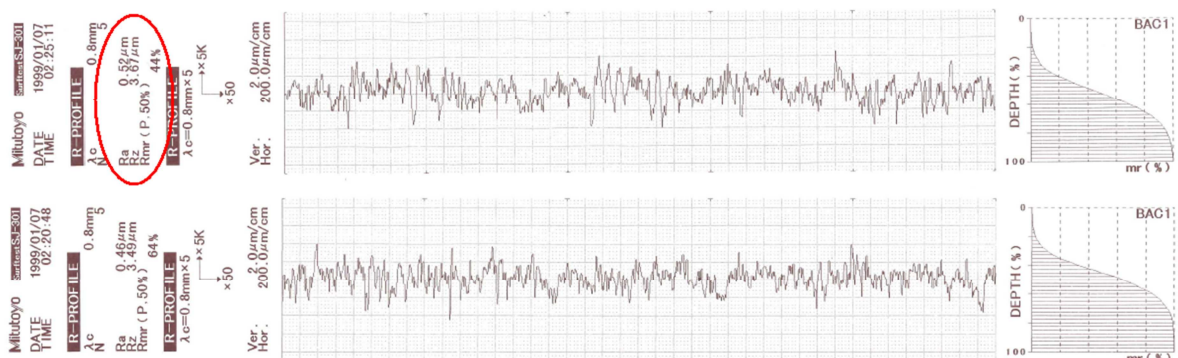
Číslo 4 za základní číselnou značkou tvoří doplňkovou číslici, která udává stav oceli v závislosti na tepelném zpracování. Toto konkrétní číslo znamená kalení nebo kalení s následným popouštěním při nízkých teplotách, po rozpouštěcím žíhání (jen u austenitických ocelí). [32]

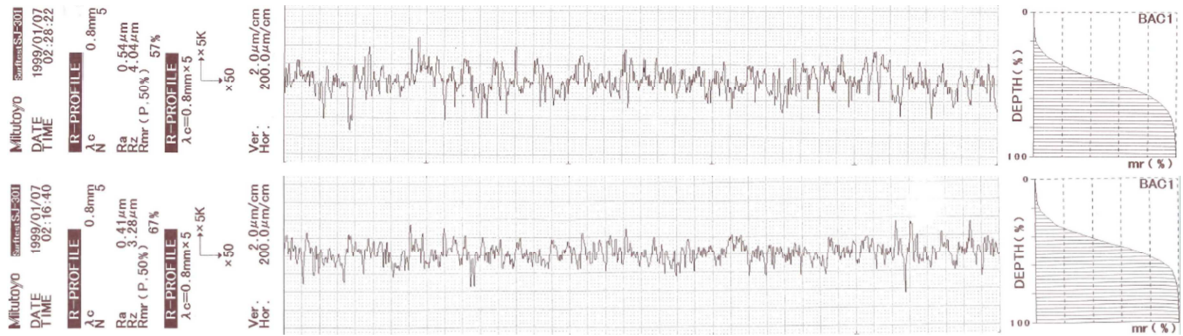
7 TECHNOLOGIE BROUŠENÍ

Broušení probíhalo na rovinné brusce při změnách technologických podmínek bez použití chladicí kapaliny. Měnily se hodnoty hloubky úběru a_p , posuvové rychlosti v_f a používaly se různé druhy broušicích kotoučů. Frekvence otáčení broušicího kotouče byla jednotná - měla hodnotu 2550 ot/min . Lze tedy říct, že při použití broušicích kotoučů o průměru 250 mm byla řezná rychlost $v_c \cong 33$ m/s. Hloubky úběru a_p byly pro tyto zkoušky určeny na 0,005; 0,02; 0,025 a 0,04 mm. Posuvové rychlosti v_f se pro každý materiál, každý kotouč a každou hloubku úběru a_p měnily 4x (7, 14, 21, 23 m/min). Samotné zkoumání jakosti broušených ploch se provádělo na drsnoměru Mitutoyo, který byl nastaven tak, aby zjišťoval hodnoty R_a , R_z a R_{mr} na třech různých úrovních posuzovaného profilu (25%, 50%, 75%). Každá plocha se měřila 5x v kolmém směru na delší stranu (obr. 16), protože při případném měření v podélném směru by se mohlo stát, že hrot sondy najetím do rýhy vyhodnotí výsledky zkresleně. Délka posuvu hrotu byla nastavena na 0,8 mm a celé měření probíhalo dle mezinárodní normy ISO. Pro přesné vyhodnocení výsledků se přístroj po určité době kalibroval, aby se zabránilo nepřesným výsledkům, z důvodu nepřesně nastaveného přístroje.

Tab. 9. Příklad vyhodnocování získaných dat

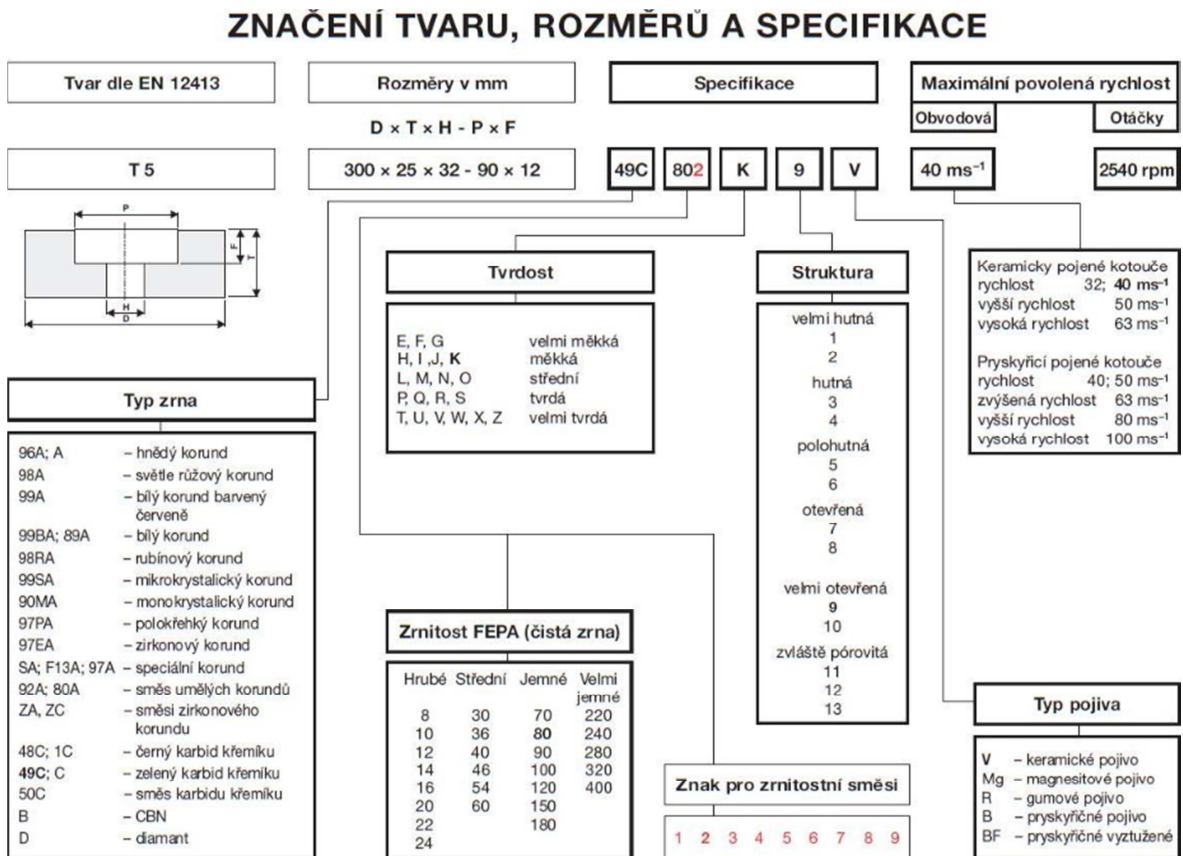
19436												
0,005mm				0,02mm			0,025mm			0,04mm		
vp	R_a	R_z	$R_m(r)$	R_a	R_z	$R_m(r)$	R_a	R_z	$R_m(r)$	R_a	R_z	$R_m(r)$
14	1.	0,44	3,87	40,00	1.	0,44	3,45	45,00	1.	0,48	3,66	63,00
	2.	0,43	3,47	40,00	2.	0,51	3,92	50,00	2.	0,53	3,74	51,00
	3.	0,47	3,65	43,00	3.	0,53	3,60	48,00	3.	0,51	3,63	55,00
	4.	0,44	3,51	48,00	4.	0,46	3,00	54,00	4.	0,49	3,70	52,00
	5.	0,41	3,28	67,00	5.	0,46	3,49	64,00	5.	0,52	3,67	44,00
	X	0,44	3,56	47,60	X	0,48	3,67	52,20	X	0,51	3,68	53,00
	smodch	0,019	0,197	10,131	smodch	0,034	0,196	6,585	smodch	0,019	0,037	6,164
	rozptyl	0,000	0,039	102,640	rozptyl	0,001	0,038	43,360	rozptyl	0,000	0,001	38,000
	medián	0,44	3,51	43,00	medián	0,46	3,60	50,00	medián	0,51	3,67	52,00
	max	0,47	3,87	67,00	max	0,53	3,92	64,00	max	0,53	3,74	63,00
min	0,41	3,28	40,00	min	0,44	3,45	45,00	min	0,48	3,63	44,00	





Obr. 18. Příklady vytisknutých výsledků z přístroje Mitutoyo

7.1 Označování brousících kotoučů



Obr. 19. Označování brousících kotoučů [30]

7.2 Použité brousící kotouče

Při experimentálním měření bylo použito 6 brousících kotoučů, jejichž základ tvořil bílý elektrokorund. Všechny kotouče měly keramické pojivo a stejnou tvrdost I, což jsou měkké kotouče. Jednalo se o ploché kotouče s průměrem 250 mm a skládaly se ze dvou skupin. První skupinu tvořily kotouče se strukturou 8 (otevřená) a 9 (velmi otevřená), přičemž tyto dvě struktury jsme považovali za stejné. Druhou skupinu tvořily kotouče se strukturou 12 (zvláště pórovitá). Každý kotouč se ještě lišil obsahem sintrovaného korundu. Ten tvořil 0%, 30%, nebo 50 % nástroje. Procentuální podíl lze poznat podle posledního čísla v označení ZKOUŠKY, přičemž kotouč 1435 měl 0% sintrovaného korundu. Při vyhodnocování výsledků je pro zjednodušení používáno označení ZKOUŠKY, tzn., používá se označení např. 83 u kotouče 32 AG92/99 80 I 8V – ZKOUŠKA 83.

Tab. 10. Označení použitých brousících kotoučů

34 A99B 80 Is(K) 9V	ZKOUŠKA 1435
32 AG92/99 80 I 8V	ZKOUŠKA 83
32 AG92/99 80 I 8V	ZKOUŠKA 85
32 A98 80 I 12VS	ZKOUŠKA 120
32 AG92/99 80 I 12VS	ZKOUŠKA 123
32 AG92/99 80 I 12VS	ZKOUŠKA 125

7.3 Sintrovaný korund

Sintrovaný korund je uměle vytvořený typ korundu, kde výchozí surovinou je aluminium-monohydrát, který se po sloučení s Al-disperzí drtí na požadovanou velikost zrn a v následných procesech získává konečnou pevnost a povrchovou tvrdost. Tímto jedinečným procesem získáme zrna stejných řezných vlastností zaručující maximální možnou opakovatelnost, využitelnost a efektivitu brusiva. Příčinou toho je extrémně malá velikost krystalů (0,0002 až 0,0005 mm, v závislosti na technologii výroby). To znamená v průměru asi 20 až 50 krát menší krystaly oproti ušlechtilému korundu. Podle vnějšího zatížení brousícího

kotouče se ze zrn oddělují různě velké krystalické úlomky a tím se na zrnech vytvářejí další ostré hroty a řezné hrany. Mezi výhody nového brusiva patří řezivost a tím i menší četnost orovnávaní a vyšší životnost. Brusivo ze sintrovaného korundu je určené pro broušení velmi tvrdých a houževnatých materiálů (tvrdosti 48 HRc, materiály HSS apod.). [29]

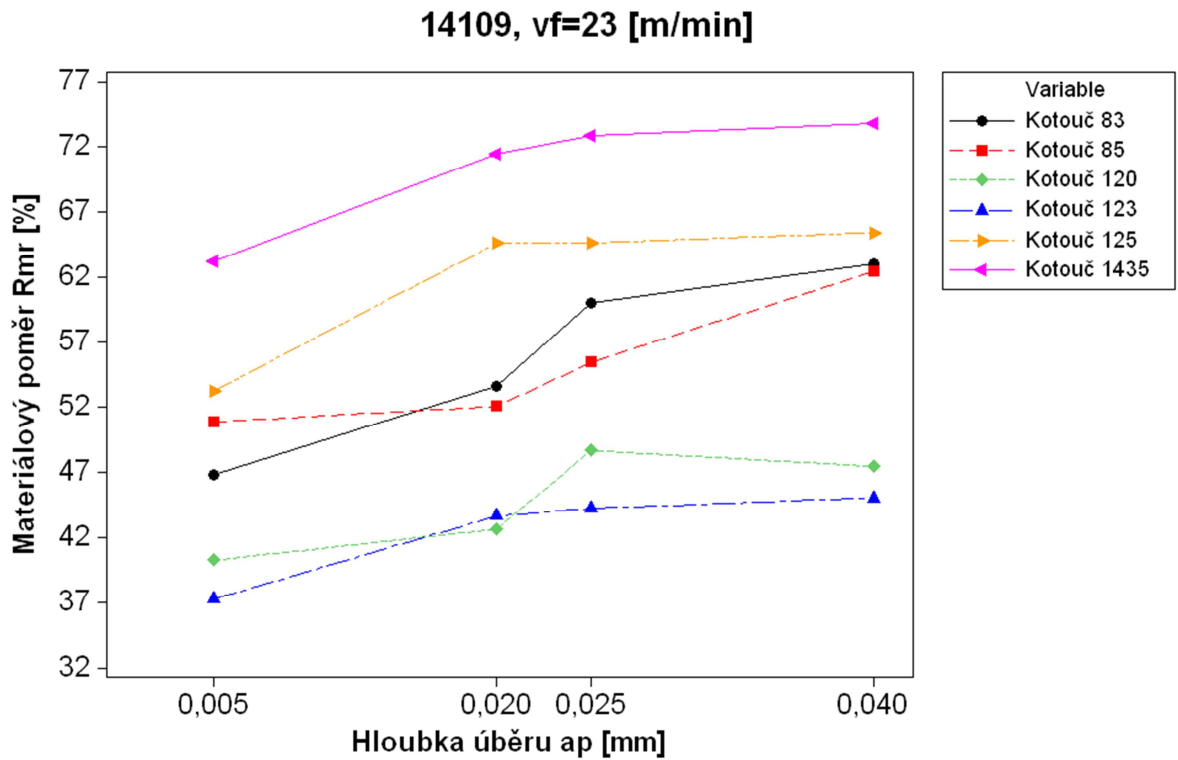
7.4 Porovnání použitých kotoučů při stejných podmínkách

Na každém vzorku vybraných materiálů byly postupně vyzkoušeny všechny druhy používaných broušicích kotoučů. Tyto procesy porovnávání se děly při změnách posuvové rychlosti a hloubky úběru. Každý vzorek materiálu byl broušen na čtyřech plochách, na každé ploše byla použita jiná hloubka úběru. Takto nabroušený vzorek se následně měřil pomocí drsnoměru Mitutoyo, pomocí kterého se zjišťovaly hodnoty Rmr, Ra a Rz. Po změření jednoho vzorku následovala další přebroušení při jiných posuvových rychlostech. Tento stejný postup se aplikoval u všech použitých materiálů.

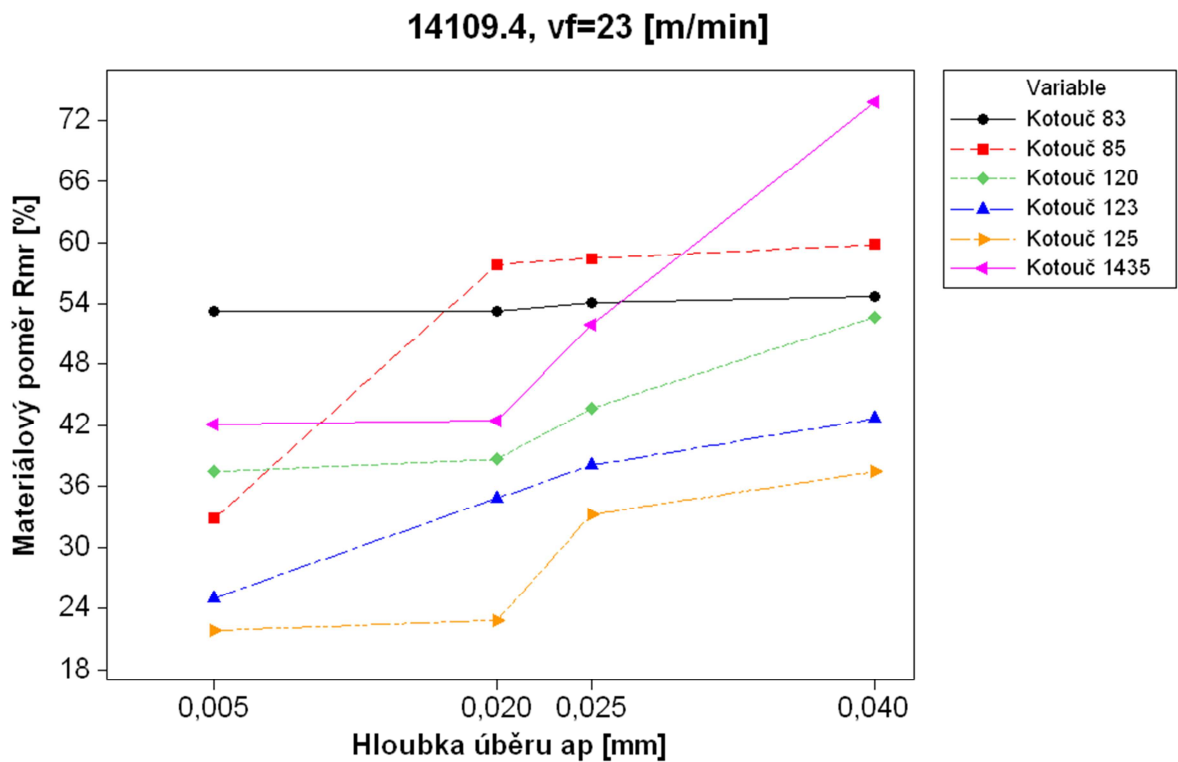
7.4.1 Závislosti Rmr, Ra, Rz na a_p

Závislost materiálového poměru Rmr na hloubce úběru a_p :

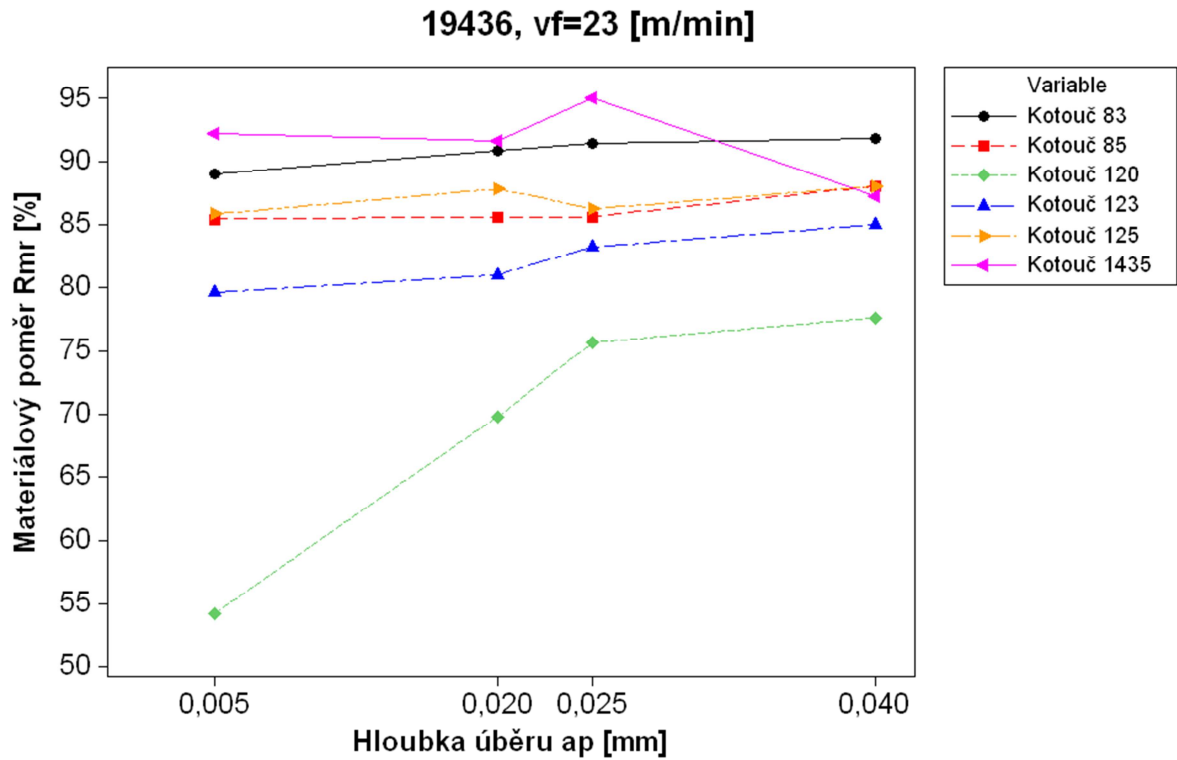
Z následujících grafů můžeme vypožorovat, jak se mění materiálový poměr Rmr v závislosti na zvětšující se hloubce úběru u každého použitého broušicího kotouče. Chování křivek všech kotoučů je podobný – všechny mají stoupající tendenci. Lze tedy říct, že materiálový poměr roste s rostoucí velikostí odebraného materiálu. Dále je zde vidět, že u kotoučů 1435, 83 a 85 (struktura otevřená, velmi otevřená) se ve většině případů hodnoty Rmr pohybují výše než u kotoučů se strukturou 12 (zvláště pórovitá). Z těchto získaných poznatků plyne, že čím více je v kotouči brusiva, tím je materiálový poměr Rmr větší. Je to způsobeno tím, že se více zatlačují vrcholky nerovností a působí zde větší normálové síly. Podobných výsledků se dosáhlo i u ostatních posuvových rychlostí u všech materiálů. Všechny grafy a výsledky jsou uvedeny v příloze práce.



