



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA A KVANTIFIKACE PŘESNOSTI BROUSICÍHO PROCESU

ANALYSIS AND QUANTIFICATION ACCURACY OF THE ABRASIVE PROCESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JIŘÍ BROŽINA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV PROKOP, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/10

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Brožina Jiří, Bc.

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Analýza a kvantifikace přesnosti brousicího procesu

v anglickém jazyce:

Analysis and quantification accuracy of the abrasive process

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analýza přesnosti brousicího procesu se zaměřením na korespondující technologické vlivy.

Cíle diplomové práce:

1. Identifikace brousicího procesu
2. Technologické vlivy na přesnost brousicího procesu
3. Parametry přesnosti brousicího procesu a jejich interpretace
4. Konkretizované technologicko ekonomické výstupy přesnosti brousicího procesu

Seznam odborné literatury:

1. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění – Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s.r.o. 1997. 857 s.
Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.
2. BEŇO, J. Teória rezania kovov. Prvé vydanie. Košice. Strojnícka fakulta TU košice, 1999. 255 s. ISBN 80-7099- 429- 0.
3. FOREJT, M. a PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje.
1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 226 s. ISBN 80-214-2374-9.
4. KOCMAN, K. a NĚMEČEK, P. Aktuální příručka pro technický úsek. 16. aktualizované vyd. Praha: Verlag Dashöfer 2001. 4250 s. ISBN 80-902247-2-5.
5. KOCMAN, K. Speciální technologie. Obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 228 s. ISBN 80-214-2562-8.
6. KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
7. KRÍŽ, R. a VÁVRA, P. Strojírenská příručka 7. svazek. 1. vyd. Praha: Scientia, 1996. 212 s. ISBN 80-7183-024-0.
8. MASLOV, J. N. Teorie broušení kovů. Praha: SNTL, 1979. 248s.
9. PERNIKÁŘ, J.-TYKAL, M.-VAČKÁŘ, J. Jakost a metrologie. Část metrologie. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2001. 151 s. ISBN 80-214-1997-0.
10. VIGNER, M.-ZELENKA, A. a KRÁL, M. Metodika projektování výrobních procesů. 1. vyd. Praha: SNTL-Státní nakladatelství technické literatury, 1984. 592 s.
11. VLACH, D. Technologie obrábění a montáží. 1. vyd. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1990. 472 s. ISBN 80-03-00143-9.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 6.10.2009


prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu




doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Vypracovaná studie je zaměřena na Analýzu a kvantifikaci parametrů přesnosti broušícího procesu. V rámci studie je identifikován broušící proces, technologické vlivy a parametry přesnosti broušených ploch. V závěrečné části je praktická ukázka technologického vlivu na výsledné parametry přesnosti broušícího procesu.

Klíčová slova

broušící proces, přesnost, parametry přesnosti, technologické vlivy na přesnost broušení

ABSTRACT

The formulated study is focused on the analysis and quantification of the accuracy–parameters related to the abrasive process. The scope of the mentioned study deals with the identification of the abrasive process, technological influence and accuracy–parameters of abrading surfaces. In the final part of this study, there is a practical sample described with respect to the technological influence on the resulting accuracy–parameters of the abrasive process.

Key words

abrasive process, accuracy, parameters of accuracy, technological influence on the accuracy of abrasive process

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BROŽINA, J. *Analýza a kvantifikace přesnosti broušícího procesu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 66 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Analýza a kvantifikace přesnosti brousicího procesu vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

28.5.2010

.....
Jméno a příjmení diplomanta

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Jaroslavu Prokopovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah	6
Úvod	7
1 Identifikace brousicího procesu	8
1.1 Technologická charakteristika brousicího procesu.....	8
1.1.1 Kinematika brousicího procesu.....	8
1.1.2 Řezné síly	14
1.2 Způsoby broušení	15
2 Technologické vlivy na přesnost brousicího procesu	18
2.1 Stroj	18
2.1.1 Faktory ovlivňující přesnost brousicího stroje.....	18
2.1.2 Zlepšení přesnosti brousicího stroje	19
2.1.3 Brousicí stroj	20
2.2 Nástroj.....	24
2.2.1 Vliv brousicího kotouče na výsledné parametry přesnosti	26
2.3 Řezné podmínky	29
3 Parametry přesnosti brousicího procesu a jejich interpretace	31
3.1 Parametry kvality povrchu broušených ploch.....	31
3.2 Přesnost broušených ploch	34
3.2.1 Přesnost rozměrů	35
3.2.2 Přesnost tvaru a polohy	35
4 Konkretizované technologicko ekonomické výstupy přesnosti brousicího procesu	38
4.1 Metodika experimentu	38
4.1.1 Zkušební vzorek	38
4.1.2 Obráběcí stroj	38
4.1.3 Brousicí kotouč	39
4.1.4 Řezné podmínky.....	39
4.1.5 Metodika měření.....	40
4.2 Naměřené hodnoty experimentu	44
4.3 Obecné vztahy statistické interpretace.....	47
4.4 Statistická interpretace vyšetřených hodnot.....	49
4.4.1 U_R – Úchylka rozměru	49
4.4.2 R_a – Průměrná aritmetická úchylka profilu	52
4.4.3 R_z – Největší výška profilu	55
4.5 Ekonomické zhodnocení.....	58
4.5.1 Metodika ekonomického zhodnocení.....	58
4.5.2 Obecná interpretace ekonomického zhodnocení.....	59
4.5.3 Konkretizovaná interpretace ekonomického zhodnocení	59
Závěr	61
Seznam použitých zdrojů	62
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	64

ÚVOD

Broušení patří mezi abrazivní metody obrábění, které jsou nejvíce využívány pro obrábění strojních částí s velkou přesností obrobených ploch. Při broušení se dosahuje přibližně o řád lepších drsností povrchu, než u obrábění s definovanou geometrií břitu. Proto je využíváno v dokončovacích operacích, ale není výjimkou využití i pro produkční obrábění.

V dnešním světě nalézá proces broušení své využití zejména ve výrobě automobilů, ložisek, turbín, obrábění těžkoobrobitelných materiálů, kalených materiálů atd.

Broušením lze dosáhnout velmi kvalitních povrchů a rozměrových parametrů. Parametry přesnosti broušených ploch jsou v této studii prakticky zkoumány. Praktické zkoumání je zaměřeno na zjištění parametrů přesnosti povrchu Ra a Rz a na zhodnocení rozměrových parametrů. Dané parametry přesnosti jsou pozorovány v závislosti na změně technologických parametrů broušícího procesu. Pozorovaným technologickým vlivem je vyjiskřování. Dle teoretických předpokladů by měly být hodnoty parametrů přesnosti při broušení s vyjiskřováním přesnější. Dále je rozebráno ekonomické hledisko s pohledu časové náročnosti pro odebrání jednotky objemu materiálu z povrchu vzorku.

V dnešní době je přirozenou snahou ve strojírenství celkovou výrobu zrychlovat, zpřesňovat a zkvalitňovat. Pro kvalitní broušení je nutné sladit odpovídající nástroj – broušící kotouč, broušící stroj, systémy zajišťující orovnávaní, chlazení/mazání a technologické podmínky, které zajistí splnění požadavků. Jen za předpokladu splnění zmíněných podmínek můžeme dosáhnout optimálních hodnot.

Z výše uvedeného vyplývá, že dodržení a zvyšování standardů přesnosti broušícího procesu není záležitostí jednoho parametru. Pro dosažení požadovaných parametrů přesnosti je nutné posuzovat vzájemné působení jednotlivých částí na konečný stav^{1,2}.

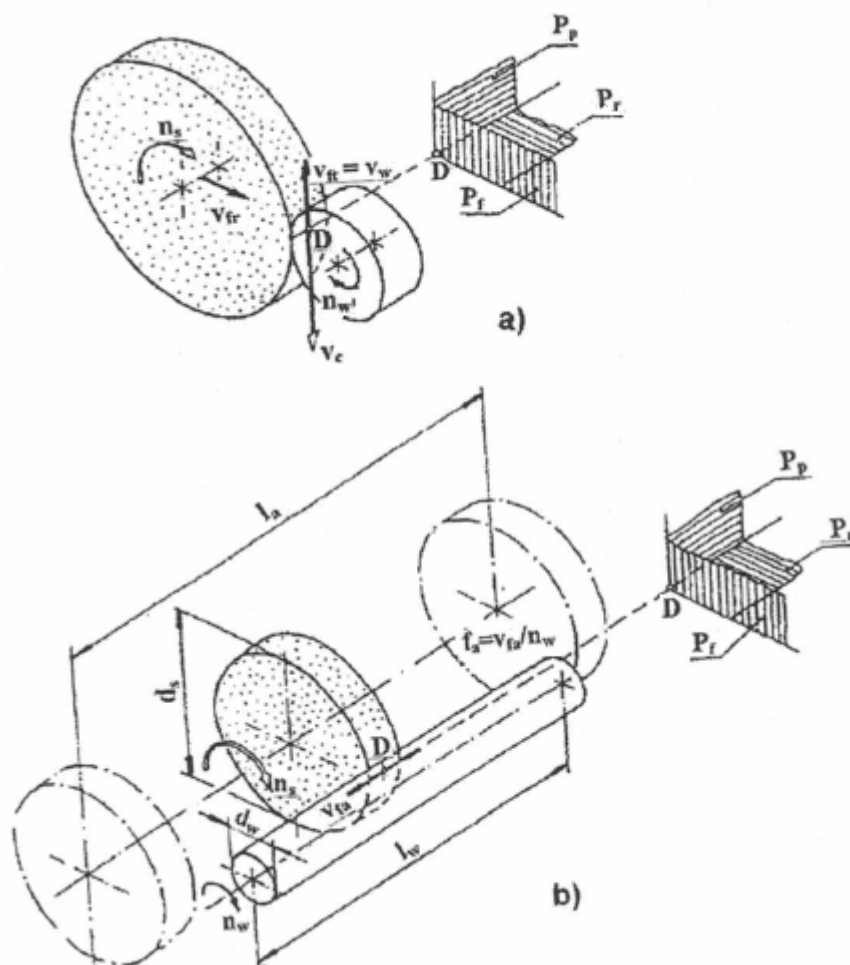
1 IDENTIFIKACE BROUSICÍHO PROCESU

1.1 Technologická charakteristika brousicího procesu

1.1.1 Kinematika brousicího procesu

Broušení je proces obrábění při kterém se odebírá materiál pomocí rotačního pohybu nástroje. Nástrojem může být brousicí kotouč, brousicí či obtahovací kámen, nebo brousicí tělísko. Nejvíce se svou kinematikou broušení podobá frézování. Zásadní rozdíl je v různorodosti geometrického tvaru brousicích zrn. Brousicí zrna mají zpravidla negativní úhel čela, nepravidelné zaoblení hrotu, nepravidelný geometrický tvar, vysokou tvrdost a odolnost proti teplotě. Rychlosti řezného procesu se pohybují v rozmezích 30 až 100 m.s⁻¹. Dále se broušení vyznačuje velmi malým průřezem odebrané třísky (10⁻³ až 10⁻⁵ mm²).

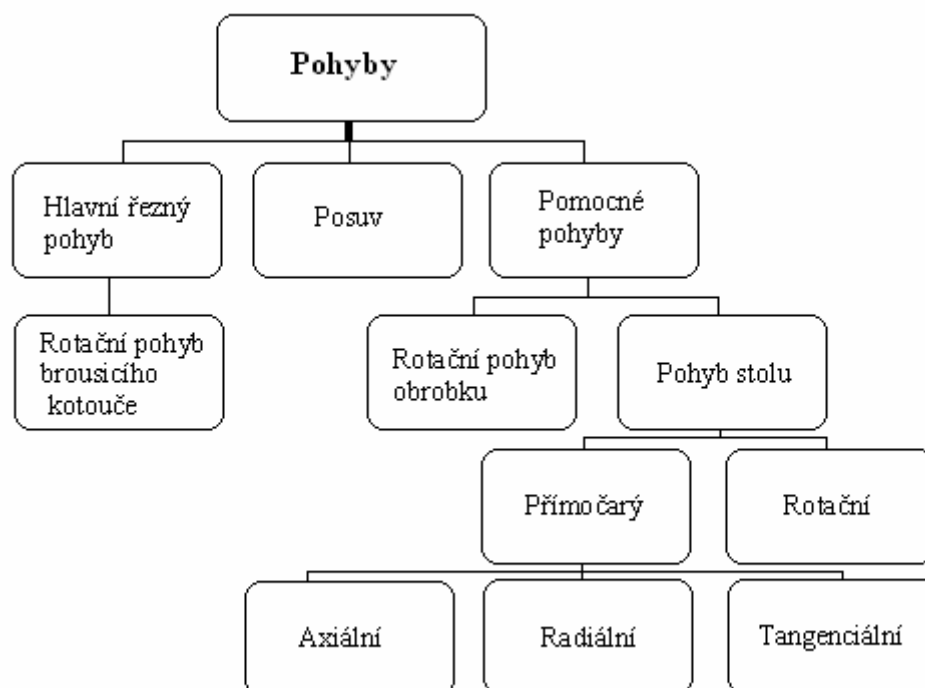
Pro každou brousicí metodu jsou identifikovány specifické rychlosti a pohyby¹.



Obr. 1.1 a – Obvodové vnější radiální broušení do kulata
b – obvodové vnější axiální broušení do kulata (1)

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

Každý pohyb a každá rychlost brousicího procesu se měří ve stejném čase a ve stejném zvoleném bodě na aktivní části brousicího kotouče.



Obr. 1.2 Schema relativních pohybů mezi brousicím kotoučem a obrobkem (3)

Kinematické veličiny brousicího procesu:

Řezná rychlost v_c - tangenciální rychlost brousicího kotouče v bodě zvoleném na ploše styku, měřená ve vztahu k držáku brousicího kotouče¹.

Hodnoty řezné rychlosti se pohybují v rozmezí 30 až 35 m.s⁻¹. V případě rychlostního broušení 80 až 180 m.s⁻¹.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (1.1)$$

Správná volba řezné rychlosti je velmi důležitá z hlediska správného využití brousicího kotouče. V případě malé řezné rychlosti dochází k rychlému opotřebení. To je způsobeno zvýšením hodnot tlaků na jednotlivá zrna.

V případě zvolení velké řezné rychlosti dojde ke zmenšení objemu třísek a poklesu tlakových sil působících na jednotlivá zrna. Nedostatečné působení síly zapříčiní nevytloupnutí zrna. Následek je pálení broušeného povrchu, nebo ucpání kotouče.

Z výše uvedeného je patrné, že volba řezné rychlosti velmi zásadně může ovlivnit kvalitu i hospodárnost celého procesu¹.

Obvodová rychlost obrobku v_w - okamžitá rychlost obvodové části obrobku ve zvoleném bodě ve vztahu ke stolu¹.

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} \quad (1.2)$$

Pokud je při broušení do kulata, nebo při rovinném broušení upevněn obrobek ke stolu, je nutno uvažovat jen pohyb stolu ($v_w = 0$).

Mezi řeznou a posuvovou rychlostí existuje poměr q . Ten má rozdílnou hodnotu pro broušení do kulata a pro rovinné broušení.

Broušení do kulata¹

$$q = 60 \cdot \frac{v_c}{v_w} \quad (1.3)$$

Rovinné broušení¹

$$q = 60 \cdot \frac{v_c}{v_{f_t}} \quad (1.4)$$

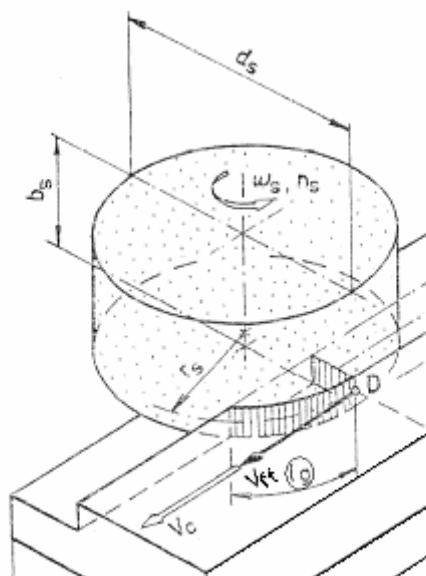
Přesah U (příčný přesah) při broušení do kulata nebo rovinné broušení s axiálním posuvem – poměr mezi šířkou aktivní části brousícího kotouče a axiálním posuvem stolu³.

$$U = \frac{b_D}{f_a} \quad (1.5)$$

Geometrická délka styku l_g – stykový oblouk brousícího kotouče a obrobku obr.(1.3)¹.

$$l_g = \sqrt{2 \cdot f_r \cdot r_{eq}} \quad (1.6)$$

Výše uvedený vzorec je používán pro výpočet hodnoty l_g , při běžných podmínkách obvodového broušení.



