



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

KVANTIFIKACE PŘESNOSTI BROUSICÍHO PROCESU

QUANTIFICATION ACCURACY OF ABRASIVE PROCESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVEL ŘEHÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV PROKOP, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Pavel Řehák

který/která studuje v **magisterském navazujícím 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:

Kvantifikace přesnosti brousicího procesu

v anglickém jazyce:

Quantification accuracy of abrasive process

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Metodika kvantifikace parametrů přesnosti brousicího procesu.

Cíle diplomové práce:

1. Technologická charakteristika brousicího procesu.
2. Parametry přesnosti brousicího procesu.
3. Analýza technologických vlivů na přesnost brousicího procesu.
4. Statistická interpretace přesnosti brousicího procesu.

Seznam odborné literatury:

1. KŘÍŽ, R. a VÁVRA, P. Strojírenská příručka 7.svazek.
1.vyd. Praha: Scientia, 1996. 212 s. ISBN 80-7183-024-0.
2. KOČMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění.
2.vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
3. VIGNER, M, PŘIKRYL, Z. a kolektiv. Obrábění. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984. 800 s.
4. KŘÍŽ, R. a VÁVRA, P. Strojírenská příručka 7.svazek.
1.vyd. Praha: Scientia, 1996. 212 s. ISBN 80-7183-024-0.
5. ČECH, J., PERNIKÁŘ, J., PODANÝ, K. Strojírenská metrologie I. 5.vydání. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2009. 183 s. ISBN 978-80-214-4.
6. PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2009. 251 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 12.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

V této práci je popsán brousicí proces včetně technologických podmínek s identifikací pohybů a rychlostí při broušení. Jsou zde popsány brousicí nástroje, stroje, jejich rozdělení a charakterizování. Dále pak technologické vlivy na přesnost brousicího procesu a některé dosahované parametry přesnosti broušené plochy a jejich statistická interpretace.

Klíčová slova

Broušení, nástroj, brousicí kotouč, přesnost brousicího procesu, statistická interpretace.

ABSTRACT

In this work, there is described an abrasive process including technological terms with an identification of motions and a speed of grinding. Then there are described abrasive tools, machines, their distribution and description. Further technological factors on accuracy of abrasive process and some reached parameters of the accuracy and their statistic interpretation.

Key words

Grinding, tool, grinding wheel, accuracy of abrasive process, statistic interpretation.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŘEHÁK, P. *Kvantifikace přesnosti brousicího procesu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 91 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.

Prohlášení

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

11. května 2011

.....
Pavel Řehák

Poděkování

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

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
Úvod	9
1 TECHNOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA BROUSÍČÍHO PROCESU	10
1.1 Obecná definice broušení.....	10
1.2 Kinematika brousicího procesu	12
1.3 Pohyby a rychlosti	15
1.4 Brousicí nástroje.....	21
1.4.1 Technologická charakteristika brousicích nástrojů	21
1.4.2 Brusivo a jeho druhy.....	21
1.4.3 Pojivo	24
1.4.4 Zrnitost brusiva.....	26
1.4.5 Tvrdost brousicích kotoučů	26
1.4.6 Struktura.....	27
1.4.7 Označování brousicích kotoučů	28
1.5 Brousicí stroje.....	29
1.5.1 Hrotové brusky	29
1.5.2 Brusky na díry	30
1.5.3 Bezhruté brusky	30
1.5.4 Rovinné brusky	31
1.5.5 Nástrojařské brusky.....	32
1.5.6 Pásové brusky.....	32
2 PARAMETRY PŘESNOSTI BROUSÍČÍHO PROCESU	33
2.1 Struktura povrchu	33
2.2 Geometrické tolerance	36
2.3 Přesnost rozměrů	41
3 ANALÝZA TECHNOLOGICKÝCH VLIVŮ NA PŘESNOST BROUSÍČÍHO PROCESU	44
3.1 Stroje	44
3.1.1 Požadavky na brousicí stroje	44
3.1.2 Modernizace brousicích strojů.....	61
3.2 Nástroje	67
3.3 Řezné podmínky.....	70
3.3.1 Posuvy a rychlosti	70
3.3.2 Přídavky na broušení	71
3.3.3 Prostředí.....	72
4 STATISTICKÁ INTERPRETACE PŘESNOSTI BROUSÍČÍHO PROCESU	74
4.1 Obecné definice.....	74
4.1.1 Metody popisné statistiky	74
4.1.2 Náhodný výběr	77
4.1.3 Odhady parametrů normálního rozdělení μ a σ^2	78
4.2 Konkretizovaná aplikace.....	82
4.2.1 Maximální výška profilu Rz.....	82
4.2.2 Střední aritmetická hodnota drsnosti Ra	84

Závěr.....	86
Seznam použitých zdrojů.....	88
Seznam použitých zkratek a symbolů.....	90

ÚVOD

Jelikož součásti vyrobené na obráběcích strojích nedosahují zpravidla požadované přesnosti a velmi často se ještě tepelně zpracovávají, jejich výroba se dokončuje broušením. Součást při broušení dostane přesné rozměry, požadovaný tvar i strukturu povrchu. Jako nástroj se při broušení nejčastěji používá brousící kotouč, který bývá často jediným nástrojem, kterým lze hospodárně obrábět tvrdé kalené a cementované součásti, slinuté karbidy a jiné tvrdé kovové i nekovové materiály.

Broušením se rovněž obnovuje řezací schopnost otupených řezných nástrojů. Tomuto způsobu broušení říkáme ostření.

V dnešní době rostou požadavky na přesnost a rychlost výroby a tím i na proces broušení, proto se tato práce snaží najít hlavní technologické vlivy na přesnost brousícího procesu a definovat základní parametry přesnosti.

V posledním bodě se pak nachází statistická interpretace přesnosti. Nejprve obecné definice a poté konkretizovaná aplikace statistiky na vyšetření přesnosti brousícího procesu. Konkrétně na vyšetření parametrů maximální výšky profilu Rz a střední aritmetické hodnoty drsnosti Ra [1].

1 TECHNOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA BROUSÍČÍHO PROCESU

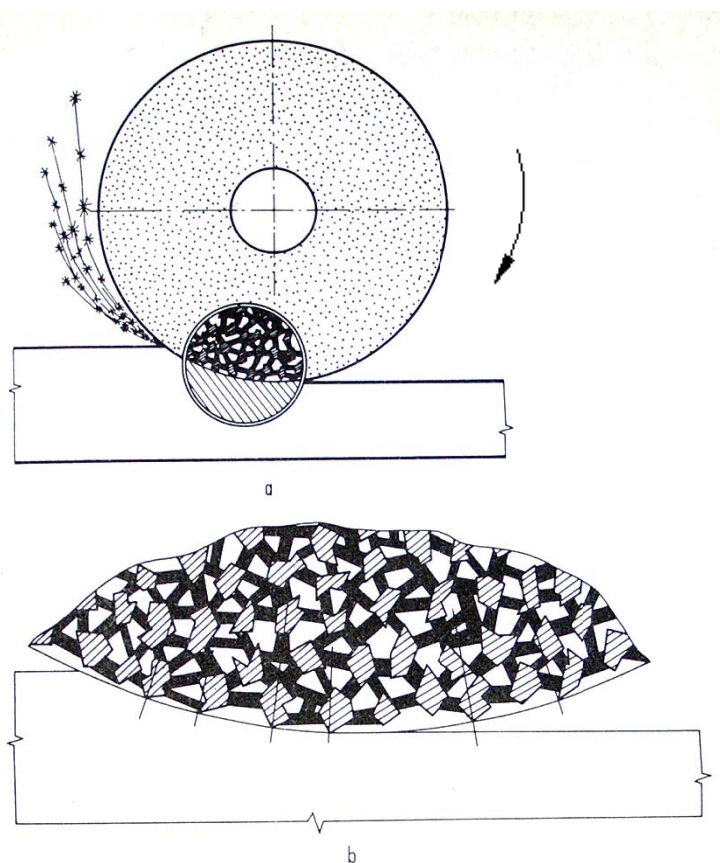
1.1 Obecná definice broušení [1]

Nástrojem při broušení je zpravidla brousící kotouč – mnohobřítý řezný nástroj. Řezné břity tvoří tvrdá zrna brusiva (obr. 1.1). Každé jednotlivé zrno brusiva působí jako řezný nástroj, který vniká do materiálu obrobku, z něhož odděluje velmi jemné třísky. Třísky mají velmi malé rozměry a vlivem vysoké teploty odletují jako jiskry. Zrna brusiva jsou uložena v pojivu brousícího kotouče.

Brousící kotouč nemá souvislý břit, protože jednotlivá brousící zrna jsou na pracovní ploše rozmístěna nepravidelně. Jednotlivá brousící zrna mají nepravidelný tvar a zaoblené vrcholy, a mají tedy zpravidla i záporné řezné úhly.

Brousící kotouč koná hlavní otáčivý řezný pohyb. Obrábí při velkých řezných rychlostech obrovským počtem brousících zrn na pracovní ploše kotouče. Brousící zrna odřezávají třísky téměř okamžitě a brousící kotouč odřeže za časovou jednotku velké množství velmi jemných třísek.

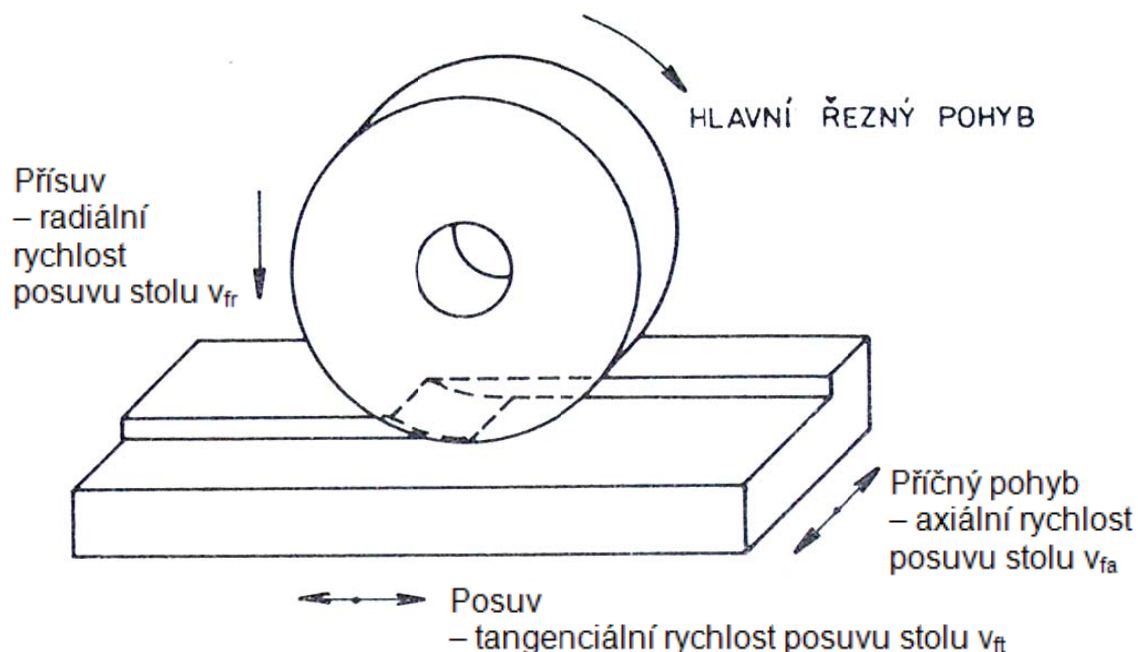
Než se brousící zrna na začátku řezného pochodu zaříznu do kovu, nejprve po něm okamžik intenzivně kloužou. Vysoké okamžité teploty, které vznikají při broušení, zvětšují tvárnost deformovaného kovu, a tím umožňují ubírat třísky zaoblenými zrny brousícího kotouče. Odebrání jedné třísky trvá asi 0,0001 až 0,00005 s a je tedy prakticky okamžité. Při obvyklých řezných podmínkách se za 1 minutu odebírají sta miliony třísek.



Obr. 1.1 Brousící kotouč
[1]
a – kotouč
b – struktura brousícího
kotouče

Mírou velikosti hlavního řezného pohybu při broušení je řezná rychlost, která se značí v_c .

Obrobek koná vedlejší řezný pohyb – posuv. Mírou velikosti posuvu je rychlost posuvu v_f , která se udává v m.s^{-1} , nebo v m.min^{-1} a také v mm/ot obrobku.



Obr. 1.2 Pohyby při broušení [1]

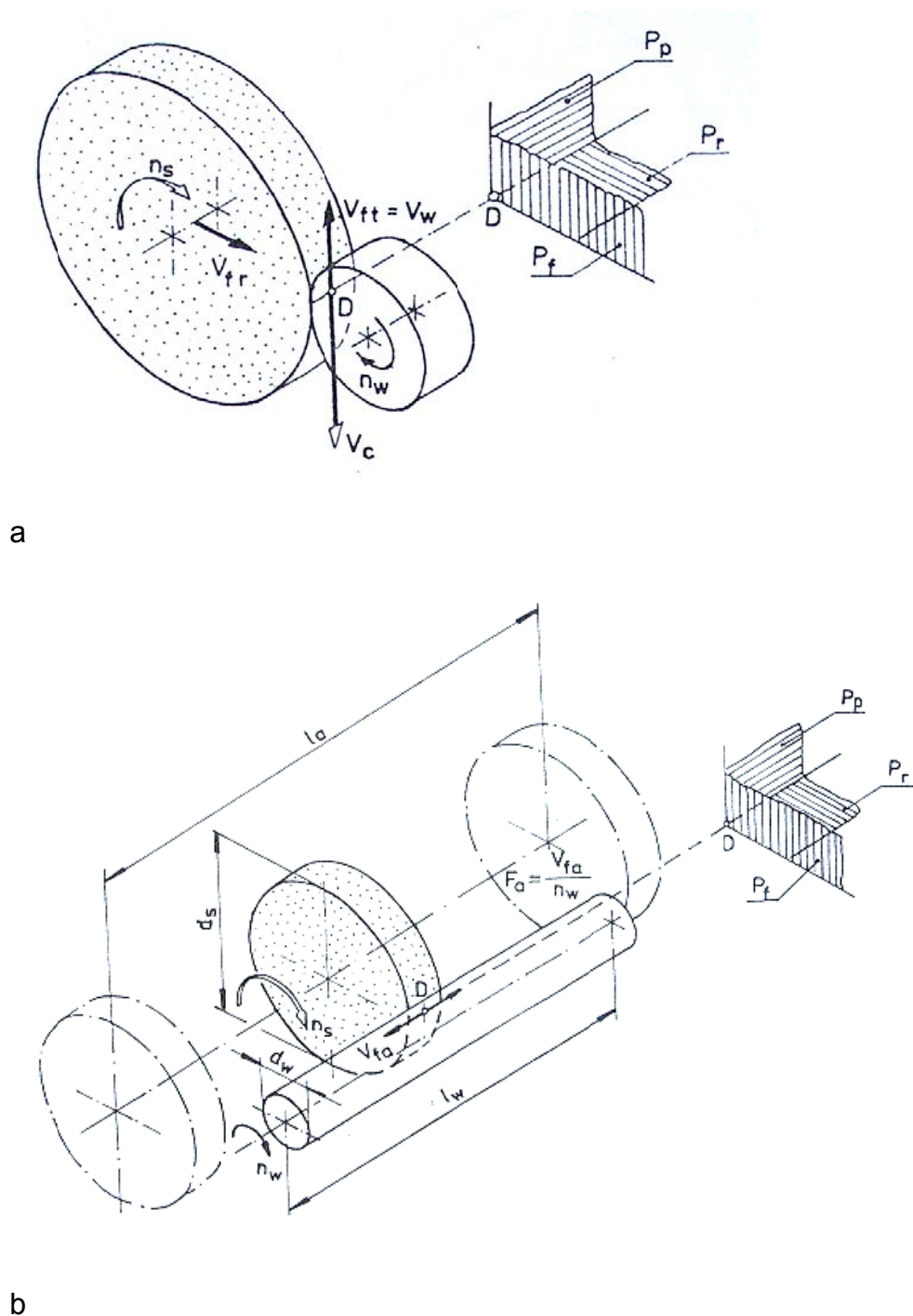
Rychlost posuvu je okamžitá relativní rychlost uvažovaného ostří ve směru posuvu. Posuv umožňuje odebrání dalších třísek. Příčný pohyb obrobku dovoluje obrobení celé plochy obrobku.

Přísuv je pohyb, jímž se nástroj přibližuje k obrobku nebo obrobek k nástroji, aby bylo možno odbrousit další vrstvu materialu.

Všechny řezné pohyby a další potřebné funkce zprostředkuje broušicí stroj – bruska.

1.2 Kinematika brousicího procesu [2,4]

Pohyby a rychlosti při broušení se identifikují pro jednotlivé brousicí způsoby. V rámci dané problematiky je dále charakterizováno obvodové vnější broušení do kulata – obr. 1.3.



Obr. 1.3 Pohyby a souřadnicové soustavy rovin pro obvodové broušení do kulata [4]
a – radiální
b – axiální

d_s – průměr brousicího kotouče [mm]
 n_s – frekvence otáčení brousicího kotouče [min^{-1}]
 d_w – průměr obrobku [mm]
 n_w – frekvence otáčení obrobku [min^{-1}]
 v_{fa} – axiální rychlost posuvu stolu [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
 f_a – axiální posuv stolu [m]
 v_{fr} – radiální rychlost posuvu stolu [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

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 [mm]
 l_w – délka obrobku [mm]

Řezná rychlost v_c se vyjádří vztahem:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.1)$$

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

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

Obvodová rychlost obrobku v_w je dána závislostí:

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.2)$$

d_w - průměr brousicího kotouče [mm]
 n_w - frekvence otáčení obrobku [min^{-1}]

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

Stykový oblouk brousicího kotouče a obrobku se kvantifikuje jako **geometrická délka styku** l_g , kinematická délka styku l_k a skutečná délka styku l_e .

Pro běžné podmínky obvodového broušení je geometrická délka styku:

$$l_g = \sqrt{2 f_r \cdot r_{eq}} \quad (1.3)$$

f_r – radiální posuv stolu [m]

r_{eq} – ekvivalent poloměru brousicího kotouče [mm]

Ekvivalent poloměru brousicího kotouče r_{eq} vyjadřuje poloměr fiktivního brousicího kotouče v záběru s obrobkem, který má stejnou délku geometrického styku l_g jako brousicí kotouč s poloměrem r_s v záběru s obrobkem o poloměru r_w při obvodovém broušení.

Hodnota r_{eq} se vyjádří ve tvaru:

$$r_{eq} = \frac{r_w \cdot r_s}{r_w \pm r_s} \quad [\text{mm}] \quad (1.4)$$

Ve vztahu (1.4) se pro vnější broušení do kulata použije znaménko plus a pro vnitřní broušení do kulata znaménko minus.