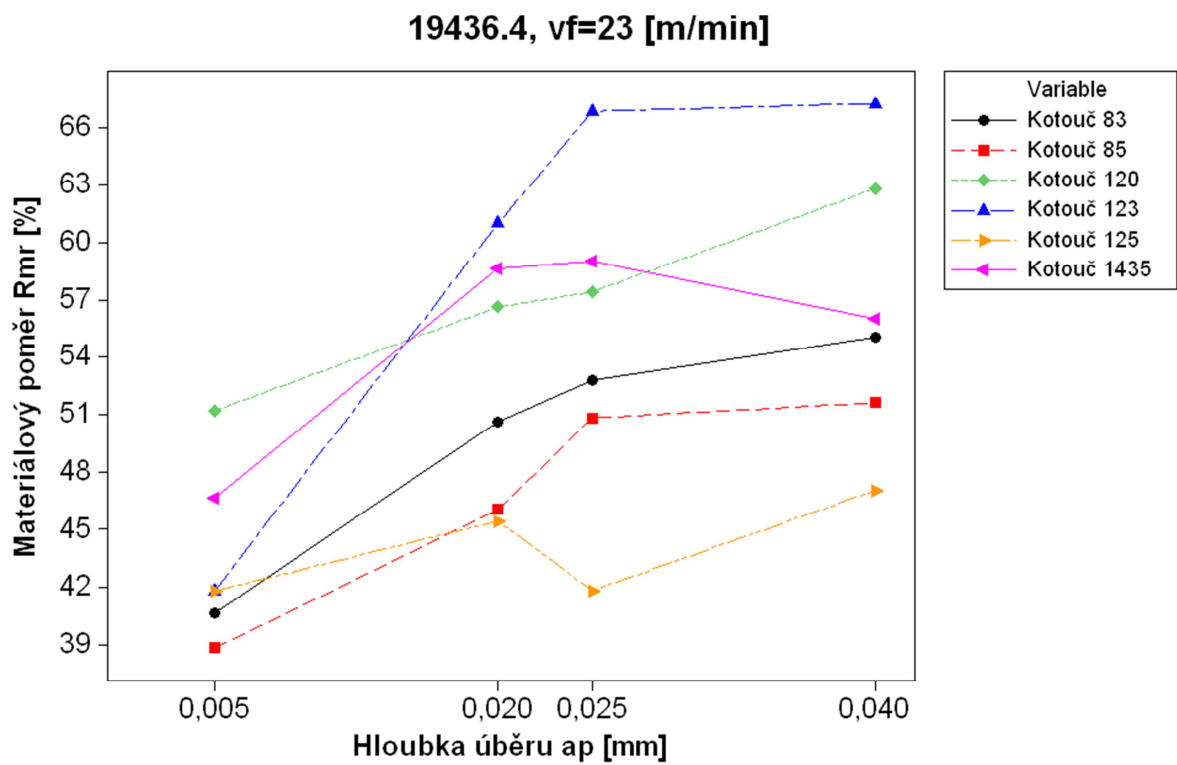
Obr. 20. Porovnání kotoučů, materiál 14109 - závislost Rmr na a_p



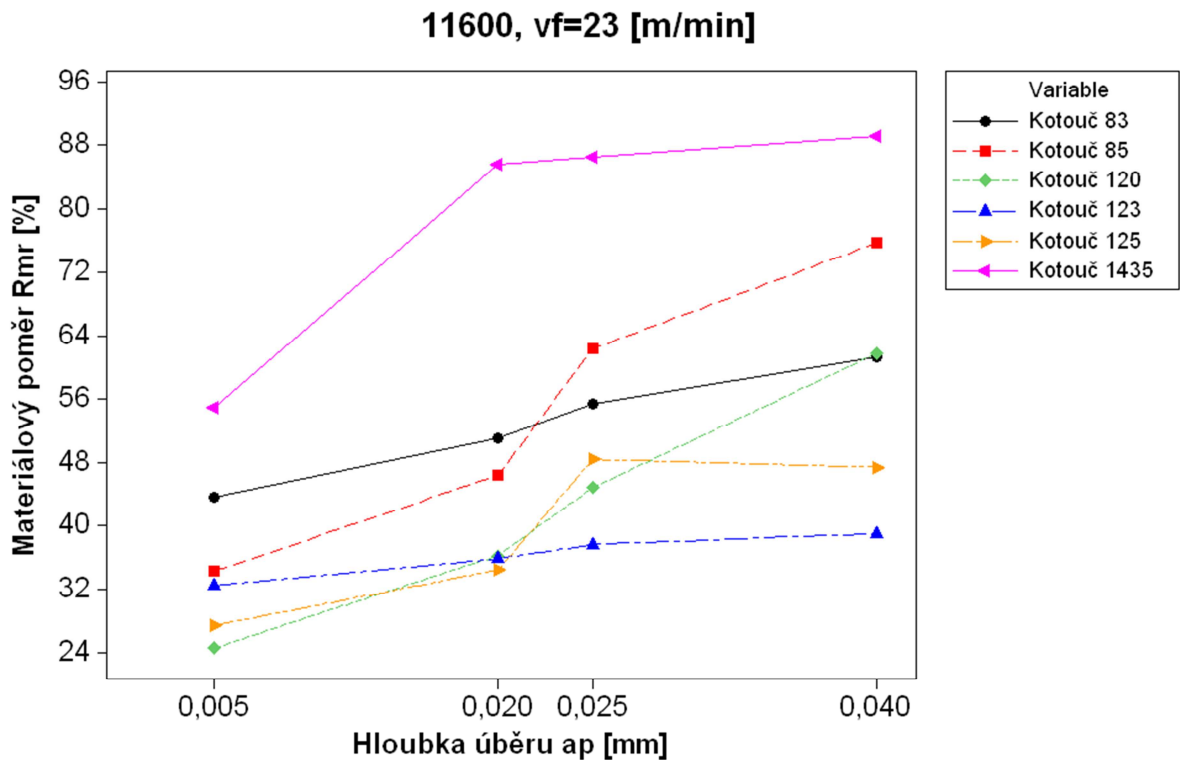
Obr. 21. Porovnání kotoučů, materiál 14109.4 - závislost Rmr na a_p



Obr. 22. Porovnání kotoučů, materiál 19436 - závislost Rmr na a_p



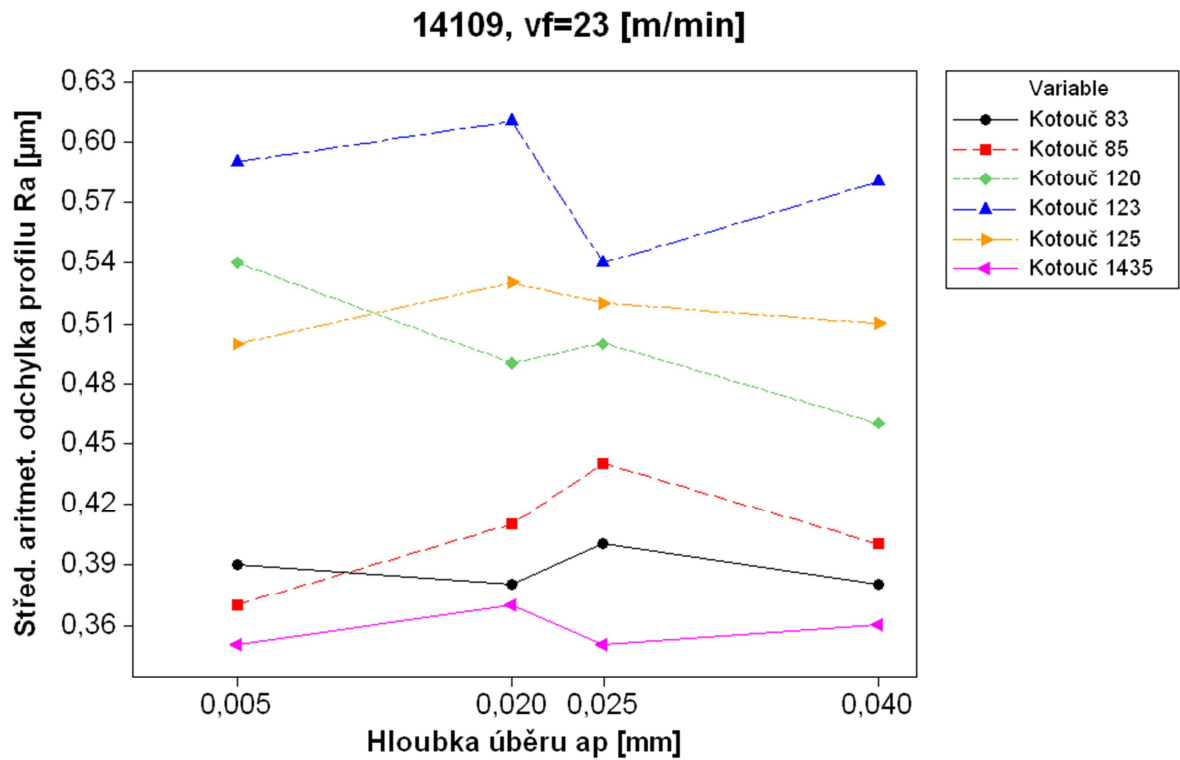
Obr. 23. Porovnání kotoučů, materiál 19436.4 - závislost Rmr na a_p



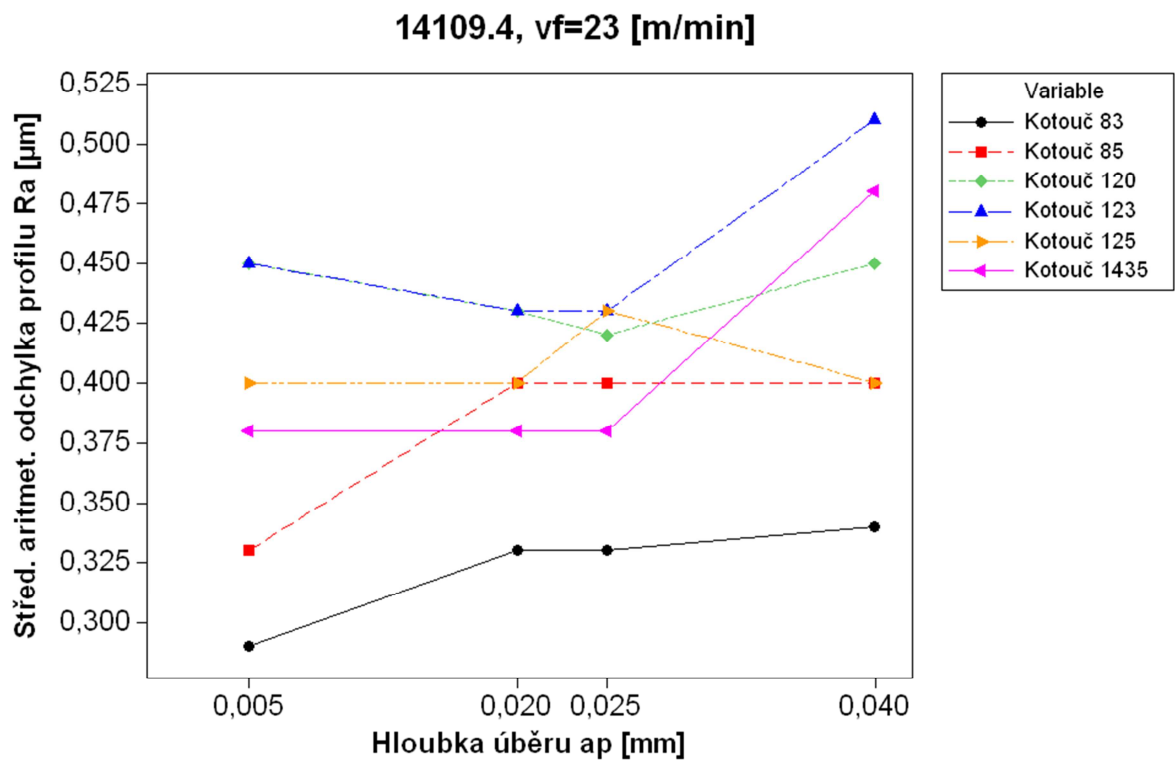
Obr. 24. Porovnání kotoučů, materiál 11600 - závislost Rmr na a_p

Závislost střední aritmetické odchytky posuzovaného profilu R_a na hloubce úběru a_p :

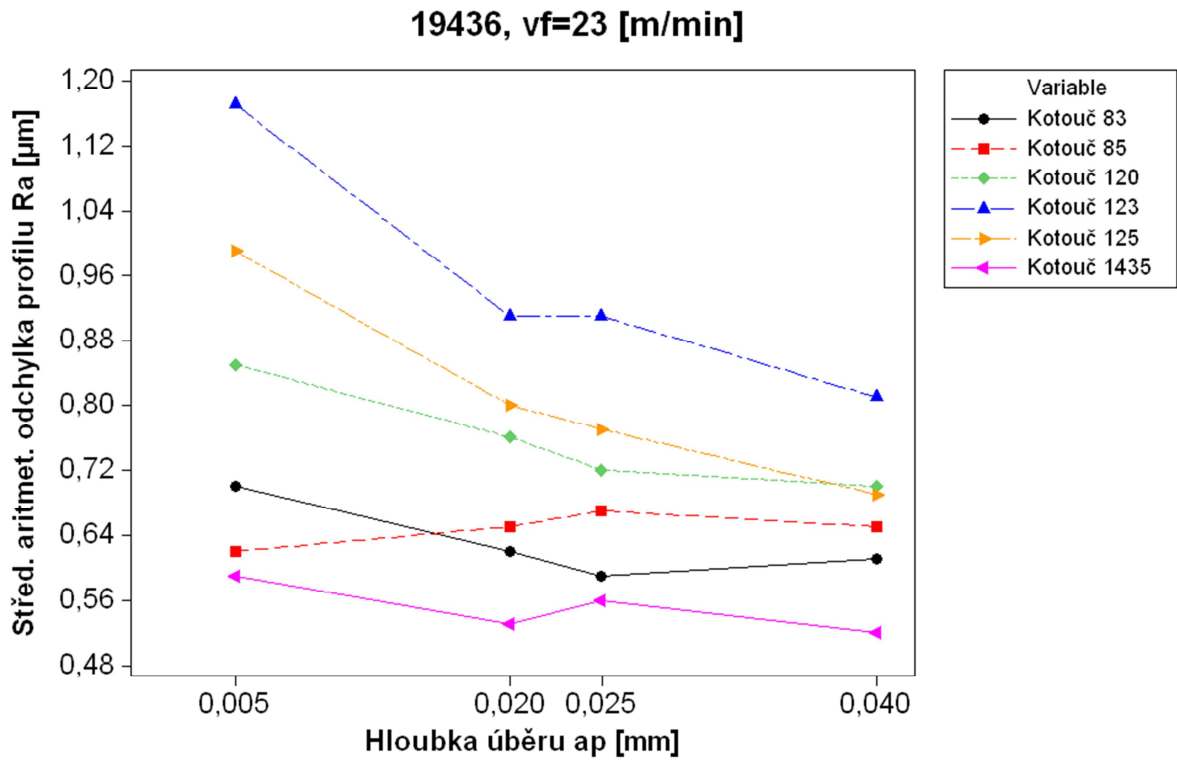
Následující grafy popisující závislost střední aritmetické odchytky posuzovaného profilu R_a na hloubce úběru a_p umožňují porovnat jednotlivé kotouče při broušení materiálů s rychlosti posuvu $v_f = 23$ m/min. Je zde vidět, že broušením kotouči s vyšší pórovitostí (120, 123, 125) dosáhneme horší hodnoty R_a než při broušení kotouči s menší pórovitostí (1435, 83, 85). Je to způsobeno tím, že u kotouče s větší pórovitostí je méně brusiva, což znamená menší kontakt broušících zrn s broušenou plochou a tím pádem větší drsnost povrchu. Chování jednotlivých křivek (stoupání, klesání) u této zkoušky nelze jednoznačně určit, ale rozdíly mezi hodnotami R_a při různých hloubkách úběru a_p jsou velmi malé a většinou zanedbatelné. V příloze této práce jsou uvedeny výsledky a grafy pro všechny druhy materiálů a rychlostí.