Obr. 1.3 Geometrická délka styku l_g při rovinném tangenciálním broušení¹⁾

Kinematická délka styku l_k – délka kinematického brusného oblouku¹⁾.

$$l_k = l_g \left(1 + \frac{1}{|q|} \right) \quad (1.7)$$

Ekvivalent poloměru brousícího kotouče r_{eq} – hodnota popisující poloměr fiktivního brousícího kotouče v záběru s obrobkem, který má stejnou délku geometrického styku jako brousící kotouč s poloměrem r_s v záběru s obrobkem o poloměru r_w při obvodovém broušení¹⁾.

Znaménko plus je nutno použít pro obvodové vnější broušení do kulata. Pro vnitřní broušení do kulata je používáno znaménko minus.

$$r_{eq} = \frac{r_w \cdot r_s}{r_w \pm r_s} \quad (1.8)$$

Ekvivalentní tloušťka broušení h_{eq} – je vztažena na jednotku aktivní šířky brousícího kotouče.

Obecné vyjádření¹⁾

$$h_{eq} = \frac{Q_w}{b_D \times v_c} \quad (1.9)$$

Výpočet ekvivalentní tloušťky broušení h_{eq} je pro různé brousící metody modifikován.

Rovinné obvodové tangenciální broušení s přímočarým pohybem stolu¹

$$h_{eq} = \frac{v_{ft}}{60 \cdot v_c} \cdot a_e \quad (1.10)$$

Obvodové radiální broušení do kulata vnější¹

$$h_{eq} = \frac{v_w}{60 \cdot v_c} \cdot f_r \quad (1.11)$$

Průřez odebírané vrstvy A – je vyjádřena v závislosti na způsobu broušení.

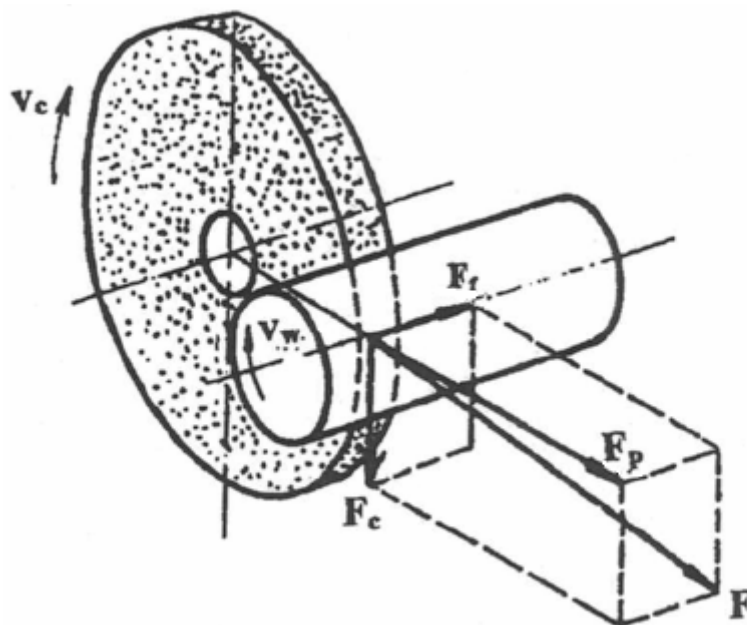
Obvodové axiální vnější broušení do kulata¹

$$A = a_e \cdot h_{eq} \quad (1.12)$$

Rovinné obvodové tangenciální broušení s přímočarým pohybem stolu¹

$$A = b_D \cdot h_{eq} \quad (1.13)$$

1.1.2 Řezné síly



obr.1.4 Rozložení řezných sil při obvodovém axiálním broušení do kulata (1)

V procesu broušení působí mezi obrobkem a brousicím kotoučem celková řezná síla F . Síla F se může rozložit do třech na sebe kolmých směrů obr (1.4).

- F_p je pasivní síla kolmá k broušené ploše
- F_c je řezná síla ležící ve směru řezné rychlosti
- F_f je posuvová síla působící ve směru podélného posuvu

$$F_p > F_c > F_f \quad \text{a} \quad F_p / F_c = 1,2 \text{ až } 3$$

Pro velikost sil jsou určující zvolené řezné podmínky, použitý nástroj a způsob broušení¹.

Výpočet řezné síly F_c

Pomocí empiricky získané rovnice – pro obvodové axiální broušení rotačních ploch¹.

$$F_c = 25(v_w \cdot f_a)^{0,6} \cdot a_e^{0,5} \quad (1.14)$$

Výpočet z rovnice¹

$$F_c = k_c \cdot A \quad (1.15)$$

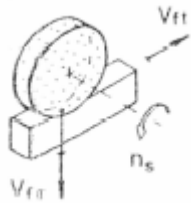
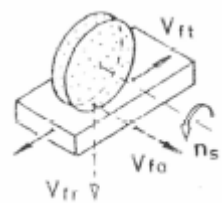
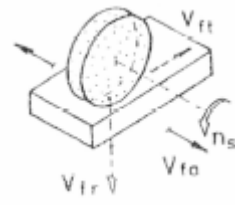
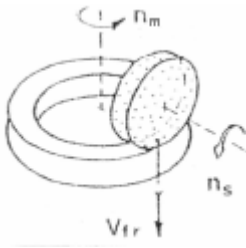
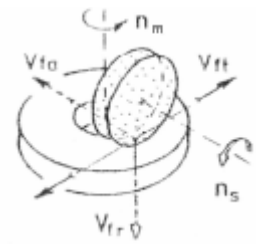
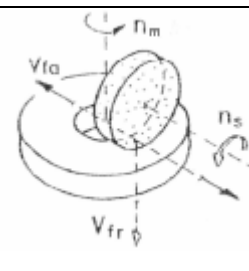
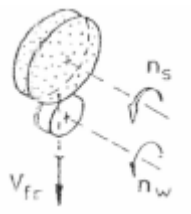
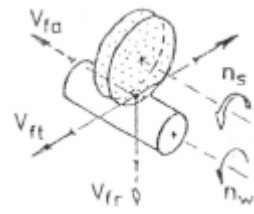
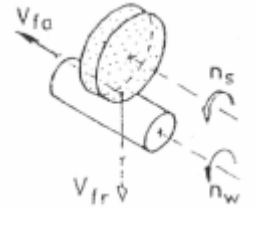
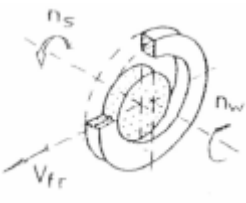
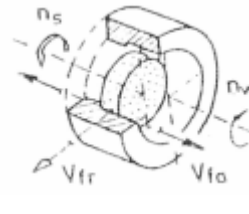
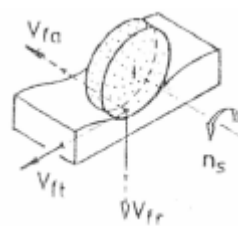
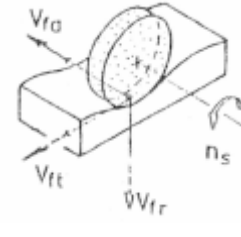
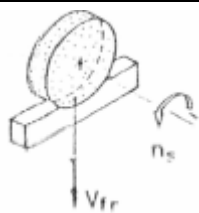
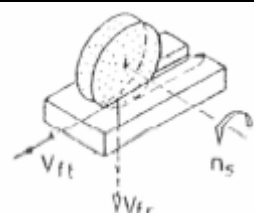
Hodnoty měrné řezné síly : pro ocel $k_c = 10\,000 - 35\,000$ MPa
: pro litinu $k_c = 4\,000 - 12\,000$ MPa

1.2 Způsoby broušení

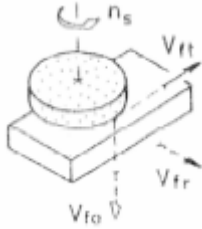
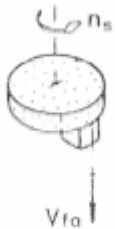
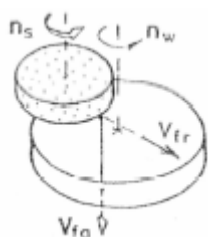
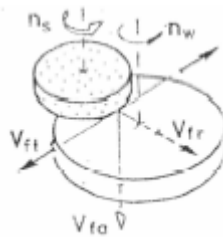
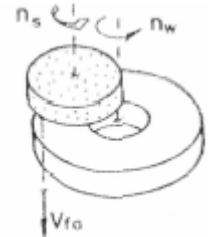
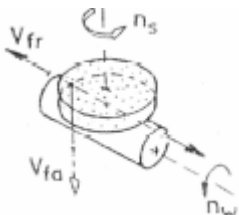
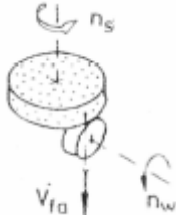
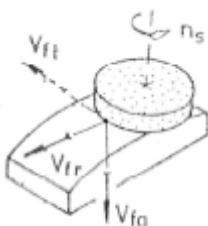
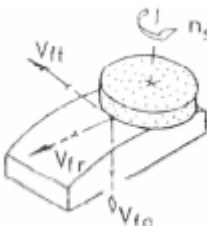
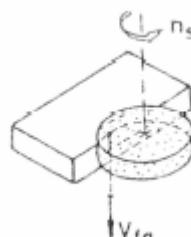
Základní operace brousicího procesu jsou posuzovány dle několika kritérií^{1,3}:

- typ obrobeného povrchu,
- aktivní část brousicího kotouče,
- vzájemný vztah obrobku a brousicího kotouče,
- směr hlavního posuvového pohybu obrobku ve vztahu k brousicímu kotouči,
- vzájemný vztah tangenciálních rychlostí brousicích kotoučů a obrobků ve zvoleném bodě,
- speciální vlastnosti.

Tab. 1.1 Základní postupy broušení³

Broušení - obvodové				
		radiální	tangenciální	axiální
Broušení rovinné	Pohyb stolu přímočarý			
	Pohyb stolu otáčivý			
Broušení do kulata	Vnější			
	Vnitřní			
Broušení tvarové	Kopírovací			
	Profilové			

Tab. 1.2 Základní postupy broušení³

Broušení - čelní		radiální	tangenciální	axiální
Broušení rovinné	Pohyb stolu přímočarý			
	Pohyb stolu otáčivý			
Broušení do kulata	Vnější			
	Vnitřní			
Broušení tvarové	Kopírovací			
	Profilové			

2 TECHNOLOGICKÉ VLIVY NA PŘESNOST BROUSICÍHO PROCESU

2.1 Stroj

2.1.1 Faktory ovlivňující přesnost brousicího stroje

Pracovní přesnost obráběcího stroje může ovlivňovat celá řada činitelů^{1,4,5}:

- stupeň kvality montáže a zpracování důležitých funkčních částí a uzlů (zpracování vodících ploch, přesnost uložení pracovních vřeten atd.),
- zásah lidského faktoru (možnost eliminace pomocí zavádění automatizovaného provozu),
- volba materiálu, který byl použit na výrobu daného obráběcího stroje (pevnost, odolnost proti opotřebení),
- míra opotřebení zatěžovaných částí stroje, která je v závislosti na pracovním vytížení a způsobu práce stroje (k rychlejšímu opotřebení přispívají velké úběry materiálu, které způsobují namáhání funkčních částí až k mezi úměrnosti, dále přispívají k rychlému opotřebení mechanismů a k vzniku nepřípustných vůlí),
- kinematická nepřesnost, která pramení z úchylek v kinematické vazbě převodů mezi jednotlivými pohyby,
- konstrukční koncepce (tuhost stroje), v důsledku působení řezných sil se deformují části obráběcího stroje (obrobku, nástroje), což má za následek změnu vzájemného nastavení ostří nástroje vůči obrobku, a tím dojde k porušení přesnosti požadovaného rozměru a tvaru obrobené plochy, protože konečná tuhost soustavy stroj – nástroj – obrobek je proměnlivou veličinou v závislosti na poloze nástroje vůči danému obráběcímu stroji,
- tepelné deformace (v důsledku nerovnoměrných teplotních změn může dojít k tepelným deformacím, které ovlivňují vzájemnou polohu obrobku a nástroje),
- kmitání v obráběcím stroji.

2.1.2 Zlepšení přesnosti brousicího stroje

V případě, že brousicí stroj vykazuje hodnoty ovlivňující celý výsledek obrábění je nutno provést určité kroky k nápravě. Jednou z možností je pořízení nového stroje. V případě menší ekonomické náročnosti je možnost generální opravy, která zajistí obnovu opotřebovaných částí stroje. Mezi prováděné opravy patří⁶:

- oprava lože a stolu – u loží se provádí přefrézování a následné zaškraškrabání, stoly se přebroušují (vše je prováděno v souladu s protokolem přesnosti),
- přeměření přímosti kuličkových šroubů – v případě dobrých hodnot přímosti se kuličkové šrouby přebroušují, dále se vymění matice včetně nových kuliček a převaděčů,
- oprava pracovního vřeteníku: oprava vřetene, výměna ozubených kol a dalších dílců (po opravě musí být proveden záběh, dle předepsaného režimu),
- oprava brousicího vřeteníku: oprava vřetene, pánví a axiálního uložení, přebroušení vodících ploch (po opravě musí být proveden záběh, dle předepsaného režimu),
- oprava desky pod brousicí vřeteník – provádí se přebroušení všech vodících ploch a kompletní výměna valivého vedení přísuvu, dále výměna ložisek, šroubu a matice příčného posuvu vymezených pružin,
- u koníku je provedeno přebroušení pinole,
- oprava mazacího systému,
- zavádění moderních řídicích systémů.

2.1.3 Broušící stroje

Každý obráběcí stroj je identifikován svými technologickými parametry (rozměrové, výkonnostní, funkční). Podrobná charakteristika každého obráběcího stroje je uvedena v jeho pasportu. Parametry jsou také uváděny v podkladech a katalozích obráběcích strojů.

Jednotlivé parametry a hodnoty stroje mají přímo vliv na konečný výsledek operace broušení. Důležité je z pohledu technologie broušení volba správného broušícího stroje na danou operaci.

Pro hrubé broušení a pomocné práce je v praxi nejvíce využívána dílenská dvoukotoúčová bruska obr (2.1). Neumožňuje dosažení přesných tvarů, rozměrů a dosažení kvalitního povrchu.

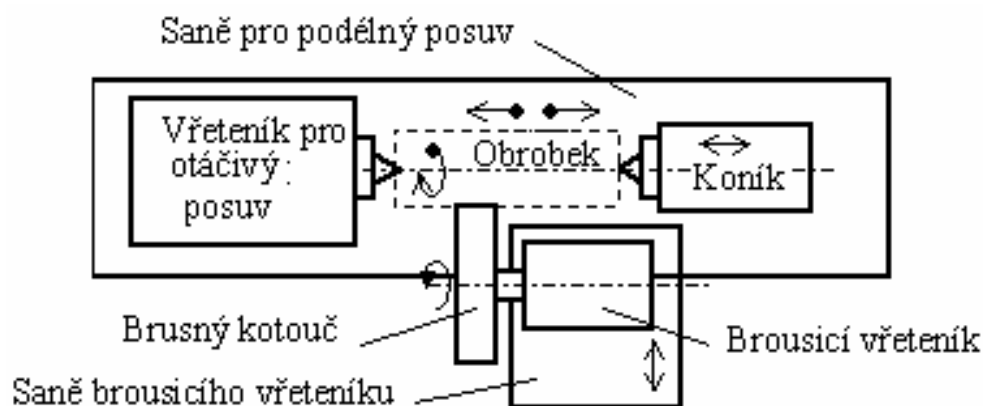


obr.2.1 Dvoukotoúčová bruska GDS 175 (19)

Brusky pro přesné broušení jsou převážně využívány pro dokončovací práce po soustružení, frézování, nebo jiné operaci. Zde je možno dosáhnout vysokých rozměrových přesností a jakostí povrchu. Mezi brusky pro přesné broušení patří brusky hrotové, bezhroté, na díry, rovinné a speciální¹.