Kinematická délka styku l_k se vyjádří dle:

$$l_k = \left(1 + \frac{1}{|q|} \right) \quad (1.5)$$

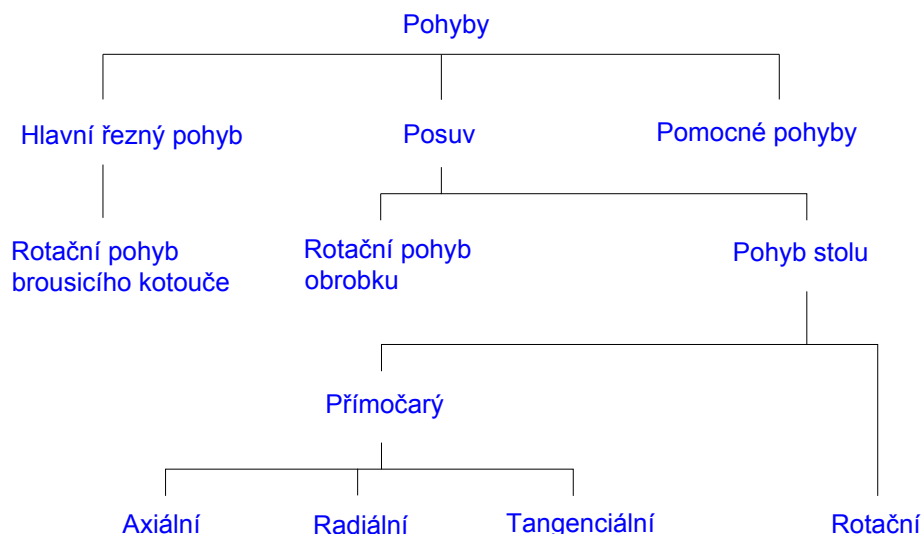
$|q|$ – absolutní hodnota poměru rychlostí.

1.3 Pohyby a rychlosti [2,4]

Všechny pohyby a rychlosti se určují v určitém čase ve zvoleném bodě aktivní části broušicího kotouče, obvykle v hlavním bodě D (obr. 1.3). Pokud se za hlavní bod zvolí jiný bod, je potřeba přesná specifikace.

Schematické znázornění pohybů je v tabulce 1.2.

Tab. 1.2 Schéma relativních pohybů mezi kotoučem a obrobkem [4]



Hlavní řezný pohyb a příslušné veličiny:

Hlavní řezný pohyb - otáčivý pohyb broušicího kotouče

Řezná rychlost v_c :

Tangenciální rychlost broušicího kotouče v bodě zvoleném na ploše styku měřená ve vztahu k držáku broušicího kotouče. Doporučená jednotka m.s^{-1} [4].

Řezná rychlost je určena vztahem 1.1.

Pro obvodové broušení do kulata vnějších ploch jsou doporučené hodnoty řezné rychlosti [2]:

Broušení axiální:	ocel	25 – 35 m.s^{-1}
	litina	25 m.s^{-1}
Broušení bezhroté:		30 – 35 m.s^{-1}

Obvodová rychlost broušicího kotouče v_s :

Tangenciální rychlost na obvodě broušicího kotouče měřená na jeho největším průměru ve vztahu k držáku broušicího kotouče. Doporučená jednotka m.s^{-1} .

Frekvence otáčení broušicího kotouče n_s :

Počet otáček broušicího kotouče za jednotku času měřený ve vztahu k držáku broušicího kotouče. Doporučená jednotka s^{-1} .

Posuv a příslušné veličiny:

Posuv vyplývá z kombinace osobně určených nezávislých pohybů obrobku a součástí obráběcího stroje.

Složky posuvu jsou plynulé nebo přerušované (na jeden zdvih, úběr nebo otáčku), dané jsou otáčením obrobku ve vztahu ke stolu, nebo pohybu stolu ve vztahu k základu obráběcího stroje.

Hlavní posuv:

Plynulý posuvný pohyb s největší posuvnou rychlostí při brusných operacích.

Při některých brusných operacích se může směr hlavního posuvu měnit, v tomto případě je potřebná podrobná specifikace.

Otáčivý pohyb obrobku:

Rotace obrobku kolem své osy ve vztahu ke stolu při broušení do kulata – obr. 1.3.

Obvodová rychlost obrobku v_w :

Okamžitá rychlost obvodové části obrobku ve zvoleném bodě ve vztahu ke stolu. Doporučená jednotka mm/s.

Pokud je při rovinném broušení anebo při broušení do kulata obrobek upevněný na stůl, uvažuje se jen s pohybem stolu $v_w = 0$ [4].

Obvodová rychlost obrobku je určena vztahem 1.2.

Doporučené parametry pro obvodové broušení do kulata vnějších ploch [2]:

Broušení axiální:	na hrubo: ocel		15 – 20 m/min
	litina		15 – 22 m/min
	hliník		20 – 30 m/min
	na čisto: ocel		8 – 15 m/min
	litina		12 – 16 m/min
Broušení bezhroté:			18 – 45 m/min

Doporučené parametry pro obvodové broušení do kulata vnitřních ploch:

Tab. 1.3. Volba řezných poměrů při vnitřním broušení [2]

Pozn: b_s – šířka brousícího kotouče, f_a se vztahuje na otáčku obrobku, a_e se vztahuje na zdvih

Druh práce	Podélný (axiální) posuv f_a [mm]	Pracovní (radiální) záběr a_e [mm]	Obvodová rychlost obrobku v_w [m.min ⁻¹]
Jednoduché brusky			
- hrubování	$(0,4 \text{ až } 0,7)b_s$	0,005 až 0,02	20 až 40
- broušení na čisto	$(0,25 \text{ až } 0,4)b_s$	0,0025 až 0,01	20 až 40
Poloautomatické brusky			
- hrubování	$(0,4 \text{ až } 0,75)b_s$	0,0025 až 0,005	50 až 150
- broušení na čisto	$(0,25 \text{ až } 0,4)b_s$	0,0015 až 0,0025	50 až 150

Při rovinném broušení může být axiální posuvný pohyb přerušovaný, uskutečňovaný na konci každého zdvihu. V tom případě jde o axiální posuv na zdvih nebo axiální přírůstek posuvu stolu na zdvih. Doporučená jednotka mm/zdvih nebo $\mu\text{m/zdvh}$.

Doporučené parametry pro obvodové broušení do kulata vnějších ploch [2]:

na hrubo: ocel $(0.6 - 0.8) b_s$
 litina $(0.75 - 0.85) b_s$
 na čisto: ocel $(0.2 - 0.4) b_s$
 litina $(0.3 - 0.5) b_s$

Doporučené parametry pro obvodové broušení do kulata vnitřních ploch:

Jsou uvedeny v tabulce 1.3.

Doporučené parametry pro rovinné broušení:

Jsou uvedeny v tabulce 1.4.

Tab. 1.4. Směrné hodnoty řezných parametrů pro rovinné broušení [2]

Druh práce	Radiální posuv f_r [mm]	Axiální posuv f_a [mm]	Tangenciální rychlost posuvu stolu v_{ft} [m·min ⁻¹]
Rovinné broušení obvodové			
a) přímočarý pohyb stolu			
- hrubování	0,01 až 0,04	$(0,4 \text{ až } 0,7)b_s$	8 až 30
- broušení na čisto	0,005 až 0,01	$(0,2 \text{ až } 0,3)b_s$	15 až 20
b) kruhový pohyb stolu			
- hrubování	0,005 až 0,015	$(0,3 \text{ až } 0,6)b_s$	20 až 60
- broušení na čisto	0,005 až 0,010	$(0,2 \text{ až } 0,25)b_s$	40 až 60
Rovinné broušení čelní			
a) přímočarý pohyb stolu			
- hrubování	0,015 až 0,04	-	4 až 12
- broušení na čisto	0,005 až 0,01	-	2 až 3
b) kruhový pohyb stolu			
- hrubování	0,015 až 0,03	-	10 až 40
- broušení na čisto	0,005	-	10 až 40

Radiální posuvný pohyb:

Pohyb stolu ve zvoleném bodě ve směru kolmém na osu brousícího kotouče.

Radiální rychlost posuvu stolu v_{fr} :

Rychlost radiálního posuvného pohybu ve vztahu k základu obráběcího stroje. Doporučená jednotka mm/s.

Obrázky 1.3 a 1.4.

Radiální posuv stolu f_r :

Přemístění stolu ve vztahu k základu obráběcího stroje radiálním posuvným pohybem měřeným za otáčku obrobku nebo zdvih, úběr.

Při broušení do kulata je doporučená jednotka mm/ot nebo $\mu\text{m/ot}$.

Při rovinném broušení je radiální posuvný pohyb přerušovaný: uskutečňuje se odebráním další vrstvy materiálu, v tom případě jde o přírůstek radiálního přísuvu. Doporučená jednotka mm/úběr nebo $\mu\text{m}/\text{úběr}$.

Doporučené parametry pro obvodové broušení do kulata vnějších ploch:

Jsou uvedeny v tabulce 1.5.

Tab. 1.5. Volba řezných podmínek při bezhrotém broušení – zapichovací způsob [2].

Druh práce	Radiální posuv na 1 otáčku obrobku f_r [mm]	Obvodová rychlost podávacího kotouče v_w [mm.min ⁻¹]
Hrubování	0,005 až 0,02	10 až 25
Broušení na čisto	0,03 až 0,01	10 až 35

Doporučené parametry pro rovinné broušení:

Jsou uvedeny v tabulce 1.4.

Tangenciální posuvný pohyb stolu:

Směr pohybu stolu rovnoběžný s vektorem hlavního řezného pohybu brousícího kotouče v bodě D.

Tangenciální rychlost posuvu stolu v_{ft} :

Rychlost tangenciálního posuvného pohybu ve vztahu k základu obráběcího stroje.

Doporučené parametry pro rovinné broušení:

Jsou uvedeny v tabulce 1.4.

Tangenciální posuv stolu f_t :

Přemístění stolu ve vztahu k základu obráběcího stroje tangenciálním pohonem stolu měřené za otáčku obrobku nebo zdvihu.

Pro broušení do kulata je doporučena jednotka mm/ot nebo $\mu\text{m}/\text{ot}$.

Otáčivý posuvný pohyb stolu:

Pohyb stolu okolo své osy.

Frekvence otáčení stolu n_m :

Počet otáček stolu za jednotku času ve vztahu k základu obráběcího stroje. Doporučená jednotka s^{-1} .

Hlavní posuvný pohyb stolu:

Složka plynulého pohybu stolu s největší rychlostí ve zvoleném bodě.

Přírůstek posuvu:

Přerušené přemístění brousicího kotouče na konci každého zdvihu nebo úběru v rovině tangenciální k obrobenému povrchu. Doporučená jednotka mm/zdvih nebo $\mu m/zdvih$, úběr.

Přírůstek přísuvu:

Přerušované přemístění brousicího kotouče kolmo na obrobený povrch, na odstranění další vrstvy materiálu po celé obrobené ploše. Doporučená jednotka mm/zdvih nebo $\mu m/zdvih$.

Celková délka posuvného pohybu stolu l_{fH} :

Celková délka posuvu po dobu určitých operací ve směru pohybu stolu. Vhodný index u symbolu l označuje druh pohybu stolu.

$$l_{fH} = l_{fa} + l_{fo}$$

Aktivní délka posuvného pohybu stolu l_{fa} :

Délka posuvu stolu po dobu určité operace aktivního broušení.

Neproduktivní délka posuvného pohybu stolu l_{fo} :

Délka posuvného pohybu po dobu určité operace, při které se broušení vykonává.

Pomocné pohyby a další veličiny:**Přibližovací pohyb:**

Pohyb brousicího kotouče přímo před začátkem broušení.

Kompenzační pohyb:

Plynulý nebo přerušovaný pohyb kompenzující opotřebení brousicího kotouče, tepelnou, plastickou deformaci nebo jiné změny.

Poměr rychlosti q :

Poměr mezi řeznou rychlostí a rychlostí posuvu ve vztahu k základu obráběcího měřený ve směru tangenty ve zvoleném bodě.

Přesah U (příčný přesah) při broušení do kulata nebo při rovinném broušení s axiálním posuvem:

Poměr mezi šířkou aktivní části brousicího kotouče a axiálním posuvem stolu:

$$U = \frac{b_D}{f_a} \quad (1.6)$$

1.4 Brousicí nástroje

1.4.1 Technologická charakteristika brousicích nástrojů [1]

Brousicí nástroje jsou brousicí zrna spojená pojivy v tuhá tělesa vhodného tvaru.

Podle tvaru se brousicí nástroje dělí na:

- a) brousicí pilníky,
- b) obtahovací kameny,
- c) brousicí kotouče,
- d) řezací a lešticí kotouče,
- e) honovací a superfinišovací kameny,
- f) brousicí segmenty.

Brousicí nástroje jsou charakterizovány těmito základními údaji:

- a) druhem brusiva,
- b) druhem pojiva,
- c) zrnitostí brusiva,
- d) tvrdostí – soudržností brousicího nástroje,
- e) slohem neboli strukturou,
- f) geometrickým tvarem a rozměry.

Tyto znaky určují možnosti a způsob použití brousicího kotouče i jiných brousicích nástrojů. Správná volba charakteristiky brousicích nástrojů pro dané pracovní podmínky je jednou ze základních podmínek hospodárného broušení.

1.4.2 Brusivo a jeho druhy [1,18]

Brusiva jsou tvrdé, houževnaté a ostrohranné krystalické látky, kterými lze brousit jiné měkkší materiály.

Podle původu jsou brusiva přírodní a umělá.

Podle tvaru mohou být brusiva rozdělena na:

- a) volná zrna, tj. brousicí, lešticí a lapovací prášky,
- b) zrna přilepená k podkladu – brousicí papíry a lešticí plátna,
- c) zrna rozptýlená v mazadlech – brousicí pasty,
- d) brousicí nástroje a pomůcky, kde jsou zrna brusiva spojena – stmelena různými pojivy.

Přírodní brusiva

Jsou to materiály nebo horniny, které jsou vhodné pro broušení nebo leštění.

Mezi přírodní brusiva patří tyto nerosty nebo horniny: leštící růže a okry, pemza, břidlice, pískovec, pazourek, křemen, granát, smírek, přírodní korund a diamant.

Přírodní brusivo se používá jen tehdy, nelze-li umělým brusivem dosáhnout stejných výsledků, nebo je-li levnější než umělé. Rozhodujícím činitelem ovlivňujícím použití přírodních brusiv je velikost zrna, která je dána buď již při vzniku nerostu, nebo drcením a tříděním brusiva. Dále je to houževnatost a zejména tvrdost, která je podstatně nižší než u umělých brusiv, s výjimkou diamantu.

Tvrdost brusiv se hodnotí podle Mohsovy stupnice tvrdosti, která je stará více než 140 let, ale stále se při hodnocení tvrdosti používá.

Mohsova stupnice tvrdosti je řada 10 nerostů v tomto pořadí: 1. mastek, 2. sůl kamenná, 3. vápenec, 4. kazivec, 5. apatit, 6. živec, 7. křemen, 8. topas, 9. korund, 10. diamant.

Diamant D je krystalický uhlík – má tvrdost 10. Používá se k broušení velmi tvrdých materiálů a k tvarování broušících kotoučů a jako broušící prach do leštících a lapovacích past pro broušení velmi tvrdých materiálů kovových i nekovových. Diamant nesnáší nárazy a prudké změny teploty. Při teplotě vyšší než 750°C shoří [1].

Umělá brusiva

Mezi obvyklá umělá brusiva patří:

- a) umělý korund – elektrokorund – Elektrit,
- b) karbid křemíku – Karborundum,
- c) nitrid boru,
- d) kubický nitrid boru,
- e) syntetický diamant.

Umělý korund

Vyrábí se přetavováním oxidu hlinitého Al_2O_3 v elektrické obloukové peci. Oxid hlinitý se získává z bauxitu. Je to nejpoužívanější brusivo na broušení oceli, ocelí na odlitky, temperované litiny a tvrdé bronzы. Broušící zrno má velký počet řezných hran, které se rychle otupují, třští a lámou.

Druhy umělého korundu:

- bílý – označení A 99 B (99% Al_2O_3) – nejkvalitnější,
- bílý – označení A 99 – je bílý jen surový, výrobky z něho jsou barevné,
- růžový – označení A 98,
- hnědý – označení A 96,
- černý – označení A 85.

Kromě běžných druhů se dodávají i kvalitnější druhy, např.: A 98 M – legovaný má lepší vlastnosti, A 97 MK – mikrokrytalický, A 97 PL – polokřehký, A 97 ZK – zirkonový.

Monokorund

Zatímco zrna běžných i legovaných druhů korundů jsou vlastně úlomky korundových krystalů, je monokorund tvořen jednotlivými krystaly, omezenými přirozenými krystalovými plochami. Zrna monokorundu mají pravidelný tvar a jsou velmi stejnoměrná. Povrch není poškozen trhlkami a zrna jsou bez vnitřního pnutí.

Monokorund se získává krystalizací Al_2O_3 rozpuštěného v sulfidické tavenině. V elektrické peci se taví směs bauxitu nejčastěji s pyritem.

Monokorundové brousicí nástroje jsou sice o 15 až 20% dražší než běžné nástroje, mají však studený řez, tj. brousí bez vzrůstu teploty a lépe drží tvar. Jsou vhodné zejména pro broušení rychlořezných ocelí a všeobecně pro ostření nástrojů. Dosahuje se lepší drsnosti povrchu a výkon broušení se zvyšuje až o 25% [1].

Karbid křemíku

Karborundum je tvrdší, houževnatější a odolnější než korund. Je to krystalická látka krystalizující v destičkových a jehličkových krystalech. Surovinou k výrobě karbidu křemíku SiC je křemičitý písek a petrolejový koks.

Karbid křemíku se používá na broušení litiny a na broušení velmi tvrdých a křehkých materiálů, jako jsou např. slinuté karbidy, ale i na měď, hliník, měkký bronz apod.

Karbid křemíku se vyrábí v několika jakostech. Průmyslově se vyrábějí zejména dva druhy SiC, a to zelený a šedý.

Označení karbidu křemíku:

zelený C 49 (49% obsahu uhlíku) – nejtvrdší a nejkvalitnější,

šedý C 48 (48% obsahu uhlíku),

černý C 47 (47% obsahu uhlíku).

Karbid boru (B_4C)

Sloučením boru a uhlíku v elektrické peci se tvoří malé lesklé krystalky vysoké tvrdosti 9.5 až 9.75 podle Mohsovy stupnice tvrdosti. Je tvrdší než karbid křemíku. Je náhražkou diamantového prášku a používá se při broušení průvlaků, broušení hran drahokamů a do lapovacích past na slinuté karbidy.