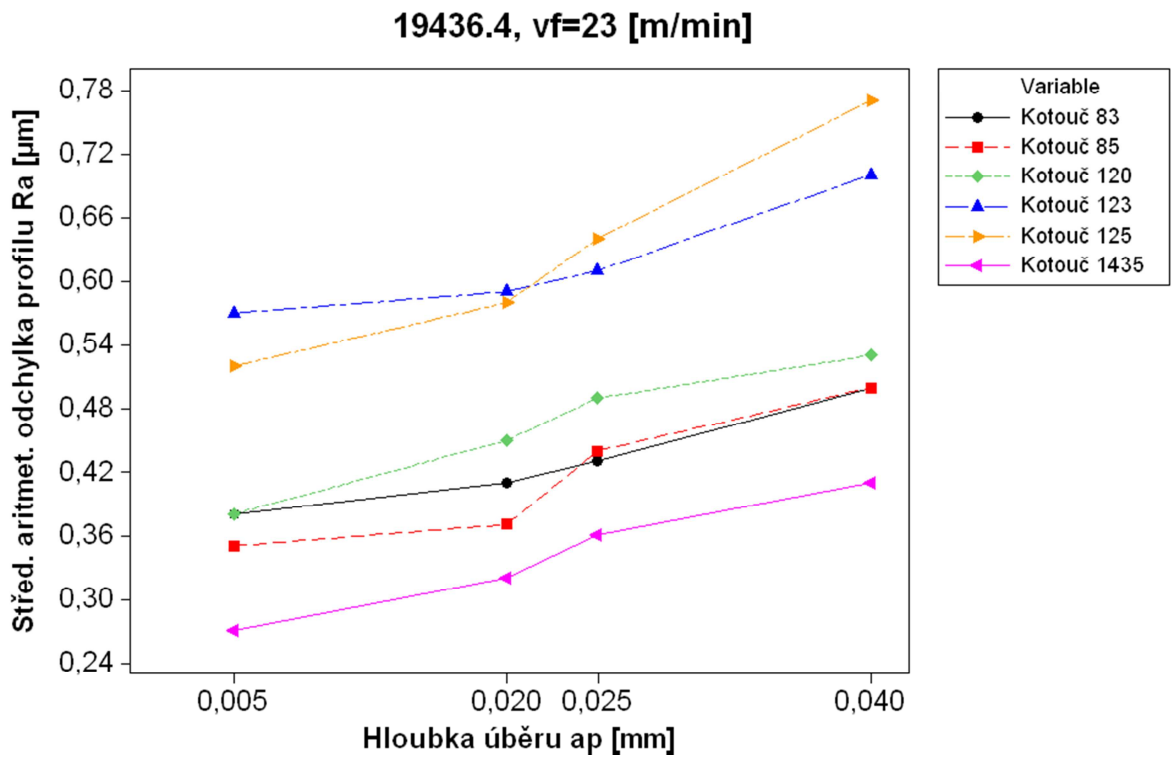
Obr. 25. Porovnání kotoučů, materiál 14109 - závislost Ra na a_p



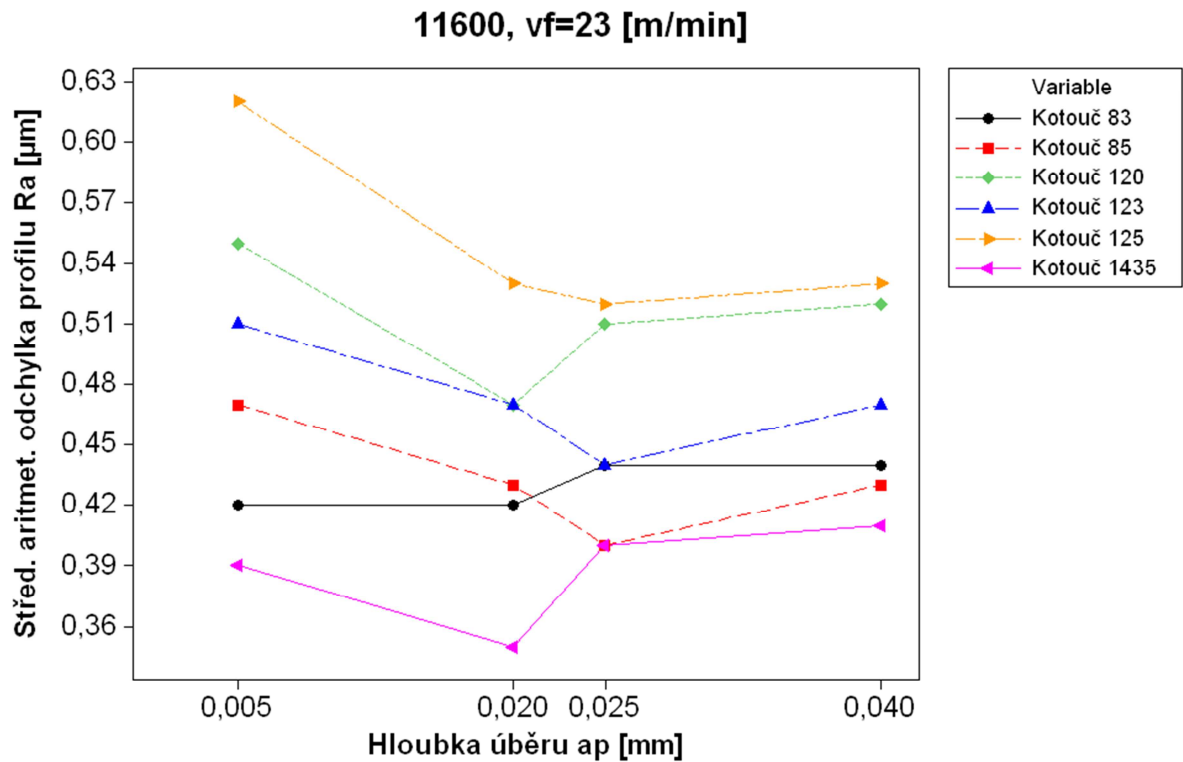
Obr. 26. Porovnání kotoučů, materiál 14109.4 - závislost Ra na a_p



Obr. 27. Porovnání kotoučů, materiál 19436- závislost Ra na a_p



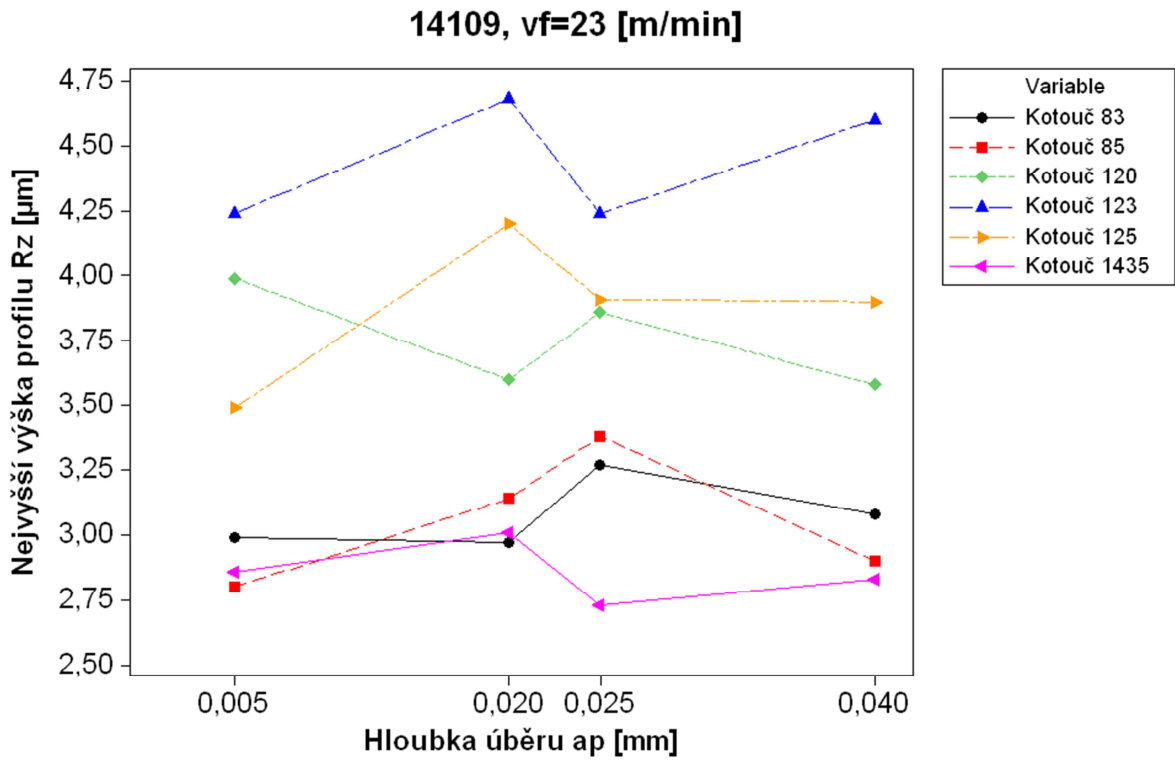
Obr. 28. Porovnání kotoučů, materiál 19436.4 - závislost Ra na a_p



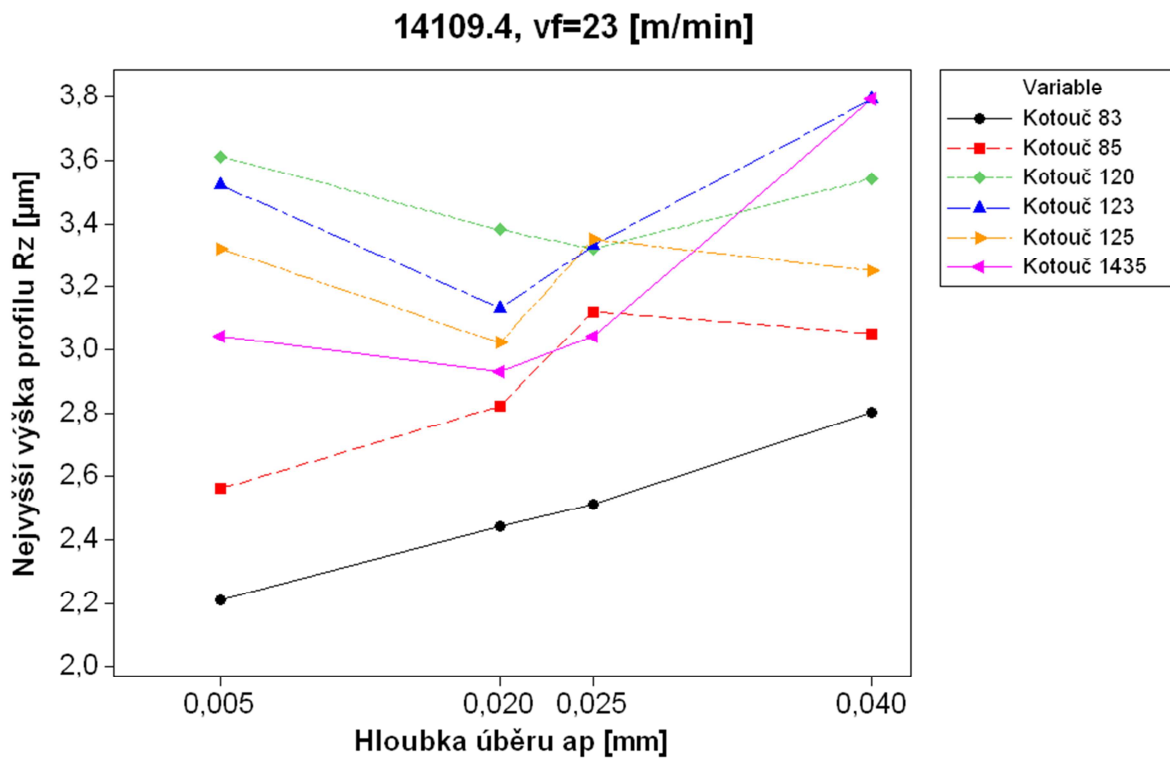
Obr. 29. Porovnání kotoučů, materiál 11600 - závislost Ra na a_p

Závislost nejvyšší výšky profilu Rz na hloubce úběru a_p :

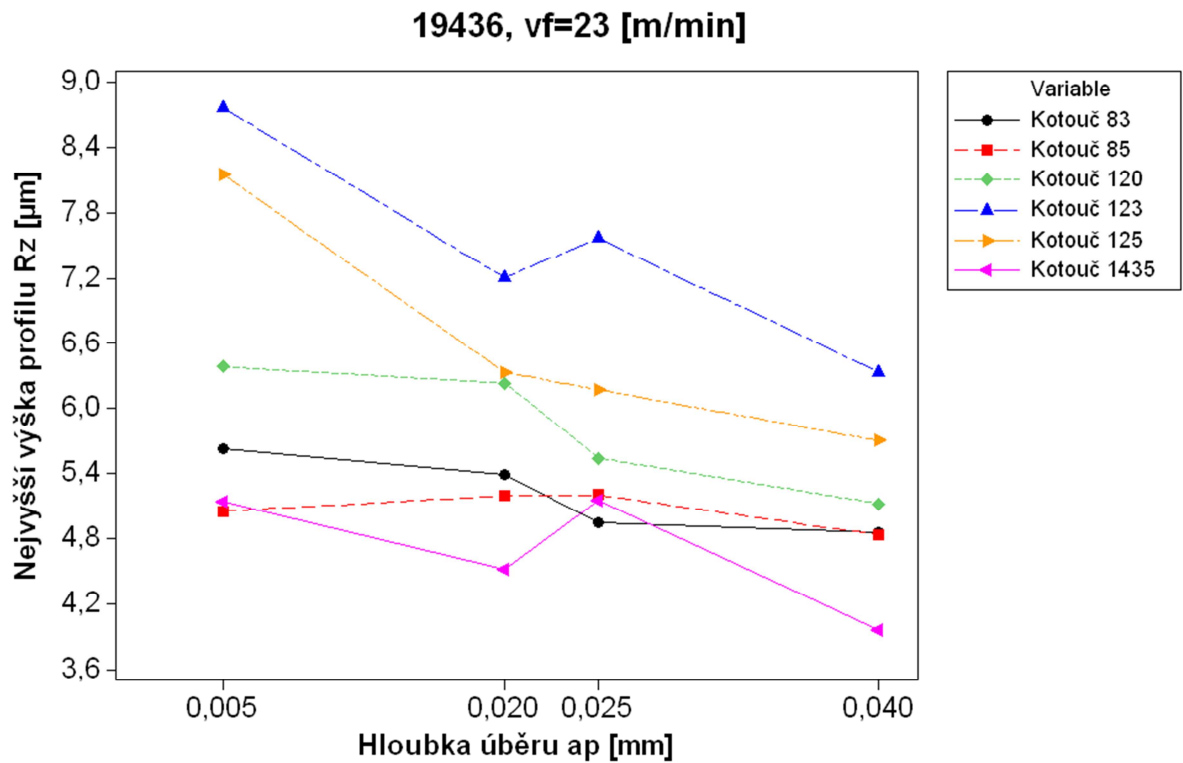
Na těchto vybraných grafech lze vidět podobné chování jednotlivých křivek jako u předchozích výsledků (přímá úměra mezi hodnotami Ra a Rz). Opět se zde projevuje rozdíl mezi strukturou kotoučů, kdy struktura 8 (9)-méně pórovitá, má nižší hodnoty Rz než struktura 12. Rozdíly v hodnotách Rz v závislosti na hloubce úběru a_p nejsou opět nikterak velké, tudíž tendence chování křivek rovněž nelze přesně určit.



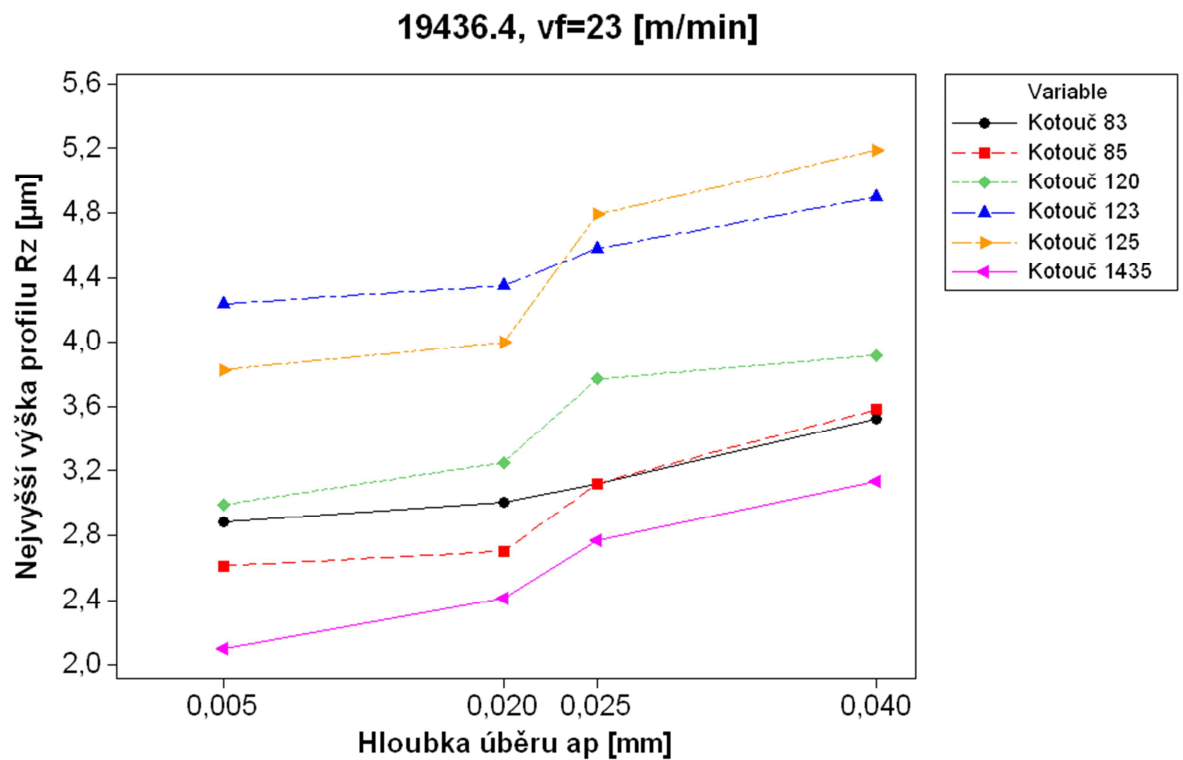
Obr. 30. Porovnání kotoučů, materiál 14109 - závislost R_z na a_p



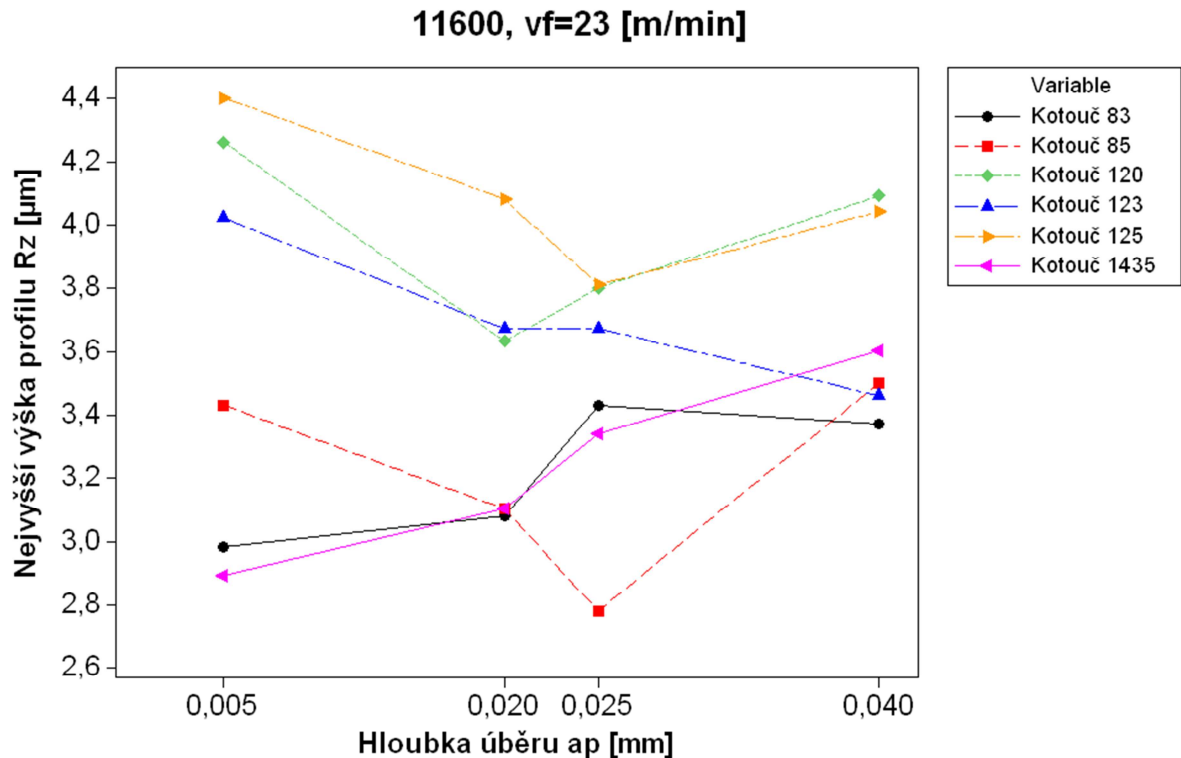
Obr. 31. Porovnání kotoučů, materiál 14109.4 - závislost R_z na a_p



Obr. 32. Porovnání kotoučů, materiál 19436 - závislost Rz na a_p



Obr. 33. Porovnání kotoučů, materiál 19436.4- závislost Rz na a_p

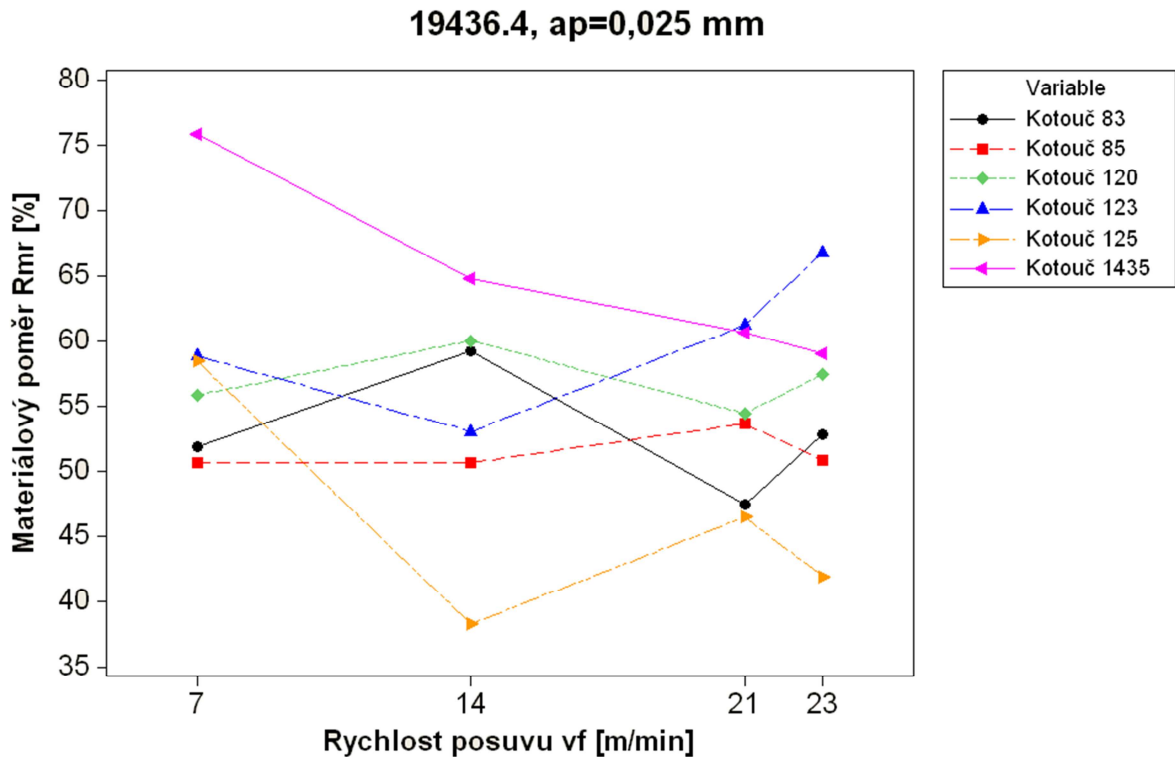


Obr. 34. Porovnání kotoučů, materiál 11600 - závislost R_z na a_p

7.4.2 Závislosti R_{mr} , R_a , R_z na v_f

Závislost materiálového poměru R_{mr} na posuvové rychlosti v_f :