Hrotové brusky

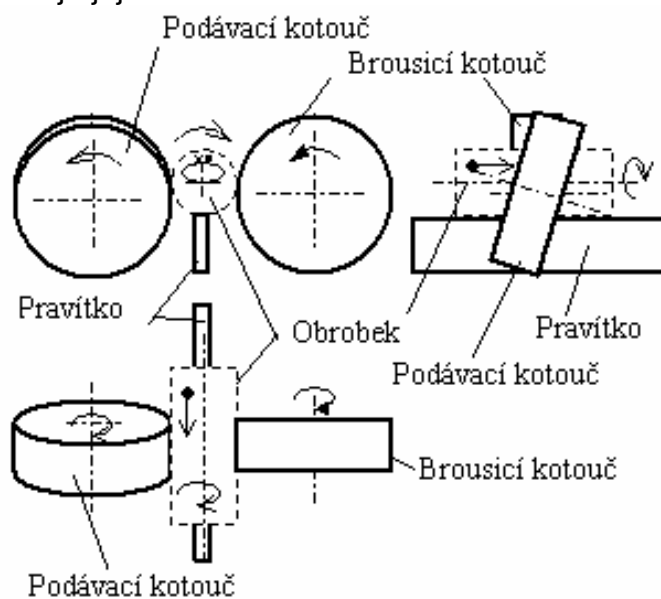
Hrotové brusky jsou využívány pro broušení rotačních ploch, které mohou být válcové, kuželové a čelní. V některých případech jsou využívány pro broušení děr. Obrobek je upnut mezi hroty. Jeden z hrotů je uložen ve vřeteníku, který obrobku dává rotační pohyb. Druhý hrot je uložen v koníku, který je možno délkově stavit dle délky obrobku. Vřeteník i koník jsou uloženy na stole, který se pohybuje v podélném směru po loži. Broušící vřetení je uložen v zadní části stojanu proti loži a je možno jej natáčet obr (2.2). Díky tomu lze vytvářet tvary strmých kuželů. Pro broušení táhlých kuželů je využívána možnost natáčení horní části stolu⁷.



obr.2.2 Hrotová bruska (7)

Bezhroté brusky

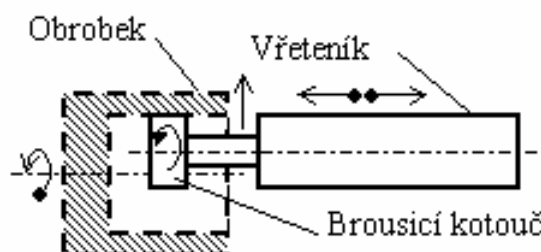
Stroj je využíván pro broušení obrobků válcového tvaru z vnějšku a v některých případech i pro broušení vnitřních rotačních ploch. Na obrobku mohou být úzké drážky, ale nikoliv vnější osazení. Je možno využít zápichového i průběžného broušení. Bruska má dva vřeteníky. Na jednom je umístěn brousící kotouč a na druhém podávací kotouč. Každý z vřeteníků má svůj vlastní náhon. Otáčky brousícího vřetene jsou konstantní a otáčky vřetene podávacího kotouče jsou volitelné. Pomocí přestavování podávacího vřeteníku po vedení lože, lze nastavit potřebný průměr broušení. Osa podávacího kotouče je mírně skloněna vůči obrobku i ose brousícího kotouče. Obvodová rychlost brousícího kotouče je výrazně vyšší než rychlost podávacího kotouče. Pomocí podávacího kotouče je obrobek podpírán ze zadní strany a v důsledku své pootočené polohy mu uděluje šroubovitý pohyb. To umožňuje obrobku procházet mezi oběma kotouči a být postupně obrušován obr (2.3). Výhodou bezhrotých brusek je jejich vhodná možnost automatizace⁷.



obr.2.3 Bezhrotá bruska (7)

Brusky na díry

Brusky na díry mohou být v několika provedeních. Mohou být sklíčidlové, planetové a bezhroté. Největší využití mají brusky sklíčidlové. Obrobek je upnut do sklíčidla, které se díky uložení na příčných saních může pohybovat dle potřeby. Brousicí vřeteno vykonává axiální posuvový pohyb a vstupuje do díry z volné strany brusným kotoučem obr (2.4). Z důvodu malého průměru brusného kotouče, je nutné pro zajištění optimální řezné rychlosti, velmi vysokých otáček⁷.

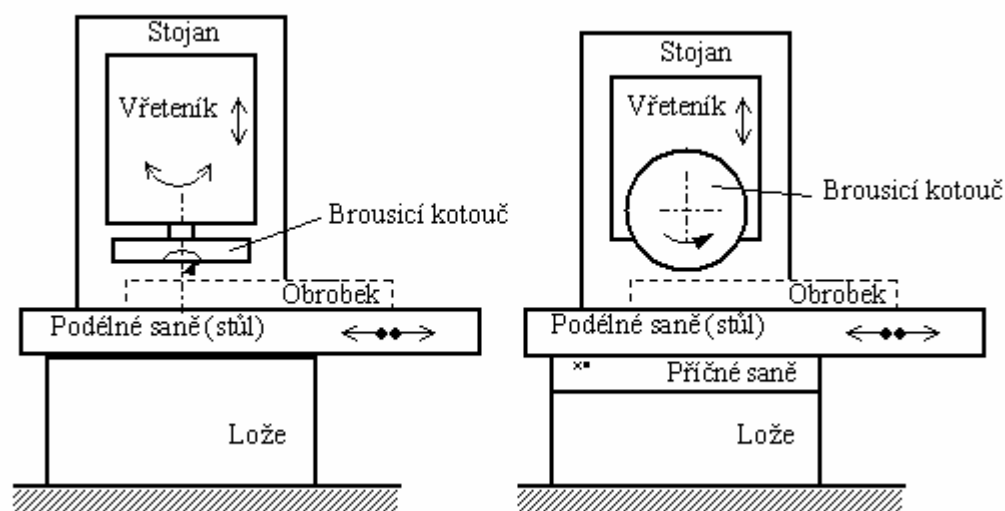


obr.2.4 Bruska na díry (7)

Rovinné brusky

Rovinné brusky mohou být svislé, nebo vodorovné obr (2.5). Vodorovné rovinné brusky se používají v kusové a malosériové výrobě pro obrábění menších obrobků. Obrobek je nejčastěji upnut pomocí elektromagnetické desky na pracovním stole. Ten je uložen na podélných saních které mohou konat posuv. Příčné saně jsou využívány k přestavování obrobku, ke kterému dochází v okamžiku úvrati podélného stolu. Ve svislém směru se pohybuje nástroj vůči obrobku posouváním vřeteníku.

Svislé rovinné brusky dosahují horších parametrů kvality obroušených ploch, než brusky vodorovné. Charakterizují se vysokými výkony a svislou osou brousicího vřetene. Obrobek je upnut na pracovním stole, který koná pouze přímočarý vratný pohyb. Z tohoto důvodu musí být šířka kotouče větší jak šířka broušené plochy⁷.



obr.2.5 a – Svislá rovinná bruska
b – Vodorovná rovinná bruska (7)

Speciální brusky

K téhle skupině brusek patří např.: brusky pro broušení klikových hřídelů, brusky na broušení ozubení, brusky na ostření nástrojů, brusky pro broušení závitů.

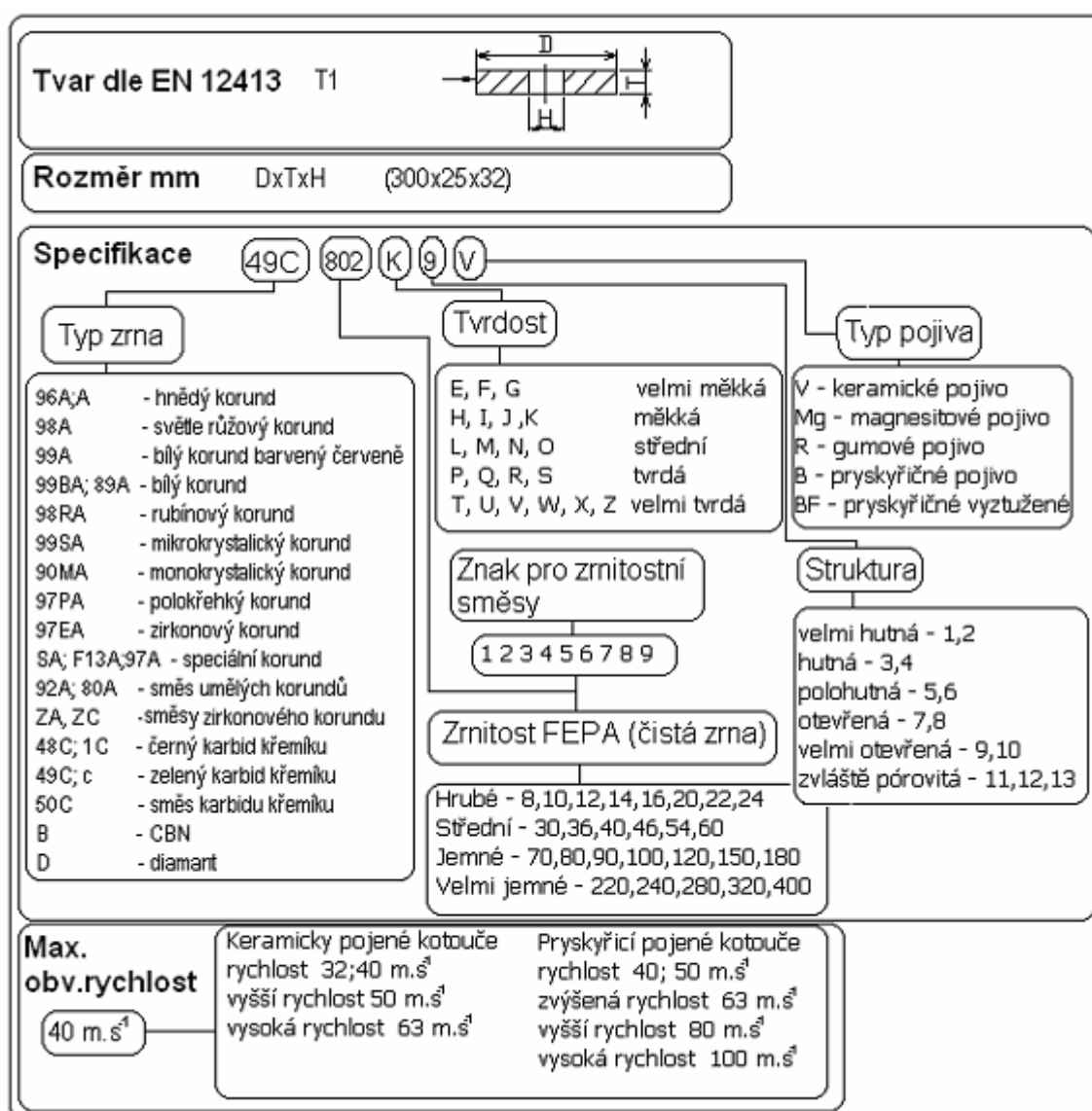
Jedním s trendů v oblasti využití brousicích strojů, který se rozvíjí je tzv. metoda quickpoint. Je to hospodárné a vysokorychlostní broušení, které přináší velký nárůst ve výkonnosti. Na stroji využívajícím téhle metody obr (2.6) se brousí jedním, jen několik milimetrů širokým CBN nebo diamantovým kotoučem s velkou odolností proti opotřebení. V dnešní době je možno využívat strojů, které používají více brousicích kotoučů. Tahle moderní metoda nepracuje s čárovým stykem brousicího kotouče s obrobkem, ale s bodovým. Toho je dosaženo natočením osy brousicího kotouče k horizontální ose obrobku, čímž se redukuje kontaktní zóna mezi brousicím kotoučem a obrobkem⁸.



obr.2.6 Brousicí stroj využívající metodu quickpoint (8)

2.2 Nástroj

Brousicí nástroj je tvořen brousicími zrny, která jsou pevně vázána v tuhá či pružná tělesa. Nástroj může mít různé tvary a rozměry. Mezi užívané brousicí nástroje můžeme řadit: kotouče (brousicí, řezací, drážkovací) , brousicí tělíska, superfinišovací a honovací kameny, brousicí a obtahovací kameny a segmenty, brousicí pilníky, brousicí plátna a papíry. Nejčastěji jsou využívány brousicí kotouče, které jsou na trhu dostupné ve velmi rozmanité nabídce tvarů a vlastností obr (2.7). Mezi používané brousicí materiály patří materiály na bázi karbidu křemíku SIC (karbidsilicium, karborundum) a na bázi kysličníku uhličitého Al_2O_3 (technický oxid hlinitý - elktrit, umělí korund). Dále jsou používány supertvrdé materiály (diamant – DIA, kubický nitrid boru – CBN) . Supertvrdé nástroje umožňují výrobu brusných nástrojů s výbornými vlastnostmi (jemná struktura, vysoká odolnost proti opotřebení a mimořádná stálost tvaru a řezných vlastností)¹⁰.



obr.2.7 Značení rozměru, tvarů a specifikace brusných kotoučů (11)

2.2.1 Vliv brousicího kotouče na výsledné parametry přesnosti

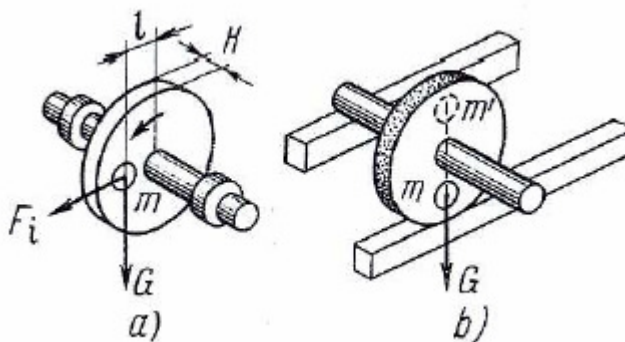
Kvalitu výsledku broušení může z pohledu brousicího kotouče ovlivňovat několik parametrů (typ brusiva, vyvážení, orovnění).

Pro správnou volbu brusného materiálu dodržujeme několik zásad¹²:

- pro broušení materiálů se sklonem k mazlavosti (měď, hliník) použijeme měkký a hrubý kotouč,
- v případě obrábění tvrdého materiálu volím měkký kotouč,
- pro odebrání větších úběrů se volí hrubé zrna brousicího kotouče,
- u materiálů citlivých na změnu teplot volím měkký kotouč.

Pro dosažení kvalitního povrchu, vysoké přesnosti rozměrů a ke snížení opotřebení ložisek brousicího vřetene stroje je nutné brousicí kotouč vyvážit. Princip vyvažování spočívá v uspořádání hmoty brousicího kotouče tak, aby se jeho geometrický střed shodoval s jeho těžištěm. Díky vyvážení se eliminují nevyvážené síly, které brání v klidném a správném chodu brousicího kotouče. Při práci s nevyváženým kotoučem dochází k vibracím, které při vysokých otáčkách brousicího kotouče negativně ovlivňují přesnost a funkci brusky.

Brousicí kotouče, které mají malou šířku a rotující hmoty téměř v jedné rovině je možno vyvažovat staticky. Těžiště nevyvážené hmoty vytváří vzhledem k ose rotace statický moment, který otáčí kotoučem tak, aby těžnice procházela středem otáčení. Plného vyvážení se dosahuje odebráním přebytečné hmoty m , nebo přidáním stejného objemu hmoty m' do stejné vzdálenosti na protilehlou stranu obr (2.8).



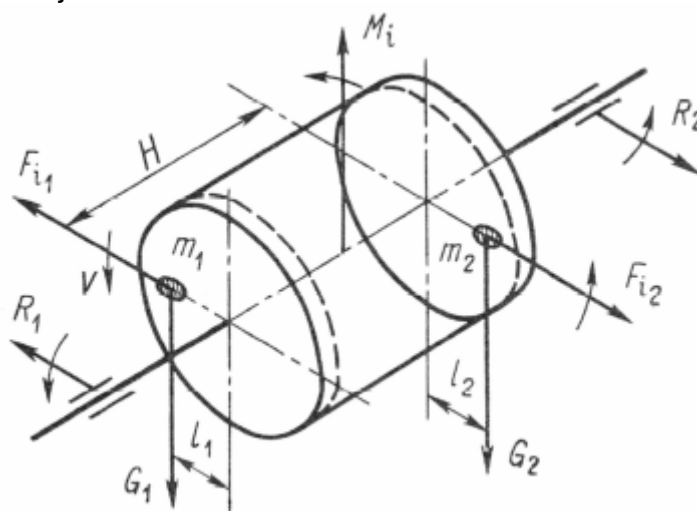
obr.2.8 Nevyvážený brousicí kotouč
a – nevyvážená hmota mimo těžiště
b – vyvážení hmoty (9)

Velikost nevyvážené síly⁹

$$F_i = m \cdot \omega^2 \cdot l \quad (2.1)$$

$$F_i = m \left(\frac{v_k}{R} \right)^2 l_e = \frac{G}{g} \left(\frac{\pi \cdot n_s}{30} \right)^2 l_e \quad (2.2)$$

Pro případy, kdy je $H > 0,1D$ je statické vyvažování nedostačující, protože nevyváženost hmoty je obvykle rozložena ve více rovinách. V tomto případě je použito vyvažování dynamické obr (2.9), které se provádí na vyvažovacích strojích⁹.