Kubický nitrid boru

Má podstatně vyšší tvrdost než všechny ostatní běžné druhy brusiv. Nedosahuje však tvrdosti diamantu. Je teplotně stálý až do 1400°C . Vůči broušené oceli je chemicky netečný. Je také velmi houževnatý a krystaly mají příznivý geometrický tvar pro broušení. Pozoruhodné výsledky jsou dosahovány zejména při broušení těžko obrobitelných ocelí.

Syntetické diamanty

Syntetické diamanty se neliší od přírodních ani strukturní mřížkou, ani tvrdostí či tepelnou odolností. V mnoha směrech dokonce předčí přírodní diamanty. Velikost diamantu se podle staré normy určovala v karátech (1 karát = 0.2 gramu). Podle nové normy se velikost diamantu uvádí v gramech. Pro silnou afinitu k železu za vysokých teplot nejsou vhodné pro broušení ocelí.

1.4.3 Pojivo [1]

Pojivo je prostředkem k zajištění žádoucího tvaru brousicího nástroje. Jeho úkolem je navzájem spojovat brousicí zrna a umožnit, aby se při broušení uvolňovala opotřebená a otupená zrna a do řezného procesu přicházela zrna s ostrými břity. Pojivo samo nemá brousicí účinky.

Podle původu rozdělujeme pojiva na:

- a) anorganická,
- b) organická.

Anorganická pojiva jsou:

- a) keramická – označení V,
- b) silikátová – označení S,
- c) magnezitová – označení O,
- d) kovová.

Organická pojiva jsou:

- a) šelak – označení E,
- b) pryž – označení R,
- c) umělá pryskyřice – označení B,
- d) kliš – označení G.

Anorganická pojiva:

Keramické pojivo obsahuje převážně keramické suroviny, jako je živec, kaolín, mastek a jiné. Je to nejobvyklejší pojivo používané u většiny brousicích nástrojů. Jeho největší předností je možnost odstupňování tvrdosti, velká pórovitost a naprostá netečnost vůči vodě, oleji a chemickým vlivům. Nevýhodou je křehkost. Brousicí nástroje s keramickým pojivem nesnášejí nárazy a musí se s nimi pečlivě a opatrně zacházet.

Směs brusiva, pojiva a přísad se lisuje, lije nebo pěchuje do forem na příslušný tvar kotouče. Kotouče se potom vypalují v pecích při teplotách 1350 až 1380°C.

Silikátové pojivo je směs vodního skla, živce, kaolinu a plavené křídly. Brousicí kotouče se nejprve 24 až 30 hodin suší při normální teplotě a pak se vytvrzují při 250 až 300°C. Výroba kotoučů je poměrně rychlá. Brousicí zrna se z kotouče dobře uvolňují a mají studený řez. To je výhoda zejména u velkých brousicích nástrojů a při velké stykové ploše s broušeným předmětem. Nástroje s tímto pojivem se používají tam, kde se žádá jemný a chladný výbrus, např. v nožířství, ostření dřevoobráběcích nástrojů apod. Kotouče dobře odolávají vodě.

Magnezitové pojivo je minerální pojivo vyrobené ze směsi uhličitanu hořečnatého, vypáleného v tzv. kaustický magnezit, dále chloridu hořečnatého a vody. Předností magnezitového pojiva je, že se zvláště nevypaluje ani nesuší. Lze z něho vyrábět velké kotouče o průměru až 2 metry. Kotouče při broušení nepálí – mají chladný řez. Jsou stejnoměrně tvrdé a používají se jako náhrada za kotouče pískovcové. Jsou vhodné však jen k broušení za sucha, protože nesnášejí vlhko, ani přílišné změny teploty. Magnezitové pojivo se

používá poměrně zřídka na kotouče k broušení hliníku, zinku a k ostření nástrojů, jako jsou nože apod.

Organická pojiva

Pryž je pojivo vhodné na kotouče vystavené mimořádnému mechanickému namáhání při zvláště velkých obvodových rychlostech. Základem pryžových pojiv je přírodní nebo umělý kaučuk, síra a urychlovače k vytvrzování. U pryžového pojiva se využívá vysoké pevnosti a pružnosti ke zhotovování velmi tenkých kotoučů na rozřezávání a broušení. Kromě toho jsou z něj zhotovovány leštící kotouče.

Šelak je přirozená pryskyřice. Lze z něho vyrábět velmi tenké kotouče vhodné k ostření pil a k jemnému ostření kalených nástrojů. Nesnáší však vysoké teploty. Při zahřátí se stává lepkavým a třísky ulpívají na kotouči a ucpávají póry.

Umělá pryskyřice. Nejpoužívanější umělou pryskyřicí je bakelit. Surovinami k výrobě tohoto pojiva jsou fenol a formaldehyd. Vyznačuje se značnou pevností a je to výborné pojivo pro řezací kotouče, pro hrubé obrušování a čištění, ale i na lapovací kotouče.

Značná mechanická pevnost dovoluje využít toto pojivo na rychloběžné řezací a drážkovací kotouče pro řezné rychlosti až 80 m/s.

Umělá pryskyřice se často ještě zpevňuje využitím textilních vláken (bavlna, plátno, plst). Kotouče ztužené textílem, tzv. kotouče FLEX, se vyznačují velkou výkonností, bezpečností a univerzálností. Používají se na odřezávání vtoků a nálitků, výborně se osvědčují při broušení svarů, odlitků a ploch po řezání plamenem.

Kromě uvedených pojiv se používají pojiva kovová, zejména při výrobě diamantových brousicích nástrojů (mosaz, měkká ocel).

Vývoj nových druhů pojiv neustále pokračuje. V zahraničí se dnes vyrábějí keramické kotouče pro rychlost 60 m/s. Příznivé výsledky byly dosaženy při broušení sírovanými brousicími kotouči. Také vývoj nových organických pojiv přináší další zvýšení výkonnosti broušení.

1.4.4 Zrnitost brusiva [1,3]

Brusivo vyjmuté z elektrické pece má podobu velkých drúz krystalů, které se drtí v silných drtičích a válcích na zrna. Zrna se pak čistí, aby se odstranily různé příměsi, a podrobují se dalším chemickým úpravám, jako je praní v louhu sodném, v kyselinách, promývání vodou, sušení, prosívání, odmagnetování apod. Brusivo se pak třídí podle velikosti na korekčních sítích.

Velikost zrna je, dle normy ČSN ISO 525 a ČSN 22 4012, dána číslem, které odpovídá počtu ok na délku jednoho anglického palce toho síta, jímž při třídění ještě zrno propadne. Podle normy ČSN se užívalo značení, které, násobeno deseti, udává přibližně rozměr zrna v μm . Od tohoto označení se upouští.

Velikost zrna se označuje čísly od nejhrubšího po nejjemnější:

hrubá	4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 22, 24,
střední	30, 36, 40, 46, 54, 60,
jemná	70, 80, 90, 100, 120, 150, 180,
velmi jemná	220, 240, 280, 320, 360, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200.

Zrnitost brusiva se volí podle předepsané drsnosti povrchu broušené součásti.

1.4.5 Tvrdost brousicích kotoučů [1]

Tvrdost neboli soudržnost kotouče se volí podle druhu broušeného materiálu a způsobu broušení.

Tvrdost brousicího nástroje je dána odporem, který klade pojivo proti vylomení jednotlivých brusných zrn z nástroje. Tvrdost je závislá na druhu a množství pojiva a na teplotě vypalování.

Stupně tvrdosti se označují písmeny velké abecedy.

Rozeznáváme brousicí nástroje:

velmi měkké	G, H,
měkké	I, J, K,
střední	L, M, N, O,
tvrdé	P, Q, R, S,
velmi tvrdé	T, U,
zvláště tvrdé	V, Z.

Brousicí kotouč volíme tím měkčím, čím tvrdší je broušený předmět a čím větší je styčná plocha brousicího kotouče s broušeným předmětem.

Brousicí schopnost kotouče se musí obnovit vhodným způsobem orovnění, při němž se otupená zrna vylámou a nahradí ostrými.

1.4.6 Struktura [1]

Slohem neboli strukturou brousicích nástrojů se rozumí poměr objemu pórů k celkovému objemu brousicího tělesa.

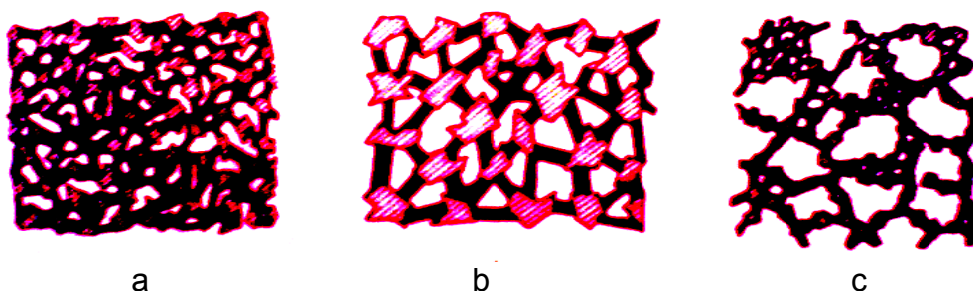
Sloh brousicích nástrojů se označuje čísly, která vyjadřují obsah pórů v procentech.

Brousicí nástroje mají sloh:

velmi hutný	1,2,
hutný	3,4,
polohutný	5,6,
pórovitý	7,8,
velmi pórovitý	9,10,
zvlášť pórovitý	11,12,13.

Na broušení hladkých předmětů z tvrdého a křehkého materiálu při malé styčné ploše broušení se doporučuje sloh hutný. Na broušení houževnatých materiálů při velké stykové ploše se doporučuje sloh pórovitý. Na broušení obrobků, které se nesmějí při obrábění zahřívat, je třeba volit nástroje zvlášť pórovité.

Póry jsou většinou menší než brousicí zrna, ale mohou být i několikrát větší, jak ukazuje obr. 1.5.



Obr. 1.5 Struktura brousicích kotoučů [1]
a – hutný, b – pórovitý, c – zvlášť pórovitý

Póry vytvářejí vlastně zubové mezery mezi zrny, a tedy prostory pro třísky i řeznou kapalinu.

Slohu se dosahuje uměle přísadou pórotvorných komponentů a má velký vliv na výkonnost brousicího nástroje.

1.4.7 Označování brousicích kotoučů

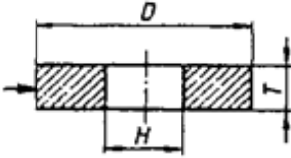
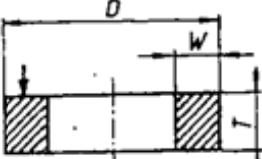
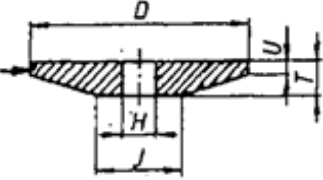
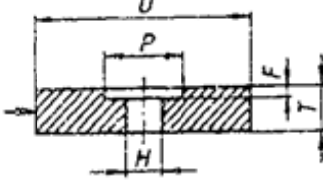
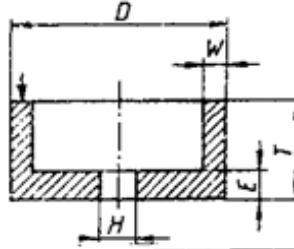
Brousicí kotouče se označují podle ČSN ISO 0525 (22 4503) z hlediska tvaru, rozměrů, specifikace složení a maximální obvodové rychlosti.

Označení tvaru brousicích kotoučů je dáno typem kotouče, doplněným u plochých kotoučů dle potřeby také označením profilu obvodu – tab. 1.6.

Příklad pro plochý brousicí kotouč, vnější průměr 300 mm, tloušťka 50 mm, díra 76 mm, brousicí materiál umělý korund, velikost zrna 36, tvrdost L, struktura 5, pojivo keramické, maximální obvodová rychlost 35 m/s [2]:

Typ kotouče 1 – 300 x 50 x 76 – A 36 L 5 V – 35 m/s

Tab. 1.6 Označování tvarů a rozměrů brousicích kotoučů – výběr [2]

Typ	Vyobrazení	Označení - charakteristika
1		Kotouče ploché Typ 1 – profil – D x T x H
2		Kotouče prstencové Typ 2 – D x T x W
3		Kotouče jednostranně zkosené Typ 3 – D/J... x T/U ... x
5		Kotouče s jednostranným vybráním Typ 5 – D x T x H – P..., F
6		Kotouče hrcovité Typ 6 – D x T x H – W..., E

1.5 Brousicí stroje [3]

Brousicí stroje se dělí podle prováděných operací na:

- hrotové**
 - s posuvným stolem
 - s posuvným vřeteníkem
- na díry**
- bezhroté**
 - pro vnější broušení
 - pro vnitřní broušení
- rovinné**
 - jedno stojanové
 - pracující obvodem kotouče
 - pracující čelem kotouče
 - dvoustojanové
- nástrojářské**
- pásové**
- speciální**
 - na jemné broušení
 - na závity
 - na ozubení
 - na klikové hřídele apod.

1.5.1 Hrotové brusky

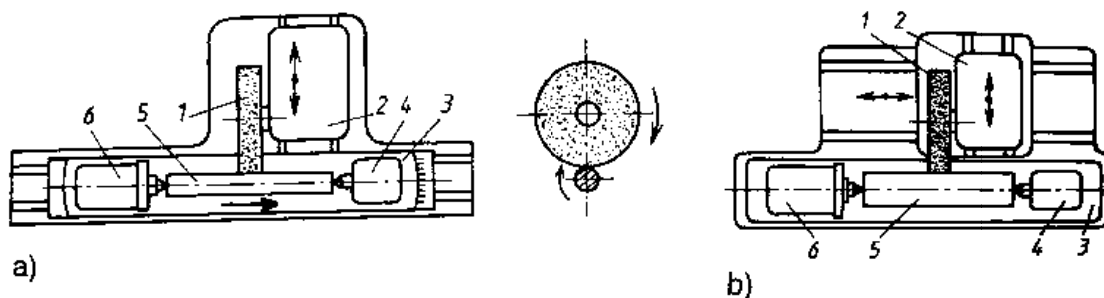
Hrotové brusky se používají k broušení rotačních ploch (válcových, kuželových, tvarových) zápichovým nebo axiálním broušením. Vyrábějí se ve dvou typech, buď s posuvným stolem (obr. 1.6 a) u menších a středních brusek, nebo s posuvným vřeteníkem (obr. 1.6 b) u velkých brusek.

U brusek s posuvným stolem, na kterém je pracovní vřeteník a koník, koná stůl přímočarý vratný pohyb, brousicí vřeteník koná přísuv.

U brusky s posuvným vřeteníkem se obrobek pouze otáčí, posuv a přísuv koná brousicí vřeteník.

Natočením vrchní části stolu umožňuje brousit dlouhé kuželové plochy, natočení vřeteníku krátké kuželové plochy.

S přídatným zařízením lze na hrotové brusce brousit díry.



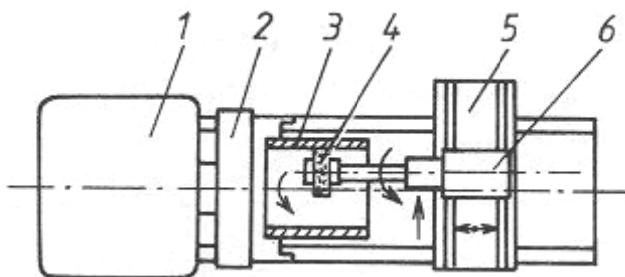
Obr. 1.6 Hrotové brusky [3]

a) s posuvným stolem, b) s posuvným vřeteníkem

1 – brousicí kotouč, 2 – brousicí vřeteník, 3 – stůl, 4 – koník,
5 – obrobek, 6 – pracovní vřeteník

1.5.2 Brusky na díry

Brusky na díry umožňují brousit válcové, kuželové i tvarové rotační plochy (obr. 1.7). Do sklíčidla pracovního vřeteníku se upíná obrobek. Brousicí vřeteník má podélný i příčný posuv. Protože je průměr brousicího kotouče malý, jsou otáčky vřetene velmi vysoké. Do 25000 otáček za minutu se používá pohon vřetene řemenem od elektromotoru, do 120000 otáček za minutu se používá speciální vysokootáčková vřetena.



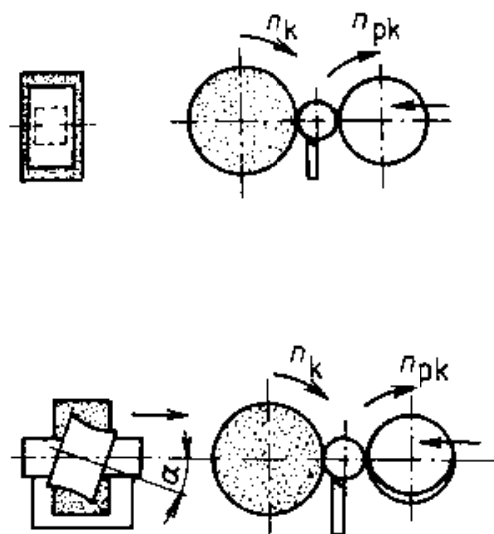
Obr. 1.7 Bruska na díry [3]

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

1.5.3 Bezhruté brusky

Bezhruté brusky se používají v sériové a hromadné výrobě na broušení vnějších a vnitřních válcových a tvarových ploch. Aby byl obrobek unášen, musí být tření mezi podávacím kotoučem a obrobkem větší, než obvodová síla mezi obrobkem a brousícím kotoučem. Pro vnitřní broušení musí být obrobek předem obroušen na vnějším povrchu.

Princip bezhroutého broušení je zřejmý z obr. 1.8.