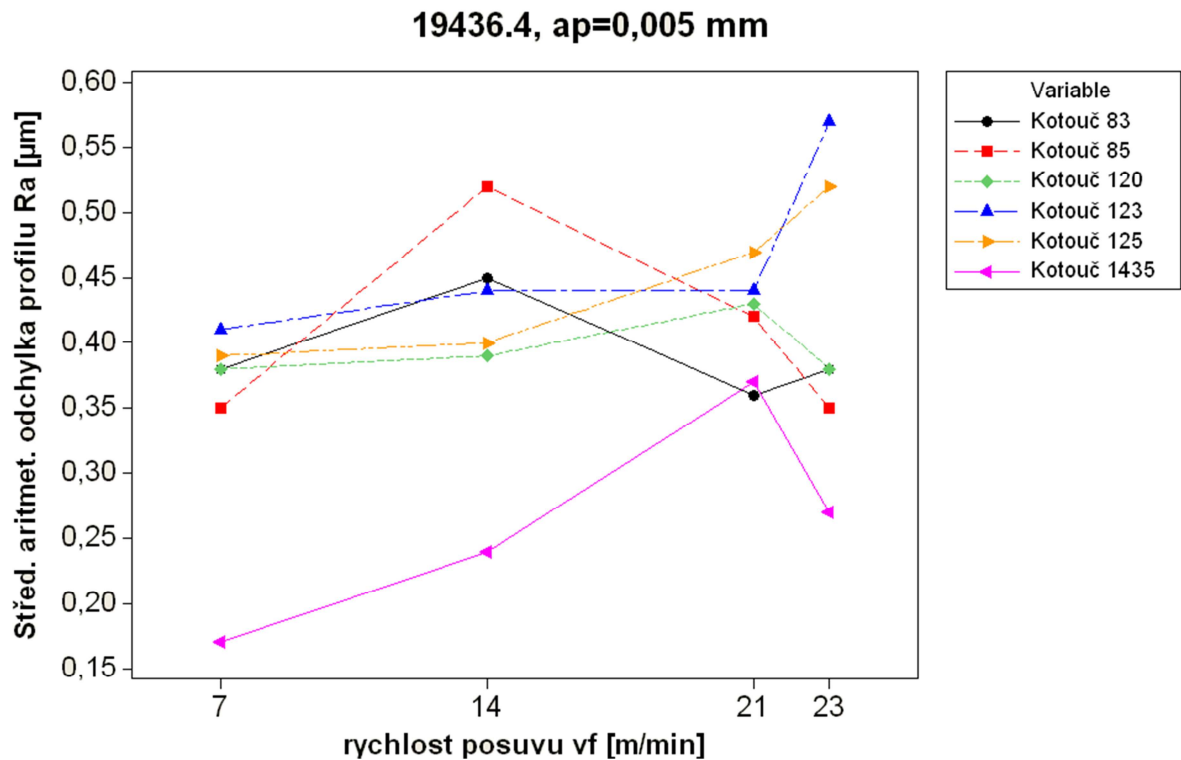
Tento druh měření by měl ukázat, jak se bude chovat materiálový poměr R_{mr} v závislosti na zvyšování posuvové rychlosti v_f u jednotlivých použitých kotoučů. Dle technologické podstaty procesu byl předpoklad takový, že by se materiálový poměr se zvyšující se rychlostí posuvu měl zvyšovat. Vzhledem na statistický charakter naměřených výsledků došlo k většímu rozptylu hodnot, a proto po vyhodnocení těchto zkoušek bylo zjištěno, že nemůžeme přesně určit chování kotoučů. Každý z grafů ukazuje odlišné chování vyhodnocených křivek, tudíž nelze přesně popsat chování zkoušených kotoučů. Všechny vyhodnocené grafy jsou k dispozici v příloze.



Obr. 35. Porovnání kotoučů - závislost Rmr na v_f

Závislost střední aritmetické odchytky posuzovaného profilu R_a na posuvové rychlosti v_f :

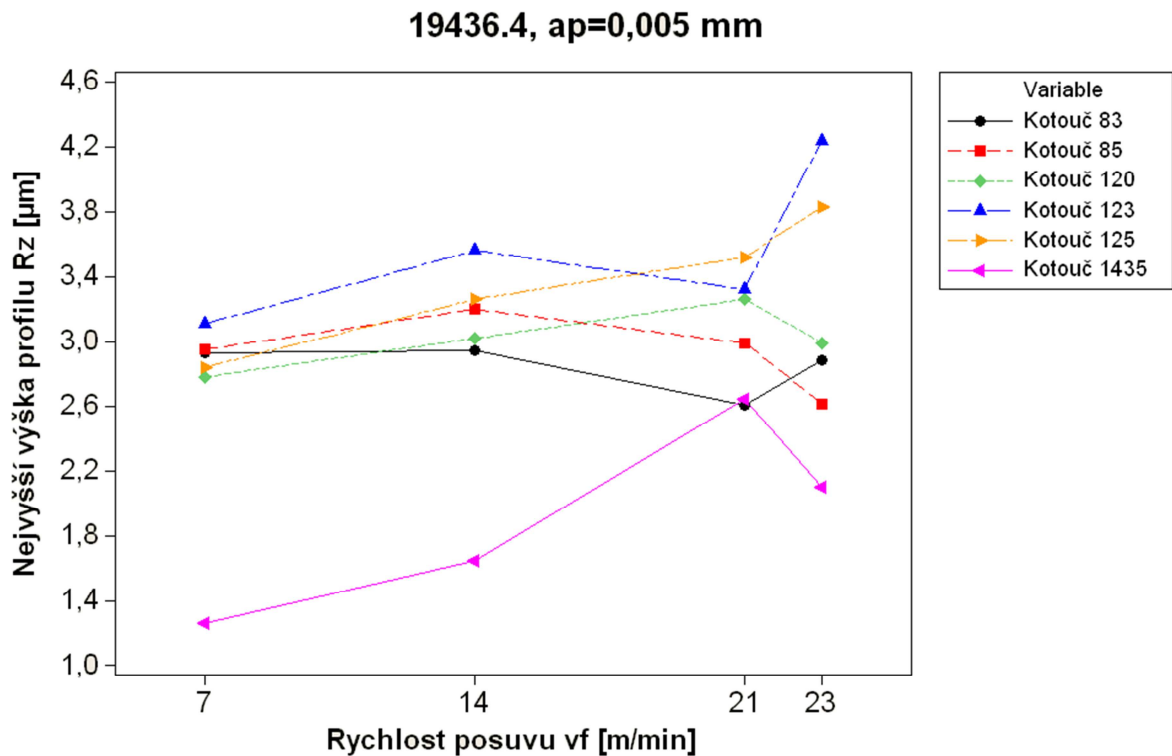
Z přiloženého grafu, vybraného jako zástupce těchto měření, je velmi složité vypočítat nějaké charakteristické chování. Platí zde stejný předpoklad jako u předcházejícího grafu. S rostoucí rychlostí posuvu by se měla zhoršovat kvalita povrchu. Je to zapříčiněné tím, že při menší rychlosti posuvu jsou zrna v častějším kontaktu s povrchem a tudíž ho lépe opracují. To znamená, že dostaneme menší hodnotu R_a . Naproti tomu při rychlejším posuvu je obrobek v kratším kontaktu s brousicími zrny - vzniká povrch s větší hodnotou R_a . Tento předpoklad se u tohoto měření zcela nepotvrdil. Podobné výsledky byly naměřeny i u ostatních materiálů a ostatních a_p – viz příloha.



Obr. 36. Porovnání kotoučů - závislost Ra na v_f

Závislost nejvyšší výšky profilu Rz na posuvové rychlosti v_f :

Obrázek 37 popisuje závislost nejvyšší výšky profilu Rz na rychlosti posuvu v_f . I zde byl předpoklad stejný jako u dvou předcházejících měření. S rostoucí rychlostí posuvu by se nejvyšší výška profilu Rz měla zvětšovat a naopak. Další teoretický předpoklad byl, že by kotouče s méně pórovitou strukturou měly mít lepší výsledky hodnot Ra, Rz na jimi opracovaném povrchu. Méně pórovitý kotouč znamená více brousicích zrn (méně pórů) a tím častější styk zrn s opracovávaným povrchem. U praktických výsledků to nebylo tak jednoznačné. Hodnoty byly dosti podobné a nebyly tam velké rozdíly mezi měřeními posuvovými rychlostmi. Další zhotovené grafy jsou v příloze.



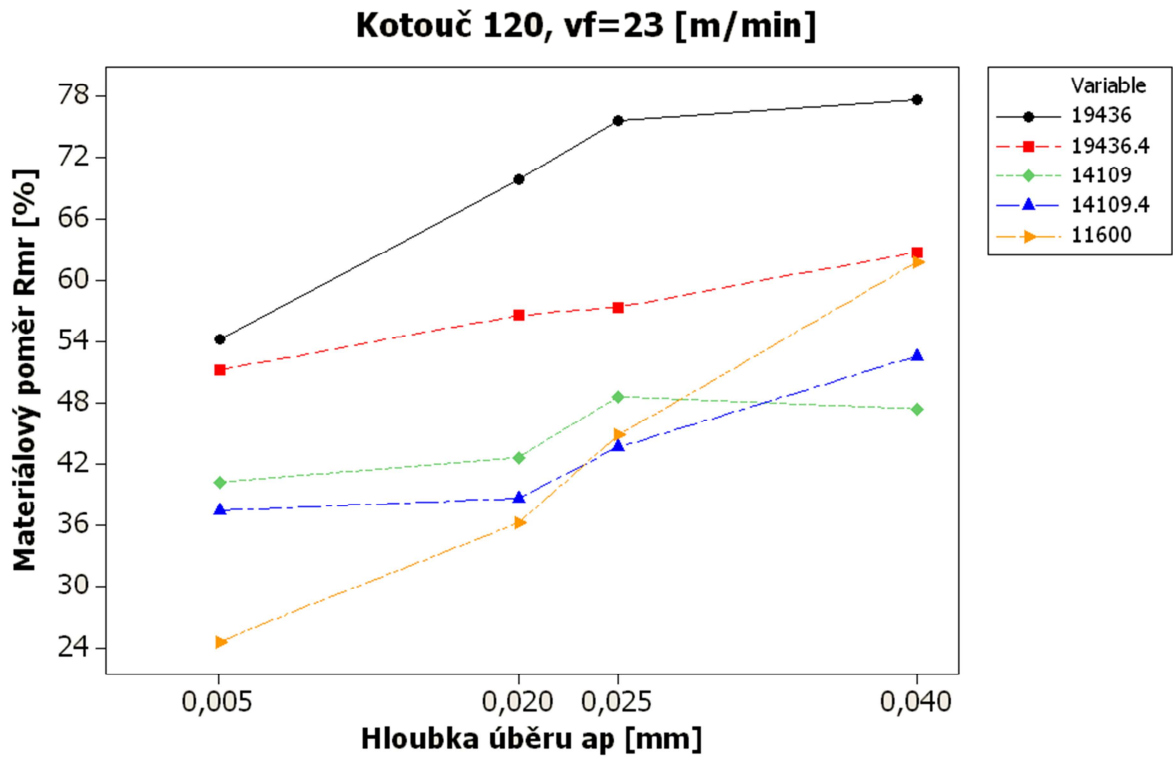
Obr. 37. Porovnání kotoučů - závislost R_z na v_f

7.5 Porovnání použitých materiálů při stejných podmínkách

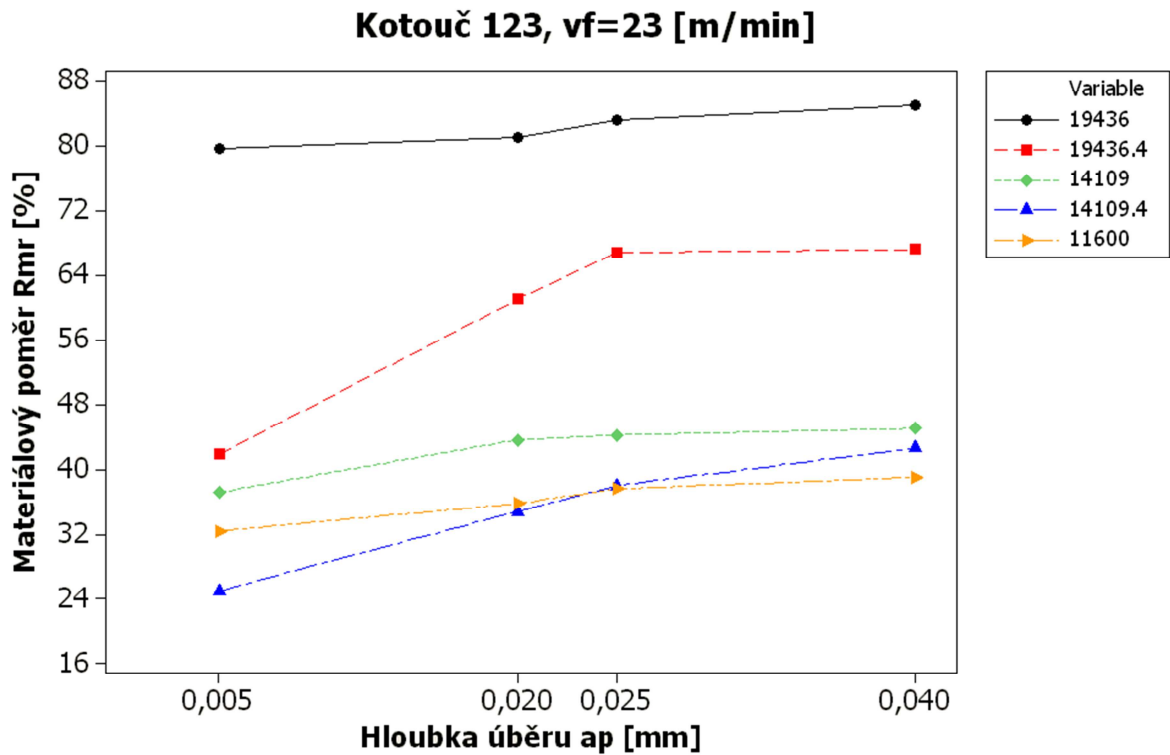
7.5.1 Závislosti R_{mr} , R_a , R_z na a_p

Závislost materiálového poměru R_{mr} na hloubce úběru a_p :

Při tomto způsobu vyhodnocování experimentálního měření bylo zjištěno, že kalené materiály mají menší materiálový poměr R_{mr} než totožné nekalené materiály (nejvyšší hodnoty má nástrojová ocel v nekaleném stavu – 19436). Důvod těchto zjištění je takový, že u měkkého materiálu (nekalený stav) brousicí zrno vnikne více do materiálu a tím způsobí částečné deformace na okrajích těchto vniků. Tyto deformované okraje způsobí větší materiálový poměr. Všechny zhotovené grafy (různé kotouče, různé rychlosti posuvu) jsou uvedeny v příloze.



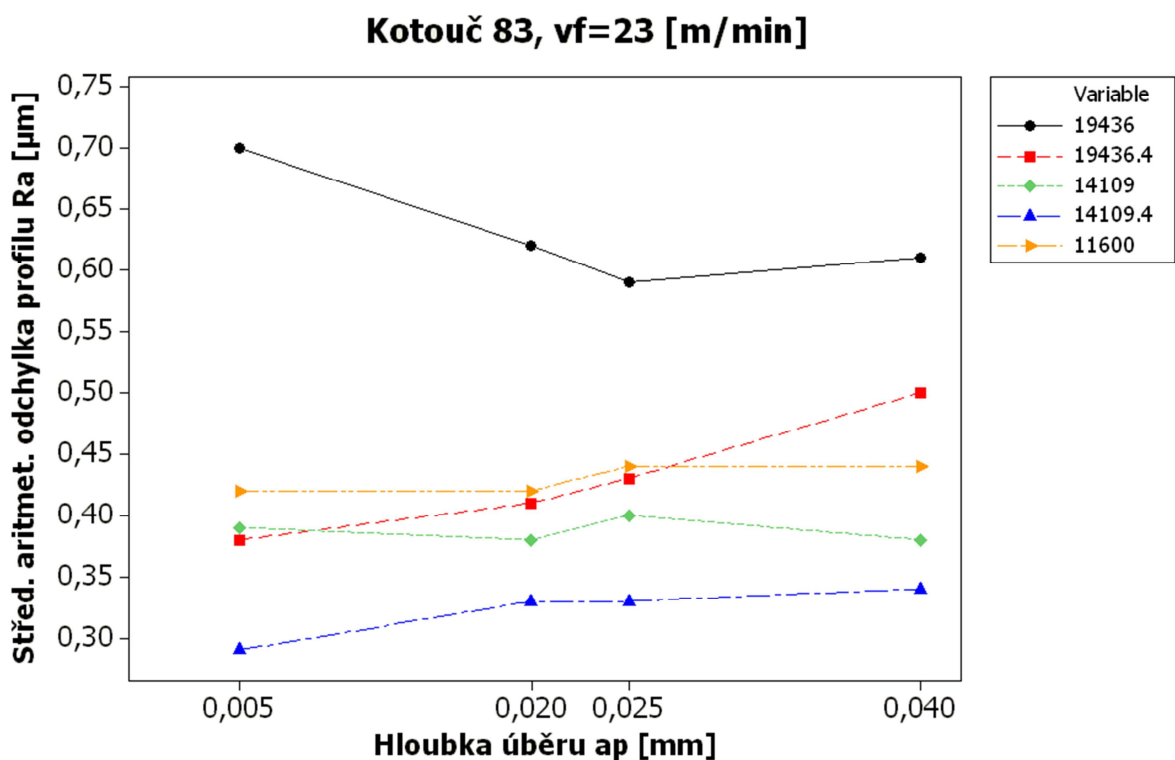
Obr. 38. Porovnání materiálů, kotouč 120 - závislost Rmr na a_p



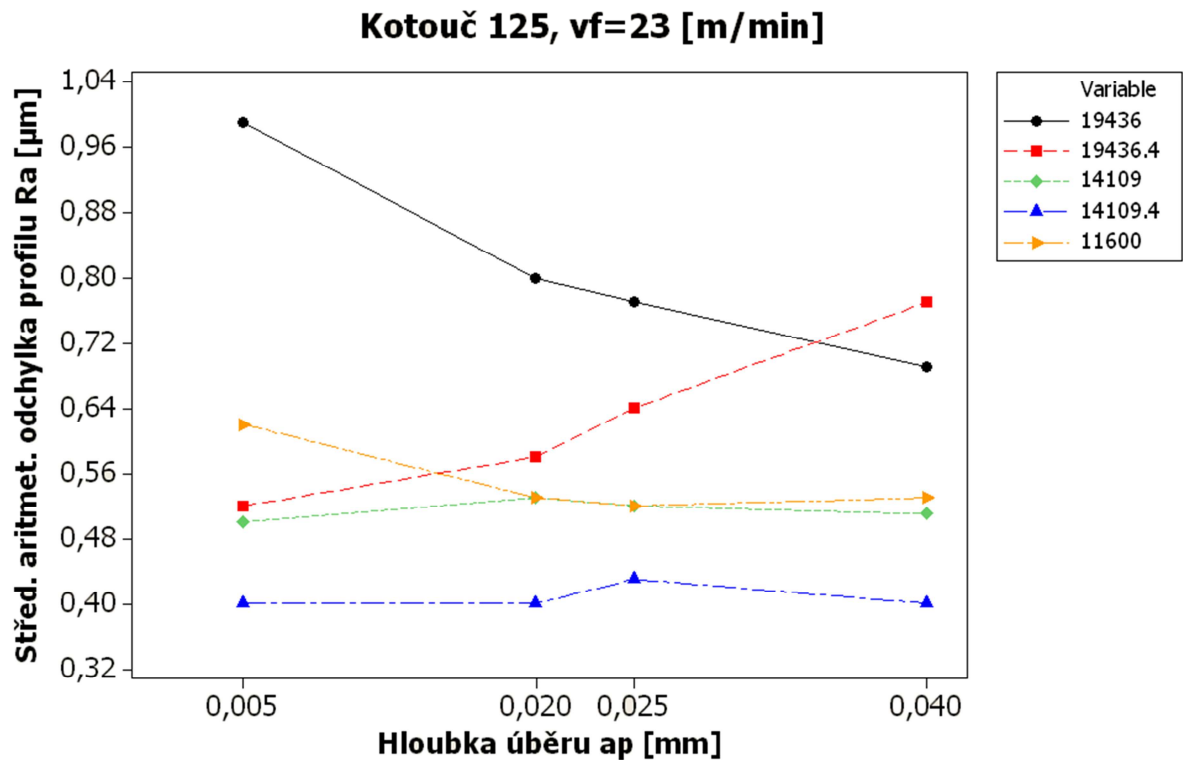
Obr. 39. Porovnání materiálů, kotouč 123 - závislost Rmr na a_p

Závislost střední aritmetické odchytky posuzovaného profilu Ra na hloubce úběru a_p :

Na obrázcích 40 a 41 je opět srovnání všech zkoušených materiálů, které jsou posuzované při závislosti hodnoty Ra na hloubce úběru a_p . Je zde vidět, že kalené materiály mají nižší hodnoty Ra než nekalené stejného typu (nejnižší hodnoty vykazuje materiál 14109.4). To znamená, že kalené materiály při stejných podmínkách broušení mají kvalitnější povrch. Diference hodnot Ra posuzovaných materiálů jsou v závislosti na hloubce úběru převážně zanedbatelné. Další výsledky s grafy jsou uvedeny v příloze práce.