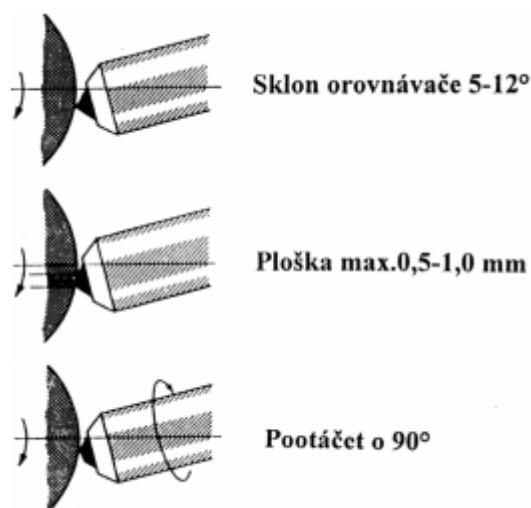


obr.2.9 Znáznornění nevyvážených hmot m_1 a m_2 ve dvou různých rovinách broušícího kotouče (9)

Pro zajištění správné funkce broušícího kotouče je prováděno orovnávaní pracovní části broušícího kotouče obr (2.10). Broušící zrna mohou efektivně pracovat jen v případě, že jsou ostrá a mají nezbytnou mezeru pro třísky. V průběhu broušení dochází k otupení zrn a k zacpání mezery. Takto otupený a zanesený kotouč ztrácí své původní vlastnosti a tím i schopnost dodržet požadované parametry přesnosti a drsnosti broušené plochy. Broušící kotouč v daném případě neřeže, ale "pálí". Orovnaní se odebere malá vrstva brusiva (0,01 – 0,05 mm) a tím se obnoví původní parametry broušícího kotouče. Pro účely orovnávaní se používá tří druhů nástrojů: keramické orovnávače, mechanické orovnávače, diamanty.

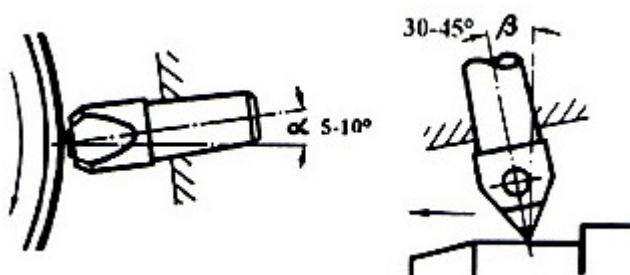
Pro správné orovnaní nebroušenými orovnávači je nutné dodržet určité náležitosti procesu orovnávaní:

- špička orovnávače musí být v ose, nebo mírně pod osou kotouče,
- osa orovnávače musí být v úhlu 5 až 12 stupňů,
- orovnávač musí být pravidelně otáčen kolem vlastní osy o 90 stupňů.



obr.2.10 Správné použití orovnávače (nebroušený) (13)

Pro střechovitě broušené orovnávače je nutnost tuhého upnutí a intenzivního chlazení. V průběhu procesu musí být osa orovnávače skloněna pod úhlem 5 až 10 stupňů obr (2.11)¹³.



obr.2.11 Správné použití orovnávače (broušený) (13)

V dnešní době jsou systémy vyvažování a orovnávání brousicích kotoučů běžnou součástí brousicích strojů.

2.3 Řezné podmínky

Výsledné parametry broušené plochy jsou ovlivněny volbou řezných podmínek procesu. V současnosti se klade velký důraz zejména na zvyšování rychlostí, protože při navýšení rychlosti broušícího kotouče dochází ke snižování řezných sil a poklesu zbytkových napětí v povrchových vrstvách broušených obrobků. Dále se snižuje velikost opotřebení broušícího kotouče a tím se zvyšuje jeho trvanlivost. Dojde ke zlepšení drsnosti a povrchu obrobku. Dalším příznivým faktorem při zvyšování rychlostí je zvýšení hodnoty úběru materiálu. Při zvýšení rychlosti o desítky m.s^{-1} může dojít až k několikanásobnému zvětšení hodnoty úběru, při zachování parametrů přesnosti. Při použití řezné rychlosti až 90 m.s^{-1} s vhodným řezným olejem pod zvýšeným tlakem (1 MPa) je možno dosáhnout úběru, který se blíží hodnotám úběru nástrojů s definovaným břitem.

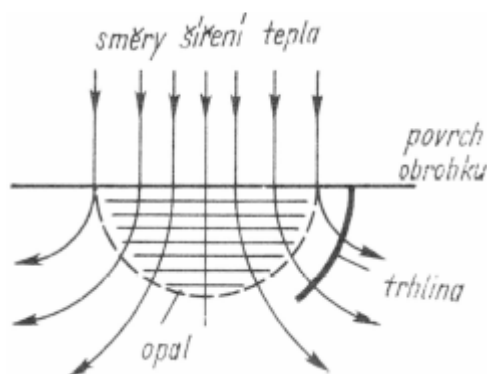
Při zvýšených rychlostech broušícího procesu dochází k zvýšení obvodové rychlosti kotouče a výkonu úběru. V důsledku zvyšování rychlosti a výkonu dojde k zvyšování tepelného namáhání v povrchu obrobku. Při zvyšování obvodové rychlosti cca do 40 m.min^{-1} dochází k prudkému poklesu teplot. Snížení teplot je způsobeno zkrácením doby působení jednotlivých zdrojů tepla v oblasti styku kotouče a obrobku. Při dalším navýšování obvodové rychlosti se značná část tepla odvádí do třísek, proto dochází k poklesu teplot při vyšších rychlostech obrobku a broušícího kotouče. Z tohoto důvodu je významný poměr rychlosti řezného kotouče a obvodové rychlosti obrobku q i při vysokých rychlostech. Pro dosažení největšího úběru bez negativního tepelného ovlivnění je nutné použít vhodného chladícího prostředku a optimálního poměru q .

Pro účely chlazení se používají speciální syntetické kapaliny pro broušení, které neobsahují minerální olej a netvoří s vodou bílé emulze, ale čiré transparentní roztoky. Pro houževnaté materiály při velkých rychlostech, se používají řezné oleje.

V případě působení okamžitých vysokých teplot broušení a vzniku opalů může dojít k tvorbě trhlin v povrchové vrstvě obrobku obr (2.12) a obr (2.13). Vznik trhlin je zapříčiněn vlivem fázových a strukturních přeměn, které způsobují změnu objemu materiálu. Změny mají v povrchových vrstvách různou hloubku a intenzitu. Objemové změny jsou příčinou vzniku vnitřních pnutí různé velikosti a znaménka. Pokud převyšují mez pevnosti broušeného materiálu, způsobují vznik trhlinek. Trhliny často vznikají na okrajích opalů a zpravidla se nacházejí v pásnu, které není ovlivněno opalem. Nebezpečí trhlin tkví v koncentraci napětí, které může vlivem zatížení iniciovat šíření trhliny, nebo vznik dalších trhlin^{9,14,15}.



obr.2.12 Trhliny po broušení (9)



obr.2.13 Schéma vzájemného výskytu opalu a trhlin (9)

Jakost povrchu dále ovlivňuje velikost úběru. Při zvyšování hodnoty úběru klesá jakost povrchu. Parametry povrchu klesají v důsledku zvětšující se tloušťky třísky při zvyšování rezného výkonu. Navýšení obvodové rychlosti kotouče zmenšuje tloušťku třísky a tím vyrovnává zhoršení kvality v důsledku zvýšení rychlosti.

Dále jakost povrchu ovlivňuje množství odebraného materiálu (specifické množství materiálu, které je vztaženo na 1 mm šířky brousícího kotouče mm^3/mm).

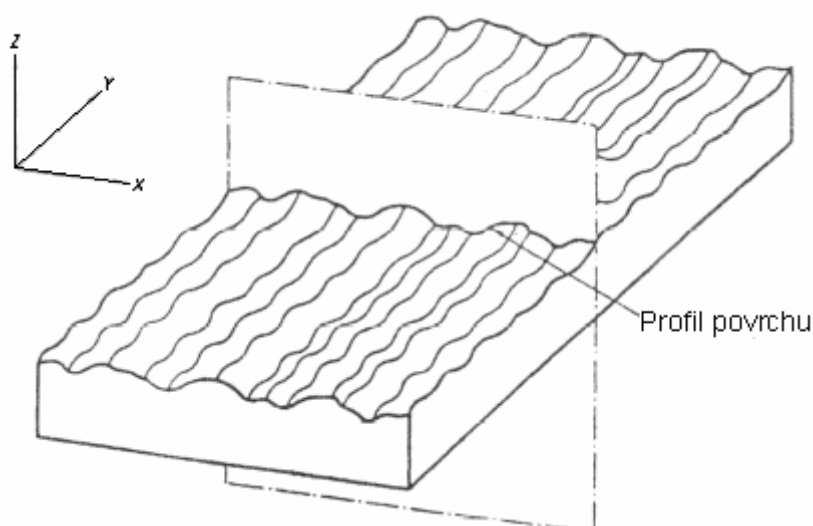
Velikosti přísmvu a posuvu jsou při dané rezné rychlosti důležité pro celkový výkon obrábění. Velikosti se volí s ohledem na druh operace broušení a na jakost brousícího kotouče, tak aby bylo dosaženo optimálních parametrů úběru materiálu^{9,14,15}.

3 PARAMETRY PŘESNOSTI BROUSICÍHO PROCESU A JEJICH INTERPRETACE

3.1 Parametry kvality povrchu broušených ploch

Každá používaná metoda obrábění povrchových ploch součásti zanechává na povrchu materiálu nerovnosti, které mají vliv na pozdější funkci těchto ploch. Mezi faktory ovlivňující výslednou drsnost povrchu patří: řezná rychlost, tvar nástroje, působení řezného materiálu a jeho opotřebení.

Prostorový útvar, který představují nerovnosti povrchu je velmi složité posuzovat. Proto se posuzování struktury povrchu řeší využitím redukce do roviny řezu rovinou postavenou kolmo k povrchu. Na rovině řezu získáme profil obr (3.1), dle kterého je možno posuzovat strukturu povrchu. Dle rozteče příslušných nerovností zkoumaného povrchu je struktura povrchu členěna na tři základní složky (složka z nejmenší roztečí tvořící drsnost povrchu, dále vlnitost povrchu a složku s největší roztečí nerovností určenou základním profilem)^{16,17}.



obr.3.1 Profil povrchu (16)

Dle normy ČSN EN ISO 4287 jsou definovány tři geometrické parametry povrchu:

- parametr **P** – parametr vypočítaný ze základního profilu,
- parametr **R** – parametr vypočítaný z profilu drsnosti,
- parametr **W** – Parametr vypočítaný s profilu vlnitosti.

Dle normy ČSN EN ISO 4287 jsou také definovány parametry profilu povrchu:

- výškové parametry (výstupky a prohlubně),
- výškové parametry (průměrné hodnoty souřadnic),
- délkové parametry,
- tvarové parametry,
- křivky a odpovídající parametry.

Mezi pozorované parametry profilu povrchu patří hodnoty R_z (největší výška profilu) obr (3.2), R_a (průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu) obr (3.3), R_c (průměrná výška prvků profilu), R_t (celková výška profilu), R_{Sm} (průměrná šířka prvků profilu), R_p (největší výška výstupku profilu), R_v (největší hloubka prohlubně profilu), R_{sk} (šikmost posuzovaného profilu), R_{ku} (špičatost posuzovaného profilu), R_q (průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu) ^{16,17}.

Hodnota R_z je určena jako součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky.



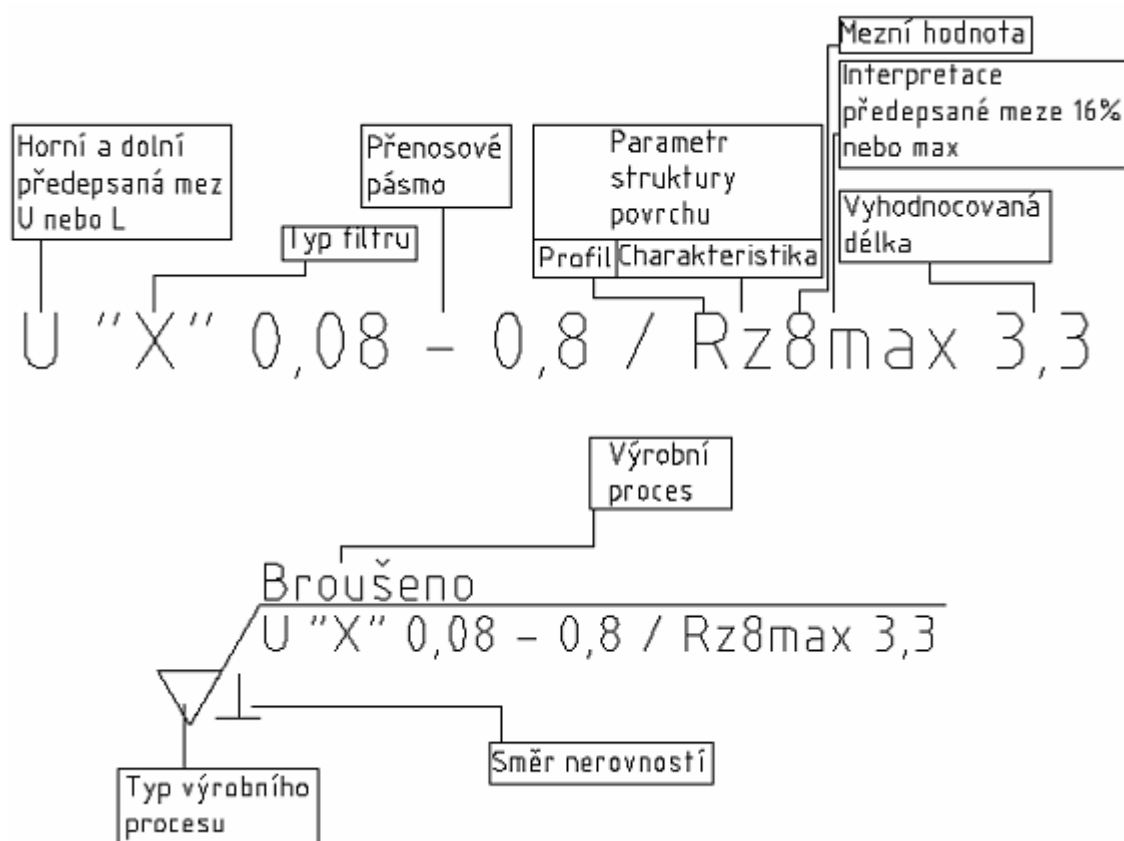
obr.3.2 Grafické znázornění parametru R_z (17)

Hodnota R_a je určena jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky ¹⁷.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (3.1)$$

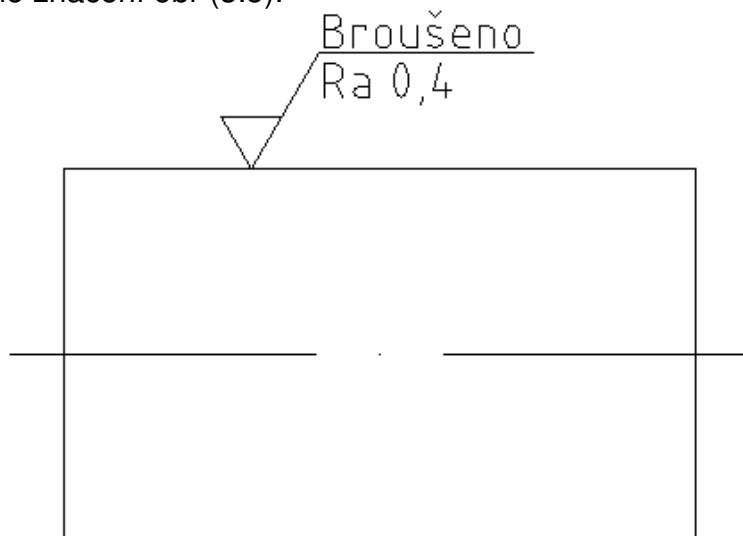


obr.3.3 Grafické znázornění parametru Ra (17)



obr.3.4 Značení struktury povrchu v technické výrobní dokumentaci (18)

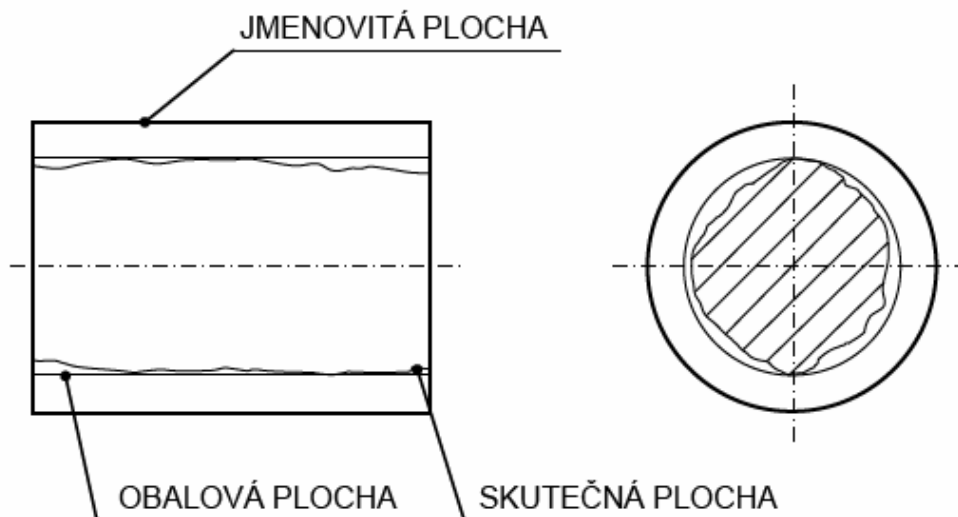
V praktických podmínkách se na výkresech s výše uvedeným označením struktury povrchu nesetkáváme. V praxi je nejčastěji používáno značně zjednodušené značení obr (3.5).



obr.3.5 Značení struktury povrchu

3.2 Přesnost broušených ploch

Přesnost broušených ploch můžeme rozdělit na přesnost tvaru, rozměru a polohy. Dosaženou přesnost vymezují parametry obráběcího stroje, tuhost soustavy stroj – nástroj – obrobek a další faktory, které působí nepřímo na technologický proces. Úchyly (rozměru, tvaru, polohy) jsou definovány pomocí tzv. obalových čar, nebo obalových ploch obr (3.6)^{16,17}.



obr.3.6 Grafické znázornění obalové plochy(20)

3.2.1 Přesnost rozměrů

Úchylku rozměrů je možno charakterizovat jako maximální dovolený rozdíl mezi plochou obalovou a plochou jmenovitou. Pro určení tolerance přesnosti rozměrů jsou používány toleranční stupně IT, toleranční pole děr a hřídelů, nebo mezní úchylky. Přesnost rozměrů je důležitá zejména z hlediska následné montáže dílů. Měření rozměrů řadíme k nejčastěji měřeným hodnotám ve strojírenství. Pro jeho realizaci je možno využít širokou škálu měřicích zařízení. Délková měřidla používaná ve strojírenství: koncové měrky, pevná a mezní měřidla (kalibry), posuvná měřítka a mikrometrická měřidla, měřicí přístroje a měřidla s převodem, měřicí přístroje optické, měřicí stroje délkové, mikroskopy a profil–projektory, měřidla na měření malých děr, měřidla na měření velkých rozměrů, aktivní sledovací měřidla, více–rozměrová měřidla, kontrolní a třídící automaty, měřicí stanice, souřadnicové měřicí stroje^{16,17}.