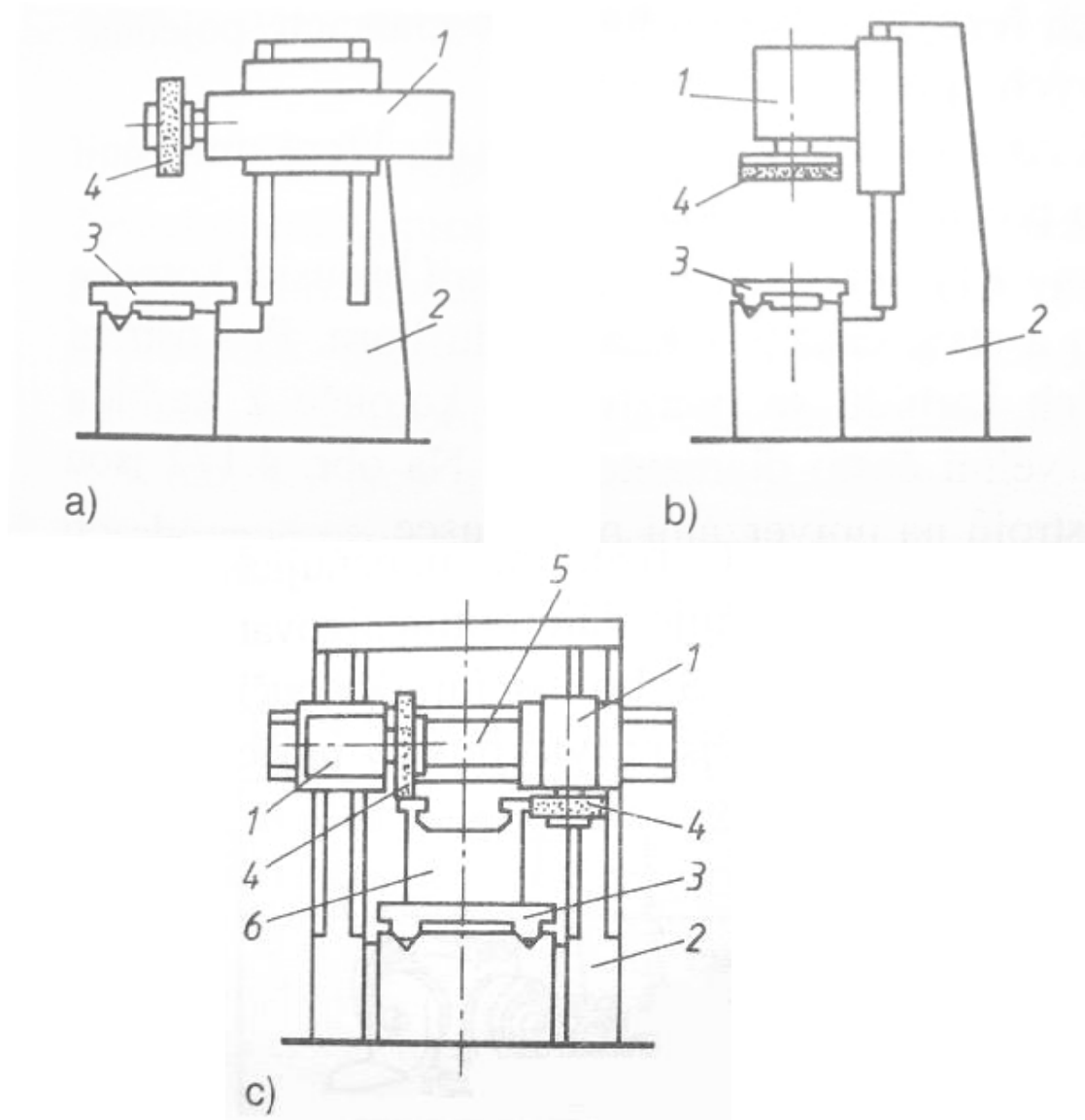


Obr. 1.8 Bezhruté zápichové a axiální broušení [3]

n_k – otáčky brousicího kotouče, n_{pk} – otáčky podávacího kotouče,
 α – úhel natočení podávacího kotouče

1.5.4 Rovinné brusky

Rovinné brusky jsou určeny pro broušení rovinných ploch. Pracují buď obvodem, nebo čelem kotouče. Obrobek se upíná na magnetickou upínací desku nebo na stůl brusky pomocí upínek nebo svěráků. Schematicky jsou typy rovinných brusek znázorněny na obr. 1.9.



Obr. 1.9 Rovinné brusky [3]

a) bruska pracující obvodem kotouče, b) bruska pracující čelem kotouče, c) dvoustojanová bruska

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

1.5.5 Nástrojařské brusky

Nástrojařské brusky jsou určeny pro ostření řezných nástrojů. Brousicí vřeteník může konat svislý pohyb a může se natáčet, stůl koná svislý pohyb, podélný a příčný pohyb a může se natáčet. Brusky jsou vybaveny rozsáhlým příslušenstvím.

Mezi speciální nástrojařské brusky patří brusky na ostření soustružnických nožů, vrtáků, závitníků, kruhových závitových čelistí, pil a další.

1.5.6 Pásové brusky

Pásové brusky lze použít pro broušení rovinných, rotačních i tvarových ploch. Jejich výhodou je velký výkon broušení, dobré využití brusiva, malé teplotní ovlivnění broušeného povrchu a snadná výměna brousicího pásu.

2 PARAMETRY PŘESNOSTI BROUSICÍHO PROCESU

Technologie broušení se ve většině případů používá jako dokončovací operace, proto se požaduje, aby tomu odpovídala přesnost rozměrů a jakost obrobených ploch. Tyto parametry závisí především na tuhosti a přesnosti brusky, velikosti zrna a dalších vlastnostech brousicího kotouče, na způsobu broušení a na řezných podmínkách [3].

2.1 *Struktura povrchu*

Funkce ploch součástí závisí také na nerovnostech, které na povrchu zanechává jakákoliv technologická metoda. Na obrobeném povrchu jsou tyto nerovnosti stopami, které zanechává řezný nástroj, popř. brusivo nebo jiskrový výboj. Na neobrobených plochách zůstávají podle způsobu zpracování – otisky nerovností forem u odlitků, kovadel a zápustek u výkovků, válců, průvlaků apod. [5]

Pro posouzení nerovností povrchu součásti jsou důležité dva pojmy [5]:

- nedokonalost povrchu a
- struktura povrchu

Nedokonalosti povrchu jsou např. rýhy, trhliny, póry, staženiny (lunkry), koroze, mikrotrhliny apod. náhodně způsobené během výroby, skladování nebo funkce povrchu. Tyto a další nedokonalosti povrchu se nezahrnují do hodnocení struktury povrchu [5].

Struktura povrchu jsou opakované nebo náhodné úchytky od geometrického povrchu, které tvoří trojrozměrnou topografii povrchu. Struktura povrchu se člení na složky podle velikosti rozteče příslušných nerovností. Složka s nejmenší roztečí nerovnosti tvoří drsnost povrchu, další složka se nazývá vlnitost povrchu a složka s největší nerovností je určena základním profilem [5].

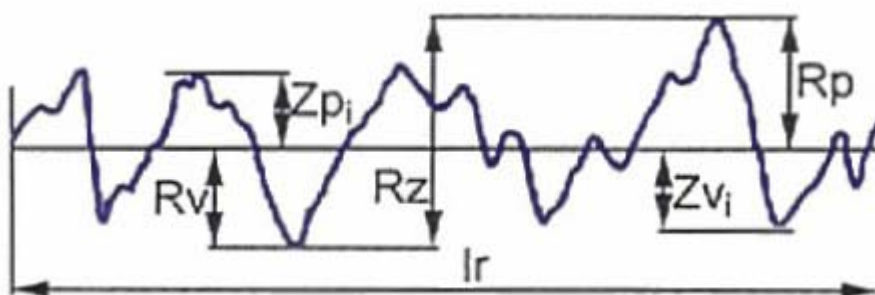
Parametry kvality povrchu obrobených ploch [10]:

Kvalita povrchu obrobené plochy se kvantifikuje parametry struktury povrchu [ČSN EN ISO 4287], k nimž patří především:

- **R_z** maximální výška profilu
- **R_a** střední aritmetická hodnota drsnosti

Maximální výška profilu R_z

Schematické vyjádření maximální výšky profilu R_z je na obr. 2.1 [8].



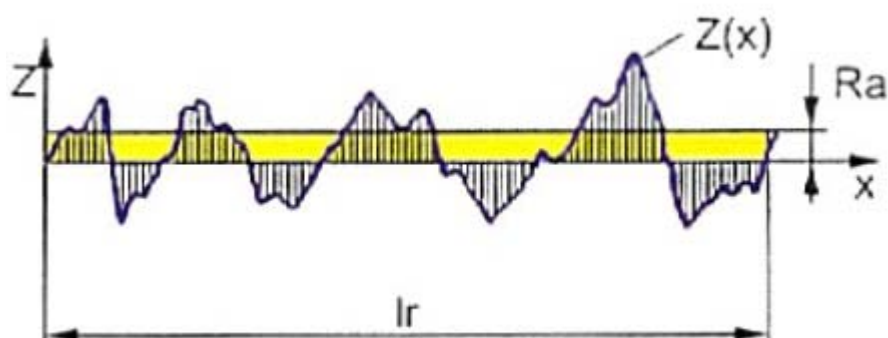
Obr. 2.1 Schematické vyjádření maximální výšky profilu R_z [8]

Střední aritmetická hodnota drsnosti R_a

Střední aritmetická hodnota drsnosti R_a je definována vztahem 2.1 [8].

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (2.1)$$

Schematické vyjádření střední aritmetické hodnoty drsnosti R_a je na obr. 2.2 [8].



Obr. 2.2 Schematické vyjádření střední aritmetické hodnoty drsnosti R_a [8]

V tab. 2.1 jsou uvedeny Střední aritmetické hodnoty drsnosti R_a obrobených ploch, dosahované při různých způsobech broušení [3].

Tab. 2.1 Střední aritmetické hodnoty drsnosti Ra ploch obrobených broušením [3]

Tvar broušené plochy	Způsob broušení	Jakost obrobené plochy Ra [μm]
Rovinná	hrubování	
	- čelem	0,8 až 6,3
	- obvodem	0,8 až 3,2
	broušení na čisto	
	- čelem	0,2 až 1,6
Vnitřní válcová	- obvodem	0,2 až 1,6
	jemné broušení	0,025 až 0,4
	hrubování	1,6 až 3,2
	broušení na čisto	0,4 až 1,6
	jemné broušení	0,05 až 0,4
Vnější válcová	hrubování	1,6 až 3,2
	broušení na čisto	0,4 až 1,6
	jemné broušení	0,025 až 0,4

Pro objektivní posouzení kvality povrchu obrobené plochy se v souladu s [ČSN EN ISO 4287] mohou specifikovat další parametry:

- **Rp** největší výška výstupku profilu
- **Rv** největší hloubka prohlubní
- **Rc** průměrná výška prvků profilu
- **Rt** celková výška profilu
- **Rq** průměrná kvadratická úchylna posuzovaného profilu
- **Rsk** šikmost posuzovaného profilu
- **Rku** špičatost posuzovaného profilu
- **RSm** průměrná šířka prvků profilu
- **RΔq** průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu
- **Rmr(c)** materiálový poměr profilu
- **Rδc** rozdíl výšky úseku profilu
- **Rmr** vzájemný materiálový poměr

Parametry jsou definovány pro základní profil, pro vlnitost a pro profil drsnosti. Ve shora uvedeném přehledu jsou zaznamenány pouze parametry profilu drsnosti.

Požadované parametry kvality povrchu jsou specifikované v konstrukční dokumentaci, kde je uveden typ (Ra, Rz ...) a mezní hodnota v μm (0,8; 3,2 ...). V některých případech je uvedena metodika interpretace předepsané meze (max. 16%).

Pravidlo „max“ znamená, že každé měření musí vyhovět předepsané mezi. Pravidlo „16%“ znamená, že daný povrch je považován za přijatelný, jestliže ne více než 16% všech naměřených hodnot přesahuje hodnotu uvedenou na výkrese. Jedno z šesti (2 z 12, 3 z 18) měření nemusí vyhovět předepsané mezi. Pravidlo „16%“ platí, pokud není uvedeno „max“ [10].

2.2 Geometrické tolerance

Úchytky tvaru, směru, polohy i házení skutečných ploch a profilů mohou nepříznivě ovlivnit funkci jak jednotlivých součástí, tak celých strojů. Například úchytky kruhovitosti elementu valivých ložisek zvyšují opotřebení a hlučnost chodu, házení rotujících kotoučů a hřídelů způsobuje chvění strojů. Na přímosti, rovnoběžnosti nebo kolmosti vodících a upínacích ploch záleží přesnost obráběcích strojů apod. Zaměnitelnost součástí je pak podmíněna tím, aby úchytky rozměrů, struktury povrchů a geometrické úchytky funkčních ploch nepřesáhly účelně stanovené mezní hodnoty, tj. aby součásti byly vyrobeny v předepsaných tolerancích [5].

Druhy geometrických tolerancí [5] [9]:

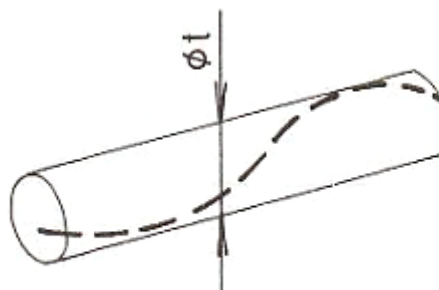
Tolerance vztahující se k jednomu prvku:

Tvaru:

- Přímosti

o značka: —

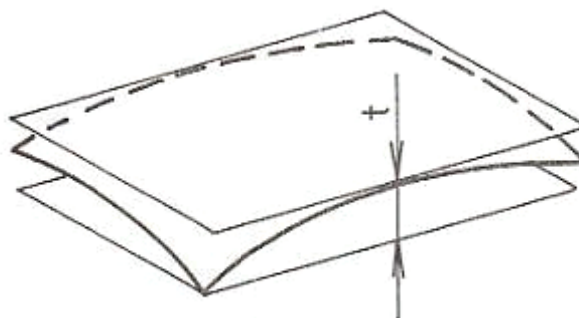
o znázornění:



- Rovinnosti

o značka: □

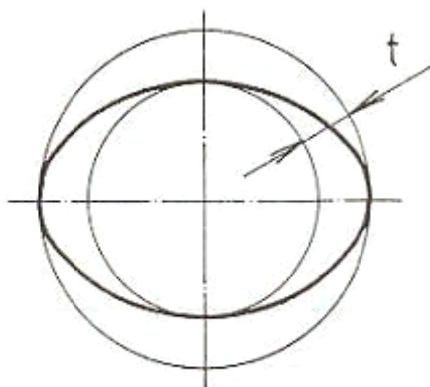
o znázornění:



- Kruhovitosti
 - o značka:



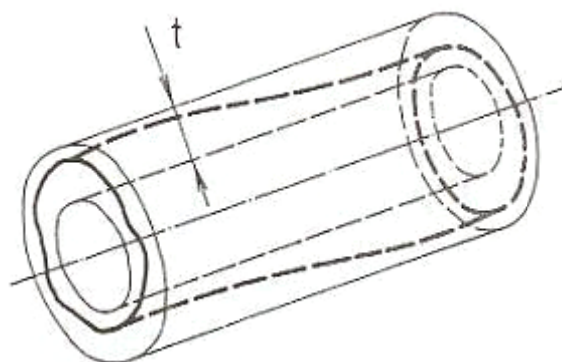
- o znázornění:



- Válcovitosti
 - o značka:



- o znázornění:



Tolerance vztahující se k jednomu prvku nebo dvěma (a více) prvkům:

Tvaru:

- Tvaru profilu
 - o značka:



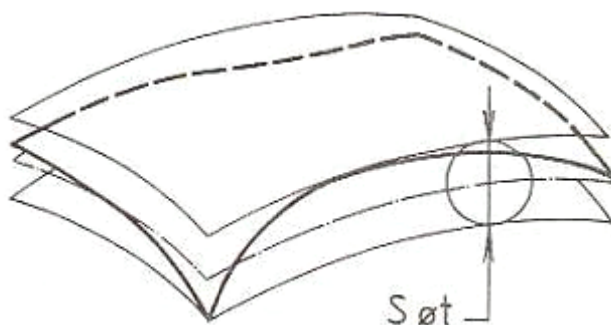
- o znázornění:



- Tvaru polohy
 - o značka



- o znázornění



Tolerance vztahující se ke dvěma nebo více prvkům:

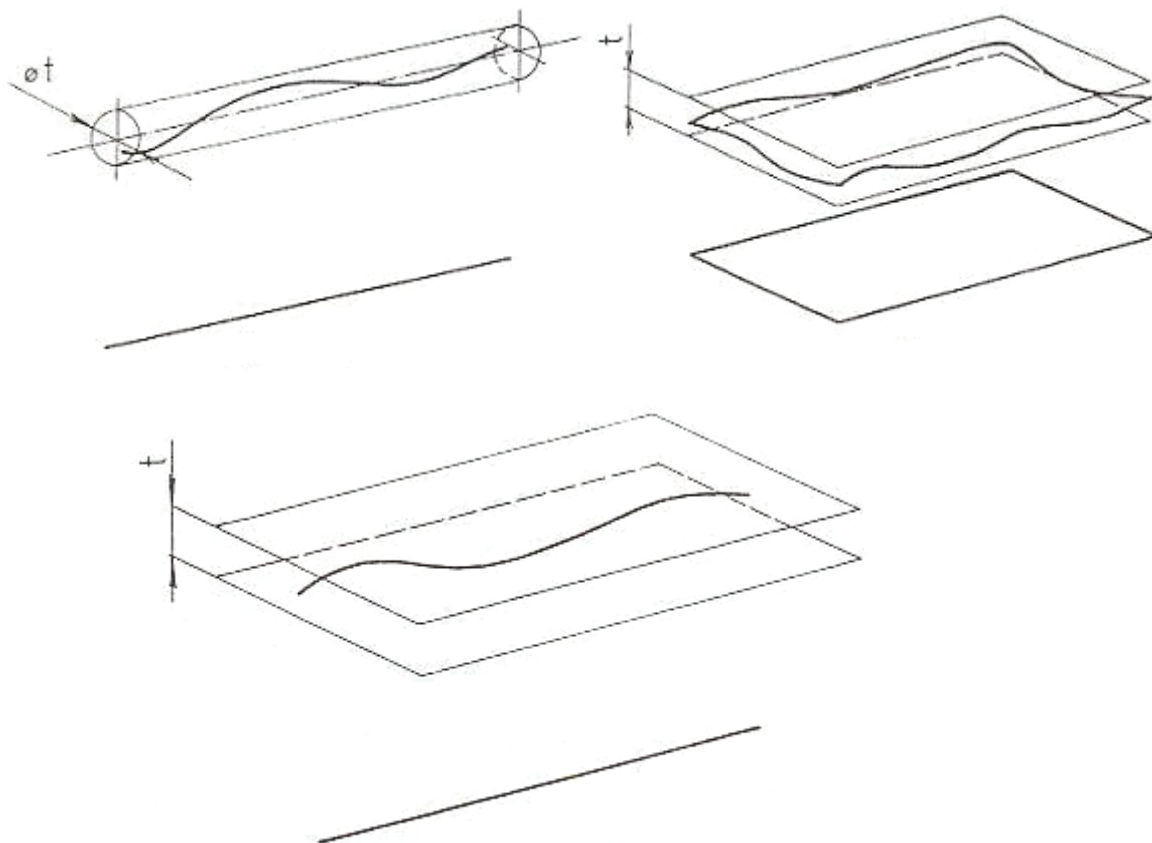
Směru:

- Rovnoběžnosti

- o značka



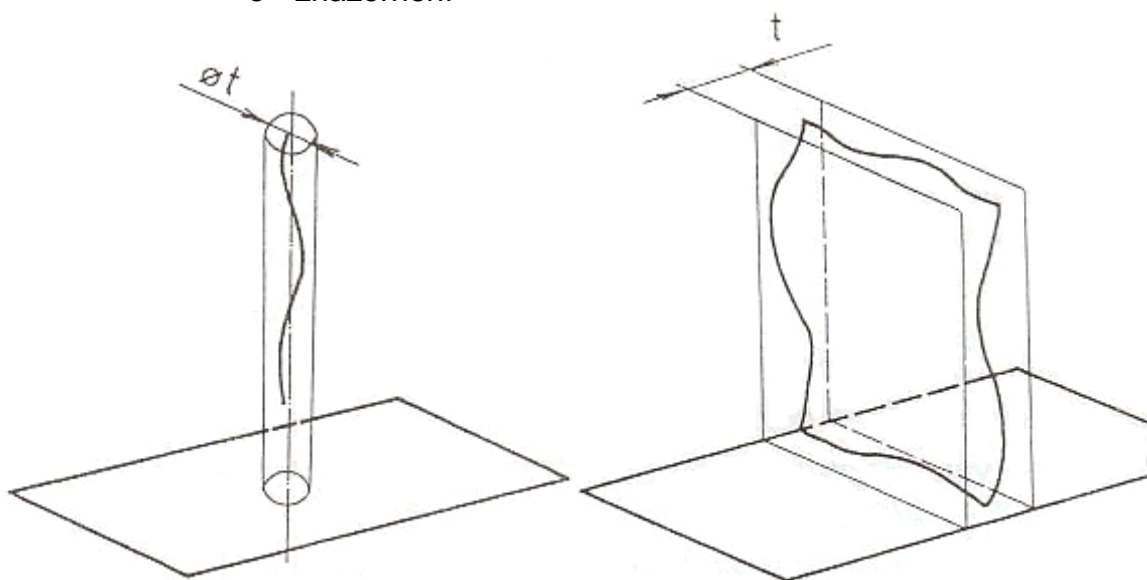
- o znázornění



- Kolmosti
- o značka



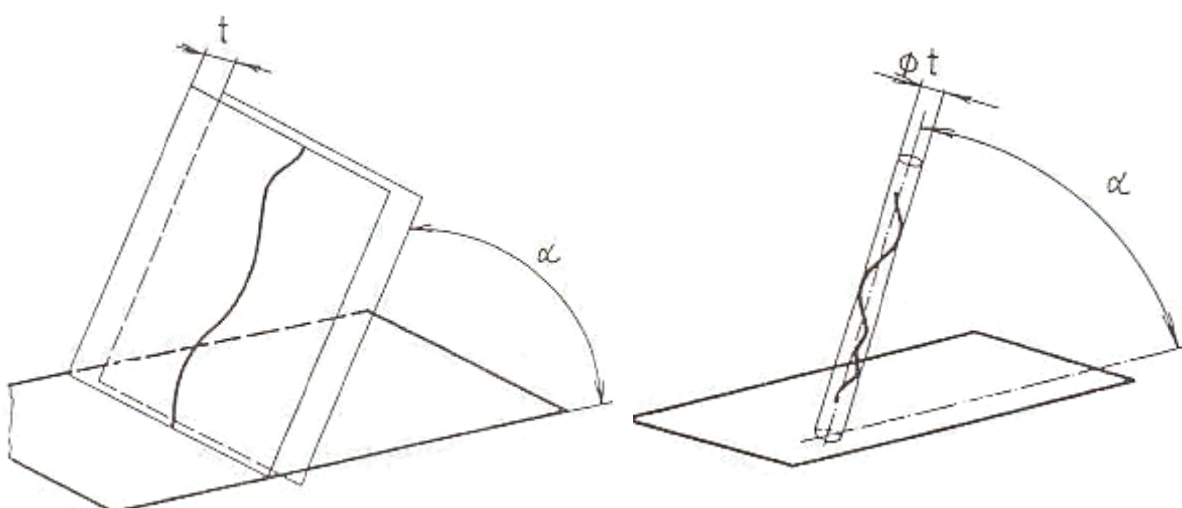
- o znázornění



- Sklonu
- o značka

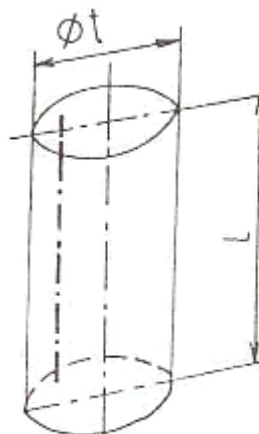


- o znázornění



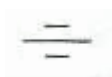
Polohy:

- Umístění
 - o značka
 - o znázornění



JMENOVITÁ POLOHA OSY

- Soustřednosti a souososti
 - o značka
- Souměrnosti [9]
 - o značka



Házení:

- Kruhového (obvodového a čelního)
 - o značka
- Celkového (obvodového a čelního)
 - o značka



2.3 Přesnost rozměrů

(ČSN 01 3136 – ISO 406)

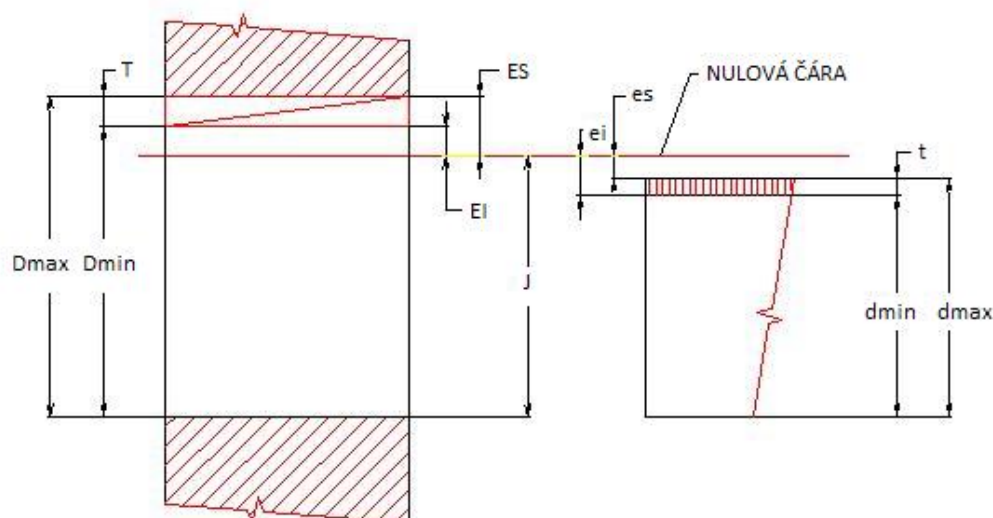
Skutečný rozměr součásti musí ležet mezi dvěma pevně stanovenými mezními rozměry. Předepisování mezních rozměrů, tj. vytvoření předpokladu správného vztahu mezi dvěma součástmi, které jsou v sobě uloženy nebo na sebe dosedají, se označuje obecným pojmem lícování.

Lícováním lze u funkčně vázaných ploch dosáhnout buď jistého stupně volnosti vzájemného pohybu součástí, nebo naopak zaručit jistý odpor nutný k jejich spojení a rozebrání. Tento vzájemný vztah se nazývá uložení. Velikosti tolerancí i uložení jsou předepisovány pomocí horních a dolních mezních úchylek.

V obrázku 2.3 značí (slovo díra označuje obecně vnitřní plochu, slovo hřídel vnější plochu; pro označení veličin vnějších ploch se používají velká písmena, vnitřních malá):

J	Jmenovitý rozměr
$D_{\max}, d_{\max}$	Horní mezní rozměry
$D_{\min}, d_{\min}$	Dolní mezní rozměry
ES	Horní mezní úchylka díry ($D_{\max} - J$)
EI	Dolní mezní úchylka díry ($D_{\min} - J$)
es	Horní mezní úchylka hřídele ($d_{\max} - J$)
ei	Dolní mezní úchylka hřídele ($d_{\min} - J$)
T	Tolerance díry $ D_{\max} - D_{\min} $
t	Tolerance hřídele $ d_{\max} - d_{\min} $

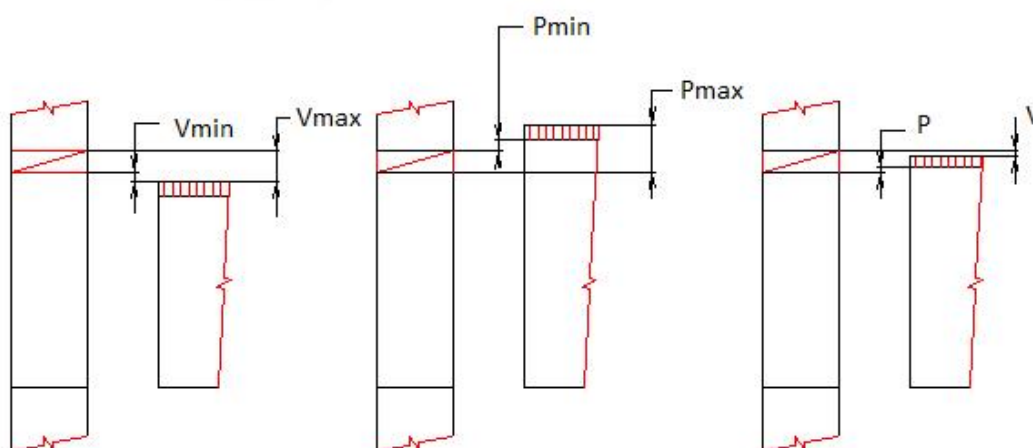
Mezní úchylky mohou být kladné nebo záporné (podle polohy vůči nulové čáře), tolerance jsou vždy kladné číslo [11].



Obr. 2.3 Základní pojmy lícování [11]

U sdružených ploch se podle vzájemné polohy tolerančních polí rozlišují 3 základní skupiny uložení [11]:

- a) **Uložení s vůlí** (hybná), která dovolují vzájemný otáčivý nebo posuvný pohyb součástí (toleranční pole díry je celé nad tolerančním polem hřídele); tolerance uložení je $V_{\max} - V_{\min} = T + t$
- b) **Uložení s přesahem** (lisovaná), která zaručují při působení předpokládaných funkčních sil nebo momentů nehybnost spojení (toleranční pole díry je celé pod tolerančním polem hřídele); tolerance uložení je $P_{\max} - P_{\min} = T + t$
- c) **Uložení přechodná**, u nichž se může vyskytnout jak vůle, tak i přesah, protože se toleranční pole díry a hřídele částečně překrývají;



a)

b)

c)

Obr. 2.4 Základní skupiny uložení [11]

Skutečná vůle nebo přesah u dvou funkčně sdružených součástí závisí na tom, kterému z mezních rozměrů se skutečný rozměr při výrobě obou součástí přiblíží. Zkušenosti z hromadné výroby i statistická šetření dokazují, že mezní případy nejmenších vůlí nebo přesahů prakticky nenastávají. Při výrobě vznikají jednak náhodné chyby, jejichž hodnotu nelze předem stanovit, jednak chyby soustavné, které mají při stejných podmínkách stejnou velikost a znaménko a lze je při výrobě respektovat. Relativní četnost náhodných chyb je stejná pro kladnou i zápornou hodnotu; nejčastější jsou hodnoty, které se co nejvíce přibližují střední hodnotě. To umožňuje pro hromadnou výrobu volit větší tolerance (finanční úspory) i za cenu toho, že musí být některé výrobky vyřazeny jako zmetkové [11].

V tab. 2.2 jsou uvedeny přesnosti rozměrů obrobené plochy, dosažitelné při různých způsobech broušení.

Tab. 2.2 Přesnost ploch obrobených broušením [3]

Tvar broušené plochy	Způsob broušení	Přesnost rozměrů IT [-]
Rovinná	hrubování	
	- čelem	9 až 11
	- obvodem	8 až 11
	broušení na čisto	
	- čelem	5 až 7
	- obvodem	5 až 7
Vnitřní válcová	jemné broušení	3 až 5
	hrubování	9 až 11
	broušení na čisto	5 až 7
Vnější válcová	jemné broušení	3 až 6
	hrubování	9 až 11
	broušení na čisto	5 až 7
	jemné broušení	3 až 6

3 ANALÝZA TECHNOLOGICKÝCH VLIVŮ NA PŘESNOST BROUSICÍHO PROCESU

3.1 Stroje

3.1.1 Požadavky na brousicí stroje

Požadavky na přesnost brousicích strojů jsou dány normami.

Pro hrotové brusky a hrotové univerzální brusky s pohyblivým stolem je to norma ČSN ISO 2433.

Pro bezhroté brusky je to norma ČSN ISO 3875.

Pro rovinné brusky je to norma ČSN ISO 4703.

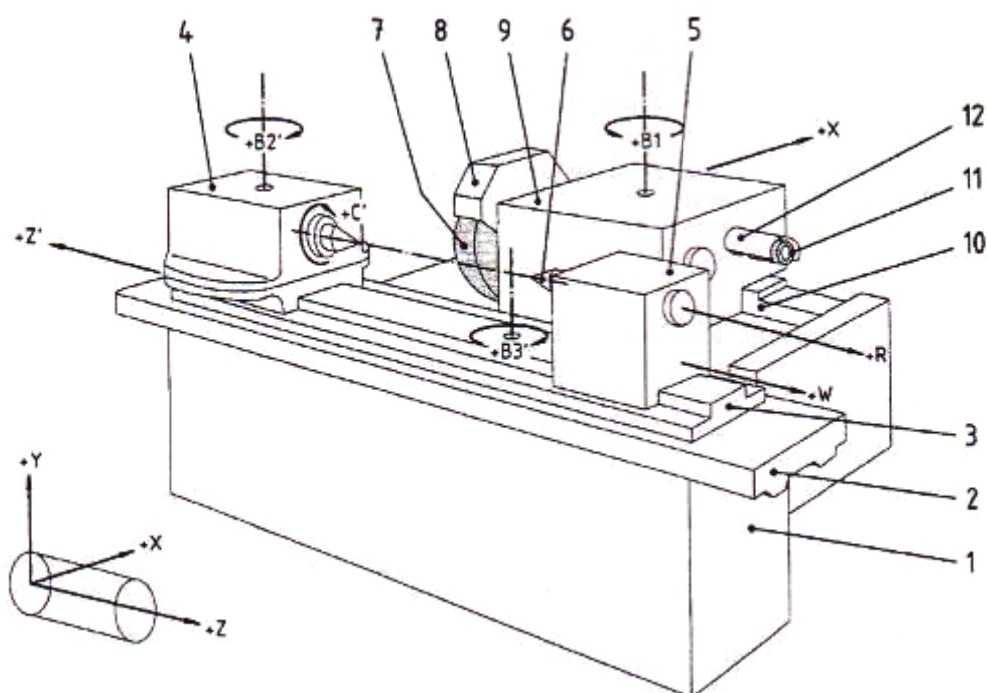
Pro zjednodušení zde budou uvedeny příklady pouze pro hrotové brusky a hrotové univerzální brusky s pohyblivým stolem.

Pro ostatní brusky jsou tolerance dosti podobné, takže je do jisté míry možno z tohoto vycházet.

Norma ČSN ISO 2433 definuje [14]:

- a) Zkoušky geometrické přesnosti
- b) Zkoušky obráběním
- c) Přesnost a opakovatelnost nastavení polohy

Terminologie označení os:



POZNÁMKA: Osa B1 je použita podle vhodnosti.

Obr. 3.1 Hrotová univerzální bruska [14]

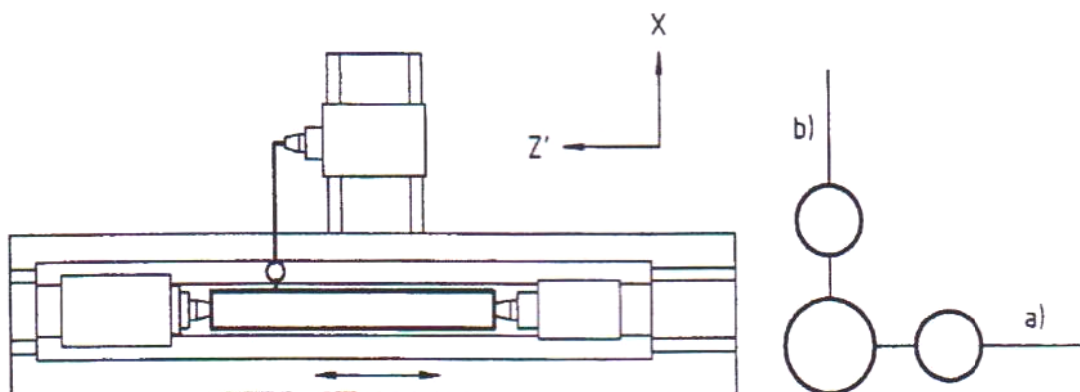
Terminologie:

- 1 – Lože
- 2 – Saně stolu
- 3 – Otočný stůl
- 4 – Unášecí vřeteník
- 5 – Koník
- 6 – Pinola
- 7 – Broušící kotouč
- 8 – Ochranný kryt broušícího kotouče
- 9 – Broušící vřeteník
- 10 – Saně broušícího vřeteníku
- 11 – Broušící kotouč na vnitřní broušení
- 12 – Ochranný kryt broušícího kotouče na vnitřní broušení

Zkoušky geometrické přesnosti [14]

- a) Měření přímočarosti pohybu saní stolu (osa Z) ve vodorovné rovině ZX
b) Měření rovnoběžnosti osy mezi hroty vřetena unášecího vřeteníku a pinoly koníku a pohybem saní stolu (osa Z) ve svislé rovině ZY.

Schéma:

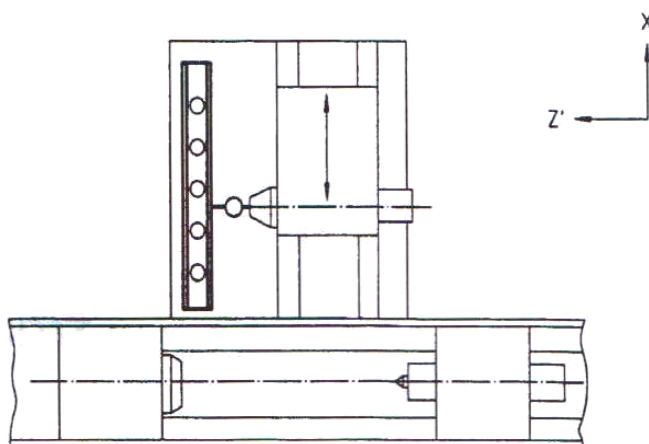


Tolerance:

- a) 0.01 na měřicí délce do 1000
Zvýšení tolerance o 0.005 na každé zvětšení délky o 1000 nebo o část odpovídající zvětšené délce
- b) 0.02 na měřicí délce do 1000
Zvýšení tolerance o 0.005 na každé zvětšení délky o 1000 nebo o část odpovídající zvětšené délce

Měření přímočarosti pohybu saní brousicího vřeteníku (osa X) ve vodorovné rovině ZX.