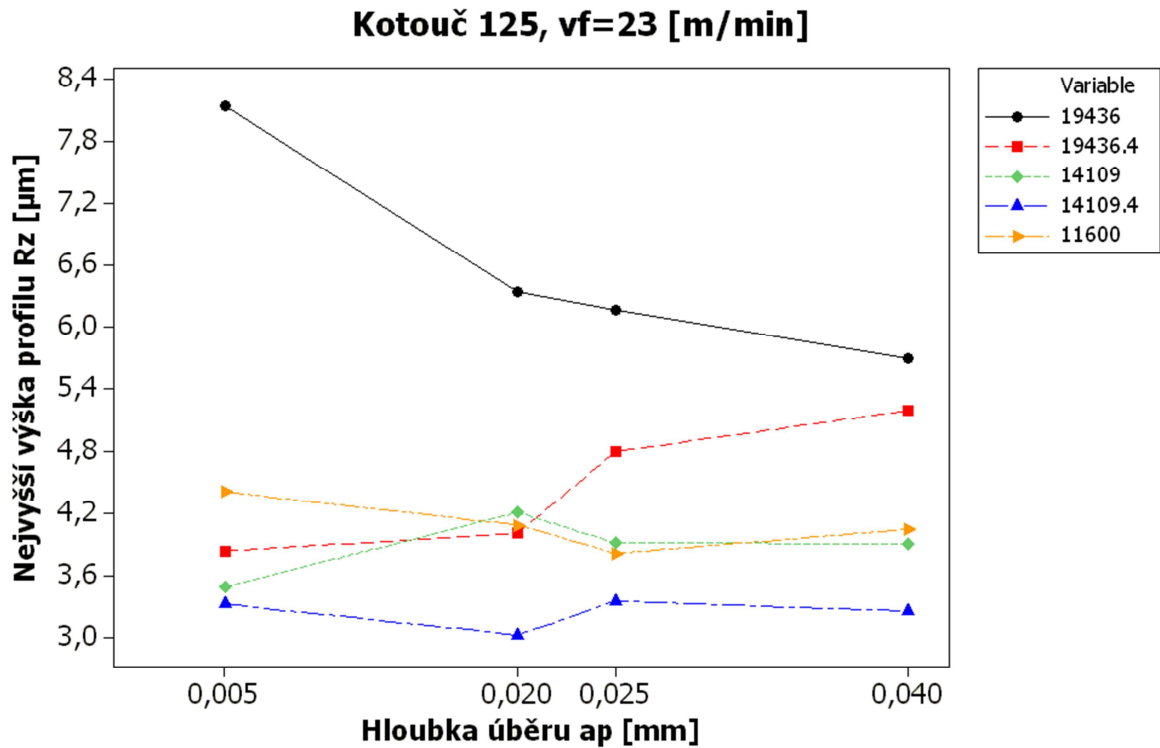
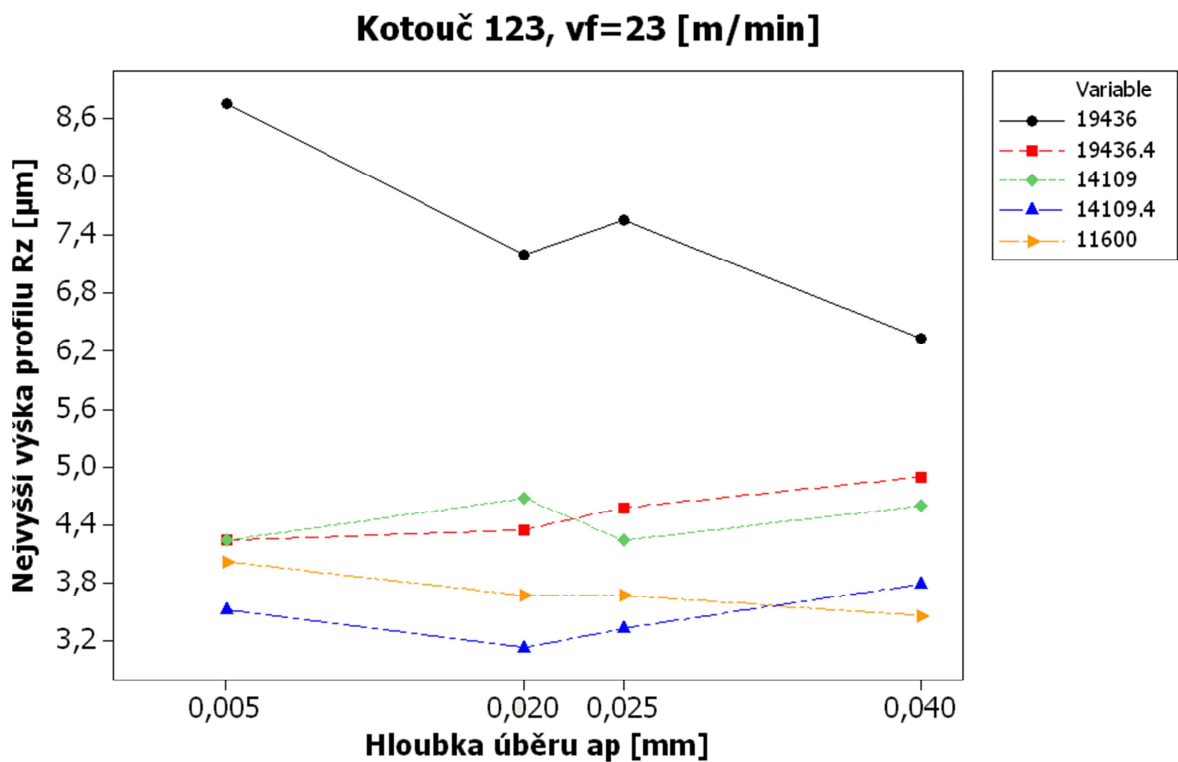
Obr. 40. Porovnání materiálů, kotouč 83 - závislost Ra na a_p



Obr. 41. Porovnání materiálů, kotouč 123 - závislost Ra na a_p

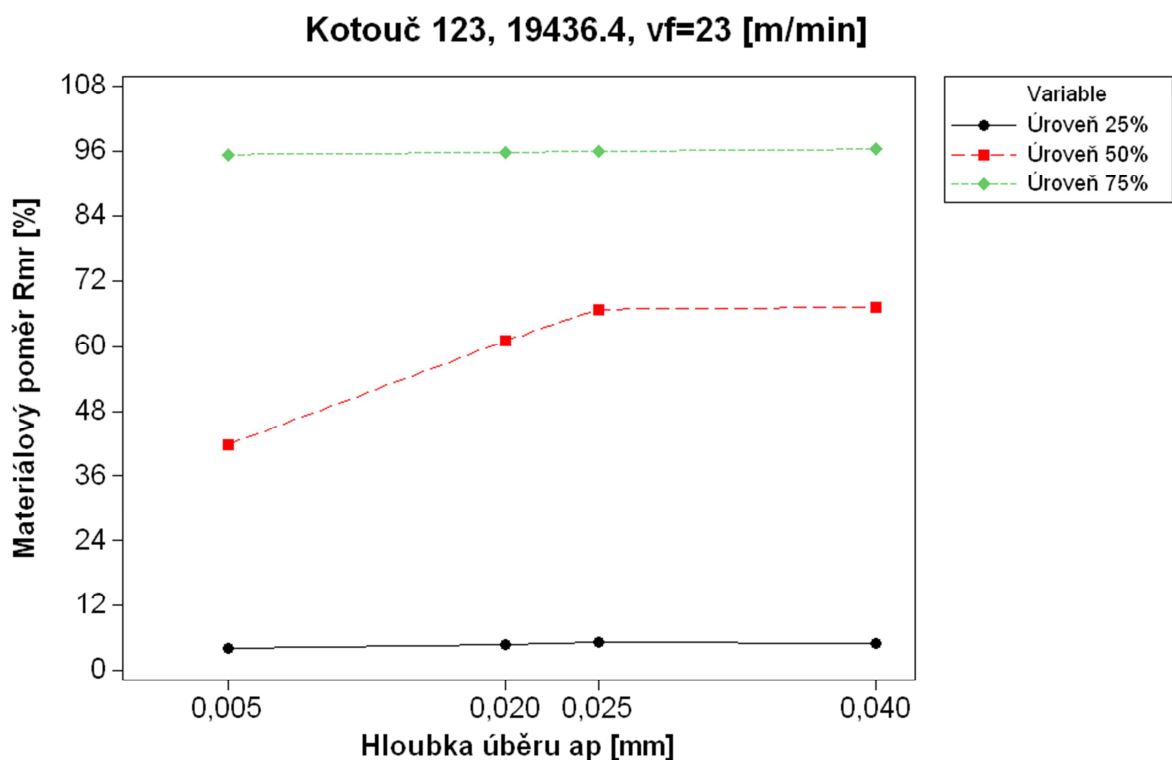
Závislost nejvyšší výšky profilu Rz na hloubce úběru a_p :

Tyto uvedené grafy porovnávají hodnoty Rz posuzovaných druhů materiálů v závislosti na zvětšující se hloubce úběru a_p . Výsledné tvary křivek, jejich vzájemné rozložení i příčiny jsou podobné jako u předchozích grafů (platí přímá úměra mezi Ra a Rz).

Obr. 42. Porovnání materiálů, kotouč 125 - závislost Rz na a_p Obr. 43. Porovnání materiálů, kotouč 125 - závislost Rz na a_p

7.6 Porovnání materiálového poměru Rmr v různých výškách posuzovaného profilu

Tato zkouška se prováděla na všech zkoušených materiálech (19436, 19436.4, 14109, 14109.4 a 11600) při posuvové rychlosti $v_f = 23$ m/min. Materiály se brousily kotoučem 123 při různých hloubkách úběru a_p . Pomocí drsnoměru se měřil materiálový poměr ve třech úrovních posuzovaného profilu (25%, 50% a 75 %). Na následujícím grafu můžeme vidět, jak s rostoucí hloubkou (úrovní) profilu roste materiálový poměr. Z grafu rovněž plyne, že materiálový poměr se ze zvětšující se hloubkou odebraného materiálu zvětšuje, což u úrovně 50 % lze dobře vidět, u dalších dvou je toto vidět jen nepatrně. Výsledky zkoušky u ostatních materiálů byly podobné a jsou uvedeny v příloze.



Obr. 44. Porovnání Rmr v různých výškách posuzovaného profilu

8 TECHNOLOGIE LEŠTĚNÍ TEXTILNÍM KOTOUČEM

Hlavním cílem této technologie bylo zlepšit kvalitu povrchu zkoušených vzorků. Při tomto způsobu dokončování povrchu již nedocházelo k velkým úběrům materiálu, ale jen k zahlazování stop po předchozím obrábění. V tomto případě to bylo broušení, po kterém zůstaly na povrchu jemné stopy po nástroji (brousicím zrnem).

Proces leštění probíhal na převodové vrtačce při nastavení maximálních možných otáček 1450 ot/min. Do upínací části vrtačky se upnul leštící kotouč z textilního materiálu, na který se za chodu nanášela speciální brousicí pasta. Leštěný vzorek se následně přitlačoval na obvod leštícího kotouče, pomocí kterého se zahlazovaly drobné nerovnosti. Tento proces se uskutečnil u každého zkoušeného materiálu a poté se opět na drsnoměru Mitutoyo měřily hodnoty materiálového poměru R_{mr} , nejvyšší výšky profilu R_z a střední aritmetické odchylky od posuzovaného profilu R_a . Stejně jako u předchozí technologie se každá plocha měřila 5x v kolmém směru na delší stranu. Délka posuvu hrotu byla také nastavena na 0,8 mm a celé měření probíhalo dle mezinárodní normy ISO. Kalibrace probíhala rovněž jako u měření broušených vzorků.

Materiálový poměr se měřil ve třech úrovních výšky profilu (25%, 50% a 75%). Hodnoty R_a , R_z stačilo vyhodnotit pouze v jedné z úrovní, neboť by všechny úrovně měly vykazovat stejné výsledky. Po praktickém ověření můžeme tedy říci, že tento předpoklad se také potvrdil. Hodnoty materiálové poměru při leštění dle teoretického předpokladu by se měly oproti broušení zvětšit. Naproti tomu hodnoty R_a , R_z by se měly podstatně snížit, tzn. opracované povrchy leštěním, mají lepší jakost povrchu. Všechny tyto teoretické předpoklady se také při tomto experimentálním měření potvrdily.

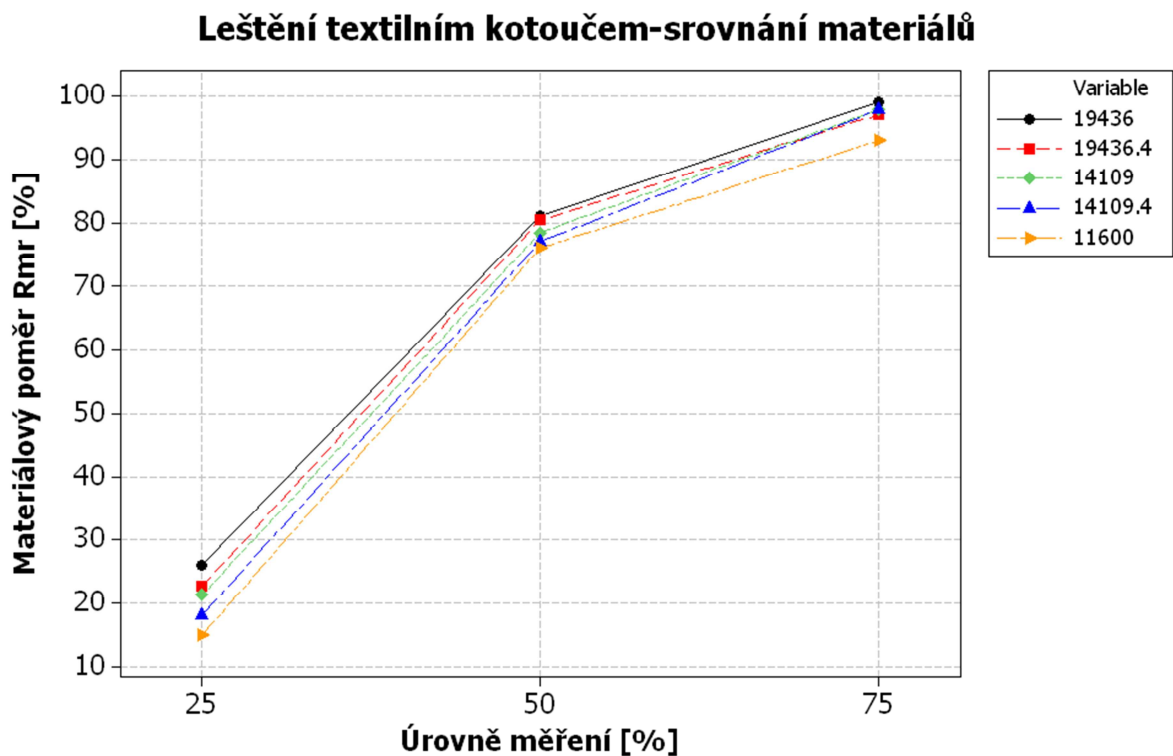
8.1 Porovnání materiálů při leštění textilním kotoučem

Následující graf (Obr. 45) popisuje závislost materiálového poměru R_{mr} na úrovních profilu, ve kterých bylo měření provedeno (25%, 50%, 75%). Jsou zde uvedeny a mezi sebou porovnány všechny zkoušené materiály. Diference mezi jednotlivými materiály jsou minimální, nástrojová ocel 19436 má největší R_{mr} , naopak ocel 11600 má R_{mr} nejmenší. Na grafu je dobře vidět rostoucí tendence křivek, kdy při vyšších úrovních by se postupně mě-

ly hodnoty dostat až ke hranici 100% materiálového poměru, tzn., čím se úroveň zvyšuje, tím je materiálu více.

Tabulka 11 ukazuje, jak se pohybovaly hodnoty Ra, Rz a Rmr u jednotlivých materiálů na 50% úrovni výšky profilu. Dále zobrazuje data směrodatné odchylky, rozptylu, mediánu, maximální a minimální hodnoty. Ostatní naměřené data je možné vidět v příloze.

Na obrázcích 46 a 47 jsou pomocí krabicových grafů vyobrazeny naměřené hodnoty Ra, respektive Rz u všech měřených materiálů. Uvnitř každého grafu lze vidět symbol, který označuje aritmetický průměr a také čáru označující medián. Při srovnání leštěných materiálů dle hodnot Ra, Rz můžeme říct, že kalené materiály se daly lépe vyleštit než nekalené. Toto zjištění koresponduje s technologií broušení, která ukázala stejné chování.