3.2.2 Přesnost tvaru a polohy

Geometrická úchylka tvaru – max. dovolená vzdálenost bodů skutečné plochy od plochy obalové.

Geometrická úchylka polohy – max. dovolená vzdálenost mezi dvěma, nebo více obalovými plochami, čarami nebo osami.

Tolerance tvaru můžeme obecně rozdělit dle ploch na kterých se tvarová tolerance měří. Pro rovinné plochy určujeme přímost (na profilu) a rovinnost (na ploše). Pro rotační plochy určujeme hodnoty kruhovitosti (na profilu) a válcovitosti (na ploše). V posuzování tvarové přesnosti je využíváno kritérium obalových prvků.

Obalový prvek je možno popsat jako čáru, nebo plochu:

- dotýkající se hodnoceného prvku (profilu, plochy),
- mající jmenovitý tvar,
- dotýkající se hodnoceného prvku vně materiálu.

Úchylka tvaru může být stanovena jako minimální z maximálních vzdáleností hodnoceného prvku od prvku obalového (vhodné z technologického hlediska). V některých případech lze využít středního prvku (vhodné při použití výpočetní techniky).

V mnoha případech jsou funkční plochy s velmi vysokými požadavky na přesnost plochy rotační a rovinné.

Úchylka kruhovitosti je měřena v rovině kolmé na osu kontrolované rotační plochy. Počet měření a poloha rovin měření je stanoven normou v závislosti na délce válcové plochy poměru délky a průměru. Pro hodnocení kruhovitosti je nutné získat profil rotačního objektu v rovině kolmé na jeho osu. Takto získaný profil je nutné porovnat s kružnicí ideálního profilu, jejíž polohu vůči posuzovanému profilu je nutno přesně specifikovat. Úchylka kruhovitosti

je pak vyjádřena radiálním nesouladem profilu rotačního objektu s kružnicí ideálního profilu.

Pro měření úchylek rovinnosti platí, že nelze provést úplné měření úchylek rovinnosti. Z naměřených hodnot úchylek tvaru zvolených bodů na ploše se vytvoří matematický model plochy. Z daného matematického modelu je možno provést vyhodnocení úchylek rovinnosti (grafickými metodami od obalové roviny, výpočtem od střední nebo obalové roviny, na mechanickém analogovém modelu od obalové roviny, vyhodnocení měřené plochy vzhledem k zjednodušené základně).

Pro měření úchylek polohy a také tvarů je nutné podrobné stanovení požadavků a podmínek, protože definice jednotlivých druhů úchylek jsou značně složité. Měřením odpovídajících dílčích úchylek lze nahradit přímé měření úchylek tvaru a polohy.

Měřicí metody můžeme rozlišovat dle shody měřicí metody s odpovídající definicí daných úchylek na metody úplné a metody zjednodušené. Úplnými metodami rozumíme metody, které odpovídají definici úchylky dle normy. Metodami zjednodušenými rozumíme metody, které v plném rozsahu neodpovídají definici úchylky. Použití zjednodušených metod je vhodné v případech když:

- nejsou k dispozici měřidla pro úplné měření,
- jsou vysoké náklady při uplatnění úplných metod,
- je možnost získat dostatečné informace i zjednodušenou metodou.

Při použití zjednodušených metod musí být splněna podmínka stanovení systematické chyby příslušné metody^{16,17}.

Tab.3.1 Tolerance geometrické přesnosti¹⁶

Název		Zkratka ČSN	Zkratka ISO	Značka
Tolerance se vztahuje k jednomu prvku				
Tolerance tvaru	Přímost	TFL	ST STR	—
	Rovinnost	TFE	FL FLA	
	Kruhovitost	TFK	CR CIR	
	Válcovitost	TFZ	CY CYL	
	Profilu podélného řezu	TF P	V normě ISO neobsaženo	
Tolerance vztahující se ke dvěma nebo více prvkům				
Tolerance směru	Sklon	TPN	AN ANG	
	Kolmost	TPR	PE PER	
	Rovnoběžnost	TPA	PA PAR PRL	
	Různoběžnost	TPX	V normě ISO neobsaženo	
Tolerance polohy	Souosost	TPC	CA CAX CAO	
	Soustřednost	-	CO CON	
	Umístění	TPP	PO POS	
	Souměrnost	TPS	SY SYM	
Tolerance házení	Kruhové házení obvodové	TCR	CR CRO	
	Kruhové házení čelní	TCA	AR ARO	
	Házení v daném směru	TCD	V normě ISO neobsaženo	
	Celkové házení obvodové	TCTR	TR TRO	
	Celkové házení čelní	TCTA	V normě ISO neobsaženo	
Tolerance vztahující se k jednomu nebo ke dvěma (a více) prvkům				
Tolerance tvaru	Tvaru plochy	TCE	PS PFS	
	Tvaru čáry	TCL	PL PFL	

4 KONKRETIZOVANÉ TECHNOLOGICKO EKONOMICKÉ VÝSTUPY PŘESNOSTI BROUSICÍHO PROCESU

V rámci projektu byla provedena analýza parametrů přesnosti brousicího procesu, v závislosti na změně technologických parametrů brousicího procesu. Experiment byl proveden v dílenských prostorách FSI VUT Brno.

4.1 Metodika experimentu

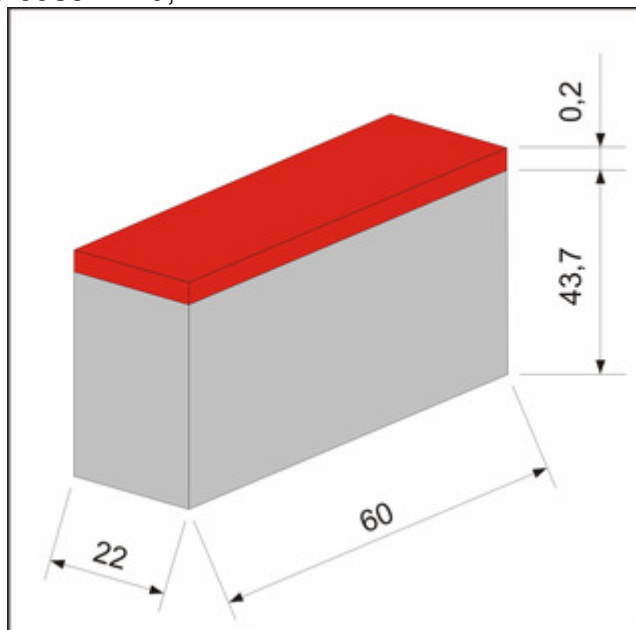
4.1.1 Zkušební vzorek

Počet vzorků – 10 kusů

Materiál vzorků – ocel 11600

Rozměry vzorku (d x š x v) – 60 x 22 x 43,9

Přídavek na broušení – 0,2



obr.4.1 Rozměry broušeného vzorku

4.1.2 Obráběcí stroj

Stroj – Bruska rovinná vodorovná BPH 320 A

Upínací plocha stolu – 320 x 1000 mm

Max. délka broušení – 1000 mm

Max. výška broušení – 350 mm

Podélný posuv – 1060 mm

Příčný posuv – 350 mm

Celkový příkon stroje – 15,4 kVA

4.1.3 Brousicí kotouč

Označení brousicího kotouče – 1 – 230 x 27 x 76 -A36L5V - 35 m.s⁻¹
(Plochý kotouč, korundové zrno, středně tvrdý, polohutná struktura, keramické pojivo)

4.1.4 Řezné podmínky

Otáčky brousicího kotouče – $n_s = 2097 \text{ min}^{-1}$

Radiální posuv – $f_r = a_e = 0,015 \text{ mm}$

Dráha stolu – $l = 820 \text{ mm}$

Tangenciální rychlost posuvu stolu

$$v_{ft} = \frac{l}{t} = \frac{0,82}{\frac{2,6}{60}} = 18,923 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

Řezná rychlost

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} = \frac{\pi \cdot 230 \cdot 2097}{60 \cdot 1000} = 25,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Ekvivalentní tloušťka broušení

$$h_{eq} = \frac{v_{ft}}{60 \cdot v_c} a_e = \frac{18,923}{60 \cdot 25,3} 0,015 = 1,87 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

Poměr rychlosti

$$q = 60 \frac{v_c}{v_{ft}} = 60 \frac{25,3}{18,923} = 80,22$$

Průřez odebírané vrstvy

$$A = b_D \cdot h_{eq} = 22 \cdot 1,87 \cdot 10^{-4} = 4,114 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$$

4.1.5 Metodika měření

Vyšetřování parametrů přesnosti brousicího procesu v závislosti na změně technologických parametrů bylo prováděno na broušeném povrchu deseti zkušebních obr (4.2). Každý z deseti použitých vzorků měl přesné výchozí rozměrové parametry obr (4.1). Jmenovitá hodnota obráběného rozměru byla 43,700 mm s přídavkem na obrábění 0,200 mm. Jako brousicí metoda bylo zvoleno rovinné obvodové radiální broušení na rovinné brusce BPH 320 A. Prvních pět vzorků bylo broušeno bez vyjiskřování. Dalších pět vzorků bylo broušeno s vyjiskřováním. Pro zajištění správné funkce brousicího kotouče bylo na začátku procesu provedeno orovnění aktivní plochy kotouče. Další orovnění se provedlo po obroušení pěti vzorků obr (4.4).

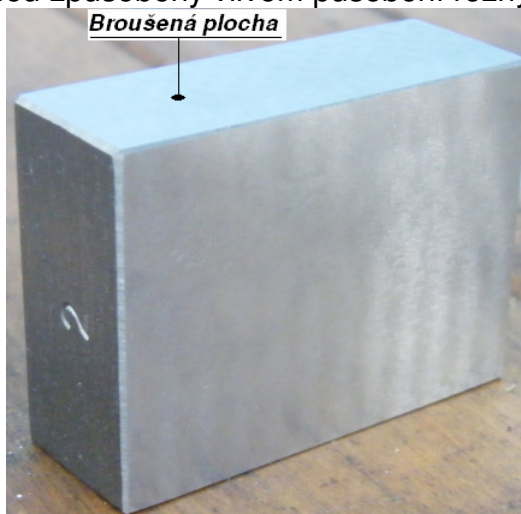
Po obroušení všech deseti vzorků bylo pomocí digitálního mikrometru (Mitutoyo 25 - 50 mm) provedeno měření obrobeného rozměru vzorku. Od zjištěné hodnoty byla odečtena jmenovitá hodnota u_j a z tohoto rozdílu hodnot bylo možné zjistit úchylku rozměru u_R .

Výpočet úchytky rozměru u_R

$$u_R = u - u_j \quad (4.1)$$

Dále byly zjištěny parametry povrchu (průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu – R_a , největší výška profilu – R_z) pomocí přístroje Perthometer M2 obr (4.5) a obr (4.6). Měření bylo u každého vzorku prováděno ve středu obráběné plochy. Naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulek, statisticky zpracovány (pro statistické zpracování bylo předpokládáno normální rozdělení) a převedeny do grafické podoby.

Vyjiskřování – používá se pro zpřesnění rozměrů broušené plochy. Brousicím kotoučem se obrobek několikrát přebrousí bez posuvu, čímž se vyrovnají pružné deformace v soustavě stroj – nástroj – obrobek – upínač. Pružné deformace jsou způsobeny vlivem působení řezných sil.



obr.4.2 Broušený vzorek



obr.4.3 Broušení vzorku

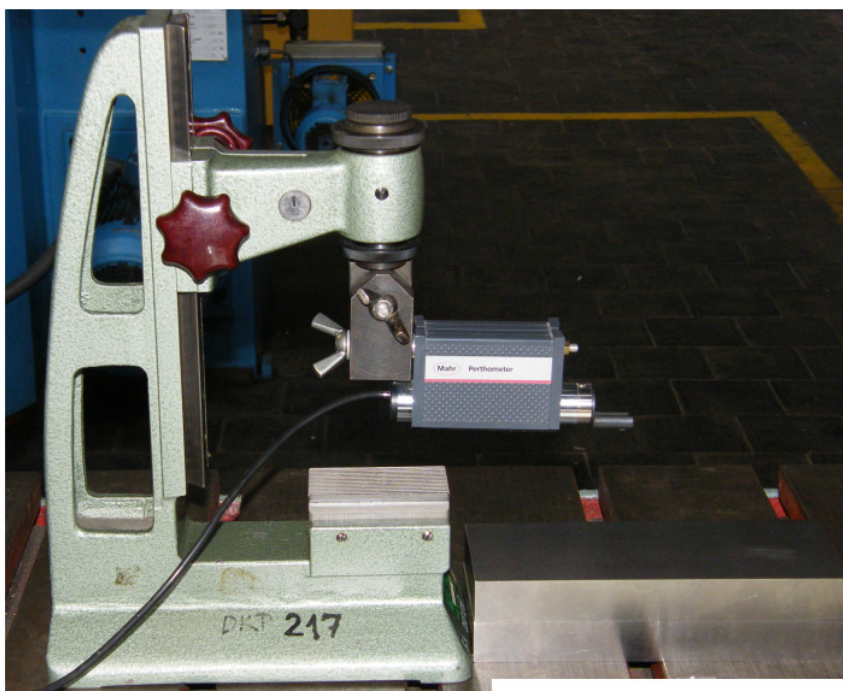


obr.4.4 Orovnávání aktivní části brousicího kotouče

Perthometer M2

Technické parametry:

- měřicí rozsah do 150 μm ,
 - měrná jednotka $\mu\text{m}/\mu\text{in}$ volitelně,
 - standardy DIN/ISO/JIS a CNONO (Motif) volitelně,
 - snímaná délka dle DIN EN ISO 4288/ASME B461: 1,75 mm; 5,6 mm; 17,5 mm (0,07 in; 0,22 in; 0,7 in); a dle EN ISO 12085: 1 mm; 2 mm; 4 mm; 8 mm; 12 mm; 16 mm,
- 
- obr.4.5 Perthometer M2 (18)
- dílčí měřené délky nastavitelné 1 do 5,
 - automatický výběr filtrů a snímané délky odpovídající standardů,
 - fázově korektní profilový filtr dle DIN EN ISO 11562,
 - cutoff 0,25 mm/0,8 mm/2,5 mm (0,01 in/0,032 in/0,100 in),
 - zmenšený cutoff volitelně,
 - parametry dle DIN/ISO/SEP: Ra, Rz, Rmax, Rp, Rq, Rt, R3z, Rk, Rvk, Rpk, Mr1, Mr2, Mr, Sm, R_{Pc}; as per JIS: Ra, Rz, Ry, Sm, S, tp; Motif Parameters: R, Rx, Ar, W, CR, CF, CL,
 - tolerance jsou ukazovány na displeji a zaznamenávány,
 - automatické nebo manuální nastavení měřítka,
 - tisk R-profilu (ISO/JIS), P-profil (Motif),
 - datový výstup měřených hodnot vč. času,
 - integrovaná paměť pro 200 naměřených hodnot,
 - blokování nastavení proti nechtěnému zásahu s možností ochrany¹⁸.