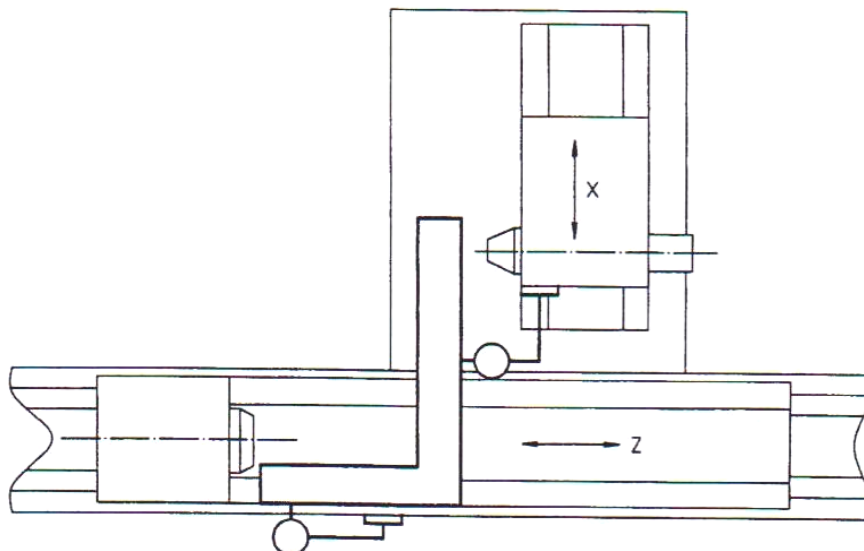
Schéma:



Tolerance:
0.02 na celé délce

Měření kolmosti pohybu saní brousicího kotouče (osa X) k pohybu saní stolu (osa Z), je-li to použitelné.

Schéma:

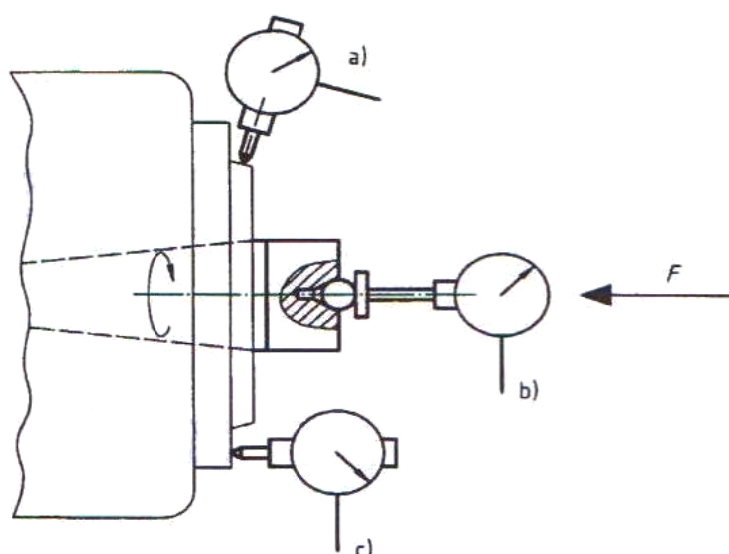


Tolerance:
0.02 na měřené délce 300

Měření vřetena unášecího vřeteníku:

- a) obvodové házení vnějšího upínacího průměru
- b) periodického axiálního pohybu
- c) čelního házení upínacího čela vřetena (zahrnuje periodický axiální pohyb)

Schéma:



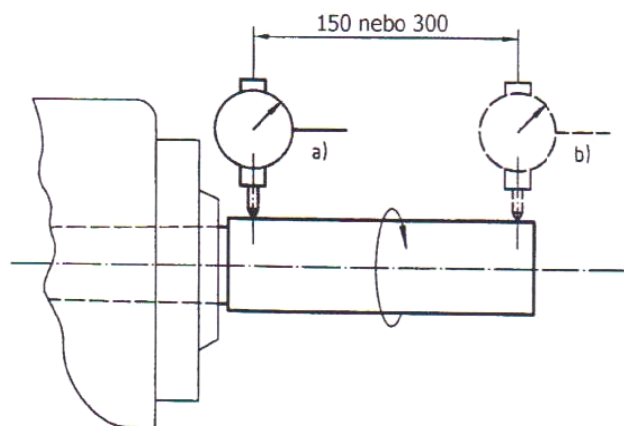
Tolerance:
a) 0.005

b) 0.005

c) 0.01

Měření obvodového házení vnitřního kužele vřetena unášecího vřeteníku:**a) u konce vřetena****b) ve vzdálenosti 150 mm nebo 300 mm**

Schéma:



Tolerance:

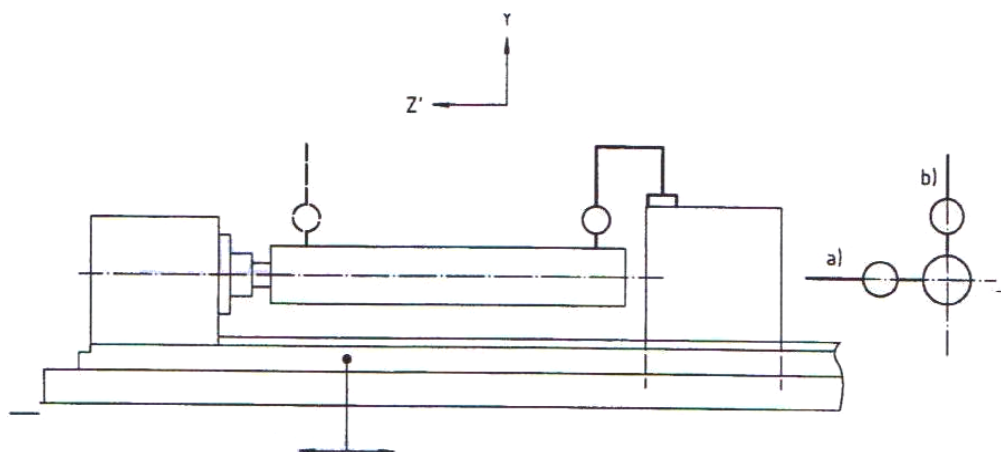
a) 0.005

b) 0.015 pro délku 300

0.010 pro délku 150

Měření rovnoběžnosti osy otáčení vřetena unášecího vřeteníku s pohybem stolu (osa Z):**a) ve vodorovné rovině ZX****b) ve svislé rovině YZ**

Schéma:



Tolerance:

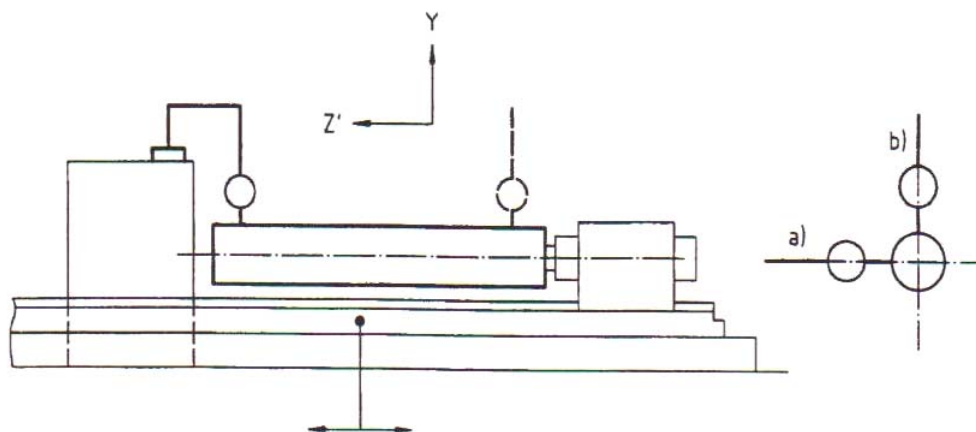
Pro a) a b)

0.012 na měřené délce 300 (konec zkušebního trnu skloněn k broušicímu kotouči a nahoru)

0.008 na měřené délce 150 (konec zkušebního trnu skloněn k broušicímu kotouči a nahoru)

Měření rovnoběžnosti osy vnitřního kužele pinoly koníku s pohybem stolu (osa Z):**a) ve vodorovné rovině ZX****b) ve svislé rovině YZ**

Schéma:



Tolerance:

a) 0.015 na měřené délce 300 (konec zkušebního trnu skloněn k broušicímu kotouči)

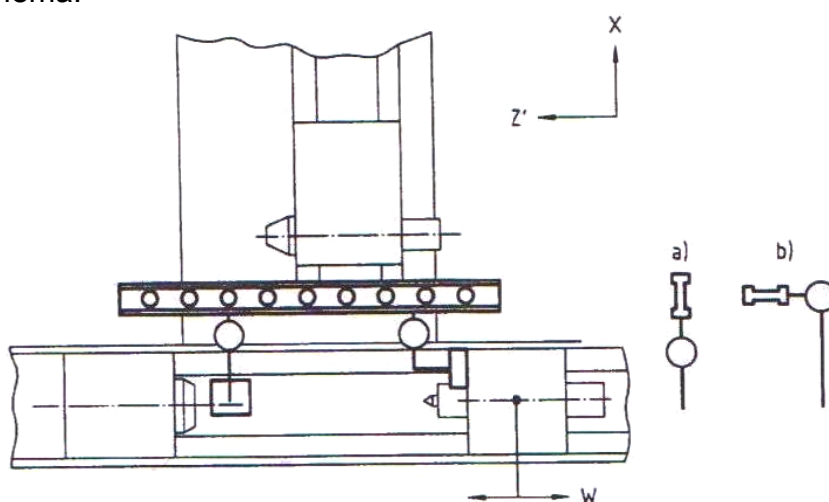
0.01 na měřené délce 150 (konec zkušebního trnu skloněn k broušicímu kotouči)

b) 0.015 na měřené délce 300 (konec zkušebního trnu skloněn nahoru)

0.01 na měřené délce 150 (konec zkušebního trnu skloněn nahoru)

Měření rovnoběžnosti pohybu koníku na stole (osa W) s pohybem stolu (osa Z):**a) ve vodorovné rovině ZX****b) ve svislé rovině YZ**

Schéma:



Tolerance:

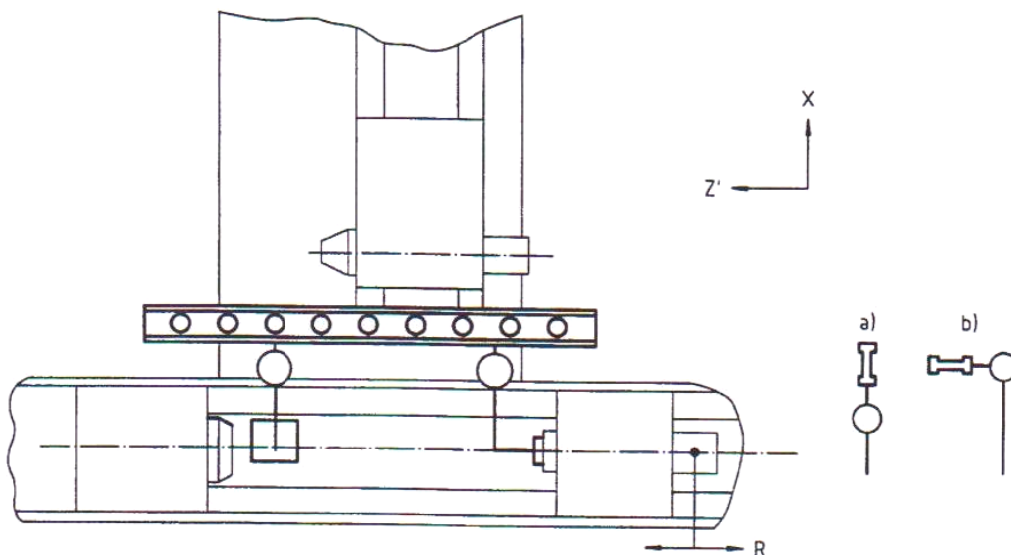
a) 0.01 na měřené délce do 1000. Zvýšení tolerance o 0.005 na každé zvětšení délky o 1000 nebo odpovídající část.

b) 0.015 na měřené délce do 1000. Zvýšení tolerance o 0.005 na každé zvětšení délky o 1000 nebo odpovídající část.

Měření rovnoběžnosti pohybu pinoly koníku (osa R) s pohybem stolu (osa Z):

- a) ve vodorovné rovině ZX
- b) ve svislé rovině YZ

Schéma:



Tolerance:

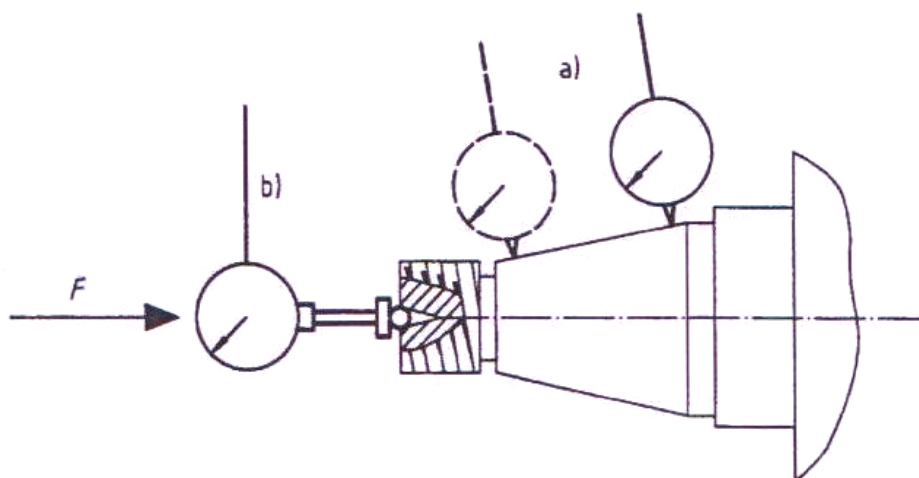
Pro a) a b):

0.008 na měřené délce do 100

Měření brouscího vřetena:

- a) obvodové házení (upínacího průměru pro brouscí kotouč)
- b) periodický axiální pohyb

Schéma:



Tolerance:

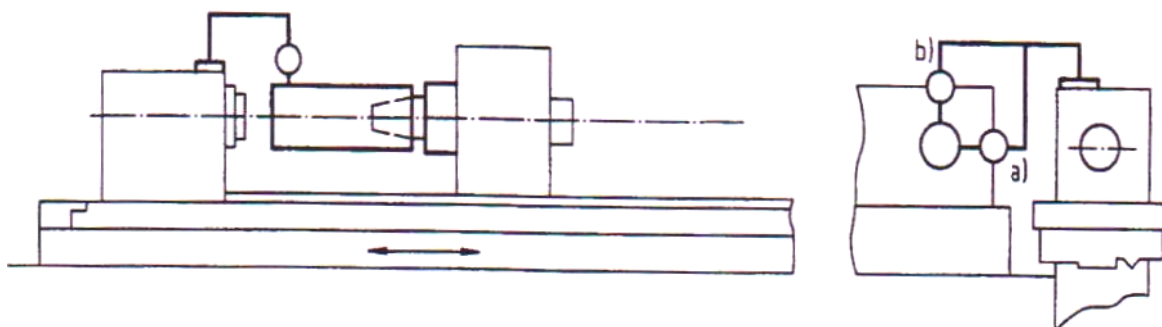
a) 0.005 pro obě měřené části plochy

b) 0.01

Měření rovnoběžnosti osy brousícího vřetena s pohybem stolu (osa Z):

- a) ve vodorovné rovině ZX
- b) ve svislé rovině YZ

Schéma:

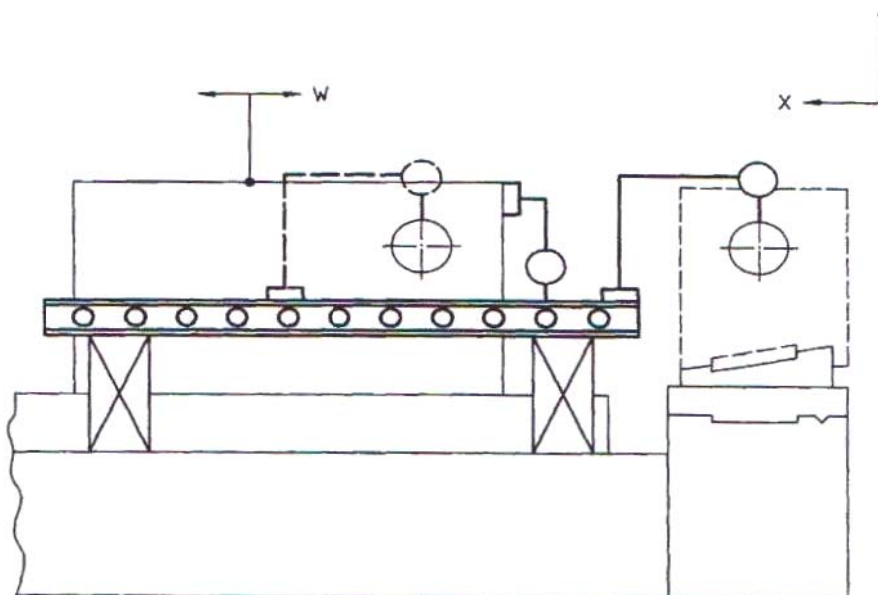


Tolerance:

- a) 0.03 na měřené délce 300
0.02 na měřené délce 150
- b) 0.03 na měřené délce 300
0.02 na měřené délce 150 (konec zkušebního trnu skloněn nahoru kromě případu, kdy brousící kotouč může být připevněn na oba konce vřetena)

Měření shodnosti vzdálenosti (shodnosti výšek) vřetena unášecího vřeteníku a brousícího vřetena od základní roviny (rovina definována pohybem v osách X a Z).