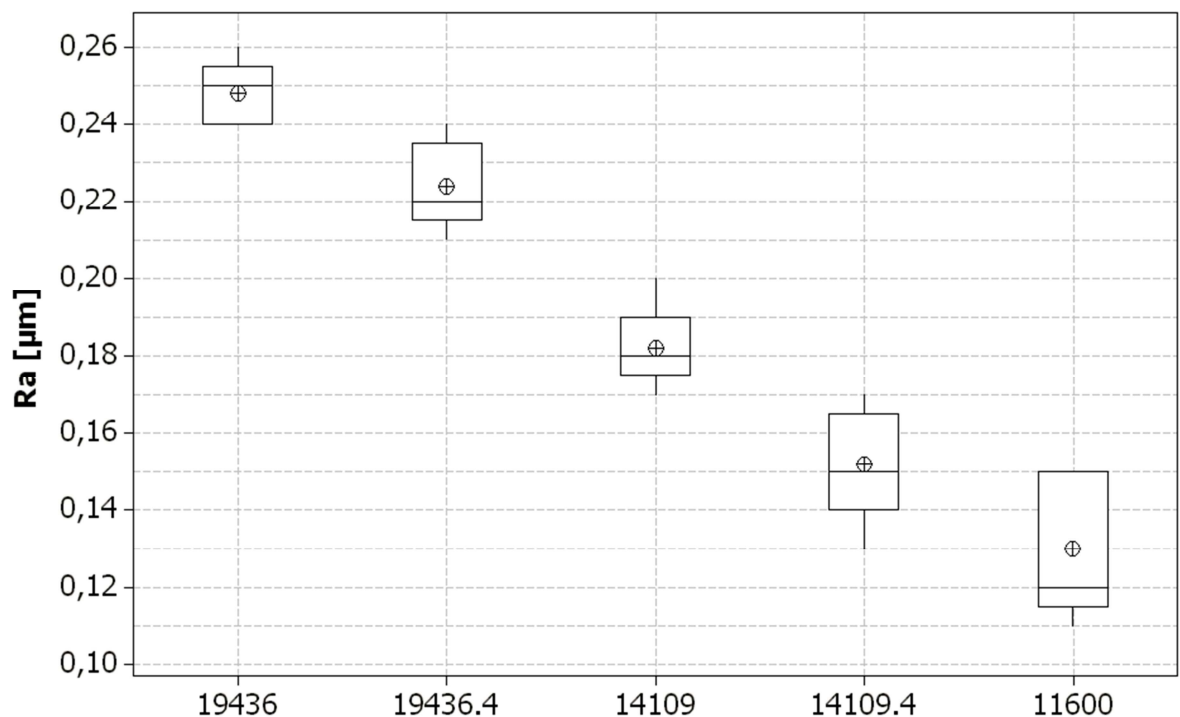
Obr. 45. Leštění textilním kotoučem-srovnání materiálů dle Rmr

Tab. 11. Příklad výsledků procesu leštění textilním kotoučem – úroveň Rmr 50%

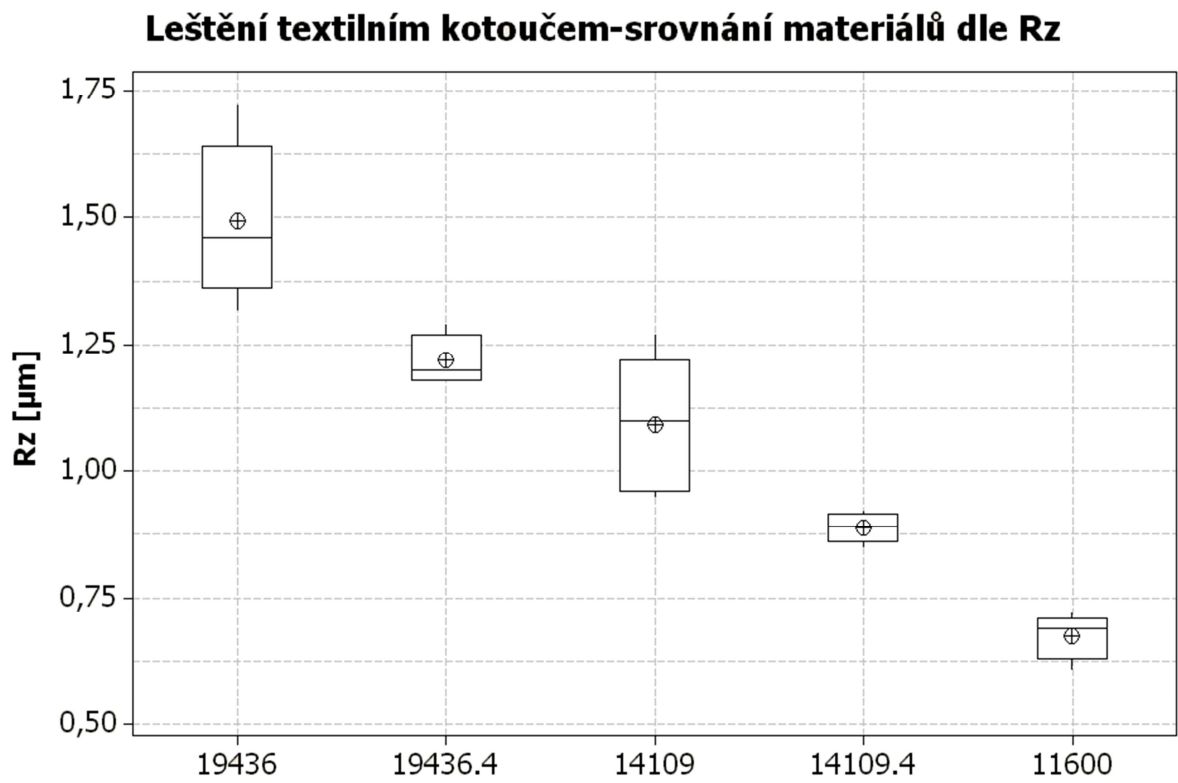
Úroveň Rmr	19436			19436.4			11600					
50%	Ra	Rz	Rm(r)	Ra	Rz	Rm(r)	Ra	Rz	Rm(r)			
	1.	0,25	1,72	81,00	1.	0,24	1,29	75,00	1.	0,12	0,61	75,00
	2.	0,24	1,40	78,00	2.	0,22	1,20	81,00	2.	0,11	0,69	70,00
	3.	0,25	1,56	75,00	3.	0,21	1,18	88,00	3.	0,15	0,72	82,00
	4.	0,26	1,46	85,00	4.	0,23	1,25	71,00	4.	0,15	0,70	79,00
	5.	0,24	1,32	86,00	5.	0,22	1,18	87,00	5.	0,12	0,65	74,00
	průměr	0,25	1,49	81,00	průměr	0,22	1,22	80,40	průměr	0,13	0,67	76,00
	smodch	0,007	0,138	4,147	smodch	0,010	0,043	6,621	smodch	0,017	0,039	4,147
	rozptyl	0,000	0,019	17,200	rozptyl	0,000	0,002	43,840	rozptyl	0,000	0,002	17,200
	medián	0,25	1,46	81,00	medián	0,22	1,20	81,00	medián	0,12	0,69	75,00
max	0,26	1,72	86,00	max	0,24	1,29	88,00	max	0,15	0,72	82,00	
min	0,24	1,32	75,00	min	0,21	1,18	71,00	min	0,11	0,61	70,00	

Úroveň Rmr	14109			14109.4				
50%	Ra	Rz	Rm(r)	Ra	Rz	Rm(r)		
	1.	0,18	0,95	67,00	1.	0,16	0,87	81,00
	2.	0,18	1,10	83,00	2.	0,15	0,91	76,00
	3.	0,18	1,17	76,00	3.	0,13	0,89	75,00
	4.	0,20	1,27	83,00	4.	0,17	0,92	81,00
	5.	0,17	0,97	83,00	5.	0,15	0,85	72,00
	průměr	0,18	1,09	78,40	průměr	0,15	0,89	77,00
	smodch	0,010	0,121	6,312	smodch	0,013	0,026	3,521
	rozptyl	0,000	0,015	39,840	rozptyl	0,000	0,001	12,400
	medián	0,18	1,10	83,00	medián	0,15	0,89	76,00
max	0,20	1,27	83,00	max	0,17	0,92	81,00	
min	0,17	0,95	67,00	min	0,13	0,85	72,00	

Leštění textilním kotoučem-srovnání materiálů dle Ra



Obr. 46. Leštění textilním kotoučem-srovnání materiálů dle Ra



Obr. 47. Leštění textilním kotoučem-srovnán materiálů dle Rz

9 TECHNOLOGIE RUČNÍHO LEŠTĚNÍ (LAPOVÁNÍ)

Touto technologií ručního leštění se opět dokončovaly povrchy na vzorcích všech vybraných druhů materiálů. Jedná se o technologii, kterou se dokončují povrchy tvarových ploch vstřikovacích forem - tvárník, tvárnice. Dosahuje se tím vysoké jakosti plochy a až zrcadlového lesku. O tom jsme se mohli přesvědčit při tomto experimentu, který probíhal ve výrobním podniku dle zaběhnutých zvyklostí a praktických zkušeností.

Při leštění zrcadlových ploch je jako hlavní zásada udržet čistotu celého procesu tzn., pravidelné čištění leštěného výrobku, pracovního místa, výměna čisticích prostředků, výměna leštící kapaliny a také mytí rukou. To všechno se dělá proto, aby se zabránilo možnosti kontaktu hrubšího zrna s jemnějším (možnost vzniku rýhy). Je třeba také zamezit, aby se brousící kameny rozdílných zrnitostí umísťovaly vedle sebe, nebo aby se leštilo pastami s rozdílnými hrubostmi jednou filcovou tyčinkou.

Samotný proces leštění se skládal ze dvou etap – leštění brousícími kameny a leštění leštícími diamantovými pastami. Brousící kameny se používaly 3 druhy, každý s jinou zrnitostí (600, 900, 1200). Začínalo se kamenem 600 (velikost zrna 9,3 μ m), kterým se za použití kapaliny leštila plocha do té doby, než se na povrchu nevyskytovaly žádné rýhy. Následovaly kameny 900 (velikost zrna 5,5 μ m) a 1200 (velikost zrna 3 μ m). Použití kapaliny bylo důležité proto, neboť při leštění na sucho by se uvolňovalo větší množství zrn a hrozilo by poškrábání plochy. Jako leštící kapalina se zde používal petrolej. Rozměry brousících kamenů byly stejné - 6x13x150 mm. Leštění těchto vzorků probíhalo pouze v jednom směru, ale pokud se leští plochy větších rozměrů, tak se leští do kříže (z důvodu zachování rovinnosti). Mezikrokem mezi použitím jednotlivých kamenů bylo samozřejmě dokonalé očištění leštěné plochy (benzinem) atd.

Po použití posledního kamene (1200) a následném očištění se přecházelo na leštící diamantové pasty. Ve výrobním podniku se používá pro tento proces terminologie leštění, ale ve skutečnosti se jedná o leštění volným brusivem v pastě - lapování. Tyto pasty měly jemnější zrnitost než brousící kameny. Použily se 4 druhy této pasty (14S, 8S, 3S a 1S) od nejhrubších po nejjemnější. Začínalo se pastou s hrubostí zrna 14S a končilo pastou 1S.

Tato leštící diamantová pasta se nanášela na filcovou tyčinku, pomocí které probíhalo samotné leštění. Pro každý druh pasty byla filcová tyčinka nová. Po použití posledních dvou past 3S a 1S (nejjemnější) se ještě pomocí vaty s pastou leštěná plocha přečistila a tím se dosáhla ještě kvalitnější plocha.

Přibližná délka leštění (každou zrnitostí) byla 10 minut, a to platilo jak u brousících kamenů, tak u leštících diamantových past. Nejlépe se leštila plocha na materiálu 11600 a naopak nejhůře se leštily materiály třídy 19. Používaly se brousící kameny od firmy Gesswein a pasty od firmy Mepac.

U zrcadlových ploch je třeba při i po opracování dodržovat určité předpisy. V žádném případě se nesmíme dotýkat leštěné plochy rukou, neboť by zcela určitě došlo k oxidaci plochy (korozi). Je třeba tyto plochy uchovávat v prostředí s co nejmenší vlhkostí a používat antikoroziční spreje, které vytvoří na povrchu film, čímž dojde k zakonzervování plochy.



Obr. 48. Použité nástroje při ručním leštění (lapování)

Zleva: leštící diamantová pasta, brousící kameny, filcová tyčinka, petrolej, vata

9.1 Použité brousící kameny

9.1.1 Gesswein-1604, zrnitost 600, typ MF

Velmi populární brousící kameny, měkké tzv. finišování (zejména typy o vyšších zrnitostech). Jsou vyrobeny na bázi karbidu křemíku. Měkká vazba umožňuje velmi rychlou práci vázaného brousícího zrna a zabraňuje zanášení brousícího kamene opracovaným materiálem. Tyto kameny se v první řadě používají k vyrovnání ploch kalených ocelí a k opracování tvarově členěných povrchů, protože se rychle přizpůsobují požadovanému profilu a

vyrovnávají nerovnosti povrchu. Lze je používat ručně nebo v pilovacích nástavcích, ne však v ultrazvukových hlavicích – tam vlivem měkké vazby praskají. [33]

9.1.2 Gesswein-2904, zrnitost 900, typ DF

Jeden z nejpoužívanějších typů brousicích kamenů. Jako brusivo u těchto kamenů je použit speciální korund se středně měkkou vazbou, čímž je zaručena vysoká stabilita tvaru a proto je ještě možné dobře korigovat kontury povrchu brousicího kamene do požadovaných tvarů. Speciální oblast použití je při opracování řezných a lisovacích nástrojů a při výrobě forem, kde se dosahuje velmi dobrých výsledků. Tento kámen je možné použít u všech ocelí pro výrobu forem a také pro předzpracování hliníku či mědi s příměsí berylia. Kámen je možné používat ručně, v pilovacích nástavcích, či ultrazvukových hlavicích (u výkonných ultrazvuků opatrně – tenčí kameny mohou vlivem středně měkké vazby při zatěžování praskat). [33]

9.1.3 Gesswein-9004, zrnitost 1200, typ SF

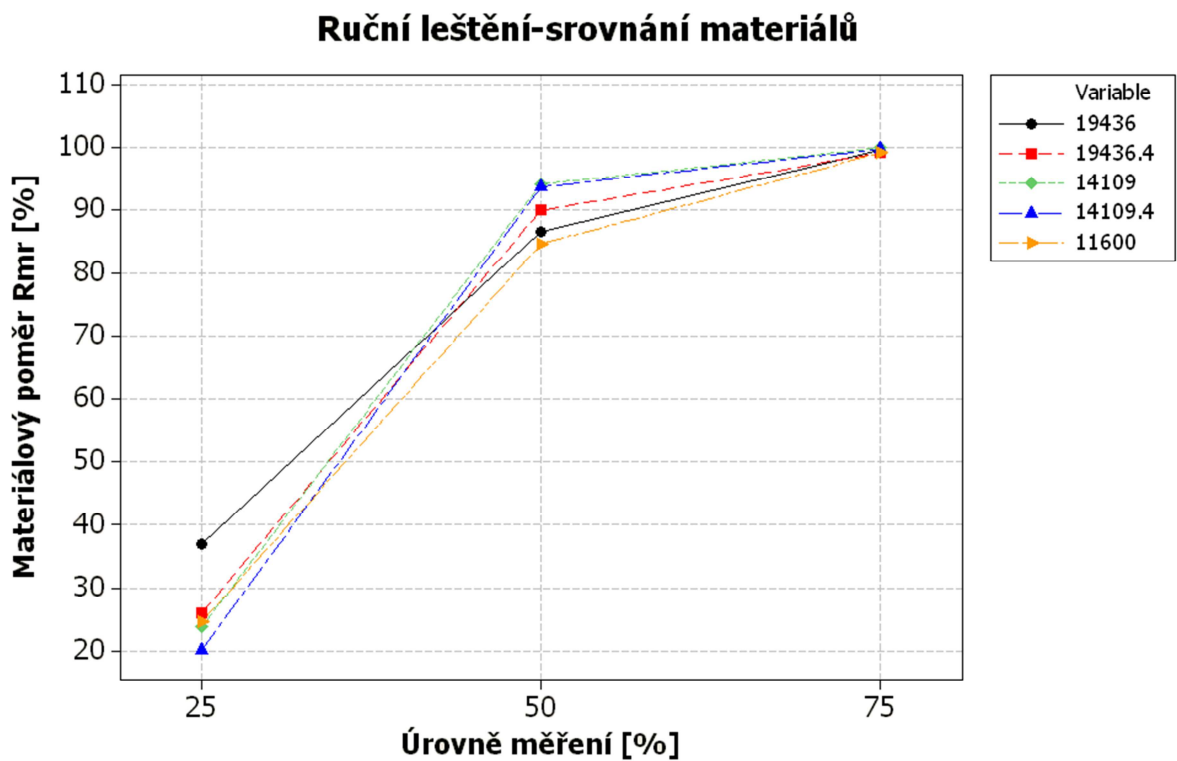
Tyto kameny s velmi jemnou zrnitostí jsou doporučovány na další opracování povrchů po použití kamenů DF nebo WP. Jsou vyráběny z rozmělněného oxidu hlinitého v jedné zrnitosti 1200. Brousicí kameny SF jsou velmi měkké – výrobce garantuje, že nedělají žádné škrábance a jsou velmi vhodné pro práci s diamantovou pastou. Z důvodu své měkkosti však relativně rychle ubývají. [33]

9.2 Porovnání materiálů při ručním leštění (lapování)

Na obrázku 49, jež popisuje závislost materiálového poměru Rmr na úrovních profilu, ve kterých bylo měření provedeno (25%, 50%, 75%) je vidět, že hodnota Rmr se již při úrovni 50% pohybuje u všech materiálů okolo hranice 90% materiálového poměru. Při úrovni 75% výšky profilu je dosažena téměř u všech materiálů hodnota 100%. U úrovni 25% výšky profilu se drží hodnoty Rmr níže než bychom předpokládali, ale stále jsou tyto hodnoty vyšší než u předchozích technologií.

Tabulka 12 ukazuje, jak se pohybovaly hodnoty Ra, Rz a Rmr u jednotlivých materiálů na 50% úrovni výšky profilu. Dále zobrazuje data směrodatné odchylky, rozptylu, mediánu, maximální a minimální hodnoty. Ostatní naměřené data je možné vidět v příloze.

Dále na obrázcích 50 a 51 můžeme vidět, jak kvalitních ploch se při tomto způsobu opracování dosáhlo. U kalených materiálů se dosáhlo lepších výsledků než u materiálů nekalených. Můžeme zde vidět také závislost mezi parametry Ra a Rz, které jsou mezi sebou přímo úměrné. Uvnitř každého grafu (Obr. 50 a 51) lze vidět symbol, který označuje aritmetický průměr a také čáru označující medián. Na obrázku 50 čára označující medián splývá s čarou označující dolní kvartil. To je způsobeno tím, že naměřené hodnoty se lišily minimálně, u materiálu 11600 se nelišily vůbec.



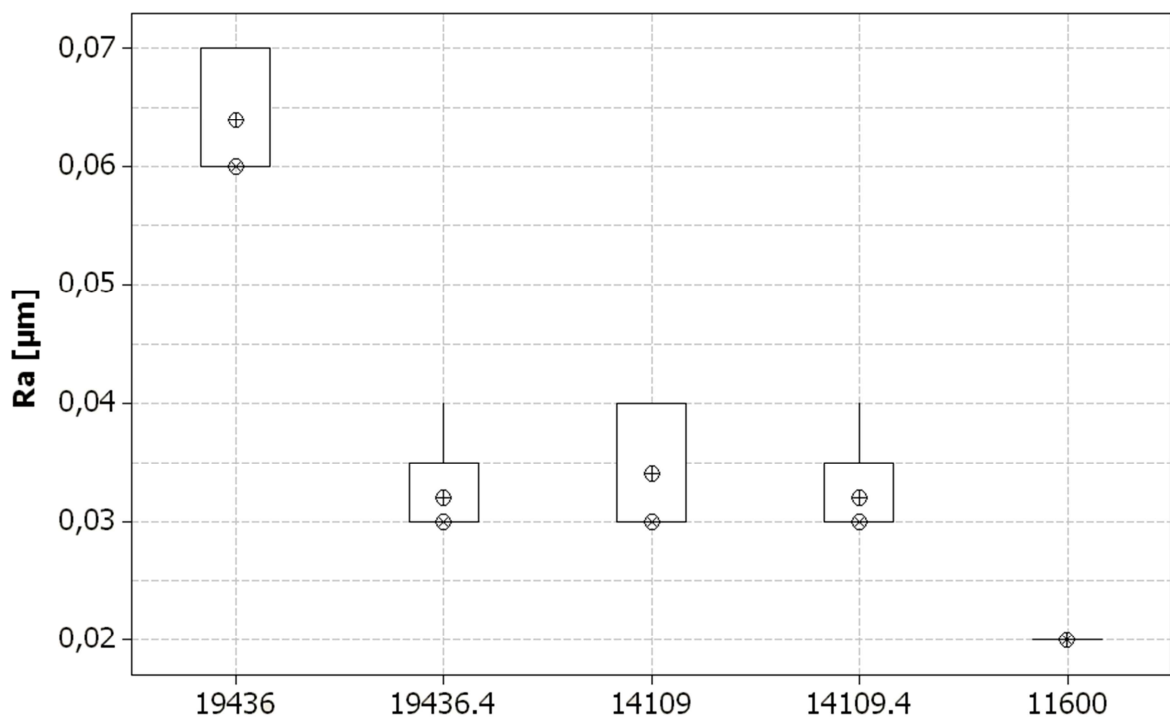
Obr. 49. Ruční leštění-srovnání materiálů dle Rmr