obr.4.6 Perthometer M2 – Měřicí zařízení upnuto v pomocném držáku

4.2 Naměřené hodnoty experimentu

Tab.4.1 Hodnoty naměřené po broušení bez vyjiskřování

i	u_i [mm]	u_{Ri} [μm]	Ra_i [μm]	Rz_i [μm]
1	43,698	-2,0	1,323	6,57
2	43,705	5,0	1,417	9,54
3	43,717	17,0	1,290	7,15
4	43,707	7,0	1,335	8,16
5	43,709	9,0	1,530	9,39
Odhad střední hodnoty	43,707	7,2	1,325	8,162
Odhad směrodatné odchylky	0,00687	6,87023	0,13697	1,31961

Tab.4.2 Hodnoty naměřené po broušení s vyjiskřováním

i	u_i [mm]	u_{Ri} [μm]	Ra_i [μm]	Rz_i [μm]
1	43,696	-4,0	1,215	7,17
2	43,700	0,0	1,175	7,89
3	43,696	-4,0	1,067	7,14
4	43,699	-1,0	1,258	8,04
5	43,707	7,0	1,339	8,43
Odhad střední hodnoty	43,699	-0,4	1,231	7,734
Odhad směrodatné odchylky	0,00451	4,50555	0,12050	0,56421

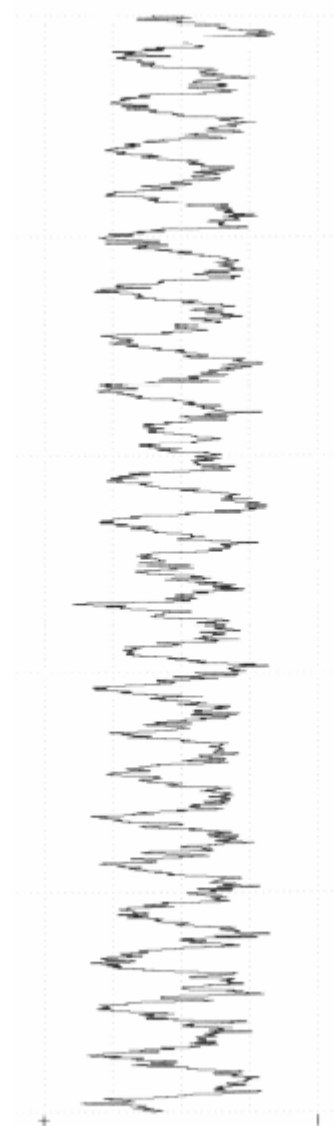
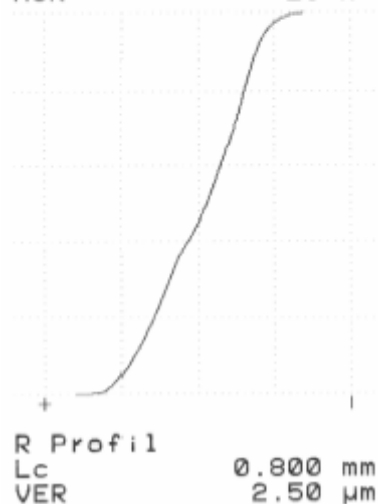
Naměřené hodnoty pomocí přístroje Perthometer M2 je možné odečítat s displeje, nebo vytisknout na papír.

Zaznamenané hodnoty přístrojem Perthometer M2 pro vzorek č.1 broušený bez vyjiskřování jsou na obr (4.7).

Perthometer M2
Objekt
Jméno

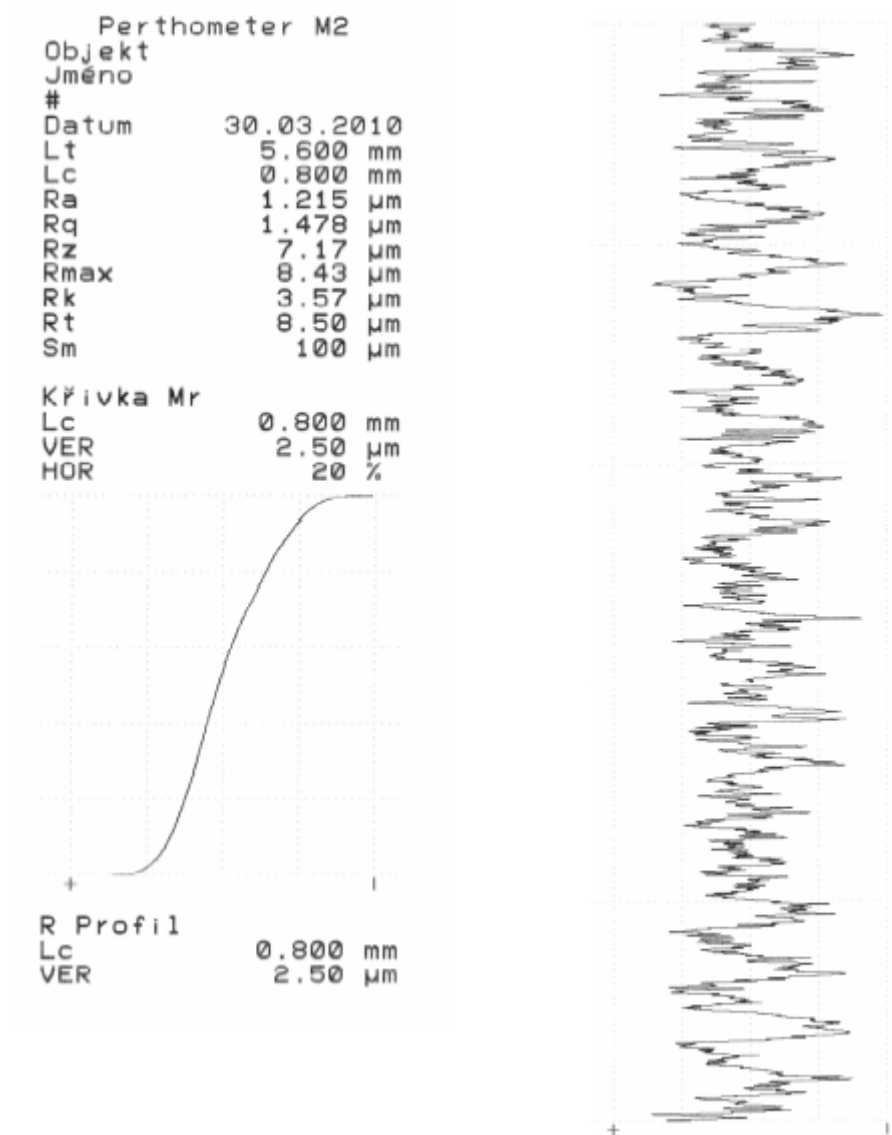
Datum 30.03.2010
Lt 5.600 mm
Lc 0.800 mm
Ra 1.323 μm
Rq 1.530 μm
Rz 6.57 μm
Rmax 7.23 μm
Rk 3.98 μm
Rt 7.43 μm
Sm 136 μm

Křivka Mr
Lc 0.800 mm
VER 2.50 μm
HOR 20 %



obr.4.7 Záznam o měření struktury povrchu

Zaznamenané hodnoty přístrojem Perthometer M2 pro vzorek č.1 broušený s vyjiskřováním jsou na obr (4.8).



obr.4.8 Záznam o měření struktury povrchu

4.3 Obecné vztahy statistické interpretace

Odhad střední hodnoty parametru přesnosti obrobené plochy²².

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.2)$$

Odhad směrodatné odchylky parametru přesnosti obrobené plochy²².

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.3)$$

Výpočet dvoustranného konfidenčního intervalu střední hodnoty parametru přesnosti obrobené plochy a jeho velikost²¹.

$$P(m_{D2} < m < m_{H2}) = 1 - \alpha \quad (4.4)$$

$$m_{D2} = \bar{x} - t_{1-\alpha/2; n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.5)$$

$$m_{H2} = \bar{x} + t_{1-\alpha/2; n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.6)$$

$$I_{m2} = m_{H2} - m_{D2} = 2t_{1-\alpha/2; n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.7)$$

Výpočet jednostranného konfidenčního intervalu střední hodnoty parametru přesnosti obrobené plochy²¹.

$$P(m_{D1} < m) = 1 - \alpha \quad (4.8)$$

$$P(m < m_{H1}) = 1 - \alpha \quad (4.9)$$

$$m_{D1} = \bar{x} - t_{1-\alpha; n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.10)$$

$$m_{H1} = \bar{x} + t_{1-\alpha; n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.11)$$

Výpočet dvoustranného statistického tolerančního intervalu parametru přesnosti obrobené plochy²².

$$L_{i2} = \bar{x} - k_2 \cdot s \quad (4.12)$$

$$L_{s2} = \bar{x} - k_2 \cdot s \quad (4.13)$$

$$I_2 = L_{s2} - L_{i2} = 2k_2 \cdot s \quad (4.14)$$

Výpočet jednostranného statistického tolerančního intervalu parametru přesnosti obrobené plochy²².

$$L_{i1} = \bar{x} - k_1 \cdot s \quad (4.15)$$

$$L_{s1} = \bar{x} + k_1 \cdot s \quad (4.16)$$

4.4 Statistická interpretace vyšetřených hodnot

4.4.1 U_R – Úchylka rozměru

Odhad střední hodnoty úchylky rozměru $\overline{u_R}$ – bez vyjiskřování

$$\overline{u_R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{Ri} = 7,2 \mu m$$

Odhad střední hodnoty úchylky rozměru $\overline{u_R}$ – s vyjiskřováním

$$\overline{u_R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{Ri} = -0,4 \mu m$$

Odhad směrodatné odchylky úchylky rozměru s_{uR} – bez vyjiskřování

$$s_{uR} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_{Ri} - \overline{u_R})^2} = 6,87023 \mu m$$

Odhad směrodatné odchylky úchylky rozměru s_{uR} – s vyjiskřováním

$$s_{uR} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_{Ri} - \overline{u_R})^2} = 4,50555 \mu m$$

Uvedené hodnoty ($\overline{u_R}$, s_{uR}) byly spočítány pomocí programu Microsoft Excel.

Konfidenční interval střední hodnoty úchylky rozměrů (dvoustranný) po broušení bez vyjiskřování

$$m_{D2uR} = \overline{u_R} - t_{1-\alpha/2; n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} = 7,2 - 2,776 \frac{6,87023}{\sqrt{5}} = -1,329 \mu m$$

$$m_{H2uR} = \overline{u_R} + t_{1-\alpha/2; n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} = 7,2 + 2,776 \frac{6,87023}{\sqrt{5}} = 15,729 \mu m$$

$$I_{m2uR} = m_{H2uR} - m_{D2uR} = 15,729 - (-1,329) = 15,058 \mu m$$

Konfidenční interval střední hodnoty úchyly rozměrů (dvoustranný) po broušení s vyjiskřováním

$$m_{D2uR} = \overline{u_R} - t_{1-\alpha/2;n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} = -0,4 - 2,776 \frac{4,50555}{\sqrt{5}} = -5,993 \mu m$$

$$m_{H2uR} = \overline{u_R} + t_{1-\alpha/2;n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} = -0,4 + 2,776 \frac{4,50555}{\sqrt{5}} = 5,139 \mu m$$

$$I_{m2uR} = m_{H2uR} - m_{D2uR} = 5,139 - (-5,993) = 11,186 \mu m$$

Statistický toleranční interval úchyly rozměru (dvoustranný) po broušení bez vyjiskřování

$$L_{i2uR} = \overline{u_R} - k_2 \cdot s = 7,2 - 5,08 \cdot 6,87023 = -27,701 \mu m$$

$$L_{s2uR} = \overline{u_R} - k_2 \cdot s = 7,2 - 5,08 \cdot 6,87023 = 42,101 \mu m$$

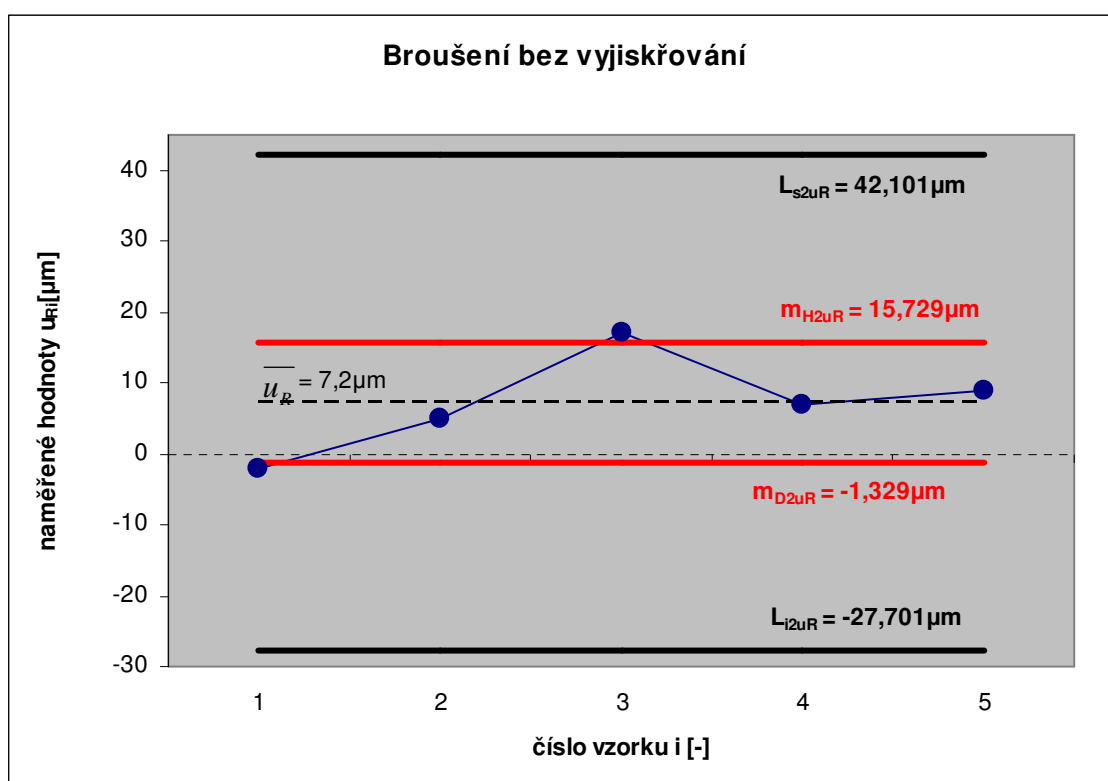
$$I_{2uR} = L_{s2uR} - L_{i2uR} = 42,101 - (-27,701) = 69,802 \mu m$$

Statistický toleranční interval úchyly rozměru (dvoustranný) po broušení s vyjiskřováním

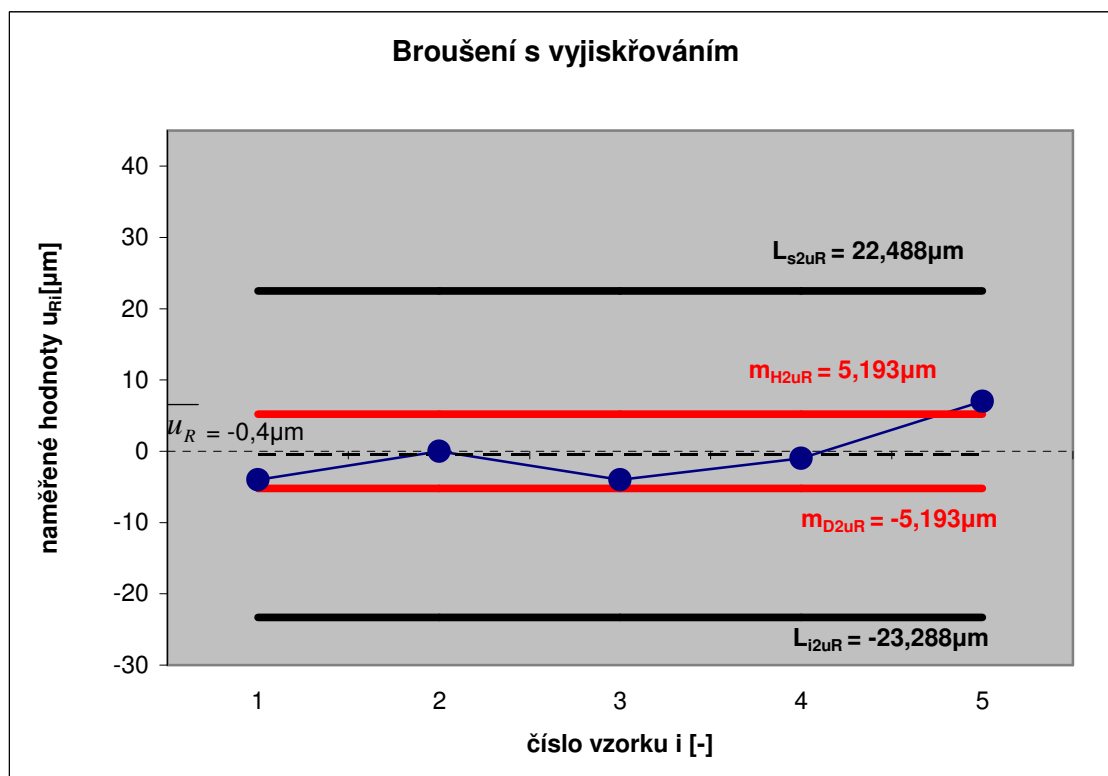
$$L_{i2uR} = \overline{u_R} - k_2 \cdot s = -0,4 - 5,08 \cdot 4,50555 = -23,288 \mu m$$

$$L_{s2uR} = \overline{u_R} - k_2 \cdot s = -0,4 - 5,08 \cdot 4,50555 = 22,488 \mu m$$

$$I_{2uR} = L_{s2uR} - L_{i2uR} = 22,488 - (-23,288) = 45,776 \mu m$$



obr.4.8 Grafické znázornění úchylky rozměrů zkušebních vzorků u_{Ri} a jejich statistická interpretace po broušení bez vyjiskřování



obr.4.9 Grafické znázornění úchylky rozměrů zkušebních vzorků u_{Ri} a jejich statistická interpretace po broušení s vyjiskřováním