Schéma:

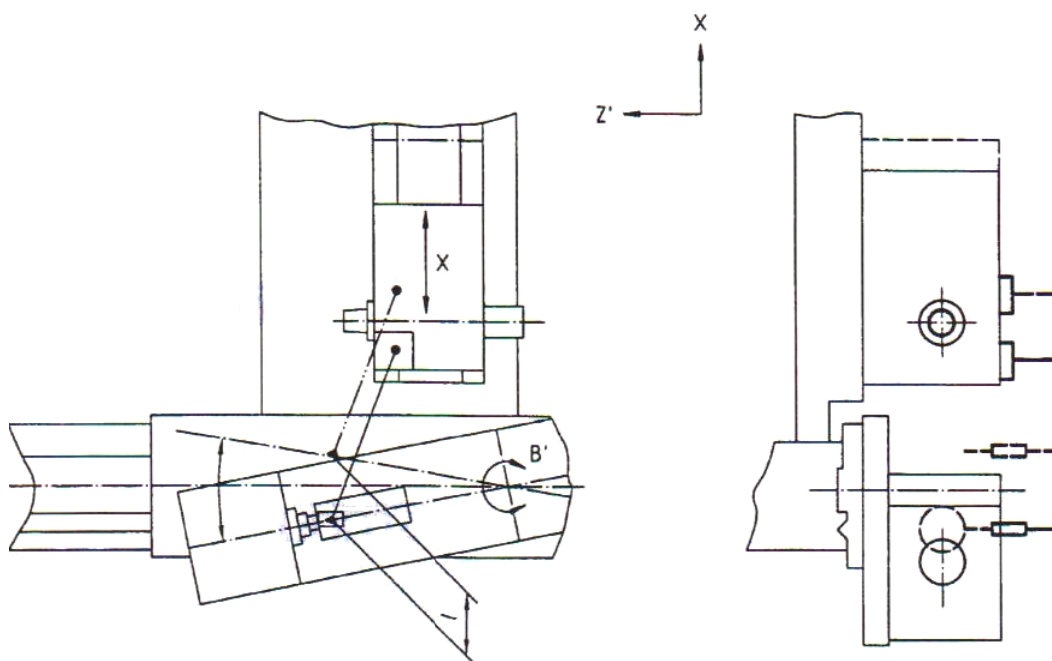


Tolerance:

0.4

Měření rovnoběžnosti roviny natáčení stolu s rovinou ZX.

Schéma:

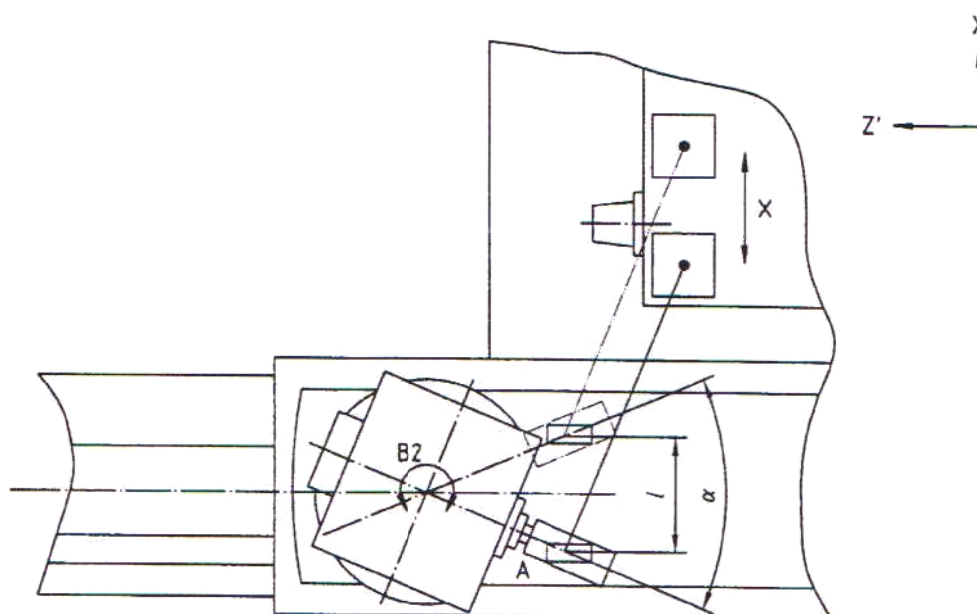


Tolerance:

0.05 na celý rozsah natáčení

Měření rovnoběžnosti roviny natáčení unášecího vřeteníku s rovinou ZX.

Schéma:

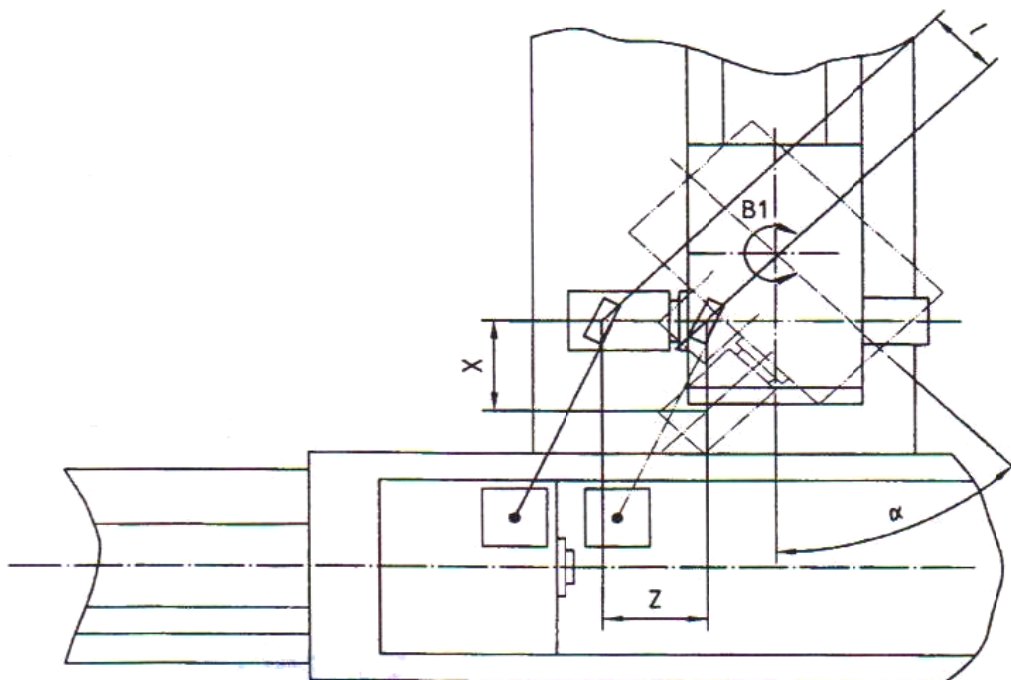


Tolerance:

0.02 pro $l \approx 200$

Měření rovnoběžnosti roviny natáčení brousicího vřeteníku s rovinou ZX.

Schéma:

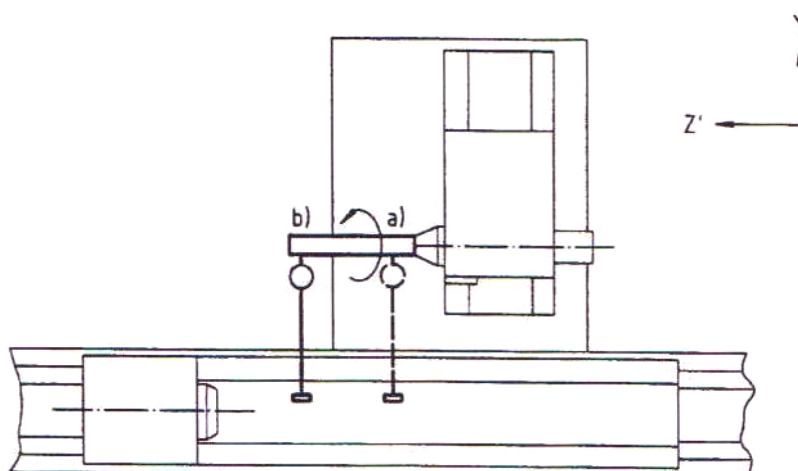


Tolerance:
0.05 pro $l=200$

Měření obvodového házení kužele brousicího vřetená na vnitřní broušení:

- a) u konce kužele
- b) ve vzdálenosti 150mm

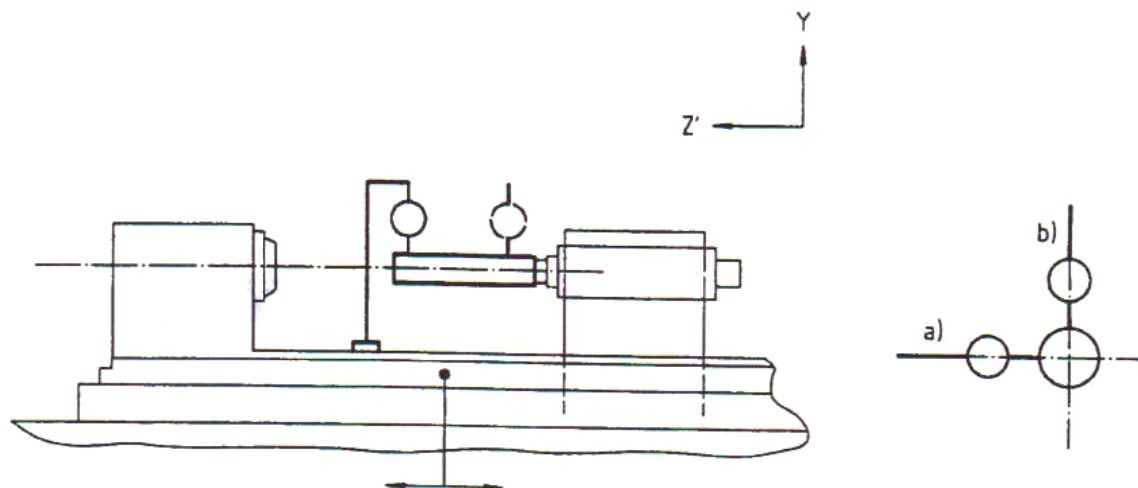
Schéma:



Tolerance:
a) 0.005
b) 0.01

Měření rovnoběžnosti osy brousicího vřetena na vnitřní broušení s pohybem stolu (osa Z):
a) ve vodorovné rovině
b) ve svislé rovině

Schéma:

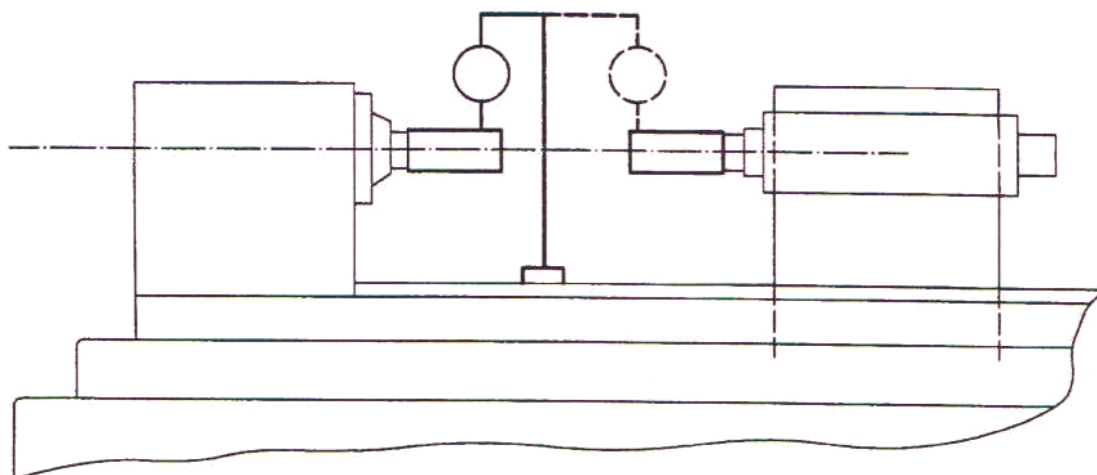


Tolerance:

- a) 0.03 na měřené délce 300
- 0.02 na měřené délce 150
- b) 0.03 na měřené délce 300 (konec zkušebního trnu skloněn nahoru)

Měření shodnosti vzdálenosti (shodnosti výšek) brousicího vřetena na vnitřní broušení a vřetena unášecího vřeteníku od základní roviny (rovina definována pohyby v osách X a Z).

Schéma:

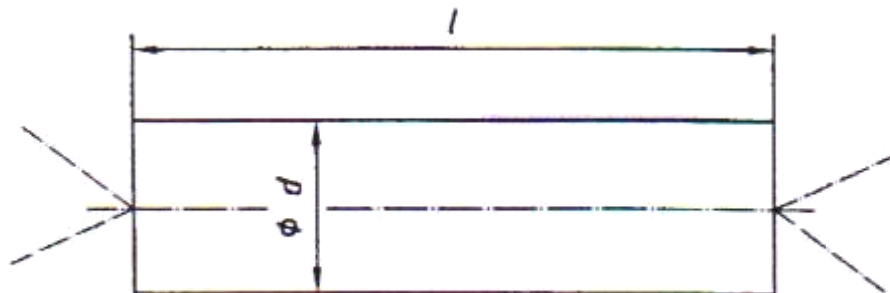


Tolerance:

0.02

Zkoušky obráběním [14]**Měření:****a) kruhovitosti****b) stálosti průměrů, rozdílnosti průměrů měřených na obou koncích a ve středu zkušebního obrobku při broušení zkušební obrobku mezi hroty**

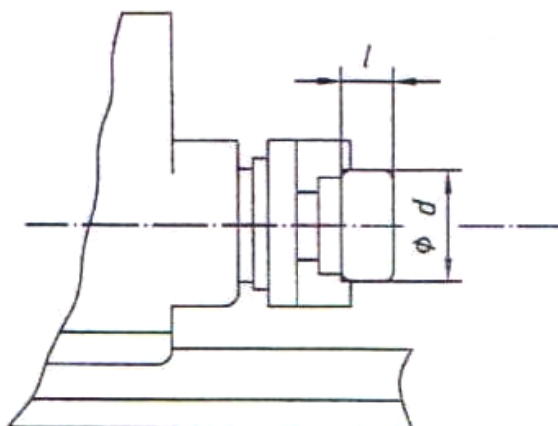
Schéma zkušební obrobku:



Tolerance:

a) 0.003 pro $l \leq 630$
0.005 pro $l > 630$ b) pro $l = 160$; 0.003
pro $l = 315$; 0.005
pro $l = 630$; 0.008pro $l = 1000$; 0.010
pro $l = 1500$; 0.015**Měření kruhovitosti při broušení zkušební obrobku upnutého ve sklíčidle.**

Schéma zkušební obrobku:



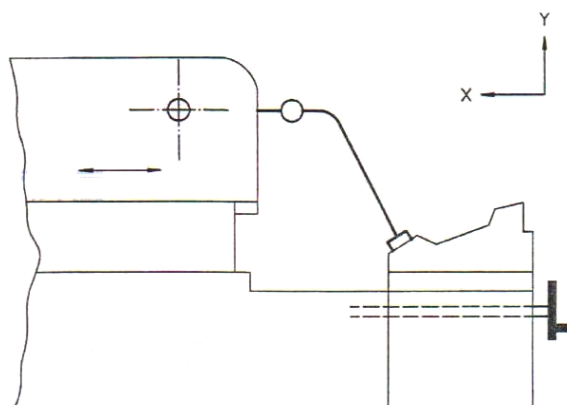
Tolerance:

Pro $DC \leq 1500$; 0.003Pro $DC > 1500$; 0.004 u obrobku průměru 100 mm

DC – vzdálenost mezi hroty

Přesnost a opakovatelnost nastavení polohy [14]**Měření opakovatelnosti nastavení polohy broušícího vřeteníku.**

Schéma:



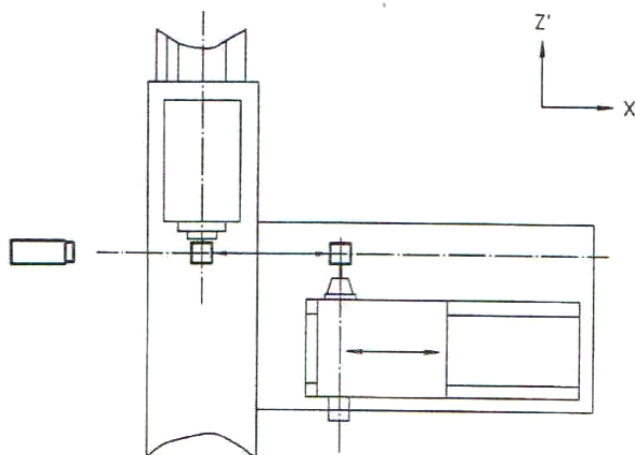
Tolerance:

Pro $D \leq 500$; 0.03Pro $D > 500$; 0.05

Kde D je maximální přípustný průměr broušení

Měření jednostranné přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v ose X (pohyb broušícího vřeteníku).

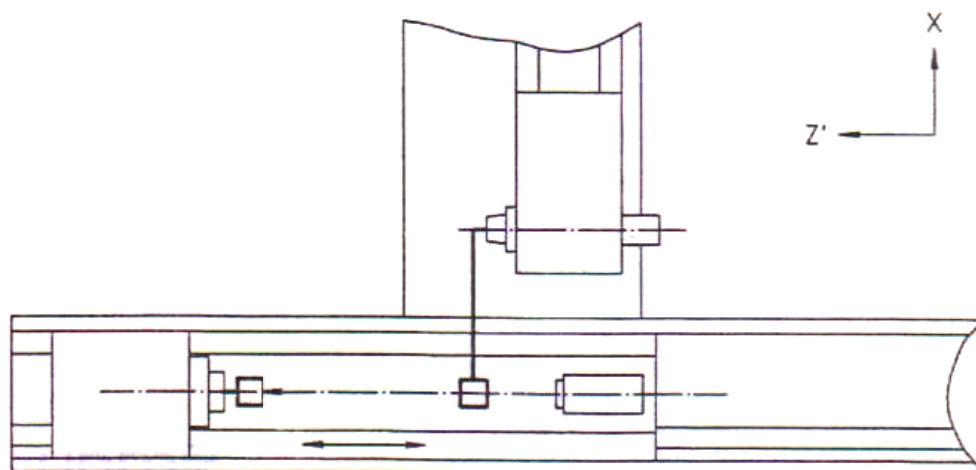
Schéma:



Tolerance	Měřená délka	
	≤ 500	≤ 1000
Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose $A \uparrow$ a $A \downarrow$	0.016	0.020
Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose $R \uparrow$ a $R \downarrow$	0.006	0.008
Jednostranná systematická polohová úchylka v ose $E \uparrow$ a $E \downarrow$	0.008	0.013
Necitlivost v ose B	0.010	0.013

Měření přesnosti a opakovatelnosti číslicově řízeného nastavení polohy v ose Z (pohyb stolu).