Tab. 12. Příklad výsledků procesu ručního leštění – úroveň Rmr 50%

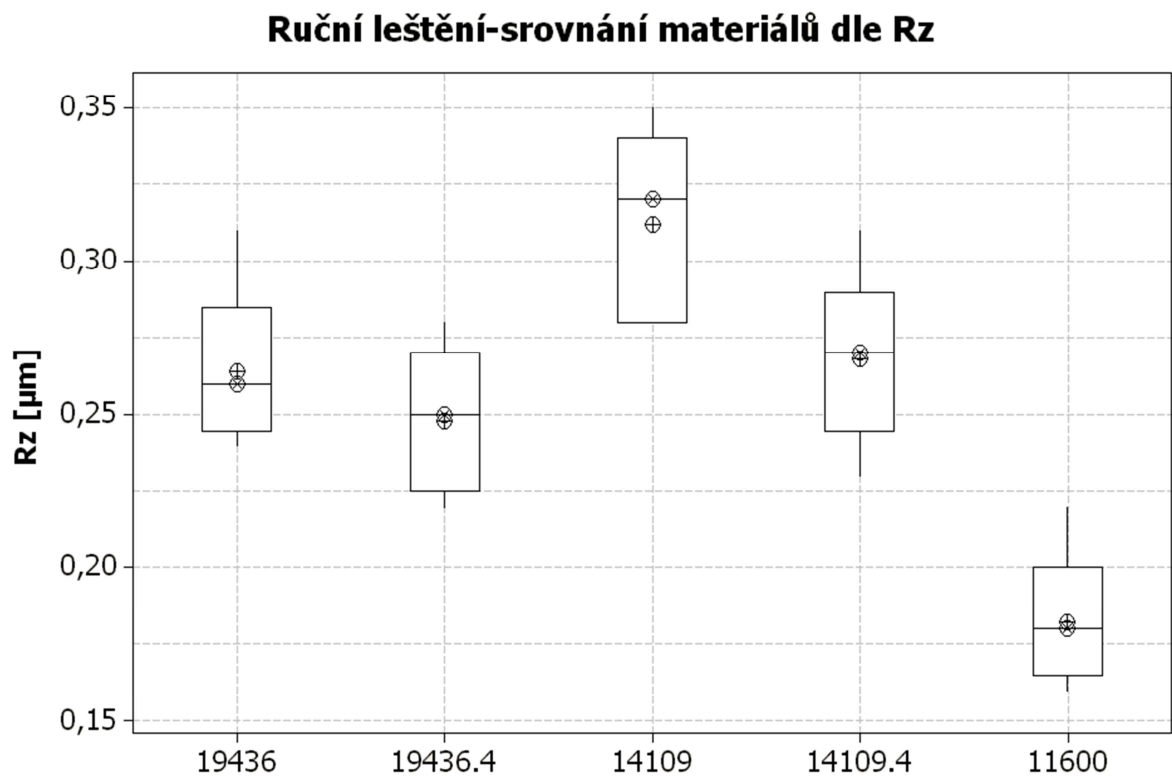
Úroveň Rmr	19436			19436.4			11600					
	Ra	Rz	Rm(r)	Ra	Rz	Rm(r)	Ra	Rz	Rm(r)			
50%	1.	0,06	0,26	81,00	1.	0,03	0,23	84,00	1.	0,02	0,18	92,00
	2.	0,06	0,31	88,00	2.	0,04	0,28	97,00	2.	0,02	0,17	85,00
	3.	0,06	0,24	82,00	3.	0,03	0,26	82,00	3.	0,02	0,16	78,00
	4.	0,07	0,25	83,00	4.	0,03	0,22	100,00	4.	0,02	0,18	83,00
	5.	0,07	0,26	99,00	5.	0,03	0,25	95,00	5.	0,02	0,22	85,00
	průměr	0,06	0,26	86,60	průměr	0,03	0,25	91,60	průměr	0,02	0,18	84,60
	smodch	0,005	0,024	6,651	smodch	0,004	0,021	7,228	smodch	0,000	0,020	4,499
	rozptyl	0,000	0,001	44,240	rozptyl	0,000	0,000	52,240	rozptyl	0,000	0,000	20,240
	medián	0,06	0,26	83,00	medián	0,03	0,25	95,00	medián	0,02	0,18	85,00
	max	0,07	0,31	99,00	max	0,04	0,28	100,00	max	0,02	0,22	92,00
min	0,06	0,24	81,00	min	0,03	0,22	82,00	min	0,02	0,16	78,00	

Úroveň Rmr	14109			14109.4				
	Ra	Rz	Rm(r)	Ra	Rz	Rm(r)		
50%	1.	0,03	0,33	96,00	1.	0,04	0,31	78,00
	2.	0,03	0,35	91,00	2.	0,03	0,23	98,00
	3.	0,03	0,32	99,00	3.	0,03	0,27	99,00
	4.	0,04	0,28	93,00	4.	0,03	0,26	99,00
	5.	0,04	0,28	92,00	5.	0,03	0,27	95,00
	průměr	0,04	0,31	94,20	průměr	0,03	0,27	93,80
	smodch	0,005	0,028	2,926	smodch	0,004	0,026	8,035
	rozptyl	0,000	0,001	8,560	rozptyl	0,000	0,001	64,560
	medián	0,04	0,32	93,00	medián	0,03	0,27	98,00
	max	0,04	0,35	99,00	max	0,04	0,31	99,00
min	0,03	0,28	91,00	min	0,03	0,23	78,00	

Ruční leštění-srovnání materiálů dle Ra



Obr. 50. Ruční leštění-srovnání materiálů dle Ra



Obr. 51. Ruční leštění-srovnání materiálů dle Rz

10 TECHNOLOGIE SUPERFINIŠOVÁNÍ

Vzhledem k tomu, že technické zázemí školní dílny neumožňuje provést zkoušky zaměřené na tuto technologii, využilo se získaných poznatků z jiného výzkumu, který se zabýval superfinišováním. Čerpalo se z dizertační práce na téma Obrobitelnost superfinišováním Ing. Moniky Bonišové. Z této dizertační práce byly získány především parametry Ra, Rz, Rmr pro možnost srovnání s jinými, v této diplomové práci zkoumanými, technologiemi.

V dizertační práci bylo vyhodnoceno několik materiálů včetně materiálu 14109.4, který se shodoval s materiálem použitým v našem výzkumu. Ostatní materiály jsou zde uvedeny pouze pro porovnání. Dále jsou zde (Tab. 13) uvedeny základní parametry superfinišovacího stroje, řezné podmínky superfinišování a použité nástroje. Obráběné díly byly před superfinišováním opracované průběžným bezhrotovým broušením, hodnoty kvality povrchu po broušení jsou uvedeny v Tab. 15.

10.1 Základní parametry superfinišovacího stroje

Název stroje: Bezhrotový superfinišovací stroj SUPFINA SM 470 průběžný

Tab. 13. Základní parametry stroje SUPFINA SM 470 [4]

	Rozsah
Průměr obrobku [mm]	4 – 150 (200)
Průměr válců [mm]	125 (135)
Pracovní délka válců [mm]	900 (750)
Otáčky válců [min^{-1}]	100 – 600
Amplituda kmitání [mm]	3 – 6
Frekvence kmitání [min^{-1}]	2000 – 2700
Spotřeba vzduchu [m^3/h]	< 20
Počet držáků kamenů [-]	Max. 10

10.2 Řezné podmínky při superfinišování a specifikace nástrojů

Při technologii superfinišování byla pro tuto zkoušku stanovena sada superfinišovacích nástrojů, kde pro hrubovací úsek bylo výhodné používat superfinišovací nástroje, ve kterých jako přídatná látka byla obsažená síra. Naopak pro dokončovací úsek bylo velmi výhodné používat superfinišovací nástroje, ve kterých byla obsažená přídatná látka vosk.

Tab. 14. Řezné podmínky superfinišování [4]

Pozice	Operace	Rozeř superfinišovacích nástrojů [mm]	Specifikace superfinišovacích nástrojů	Dodavatel	Otáčky [min ⁻¹]	Superfinišovací tlak [MPa]	Délka oscilace [mm] frekvence [min ⁻¹]
1.	hrubování	25 x 13 x 60	WA 400 160 V2S	Darmann	80	0,35	2,5
2.	hrubování	25 x 13 x 60	WA 400 160 V2S	Darmann		0,35	
3.	hrubování	25 x 13 x 60	WA 400 160 V2S	Darmann		0,35	
4.	hrubování	25 x 13 x 60	WA 600 160 V2S	Darmann		0,35	
5.	hrubování	25 x 13 x 60	WA 600 160 V2S	Darmann		0,35	
6.	hrubování	25 x 13 x 60	WA 600 160 V2S	Darmann		0,35	
7.	dokončování	25 x 13 x 60	MVC 1500/8 G5 VCAM W	Micromold		0,35	2200
8.	dokončování	25 x 13 x 60	MVC 1500/8 G5 VCAM W	Micromold		0,35	

Největší úběr materiálu na průměr se dosahuje při hrubovacím úseku. Úběr na průměr je přibližně 8 μm a tento úsek slouží k odstranění nejhrubších vad vzniknutých při předcházejícím způsobu obrábění. Následující úsek dokončovacího superfinišování má už jen leštící efekt při minimálním úběru 2 μm . Při tomto úseku není možné podstatně snižovat rýhy vzniklé při předcházejícím obrábění, ale tento úsek má výrazný vliv na materiálový poměr profilu, který je velmi důležitým ukazatelem kvality ploch obráběných dílů. [4]

10.3 Použité superfinišovací kameny

-podle brousicího materiálu:

$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{S}$ (sírované), SiC, SiC + S (sírované), SiC + W (voskované)

- podle velikosti zrn:

Hrubovací – 400, 600, 800, 1000

Dokončovací – 1000, 1200, 1500, 1800, 3000, 8000

[4]

10.4 Naměřené hodnoty

Měření probíhalo na 10 vzorcích a v následujících tabulkách jsou uvedeny aritmetické průměry všech měření. Červeně vyznačené hodnoty (materiál 14109.4) byly použity při srovnávání jednotlivých operací v následující kapitole. Ostatní materiály jsou přiloženy pro dokonalejší představu o tom, jakých výsledků se touto technologií dosahuje. Jelikož se jedná o oceli stejných tříd jako při našem výzkumu (11, 19), výsledné hodnoty by se neměly od našich použitých materiálů výrazně lišit.

Tab. 15. Parametry drsnosti povrchu před superfinišováním (po broušení)[4]

Materiál	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmr [%]
11 600.4	0,352	2,300	61,870
14 109.4	0,286	2,110	64,740
14 220.4	0,298	2,000	62,160
19 312.4	0,228	1,520	65,720

Tab. 16. Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu po superfinišování [4]

Materiál	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmr [%]
11 600.4	0,108	1,110	82,210
14 109.4	0,020	0,190	96,010
14 220.4	0,008	0,130	98,800
19 312.4	0,044	0,320	93,350

11 VLIV TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK NA ŽIVOTNOST

Nejvýraznější vliv na životnost materiálů má materiálový poměr Rmr, proto podle této charakteristiky určujeme životnost dílů. Znamená to, že čím vyšší je materiálový poměr, tím více materiálu přenáší vnější zatížení.

11.1 Srovnání použitých brousicích kotoučů u jednotlivých materiálů

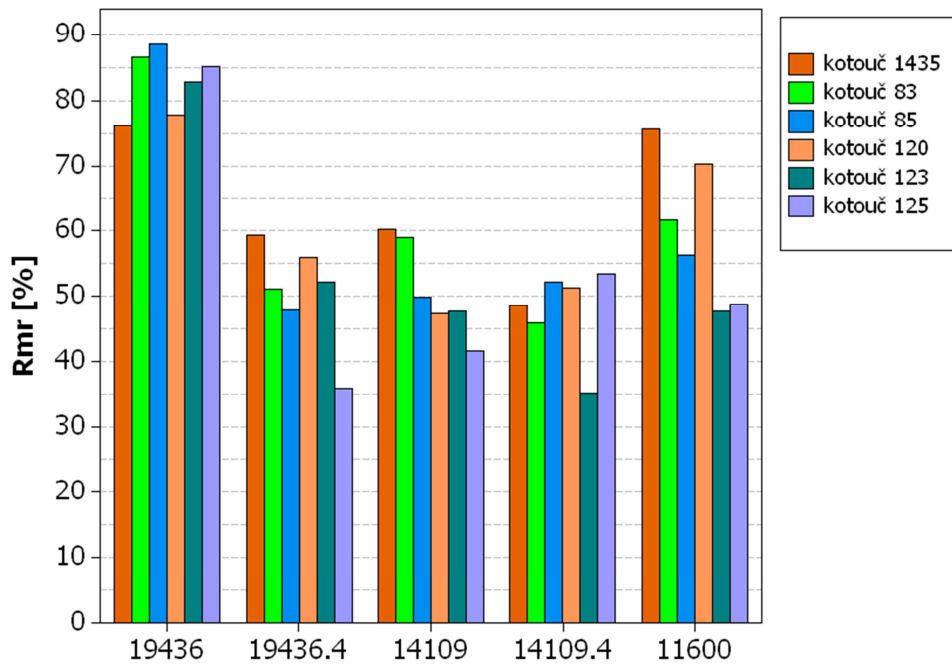
Vyhodnocovaly se všechny použité brousicí kotouče a to podle parametrů, které mají největší vliv na životnost dílů. Jedná se o parametry Rmr (materiálový poměr) v 50% úrovně výšky profilu a Ra (střední aritmetická odchylka profilu). Na obrázku 52 lze vidět srovnání použitých brousicích kotoučů u jednotlivých materiálů při středních hodnotách nastavovaných parametrů ($v_f=14$ m/min, $a_p=0,02$ mm). Parametr Rmr u kotouče 1435 (34 A99B 80 Is(K) 9V – ZKOUŠKA 1435) se pohybuje téměř vždy v porovnání s ostatními kotouči na nejvyšších hodnotách (není tomu tak u oceli 19436, u oceli 14109.4 se hodnoty kotoučů od sebe výrazně neliší).

Obrázek 53 zase popisuje, jak se pohybují hodnoty Ra zkoušených kotoučů u jednotlivých materiálů. Opět se to posuzuje při středních hodnotách nastavovaných parametrů ($v_f=14$ m/min, $a_p=0,02$ mm) a opět lze říct, že použití kotouče s označením 1435 je z hlediska kvality povrchu téměř u všech materiálů nejlepší.

Díky těmto experimentálním výsledkům lze tedy říci, že při použití tohoto kotouče (34 A99B 80 Is(K) 9V – ZKOUŠKA 1435) bude životnost většiny zkoumaných materiálů (mimo 19436) nejvyšší.

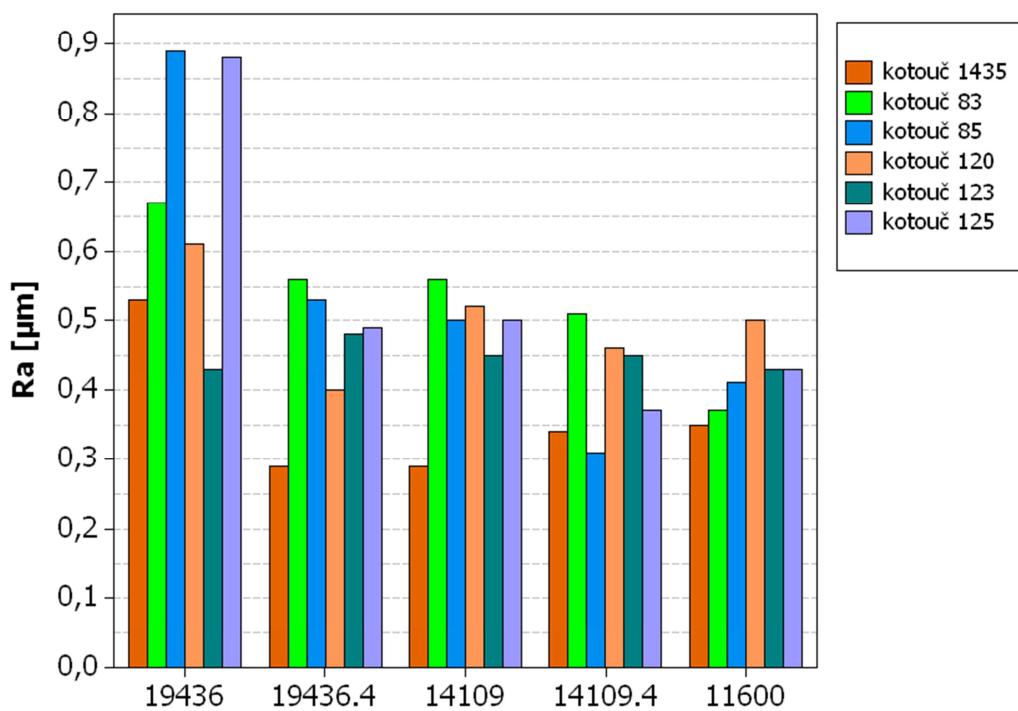
Podobné výsledky se dosáhly nejen při středních hodnotách, ale i při ostatních nastavovaných parametrech.

Srovnání brousících kotoučů dle Rmr, $v_f=14$ m/min, $a_p=0,02$ mm



Obr. 52. Srovnání brousících kotoučů dle Rmr, $v_f=14$ m/min, $a_p=0,02$ mm

Srovnání brousících kotoučů dle Ra, $v_f=14$ m/min, $a_p=0,02$ mm



Obr. 53. Srovnání brousících kotoučů dle Ra, $v_f=14$ m/min, $a_p=0,02$ mm

11.2 Srovnání zkoumaných technologií u jednotlivých materiálů

Toto srovnání ukazuje hodnocení životnosti dílů podle parametrů Rmr a Ra v závislosti na použitých technologiích.

První obrázek (Obr. 54) posuzuje životnost podle parametru materiálového poměru Rmr v 50% úrovni výšky profilu. Operaci broušení zastupuje nejlepší z vyhodnocovaných brousících kotoučů – kotouč 1435, při středních hodnotách nastavovaných parametrů –

$v_f=14$ m/min a $a_p=0,02$ mm.

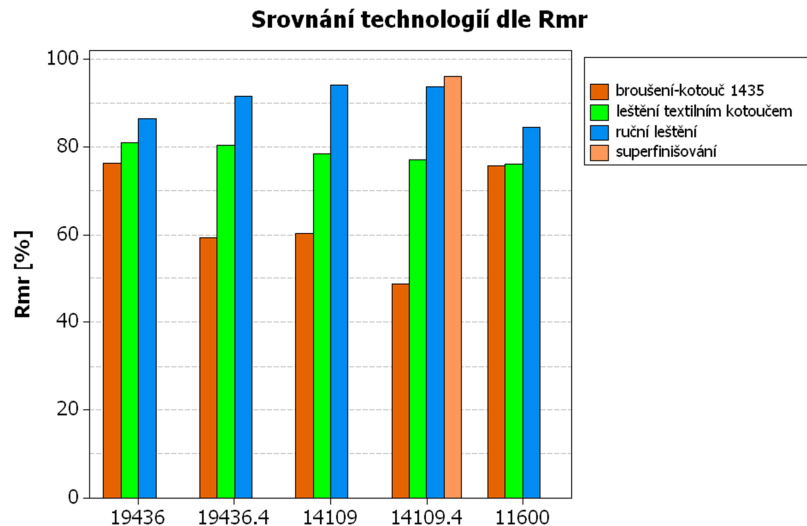
Při porovnání jednotlivých technologií vychází nejlepší výsledky u technologie ručního leštění (lapování) a superfinišování. Hodnoty operace superfinišování byly získány pouze pro materiál 14109.4, tudíž nelze s jistotou říct, zda se podobných výsledků dosahuje i u ostatních materiálů. Podle přiložených výsledků této operace u ocelí stejných tříd (19 a 11) lze předpokládat, že hodnoty Rmr i Ra při superfinišování se budou pohybovat podobně jako při operaci ručního leštění (lapování).

Při pohledu na obrázek 54 jsou vidět jasné rozdíly mezi jednotlivými operacemi, kde broušení má nejnižší hodnoty Rmr v porovnání s oběma druhy leštění a superfinišování.

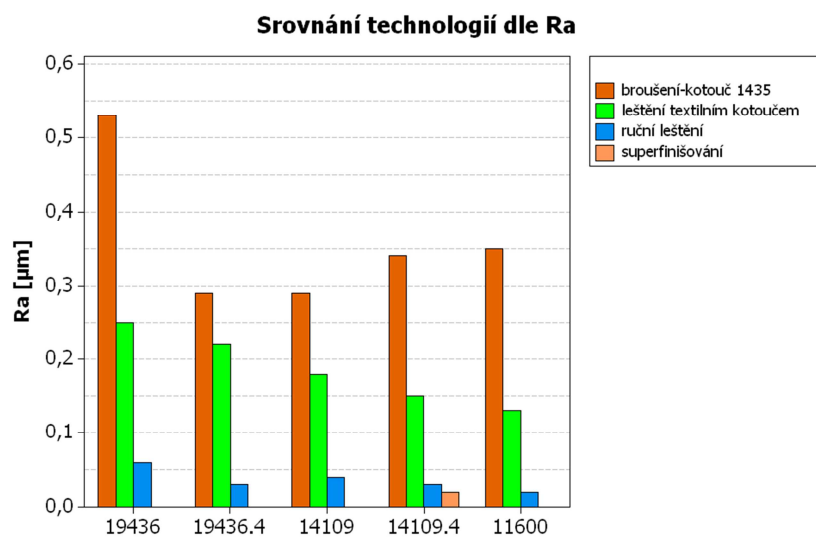
Obrázek 55 hodnotí jednotlivé operace dle parametru Ra. Nejlepší výsledky byly opět naměřeny u operace ručního leštění (lapování) a superfinišování, naopak nejhorší hodnoty Ra ukázala operace broušení. Je to z toho důvodu, že po broušení se na opracovaném povrchu nacházejí malé rýhy způsobené uvolněnými brousícími zrny, které se uvolňují při samotném procesu broušení. Tato uvolněná zrna se rozlomí a po určité době působí v pracovním procesu jako volné brusivo s menší zrnitostí.