4.4.2 R_a – Průměrná aritmetická úchylka profilu

Odhad střední hodnoty parametru přesnosti povrchu $\overline{Ra}$ – bez vyjiskřování

$$\overline{Ra} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ra_i = 1,325 \mu m$$

Odhad střední hodnoty parametru přesnosti povrchu $\overline{Ra}$ – s vyjiskřováním

$$\overline{Ra} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ra_i = 1,231 \mu m$$

Odhad směrodatné odchylky parametru přesnosti povrchu s_{Ra} – bez vyjiskřování

$$s_{Ra} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Ra_i - \overline{Ra})^2} = 0,13697 \mu m$$

Odhad směrodatné odchylky parametru přesnosti povrchu s_{Ra} – s vyjiskřováním

$$s_{Ra} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Ra_i - \overline{Ra})^2} = 0,12050 \mu m$$

Uvedené hodnoty ($\overline{Ra}$, s_{Ra}) byly spočítány pomocí programu Microsoft Excel

Konfidenční interval střední hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu R_a (jednostranný) po broušení bez vyjiskřování

$$m_{H1Ra} = \overline{Ra} + t_{1-\alpha;n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} = 1,325 + 2,132 \frac{0,13697}{\sqrt{5}} = 1,456 \mu m$$

Konfidenční interval střední hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu R_a (jednostranný) po broušení s vyjiskřováním

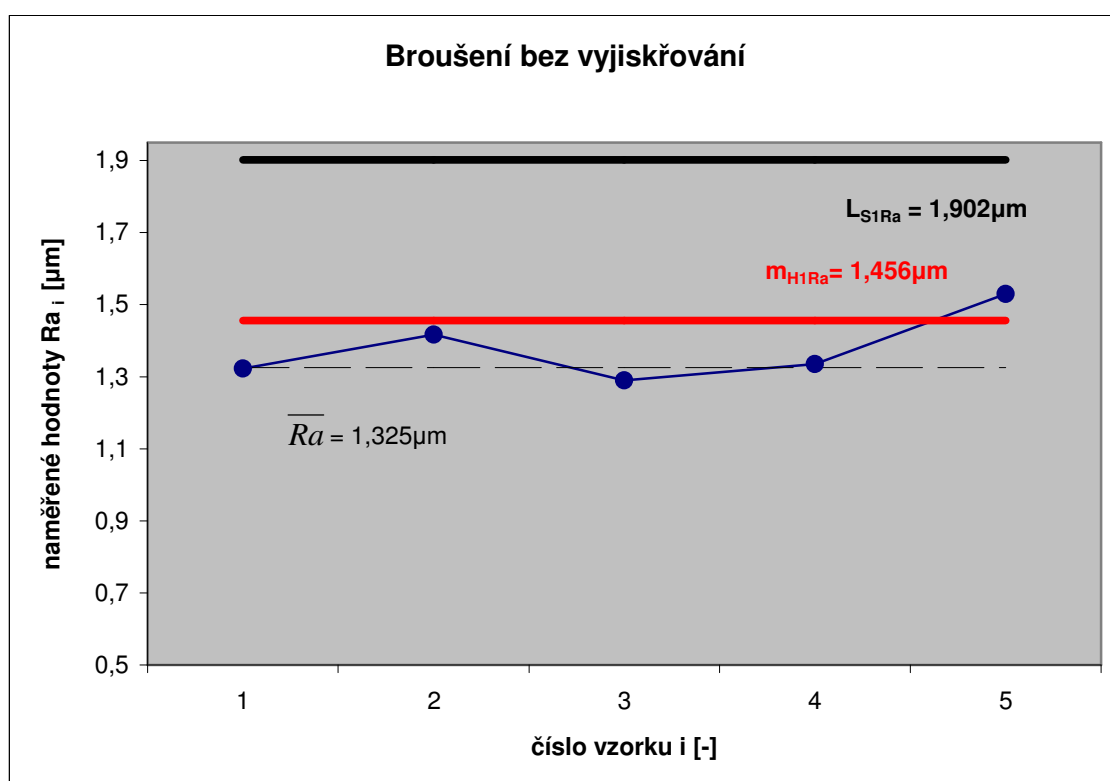
$$m_{H1Ra} = \overline{Ra} + t_{1-\alpha;n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} = 1,231 + 2,132 \frac{0,12050}{\sqrt{5}} = 1,346 \mu m$$

Statistický toleranční interval průměrné aritmetické úchylky profilu R_a (jednostranný) po broušení bez vyjiskřování

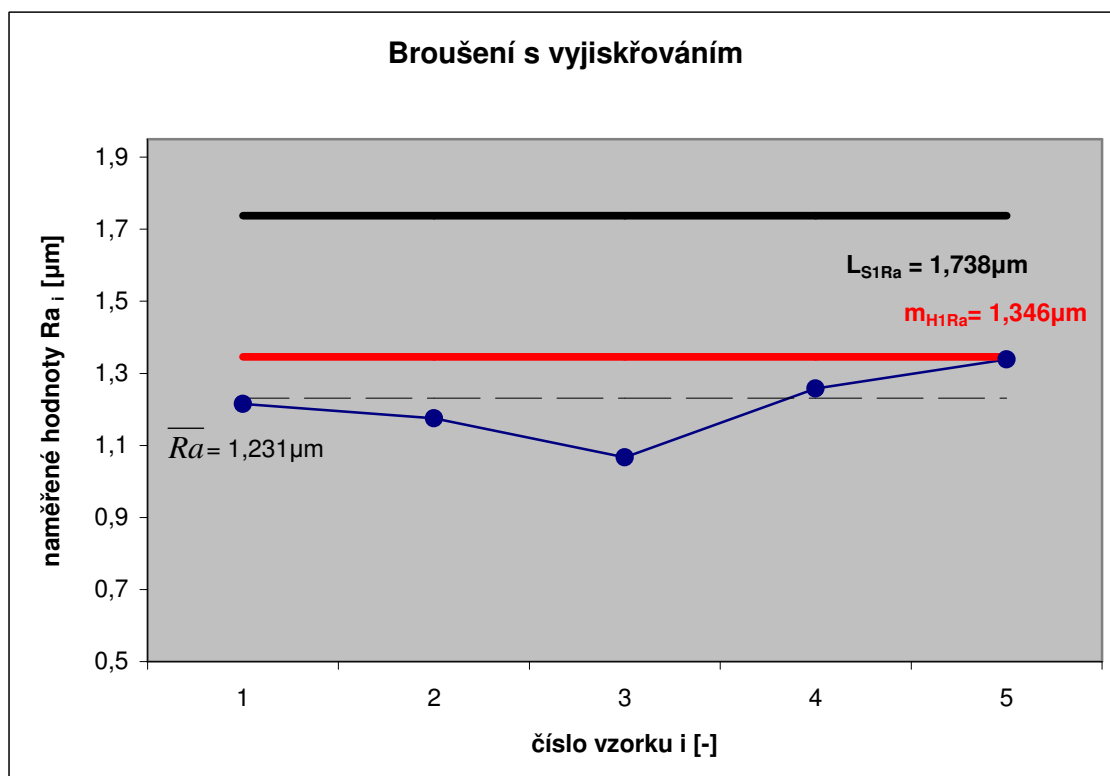
$$L_{s1Ra} = \overline{Ra} + k_1 \cdot s = 1,325 + 4,21 \cdot 0,13697 = 1,902 \mu m$$

Statistický toleranční interval průměrné aritmetické úchyly profilu Ra (jednostranný) po broušení s vyjiskřováním

$$L_{s1Ra} = \overline{Ra} + k_1 \cdot s = 1,231 + 4,21 \cdot 0,12050 = 1,738 \mu m$$



obr.4.10 Grafické znázornění průměrné aritmetické úchytky profilu zkušebního vzorku Ra_i a jejich statistická interpretace po broušení bez vyjiskřování



obr.4.11 Grafické znázornění průměrné aritmetické úchytky profilu zkušebního vzorku Ra_i a jejich statistická interpretace po broušení s vyjiskřováním

4.4.3 R_z – Největší výška profilu

Odhad střední hodnoty parametru přesnosti povrchu $\overline{R_z}$ – bez vyjiskřování

$$\overline{R_z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{z_i} = 8,162 \mu m$$

Odhad střední hodnoty parametru přesnosti povrchu $\overline{R_z}$ – s vyjiskřováním

$$\overline{R_z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{z_i} = 7,734 \mu m$$

Odhad směrodatné odchylky parametru přesnosti povrchu s_{R_z} – bez vyjiskřování

$$s_{R_z} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_{z_i} - \overline{R_z})^2} = 1,31961 \mu m$$

Odhad směrodatné odchylky parametru přesnosti povrchu s_{R_z} – s vyjiskřováním

$$s_{R_z} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_{z_i} - \overline{R_z})^2} = 0,56421 \mu m$$

Uvedené hodnoty ($\overline{R_z}$, s_{R_z}) byly spočítány pomocí programu Microsoft Excel.

Konfidenční interval největší výšky profilu R_z (jednostranný) po broušení bez vyjiskřování

$$m_{H1R_z} = \overline{R_z} + t_{1-\alpha;n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} = 8,162 + 2,132 \frac{1,31961}{\sqrt{5}} = 9,420 \mu m$$

Konfidenční interval hodnoty největší výšky profilu R_z (jednostranný) po broušení s vyjiskřováním

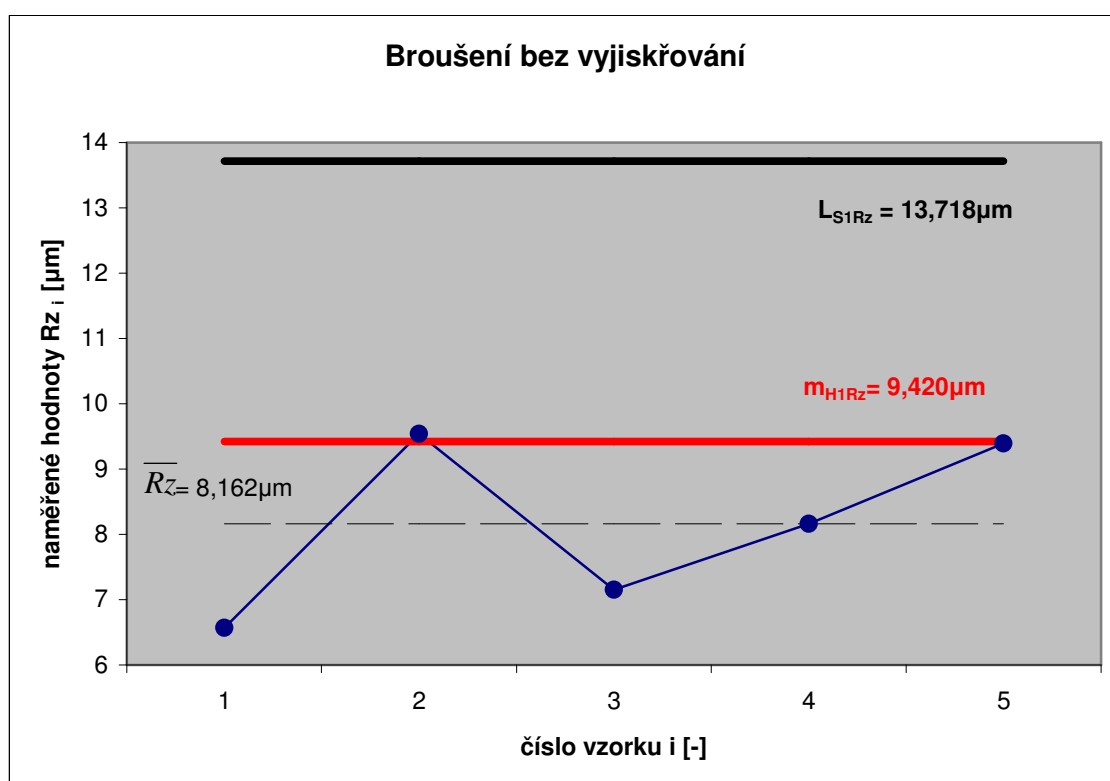
$$m_{H1R_z} = \overline{R_z} + t_{1-\alpha;n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} = 7,734 + 2,132 \frac{0,56421}{\sqrt{5}} = 8,272 \mu m$$

Statistický toleranční interval největší výšky profilu R_z (jednostranný) po broušení bez vyjiskřování

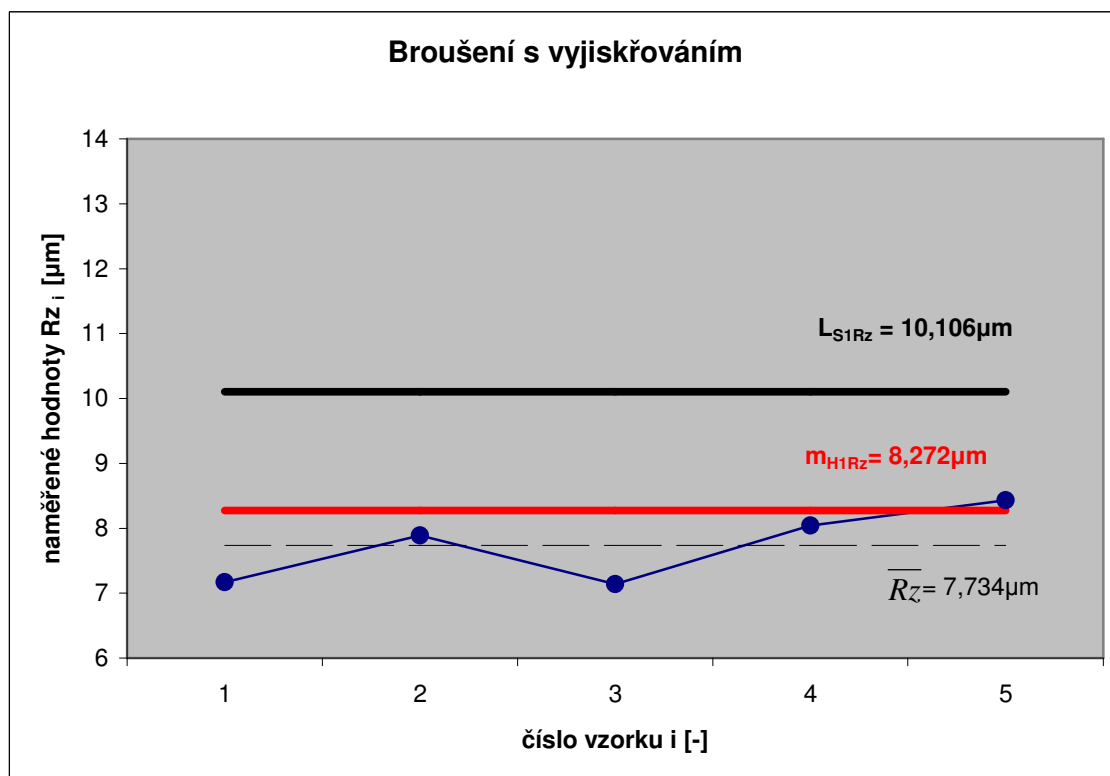
$$L_{s1R_z} = \overline{R_z} + k_1 \cdot s = 8,162 + 4,21 \cdot 1,31961 = 13,718 \mu m$$

Statistický toleranční interval největší výšky profilu Rz (jednostranný) po broušení s vyjiskřováním

$$L_{s1Rz} = \overline{Rz} + k_1 \cdot s = 7,734 + 4,21 \cdot 0,56421 = 10,106 \mu m$$