Na obrázku 55 je také vidět, že kalené materiály se daly lépe leštit než nekalené. Při porovnávání obou grafů (Obr. 54 a 55) je vidět, že čím větší je materiálový poměr Rmr, tím je hodnota Ra menší tzn., je kvalitnější povrch.

Z těchto získaných výsledků jasně plyne, že nejvyšší životnost budou mít díly při opracování povrchu technologií ručního leštění (lapování) a také jistě superfinišováním, což v této práci nebylo možné přesně určit.



Obr. 54. Srovnání hodnocených technologií dle Rmr - úroveň 50% výšky profilu



Obr. 55. Srovnání hodnocených technologií dle Ra

11.3 Ekonomické zhodnocení

Z hlediska pohledu ekonomického nelze ovšem technologii ručního leštění (lapování) používat při výrobě běžných dílů. Tato operace je velmi málo produktivní, časy opracování jednotlivých materiálů byly neporovnatelně vyšší než u broušení i než při použití textilního kotouče. Vysoké požadavky jsou kladeny také na personál, jenž musí být hodně manuálně zručný a zkušený. Náklady na operaci ručního leštění (lapování) tvoří až 300% nákladů při broušení, proto se touto technologií opracovávají převážně jen dutiny forem, kde jsou vysoké požadavky na jakost povrchu.

ZÁVĚR

Celá tato diplomová práce se zabývá dokončovacími operacemi a měřením charakteristik nedokonalostí povrchu. Je rozdělena na dvě části, teoretickou a praktickou. První část je důležitá v tom, že by měla poskytnout teoretický základ pro část výzkumnou (praktickou).

První zkoumaná dokončovací operace je broušení. Tato technologie byla na výše zmíněné experimentální zkoušky dosti náročná, a tudíž zabrala nejvíce času. Jednak se tyto zkoušky uskutečňovaly na pěti různých materiálech, přitom se měnily všechny možné nastavitelné parametry – rychlost posuvu v_f , hloubka odebraného materiálu a_p a používaly se různé broušící kotouče (6 druhů). Vzorky materiálů se brousily při všech možných kombinacích těchto parametrů a následně se každá takto broušená plocha hodnotila dle parametrů R_{mr} , R_z , R_a . Pro zapsání a statistické vyhodnocení naměřených hodnot bylo použito programu MS EXCEL 2007 a pro následné zpracování grafů programu MINITAB 14. Při těchto zkouškách se vycházelo z určitých teoretických předpokladů, které jsme se pokusili potvrdit. Ve většině případů se to podařilo, ovšem při závislostech R_{mr} , R_a , R_z na v_f výsledky neukazovaly předpokládané hodnoty. Do broušícího procesu vstupovalo velké množství hodnot (např. druh zrna, velikost zrna, teplota oleje ve stroji, lidský faktor atd.), a proto nelze statisticky zaručit bezchybné výsledky.

S rostoucím obsahem sintrovaného korundu se snižují jednotlivé složky řezných sil, tím se zmenšuje napružení stroje (menší deformace stroje) a zvyšuje se přesnost výroby. Dále lze říct, že se zvyšuje trvanlivost nástroje, ale zároveň se mírně zhoršuje drsnost opracovávaného povrchu.

Při této technologii jsme narazili i na další faktory ovlivňující jakost povrchu, o kterých v této práci není zmínka a to, že při broušení vznikalo velké množství tepla (v místě řezu až kolem 1000°C). Dělo se tak z důvodu tření broušících zrn o materiál při vytváření třísky. Díky tomu, že se při broušení nepoužívala chladicí kapalina (která snižuje tření a tím i vznik tepla), tak se při větších hloubkách úběru materiálu a vyšších posuvových rychlostech vyskytovaly tzv. spáleniny na povrchu. Tyto spáleniny jsou důkazem přehřátí materiálu a změn struktury. Důsledek přehřátí může být popouštění zakalené oceli a její změknutí, nebo při použití chladicí kapaliny může dojít ke zkřehnutí materiálu.

Další prostor v praktické části práce dostala technologie leštění. Leštilo se dvěma různými způsoby-textilním kotoučem a ručním leštěním (lapováním). Při praktickém provádění se opět leštily všechny vybrané materiály. Při leštění textilním kotoučem se využila školní

převodová vrtačka a při způsobu ručního leštění se využilo pomoci výrobního podniku, který se touto technologií zabývá. Opět se vyhodnocovaly stejné parametry jako u broušení a zjišťovaly se rozdíly mezi nimi.

Při získávání hodnot operace superfinišování se využilo již provedeného výzkumu, který byl na tuto technologii zaměřen. Bylo z něj použito dosažených hodnot u ocelí, z nichž pouze jedna se shodovala s námi použitou 14109.4. Ostatní výsledky jsou přiloženy pro větší představu, jak kvalitní povrchy se dají touto technologií dosáhnout.

Poslední bod této práce se zabývá vyhodnocením vlivu technologických podmínek na životnost dílů. Bylo určeno, že při broušení má nejlepší vliv na životnost kotouč 34 A99B 80 Is(K) 9V – ZKOUŠKA 1435, u něhož se dosáhlo nejlepších výsledků parametrů Rmr a Ra. Výsledky tohoto kotouče se následně srovnávaly s dalšími operacemi. Nejlepší hodnoty vykazovala operace ručního leštění (lapování) spolu se superfinišováním.

Jednotlivé závěry a diskuze k dosaženým výsledkům měření jsou uvedeny uvnitř práce, pro každý konkrétní případ.

Operace broušení, leštění textilním kotoučem a následné vyhodnocování probíhalo na školních zařízeních pod odborným dohledem a za dodržování zásad bezpečnosti práce.

V práci jsou uvedeny pouze vybrané výsledky a grafy, které tvoří jen zlomek celého výzkumu. Ostatní výsledky všech učiněných zkoušek jsou umístěny v příloze této práce - ve formě CD. Je to z důvodu nemožnosti uvést všechna naměřená data do tištěné podoby práce.

Všechny zadané cíle diplomové práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AB Sandvik Coromat. Příručka obrábění : Kniha pro praktiky. 1.české vydání. Sandviken : Scientia, 1997. 868 s.
- [2] BEŇO, Jozef 2004. 418 s.; MAŇKOVÁ, Ildikó. Technologické a materiálové činitele obrábania. prvé. Košice : Viena, 2004. 418 s.
- [3] BEŇO, Jozef. Teoria rezania kovov. 1.vyd. Košice : Viena, 1999. 255 s.
- [4] BONIŠOVÁ, Monika. Obrobitelnosť superfinišovaním. Trnava, 2004. 155 s. Dizertační práce. Trnava.
- [5] BUMBÁLEK, B.; OBVODY, V.; OŠŤÁDAL, B. Drsnost povrchu. 1.vyd. Praha : SNTL, 1989. 340 s.
- [6] ČERNÝ, František; TRMAL, Jiří; MARŠÁLEK, Jaroslav. Brusky a broušení. Praha : SNTL, 1970. 263 s.
- [7] ČOP, Jiří. Broušení materiálů s využitím kubického nitridu boru. Zlín, 2010. 74 s. Bakalářská práce. UTB ve Zlíně.
- [8] ČSN EN ISO 13565 – 2: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda, povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti – Část 2: Výškové charakteristiky využívající křivku lineárního materiálového poměru, 1999 (014446)
- [9] ČSN EN ISO 13565 – 3: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti – Část 3: Výškové charakteristiky využívající pravděpodobnostní křivku materiálu, 2001 (014446)
- [10] DILLINGER, Josef. Moderní strojírenství pro školu a praxi. 1.vyd. Brno : Europa, 2007. 612 s.
- [11] DÍBALOVÁ, Monika. Obrobitelnosť brúsením. Trnava, 2005. 141 s. Dizertační práce. Trnava.
- [12] FRISCHHERZ, Adolf; PIEGLER, Herbert; PRAGAČ, Jaromír. Technologie zpracování kovů : Odborné znalosti. 4.vyd. Praha : SNTL, 2001. 280 s.
- [13] GAŠPÁREK, Jozef. Dokončovacie sposoby obrábania. Bratislava : Alfa, 1979. 360 s.
- [14] HLUCHÝ, Miroslav; HANĚK, Václav. Strojírenská technologie 2. 2.,upravené vydání. Praha : Scientia, 2001. 176 s.

- [45] HLUCHÝ, M.; KOLOUCH, J. Strojírenská technologie 1. Praha: Scientia, 1996. 216 s.
- [16] KOCMAN, Karel; PROKOP, Jaroslav. Technologie obrábění. druhé. Brno : CERM, 2005. 270 s.
- [17] KOLÁŘ, David. Korelace struktury brousícího kotouče a jakosti broušené plochy. Zlín, 2010. 119 s. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [58] MASLOV, J.N.; KLŮNA, Jindřich; NECKÁŘ, Ferdinand. Teorie broušení kovů. Praha : SNTL, 1979. 248 s.
- [19] NESLUŠAN, Miroslav, et al. Experimentálne metody v trieskovom obrábaní. prvé vydanie. Žilina : EDIS, 2007. 343 s.
- [20] PERNIKÁŘ, Jiří; TYKAL, Miroslav; VAČKÁŘ, Josef. Jakost a metrologie. Brno : CERM, 2001. 151 s.
- [21] ŘÍČKA, Jaroslav; BULLA, Vladimír. Technologie obrábění a montáže. Brno : Rektorát VUT Brno, 1989. 165 s.
- [22] VASILKO, Karol. Analytická teoria trieskového obrábania. prvé. Prešov : COFIN Prešov, 2007. 338 s.
- [23] VASILKO, Karol; RAGAN, Emil. Teoria výrobných technológií. 1.vyd. Prešov : Coffin, 2010. 241 s.
- [24] VASILKO, Karol; BOKUČAVA, Givi. Brúsenie kovových materiálov. Bratislava : Alfa, 1988. 240 s.
- [25] VOJVODÍK, Petr. Aplikace nekonvenčních brousících materiálů při dokončování dílů forem. Zlín, 2009. 94 s. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [26] BRH 20.03F, *Bruska rovinná horizontální. Návod k použití.*
- [27] Mytutoyo SJ – 301, *Přístroj na měření drsnosti povrchu. Návod k použití.*
- [28] Převodová vrtačka B40 GSM, *Návod k obsluze.*
- [29] Zkoušky testování vývojových brousících kotoučů pro realizaci projektu EUREKA OE 8002-SINTERKORUND, Kocman, Lukovics, Zlín 2009
- [30] JIMI- brusivo [online]. cit. [2011-03-15]. Dostupný z WWW:
<<http://www.brusivojimi.com/clanky/znaceni-brusnych-kotoucu/>>

[31] Tumlikovo [online]. cit. [2011-03-22]. Dostupný z WWW:

<<http://www.tumlikovo.cz/rubriky/materialy/>>

[32] Feroná [online]. cit. [2011-03-22]. Dostupný z WWW:

< <http://www.ferona.cz/cze/katalog/oceli.php> >

[33] Mepac [online]. cit. [2011-03-29]. Dostupný z WWW:

< <http://www.mepac.cz/image/pictures/web/gesswein.pdf> >

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a	Amplituda
a_p	Hloubka odebraného materiálu
ČSN	Česká státní norma
D	Hlavní bod při broušení
EN	Evropská norma
f_a	Axiální posuv stolu
F_c	Řezná síla
F_f	Posuvová síla
F_p	Pasivní síla
HSS	Rychlořezná ocel
HRC	Tvrдость podle Rockwella
ISO	Mezinárodní norma
l_a	Délka axiální dráhy broušícího kotouče
l_n	Vyhodnocovaná délka
l_r	Základní délka pro drsnost
l_p	Základní délka primárního profilu
l_w	Základní délka pro vlnitost profilu
MI(c)	Nosná délka profilu na úrovni C
n_s	Frekvence otáčení broušícího kotouče
n_w	Frekvence otáčení obrobku
P_a	Primární profil
P_f	Nástrojová rovina boční
P_p	Nástrojová rovina zadní
P_r	Nástrojová rovina základní

R_a	Střední aritmetická odchylka profilu drsnosti
R_c	Střední výška prvku profilu
$R_{mr(c)}$	Materiálový poměr profilu (nosný podíl)
r_n	Poloměr zaoblení ostří
R_p	Výška největšího výstupku profilu
R_v	Hloubka největší prohloubeniny profilu
R_z	Největší výška profilu
v_{fa}	Axiální rychlost posuvu stolu
v_{fr}	Radiální rychlost posuvu stolu
v_w	Obvodová rychlost obrobku
W_a	Profil vlnitosti
X_s	Šířka prvku profilu
Z_p	Výška výstupku profilu
Z_t	Výška profilu
Z_v	Hloubka prohloubeniny
α	Úhel sklonu stopy po jednom zrnu brusiva
δ	Úhel řezu
λ_c	Vlnová délka filtru profilu
λ_f	Vlnová délka filtru profilu
ω_k	Frekvence kmitavého pohybu

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Vybrané způsoby obvodového broušení [17]</i>	14
<i>Obr. 2. Vybrané způsoby čelního broušení [17]</i>	14
<i>Obr. 3. Model záběru broušícího zrna [16]</i>	16
<i>Obr. 4. Pohyby a souřadnicové soustavy rovin pro obvodové vnější broušení do kulata, a) radiální, b) axiální [16]</i>	16
<i>Obr. 5. Rozložení řezných sil při obvodovém axiálním broušení do kulata [16]</i>	18
<i>Obr. 6. Druhy broušících zrn [10]</i>	24
<i>Obr. 7. Základní způsoby opotřebení broušícího kotouče [7]</i>	25
<i>Obr. 8. Kinematické schéma superfinišování [16]</i>	26
<i>Obr. 9. Průběh superfinišovacího procesu – zvětšování nosného podílu [16]</i>	27
<i>Obr. 10. Prvek profilu [19]</i>	40
<i>Obr. 11. Nosná délka profilu na úrovni c $Ml(c)$ [19]</i>	40
<i>Obr. 12. Amplitudové parametry – R_p, R_v, R_z [19]</i>	41
<i>Obr. 13. Střední aritmetická hodnota drsnosti R_a [25]</i>	41
<i>Obr. 14. Křivka materiálového poměru drsnosti povrchu [5]</i>	42
<i>Obr. 15. Hustota odchylek profilu [19]</i>	42
<i>Obr. 16. Měřený vzorek</i>	48
<i>Obr. 17. Schéma přístroje Mitutoyo [27]</i>	49
<i>Obr. 18. Příklady vytisknutých výsledků z přístroje Mitutoyo</i>	53
<i>Obr. 19. Označování broušících kotoučů [30]</i>	53
<i>Obr. 20. Porovnání kotoučů, materiál 14109 - závislost R_{mr} na a_p</i>	56
<i>Obr. 21. Porovnání kotoučů, materiál 14109.4 - závislost R_{mr} na a_p</i>	56
<i>Obr. 22. Porovnání kotoučů, materiál 19436 - závislost R_{mr} na a_p</i>	57
<i>Obr. 23. Porovnání kotoučů, materiál 19436.4 - závislost R_{mr} na a_p</i>	57
<i>Obr. 24. Porovnání kotoučů, materiál 11600 - závislost R_{mr} na a_p</i>	58
<i>Obr. 25. Porovnání kotoučů, materiál 14109 - závislost R_a na a_p</i>	59
<i>Obr. 26. Porovnání kotoučů, materiál 14109.4 - závislost R_a na a_p</i>	59
<i>Obr. 27. Porovnání kotoučů, materiál 19436- závislost R_a na a_p</i>	60
<i>Obr. 28. Porovnání kotoučů, materiál 19436.4 - závislost R_a na a_p</i>	60
<i>Obr. 29. Porovnání kotoučů, materiál 11600 - závislost R_a na a_p</i>	61
<i>Obr. 30. Porovnání kotoučů, materiál 14109 - závislost R_z na a_p</i>	62
<i>Obr. 31. Porovnání kotoučů, materiál 14109.4 - závislost R_z na a_p</i>	62

<i>Obr. 32. Porovnání kotoučů, materiál 19436 - závislost Rz na a_p</i>	63
<i>Obr. 33. Porovnání kotoučů, materiál 19436.4- závislost Rz na a_p</i>	63
<i>Obr. 34. Porovnání kotoučů, materiál 11600 - závislost Rz na a_p</i>	64
<i>Obr. 35. Porovnání kotoučů - závislost Rmr na v_f.....</i>	65
<i>Obr. 36. Porovnání kotoučů - závislost Ra na v_f</i>	66
<i>Obr. 37. Porovnání kotoučů - závislost Rz na v_f.....</i>	67
<i>Obr. 38. Porovnání materiálů, kotouč 120 - závislost Rmr na a_p.....</i>	68
<i>Obr. 39. Porovnání materiálů, kotouč 123 - závislost Rmr na a_p.....</i>	68
<i>Obr. 40. Porovnání materiálů, kotouč 83 - závislost Ra na a_p.....</i>	69
<i>Obr. 41. Porovnání materiálů, kotouč 123 - závislost Ra na a_p.....</i>	70
<i>Obr. 42. Porovnání materiálů, kotouč 125 - závislost Rz na a_p</i>	71
<i>Obr. 43. Porovnání materiálů, kotouč 125 - závislost Rz na a_p</i>	71
<i>Obr. 44. Porovnání Rmr v různých výškách posuzovaného profilu.....</i>	72
<i>Obr. 45. Leštění textilním kotoučem-srovnání materiálů dle Rmr</i>	74
<i>Obr. 46. Leštění textilním kotoučem-srovnání materiálů dle Ra</i>	75
<i>Obr. 47. Leštění textilním kotoučem-srovnání materiálů dle Rz</i>	76
<i>Obr. 48. Použité nástroje při ručním leštění (lapování).....</i>	78
<i>Obr. 49. Ruční leštění-srovnání materiálů dle Rmr.....</i>	80
<i>Obr. 50. Ruční leštění-srovnání materiálů dle Ra</i>	81
<i>Obr. 51. Ruční leštění-srovnání materiálů dle Rz</i>	82
<i>Obr. 52. Srovnání brousicích kotoučů dle Rmr, $v_f=14$ m/min, $a_p=0,02$ mm</i>	87
<i>Obr. 53. Srovnání brousicích kotoučů dle Ra, $v_f=14$ m/min, $a_p=0,02$ mm.....</i>	87
<i>Obr. 54. Srovnání hodnocených technologií dle Rmr - úroveň 50% výšky profilu</i>	89
<i>Obr. 55. Srovnání hodnocených technologií dle Ra</i>	89

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Druhy brousicích materiálů [16]</i>	20
<i>Tab. 2. Zrnitost brousicích kotoučů [16]</i>	22
<i>Tab. 3. Pojivo brousicích kotoučů [16]</i>	22
<i>Tab. 4. Tvrdost brousicích kotoučů [16]</i>	23
<i>Tab. 5. Struktura brousicích kotoučů [16]</i>	24
<i>Tab. 6. Řezné podmínky a přídavky pro superfinišování [16]</i>	27
<i>Tab. 7. Základní parametry brusky [26]</i>	49
<i>Tab. 8. Základní parametry vrtačky [28]</i>	50
<i>Tab. 9. Příklad vyhodnocování získaných dat</i>	52
<i>Tab. 10. Označení použitých brousicích kotoučů</i>	54
<i>Tab. 11. Příklad výsledků procesu leštění textilním kotoučem – úroveň Rmr 50%</i>	75
<i>Tab. 12. Příklad výsledků procesu ručního leštění – úroveň Rmr 50%</i>	81
<i>Tab. 13. Základní parametry stroje SUPFINA SM 470 [4]</i>	83
<i>Tab. 14. Řezné podmínky superfinišování [4]</i>	84
<i>Tab. 15. Parametry drsnosti povrchu před superfinišováním (po broušení)[4]</i>	85
<i>Tab. 16. Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu po superfinišování [4]</i>	85

SEZNAM PŘÍLOH

P I: Naměřené hodnoty, statistické vyhodnocení u všech provedených technologií – pomocí programu MS EXCEL 2007

P II: Grafické vyhodnocení naměřených dat u všech provedených technologií – pomocí programu MINITAB 14

Přílohy této diplomové práce jsou dostupné na přiloženém CD.

PŘÍLOHA P I: NÁZEV PŘÍLOHY