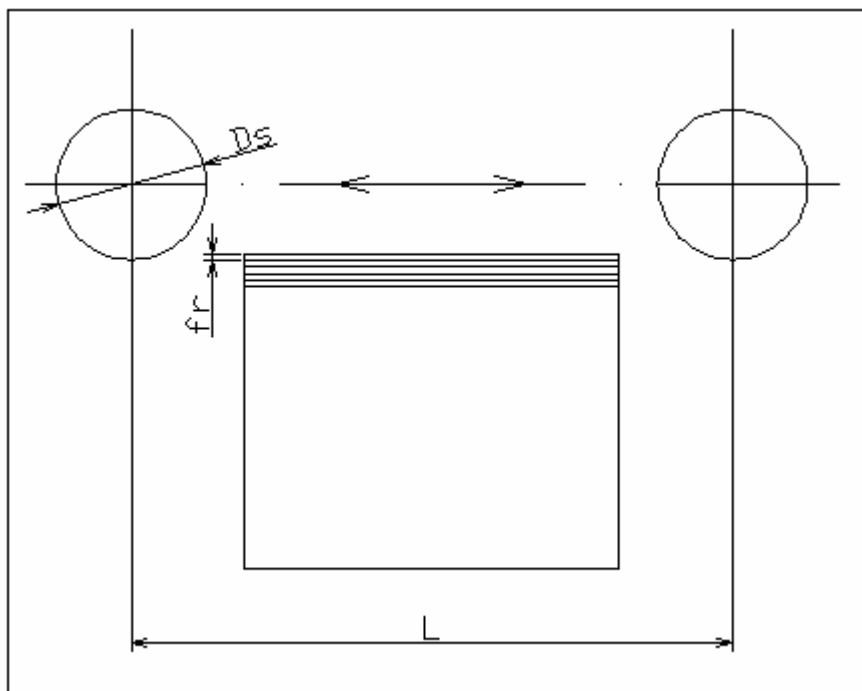
obr.4.12 Grafické znázornění největší výšky profilu zkušebního vzorku Rz_i a jejich statistická interpretace po broušení bez vyjiskřování



obr.4.13 Grafické znázornění největší výšky profilu zkušebního vzorku Rz_i a jejich statistická interpretace po broušení s vyjiskřováním

4.5 Ekonomické zhodnocení

Pro námi použitý způsob broušení (rovinné obvodové radiální broušení) obr (4.14) je vhodné využití v oblasti přesného broušení. Pracuje se s relativně úzkým kotoučem a obrobek se vlivem vzniklého tepla při broušení deformuje jen nepatrně. Vhodné využití tedy nachází ve výrobě nástrojů, měřidel, přípravků atd¹.



obr.4.14 Rovinné obvodové radiální broušení

4.5.1 Metodika ekonomického zhodnocení

Pro danou analýzu bylo provedeno broušení s vyjiskřováním a bez vyjiskřováním. Ekonomické hodnocení bylo zaměřeno na broušení s vyjiskřováním, protože je v technické praxi využíváno větší měrou. Při broušení byl změřen čas (2,6 s) jednoho zdvihu a délka jednoho zdvihu (820 mm). Čas i délka byly po celou dobu experimentu konstantní. Celkový přídavek byl 0,2 mm a hodnota radiálního posuvu na jeden zdvih byla 0,015 mm. Ze zjištěných hodnot byl vypočten potřebný počet zdvihů a časová náročnost na odebrání jednoho mm³ broušeného materiálu.

4.5.2 Obecná interpretace ekonomického zhodnocení

Počet zdvihů

$$z = \frac{p}{f_r} \quad (4.17)$$

Objem materiálu přídatku

$$V_p = d_p \cdot \check{s}_p \cdot v_p \quad (4.18)$$

Jednotkový čas strojní pro obroušení jednoho kusu

$$t_{ASK} = t \cdot z \quad (4.19)$$

Jednotkový čas strojní pro odebrání jednotky objemu s povrchu materiálu

$$t_{ASJ} = \frac{t_{ASK}}{V_p} \quad (4.20)$$

4.5.3 Konkretizovaná interpretace ekonomického zhodnocení

Počet zdvihů

$$Z = \frac{0,2}{0,015} = 13,3 = 14 \text{ zdvihů}$$

Prvních třináct zdvihů bylo provedeno s hodnotou $f_r = 0,015$ mm a poslední zdvih byl proveden s hodnotou $f_r = 0,005$ mm.

Objem materiálu přídatku

$$V_{p1} = 60 \cdot 22 \cdot (13 \cdot 0,015) = 257,4 \text{ mm}^3$$

$$V_{p2} = 60 \cdot 22 \cdot (1 \cdot 0,005) = 6,6 \text{ mm}^3$$

$$V_p = V_{p1} + V_{p2} = 257,4 + 6,6 = 264 \text{ mm}^3$$

Jednotkový čas strojní pro obroušení jednoho kusu

$$t_{ASK1} = 2,6 \cdot 13 = 33,8s$$

$$t_{ASK2} = 2,6 \cdot 1 = 2,6s$$

$$t_{ASK} = t_{ASK1} + t_{ASK2} = 33,8 + 2,6 = 36s$$

Jednotkový čas strojní pro odebrání jednotky objemu s povrchu materiálu

$$t_{ASJ1} = \frac{33,8}{257,4} = 0,1313s \cdot mm^{-3}$$

$$t_{ASJ1} = \frac{2,6}{6,6} = 0,3939s \cdot mm^{-3}$$

ZÁVĚR

Ve vypracované studii jsou analyzovány a kvantifikovány parametry, které ovlivňují přesnost brousicího procesu.

V teoretické části studie je identifikován brousicí proces, vlivy působící na výslednou přesnost a parametry přesnosti brousicího procesu. Vlivy působící na konečnou hodnotu přesnosti jsou popsány z hlediska stroje, nástroje a řezných podmínek. Parametry přesnosti brousicího procesu jsou rozděleny na parametry přesnosti povrchu a na parametry přesnosti rozměrů broušených ploch.

V praktické části práce jsou posuzovány výsledné parametry přesnosti rozměrů a povrchových parametrů broušené plochy, při broušení s vyjiskřováním a bez vyjiskřování. Zjištěné hodnoty odpovídají teoretickému předpokladu, že při použití broušení s vyjiskřováním bude dosaženo lepších parametrů obrobených ploch. V případě porovnání hodnot přesnosti rozměrů jsou rozdíly v řádech jednotek mikrometrů. V případě porovnání parametru R_a jsou rozdíly v řádech desetin mikrometrů a v případě parametru R_z jsou rozdíly v jednotkách mikrometrů. Pro provedený experiment nejsou rozdíly v naměřených hodnotách velké, protože při zvoleném typu zkušební vzorku a zvolené brousicí metodě nejsou pružné deformace v soustavě stroj – nástroj – obrobek – upínač velké. Pro broušení jinou metodou a jiného typu vzorku by byly naměřené rozdíly parametrů přesnosti výraznější.

Dále byly zjištěny meze pro konfidenční interval střední hodnoty parametru přesnosti obrobené plochy, které limitují skutečnou velikost střední hodnoty parametru přesnosti obrobené plochy s 95% pravděpodobností.

Také byl určen statistický toleranční interval parametru přesnosti obráběcího procesu, který s 95% pravděpodobností pokrývá podíl souboru, z něhož pochází náhodný výběr.

Pro hodnoty rozměru broušených ploch byl vždy počítán dvoustranný interval a pro parametry přesnosti povrchu byl počítán jednostranný interval, protože dolní mezí intervalu je vždy nula.

Dále bylo posuzováno ekonomické hledisko provedeného experimentu. Byl spočítán čas potřebný na odebrání objemové jednotky materiálu. Z výše uvedených výpočtů je patrné, že v případě experimentu, který byl proveden v této studii nejsou ekonomické parametry optimální. Je patrné, že hodnota $f_r = 0,015$ mm a délka zdvihu $l = 820$ mm nejsou vhodně zvoleny. Hodnota 0,015 mm byla volena z důvodu rychlého otupování brousicího kotouče. Pro optimálnější ekonomické výstupy by byl volen vhodnější brousicí kotouč, hodnota $f_r = 0,02$ nebo 0,04 mm a délka zdvihu $l = 300$ mm.

Z hlediska budoucnosti a vývoje broušení bude dle mého názoru kladen stále větší důraz na zrychlování a zpřesňování brousicího procesu a začleňování broušení do hlavních výrobních operací. Největší vývoj můžeme předpokládat u produktů využívající tzv. metodu quickpoint.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOCMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80–214–3068–0.
2. Zvyšování efektivnosti broušení. *MM Průmyslové spektrum*. Listopad 2003. [online]. [cit. 2010-20-01]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-efektivnosti-brouseni>>.
3. ČSN ISO 3002–2. *Základné veličiny pri rezaní a brúsení – Časť 5: Základná terminológia brusných operácií používajících brúsiace kotúče*, Praha: Český normalizační institut, 1994. 29 s.
4. KOCMAN, K. *Speciální technologie. Obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 228 s. ISBN 80–214–2562–8.
5. FOEJT, M a PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 226 s. ISBN 80–214–2374–9.
6. *Rozsah modernizace stroje*. ZeVo PRAHA s.r.o. Praha. [online]. [cit. 2010-20-01]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-efektivnosti-brouseni>>.
7. *Obráběcí stroje. Rozdělení obráběcích strojů*. [online]. [cit. 2010-18-03]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-efektivnosti-brouseni>>.
8. *Komplexní broušení s Quickpointem*. JUNKER–GROUP. [online]. [cit. 2010-20-01]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.junker.cz/CZ/ap.htm>>.
9. MASLOV, J. N. *Teorie broušení kovů*. vyd. Praha: SNTL–Nakladatelství technické literatury, 1979. 246 s.
10. Broušení kotouče ze supertvrdých řezných materiálů. *MM Průmyslové spektrum*. Červenec 2001. [online]. [cit. 2010-20-01]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/brousici-kotouce-ze-supertvrdych-reznych-materialu>>.
11. *Značení tvaru, rozměrů a specifikace*. JIMI–BRUSIVO s.r.o. [online]. [cit. 2010-23-03]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.brusivojimi.com/img/user_images/uploaded/katalogy_ceniky/Bez%20n%C3%A1zvu.JPG>.
12. *Naše rady*. SALDO–JAROSLAV ZLATOHLÁVEK. [online]. [cit. 2010-20-02]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.saldoln.cz/page_5.html>.
13. *Diamantové nástroje*. DIA – PRAHA s.r.o. Praha. [online]. [cit. 2010-20-02]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.diapraha.cz/index.php?page=obsah§ion=navod2&top=>>>.
14. Optimalizace procesu broušení zvláště vysokými obvodovými rychlostmi. *MM Průmyslové spektrum*. Duben 2003. [online]. [cit. 2010-20-01]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/optimalizace-procesu-brouseni-zvlaste-vysokymi-obvodovymi-rychlostmi>>.
15. Broušení – emulze, roztok, nebo olej. *MM Průmyslové spektrum*. Květen 2005. [online]. [cit. 2010-20-01]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/brouseni-emulze-roztok-nebo-olej>>.

16. PERNIKÁŘ, J. – TYKAL, M. a VAČKÁŘ, J. *Jakost a metrologie*. vyd Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 151 s. ISBN 80–214–1997 –0.
17. ČECH, J. – PERNIKÁŘ, J. a PODANÝ, K. *Strojírenská metrologie*. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 176 s. ISBN 80–214–3070–2.
18. *Perthometer M2*. MAHR, spol s.r.o. Proboštov. [online]. [cit. 2010-10-04]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mahr.com/index.php?NodeID=2481&Language=CS>>.
19. *Bruska dvoukotoučová BDS 175*. Levné nářadí s.r.o. Hradec–Nová ves. [online]. [cit. 2010-18-03]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.naradi-gude.cz/dvoukotoucova-bruska-gds-175-p-55.html>>.
20. VELIČKOVÁ, E. *Rozměrová a tvarová přesnost, přesnost polohy, drsnost povrchu*. [online]. [cit. 2010-29-04]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.fbi.vsb.cz/shared/uploadedfiles/fbi/presnost.pdf>>.
21. ČSN ISO 3207. *Statistická interpretace výsledků zkoušek. Odhad průměru. Konfidenční interval*, Praha: Český normativní institut, 1993. 12 s.
22. ČSN ISO 16269–6. *Statistická interpretace dat – Část 6: Stanovení statistických tolerančních intervalů*, Praha: Český normalizační institut, 2007. 36 s.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
v_c	$m.s^{-1}$	Řezná rychlost
d_s	mm	Průměr brousicího kotouče
n_s	min^{-1}	Frekvence otáčení brousicího kotouče
v_w	$m.min^{-1}$	Obvodová rychlost obrobku
d_w	mm	Průměr obrobku
n_w	min^{-1}	Frekvence otáčení obrobku
q	-	Poměr rychlostí
v_{fr}	$m.min^{-1}$	Radiální rychlost posuvu stolu
U	-	Přesah U (příčný přesah) při broušení do kulata nebo rovinné broušení s axiálním posuvem
b_D	mm	Šířka aktivní části brousicího kotouče
f_a	mm	Axiální posuv stolu
l_g	mm	Geometrická délka styku
f_r	mm	Radiální posuv stolu
A	mm^2	Průřez odebírané vrstvy
h_{eq}	mm	Ekvivalentní tloušťka broušení
Q_w	$mm^3.s^{-1}$	Rychlost odebírání materiálu
r_{eq}	mm	Ekvivalentní délka poloměru brousicího kotouče
l_k	mm	Kinematická délka styku
$ q $	-	Absolutní hodnota poměru rychlostí
r_s	mm	Poloměr brousicího kotouče
r_w	mm	Poloměr obrobku
F_c	N	Řezná síla
v_{fa}	$m.min^{-1}$	Axiální rychlost posuvu stolu
v_{ft}	$m.min^{-1}$	Tangenciální rychlost posuvu stolu
l_a	mm	Délka axiální dráhy brousicího kotouče
l_w	mm	Délka obrobku
D	-	Hlavní bod při broušení
P_f	-	Nástrojová rovina boční
P_r	-	Nástrojová rovina zadní
P_p	-	Nástrojová rovina základní
a_e	mm	Pracovní záběr
K_c	MPa	Měrná řezná síla
A	mm^2	Průřez odebírané vrstvy
F_i	N	Velikost nevyvážené síly
m	g	Hmotnost nevyvážené hmoty
m	μm	Střední hodnoty parametru přesnosti obrobené plochy

ω^2	cm. s ⁻¹	Zrychlení těžiště
G	cm. s ⁻¹	Hmotnost kotouče
I_e	cm	Velikost excentricity
Ra	μm	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
Rz	μm	Největší výška profilu
RSm	μm	Průměrná šířka prvků profilu
Rt	μm	Celková výška profilu
Rc	μm	Průměrná výška prvků profilu
Rp	μm	Největší výška výstupku profilu
Rv	μm	Největší hloubka prohlubně profilu
Rsk	μm	Šikmost posuzovaného profilu
Rku	μm	Špičatost posuzovaného profilu
Rq	μm	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu
Z(x)	μm	Hodnota pořadnice
l	mm	Základní délka
Zp	μm	Nejvyšší výstupek profilu
Zv	μm	Nejnižší výstupek profilu
h_{eq}	mm	Ekvivalentní tloušťka broušení
u_r	μm	Úchylka rozměru
u	mm	Naměřená hodnota
u_j	mm	Jmenovitá hodnota
$\bar{x}$	mm, μm	Odhad střední hodnoty parametru přesnosti obrobene plochy
s	mm, μm	Odhad směrodatné odchylky parametru přesnosti obrobene plochy
m_{D2}	μm	Dolní mez dvoustranného konfidenčního intervalu střední hodnoty parametru přesnosti obrobene plochy
m_{H2}	μm	Horní mez dvoustranného konfidenčního intervalu střední hodnoty parametru přesnosti obrobene plochy
1-α	-	Konfidenční úroveň
n	-	Počet pozorované ve výběru
I_{m2}	μm	Velikost dvoustranného konfidenčního intervalu
m_{D1}	μm	Dolní mez jednostranného konfidenčního intervalu střední hodnoty parametru přesnosti obrobene plochy
m_{H1}	μm	Horní mez jednostranného konfidenčního intervalu střední hodnoty parametru přesnosti obrobene plochy

L_{i2}	μm	Dolní mez dvoustranného statistického tolerančního intervalu parametru přesnosti obrobené plochy
L_{s2}	μm	Horní mez dvoustranného statistického tolerančního intervalu parametru přesnosti obrobené plochy
k_2	-	Součinitel pro meze dvoustranného statistického tolerančního intervalu parametru přesnosti obrobené plochy
L_{i1}	μm	Dolní mez jednostranného statistického tolerančního intervalu parametru přesnosti obrobené plochy
L_{s1}	μm	Horní mez jednostranného statistického tolerančního intervalu parametru přesnosti obrobené plochy
k_1	-	Součinitel pro meze jednostranného statistického tolerančního intervalu parametru přesnosti obrobené plochy
p	mm	Přídavek obrábění
t	s	Čas zdvihu
V_p	mm^3	Objem přídavku na obrábění
v_p	mm	Výška přídavku
$\bar{s}_p$	mm	Šířka přídavku
d_p	mm	Délka přídavku
t_{ASK}	s	Jednotkový čas strojní pro obroušení jednoho kusu
t_{ASJ}	$\text{s} \cdot \text{mm}^{-3}$	Jednotkový čas strojní pro odebrání jednotky objemu s povrchu materiálu