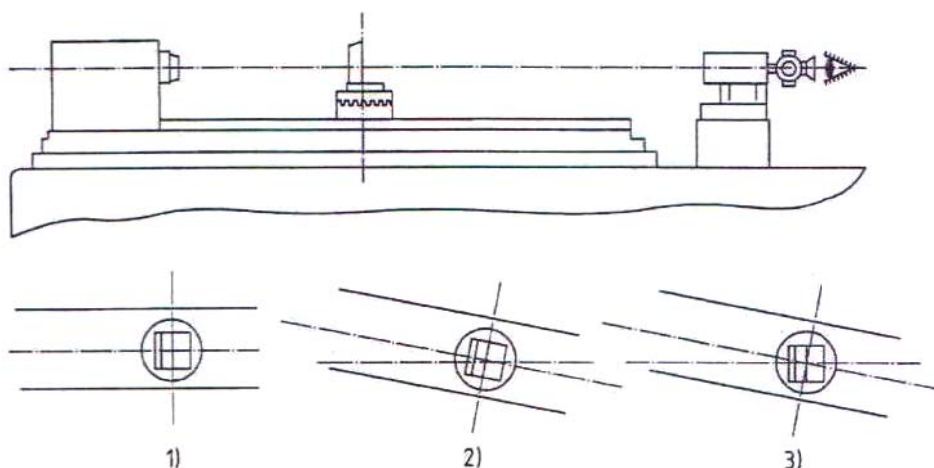
Schéma:



Tolerance	Měřená délka		
	≤ 500	≤ 1000	≤ 2000
Osy do 2000 mm			
Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose A	0.025	0.032	0.040
Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose A ↑ a A ↓	0.015	0.019	0.024
Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose R	-	-	-
Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose R ↑ a R ↓	0.008	0.010	0.013
Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose E	0.016	0.020	0.025
Jednostranná systematická polohová úchylka v ose E ↑ a E ↓	0.008	0.010	0.013
Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose M	0.008	0.010	0.013
Necitlivost v ose B	0.010	0.013	0.016
Osy nad 2000 mm			
Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose E	0.032 + 0.008 pro každých dalších 1000 mm		
Jednostranná systematická polohová úchylka v ose E ↑ a E ↓	0.025 + 0.005 pro každých dalších 1000 mm		
Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose M	0.025 + 0.005 pro každých dalších 1000 mm		
Necitlivost v ose B	0.016 + 0.003 pro každých dalších 1000 mm		

Měření přesnosti a opakovatelnosti číslicově řízeného nastavení polohy v ose B 3' (natáčení stolu).

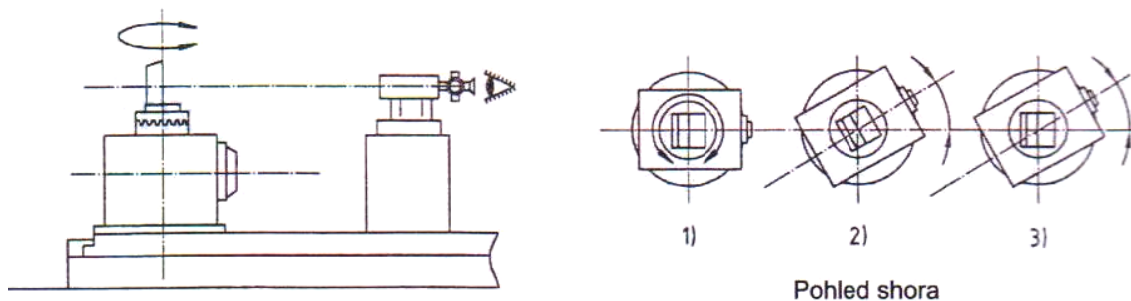
Schéma:



Tolerance	Měřená délka $\leq +10^\circ$
Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose A	25''
Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose A ↑ a A ↓	20''
Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose R	-
Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose R ↑ a R ↓	10''
Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose E	20''
Jednostranná systematická polohová úchylka v ose E ↑ a E ↓	10''
Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose M	10''
Necitlivost v ose B	13''

Měření přesnosti a opakovatelnosti číslicově řízeného nastavení polohy v ose B 2' (natáčení unášecího vřeteníku).

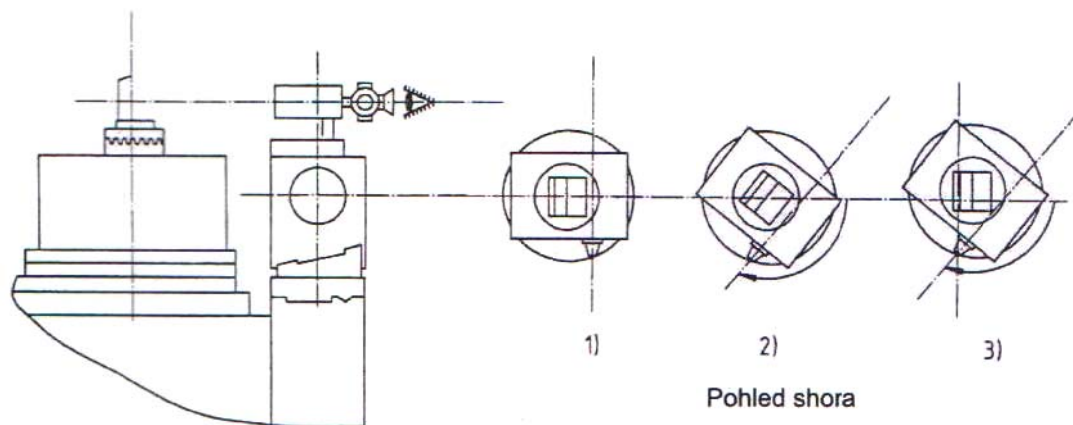
Schéma:



Tolerance	Měřená délka $\leq \pm 45^\circ$
Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose A	25''
Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose A$\uparrow$ a A$\downarrow$	20''
Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose R	-
Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose R$\uparrow$ a R$\downarrow$	10''
Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose E	20''
Jednostranná systematická polohová úchylka v ose E$\uparrow$ a E$\downarrow$	10''
Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose M	10''
Necitlivost v ose B	13''

Měření přesnosti a opakovatelnosti číslicově řízeného nastavení polohy v ose B 1 (natáčení broudicího vřeteníku).

Schéma:



Tolerance	Měřená délka $\leq \pm 45^\circ$
Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose A	25''
Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose A$\uparrow$ a A$\downarrow$	20''
Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose R	-
Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose R$\uparrow$ a R$\downarrow$	10''
Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose E	20''
Jednostranná systematická polohová úchylka v ose E$\uparrow$ a E$\downarrow$	10''
Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose M	10''
Necitlivost v ose B	13''

3.1.2 Modernizace brousicích strojů

Má-li se zvýšit přesnost výroby je vhodné starší stroje modernizovat. Modernizace a generální opravy sice stojí nemalé finanční prostředky, nicméně lze jimi dosáhnout vyšší efektivity výroby a to hlavně instalováním moderních technologií.

Některé stroje se již modernizovat z finančního hlediska nevyplatí, jelikož by modernizace vyšla na stejné nebo i vyšší náklady než koupě stroje nového. Respektive by náklady na modernizaci byly tak vysoké, že je výhodnější koupit místo zastaralého stroje nový. Proto je potřeba si předem rozmyslet, zda ještě modernizovat či ne.

U brousicích strojů se modernizují tyto části [12]:

Povrchová úprava

Vnitřní plochy brusky se opatří antikorozním olejivzdorným nátěrem. Vnější plochy jsou vytmeleny, přebroušeny a opatřeny polyuretanovým nátěrem.

Lože, stoly, desky pod brousicí vřeteník

U loží se provádí přefrézování s následným zaškrabáním dle protokolu přesnosti s použitím přesných tuširovacích šablon pro jednotlivá vedení: stolu, loží, vedení zadní desky a brousicího vřeteníku. Spodní i vrchní stůl jsou přebroušeny na speciálních bruskách na vodící plochy s protokolem přesnosti broušení.

Kuličkové šrouby

Kuličkové šrouby na všech strojích jsou dodávány nové. Dodávané kuličkové šrouby jsou v přesnosti IT 3, resp IT 1 [12].

Pracovní vřeteník

Kompletní oprava pracovního vřeteníku, zahrnující výměnu vřetene za nové s vysoce přesnými párovanými ložisky, výměna ozubených kol a dalších dílců. Montáž pracovního vřeteníku dle schválené dokumentace a ověřených montážních postupů s použitím speciálních přípravků. Závěrem je proveden záběh vřeteníku podle předepsaného režimu.

Brousicí vřeteník a deska pod brousicí vřeteník

Kompletní oprava brousicího vřeteníku zahrnuje výměnu vřetene za nové, dále pávní a axiálního uložení, přebroušení vodících ploch, záběh vřeteníku dle předepsaného režimu.

V případě potřeby zákazníka výrazného snížení obvodové rychlosti jsou stroje vybavovány zapouzdřeným vřetenem s uložením na přesných valivých ložiscích.

Kompletní oprava desky pod brousicí vřeteník, výměna šroubu a matice příčného posuvu vymezovacích pružin, ložisek, přebroušení všech vodících ploch a kompletní výměna valivého vedení přísuvu s použitím vytříbených válečků na 0,001 mm

Elektromotory jsou vždy vyměňovány za nové.

Koník

Provádí se přebroušení pinole s následným tvrdochromovým povlakem a přebroušením na přesnost. Podle aktuálních hodnot se protáčí těleso koníku. Původní hydraulické ovládání koníka je u modernizované verze nahrazováno za pneumatické.

Mazací system

Kompletní výměna mazacího systému stroje včetně nových rozvodů, rozdělovačů a mazacího agregátu. Mazací systém je doplněn o tlakové spínače kontrolující dodávku maziva do jednotlivých mazaných míst.

Hydraulický agregát

Hydraulický agregát je při modernizaci odstraněn a veškerá hydraulika nahrazena posuvem kuličkovým šroubem. V případě požadavku zákazníka na GO hydrauliky na vlastním stroji je nádrž hydraulického agregátu důkladně vyčištěna, natřena olejivzdorným nátěrem, opatřena novými olejovými značkami a kompletně přetěsněna. Původní problematické tlakové spínače a rozvaděče jsou vyměněny za nové. Čerpadla jsou vyměněna za nová. Oprava hydraulického válce obsahující výměnu všech těsnících manžet, pístních tyčí a odvzdušňovací kostky.

Kompletní oprava hydrauliky u hydraulických strojů spočívá v demontáži všech těles, dodání nových šoupátek a kohoutů, jakož i těsnících elementů, prohonování všech hydraulických těles, zabroušení a zalícování nových šoupátek a kohoutů. Závěrem je provedeno ověření jednotlivých parametrů a funkcí.

Elektro část**Řídící systém**

Pro řízení stroje jsou používány specializované řídicí systémy podle přání zákazníka a složitosti výroby. Je možno volit od rozšířených jednodušších TEACH-IN systémů Kavalír K 51 či K 51-2 nebo SIEMENS Simatic C-7 až po CNC řízení SIEMENS 840 D nebo nově SIEMENS 802 D s dílenským programováním a zadáváním podle DIN/ISO.

Elektrický rozvaděč a ovládací panel

Veškeré řídicí, spínací a jistící elektrické prvky jsou umístěny v novém elektrickém rozvaděči. Nová elektrická výzbroj. Ovládací panel obsluhy je uchycen na otočné konzole. Na novém ovládacím panelu je umístěn displej řídicího systému a hlavní ovládací prvky stroje.

Veškerá elektroinstalace je prováděna podle platných norem.

- nový ovládací panel
 - doplnění stroje o předepsané ochranné prvky,
- Veškeré elektromotory jsou nahrazeny novými.

Nové trendy:

Např. výrobce brusek Blohm Jung investuje do vývoje nejmodernějších řešení.

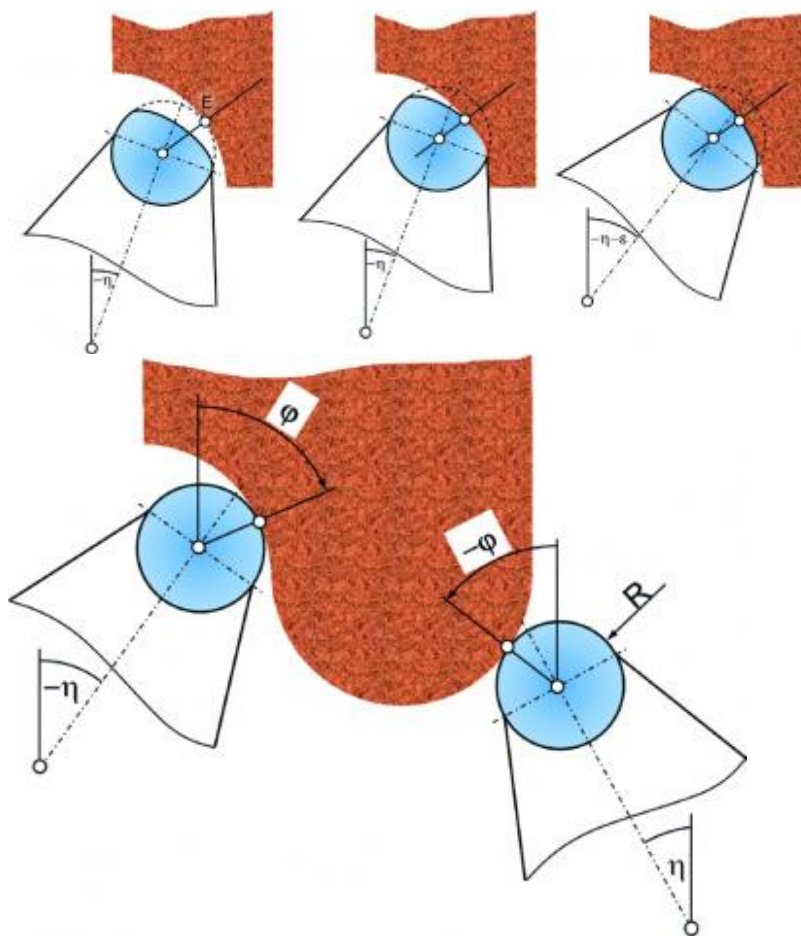
Konkrétně v profilovém broušení se jedná o [15, 16]:

- kompenzaci opotřebení diamantového orovnávače
- CNC hlavový orovnávač PA37K
- Ustavení obrobku na otočném stole
- Brusky nové generace

Kompenzace opotřebení diamantového orovnávače

Kdy software kompenzací opotřebení eliminuje chybu orovnávacích nástrojů v řádu μm .

Softwarem **GEOID** je přesně zmapována řezná hrana orovnávacího nástroje s přesností na μm . Dále je vypočtena korekční hodnota, která je přenesena na orovnávač a pomocí této korekce je orovnávan brusný kotouč. Díky tomu použitelnost a životnost orovnávacího nástroje výrazně stoupá. Odpadají časté výměny orovnávačů, tím se snižují náklady, zvyšuje časová úspora a dochází k výraznému zlepšení konečného vybroušeného profilu. Princip je uveden na obr. 3.2.



Obr. 3.2 Ukázka praktického použití kompenzace opotřebení orovnávače [15].

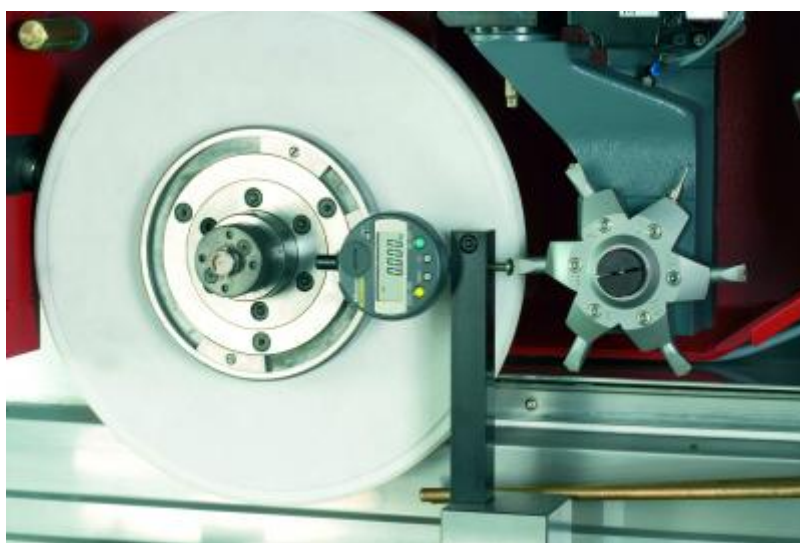
CNC hlavový orovnávač PA37K

Svou možností použití klasických broušených diamantů nebo rotačních orovnávacích kladek (obr. 3.3 a 3.4) je jediný svého druhu na světě. Tzv. „hvězda“ osazená šesti diamanty je připravena k použití do šesti minut po jednoduchém upnutí diamantů (čas potřebný na změření diamantů a jejich kompenzaci), rotační kladka pak do deseti minut. Funkce „CD-orovnávání“ redukuje časy potřebné k orovnáání až o 50 %. Jedná se o kontinuální orovnávání během broušení.

Použití špičkového orovnávacího CNC systému PA37K ve spojení se softwarem GOEID na stroji Blohm Jung Vario (obr. 3.8) představuje moderní, výkonné a velmi přesné pracoviště pro broušení profilů.



Obr. 3.3 Kalibrace diamantové kladky [15].

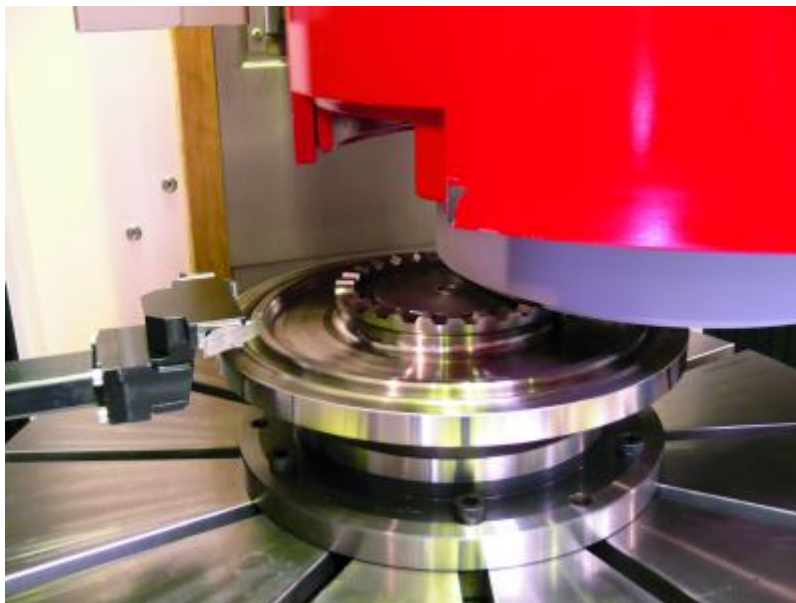


Obr. 3.4 Kalibrace „hvězdy“ [15].

Ustavení obrobku na otočném stole

Až 30 % celkového času lze ušetřit při nakládání a centrování obrobku na otočném stole (obr. 3.5). Při řešení konkrétní aplikace na brusce Blohm Profimat MC s vertikálním vřetenem – broušení „Curvic couplings leteckého motoru“ – byla vyvinuta nová technologie. Nyní lze obrobek umístit prakticky libovolně na ploše otočného stolu a již není nutné ho pracně vystředovat. Pomocí speciálně vyvinutého softwaru a sondy ve spojení se Siemensem Sinumerik 840D je možné změřit a zkompenzovat veškeré geometrické odchylky a dosáhnout tak kompletního vybroušení s absolutní přesností.

Zákazníku, výrobci leteckých motorů z Francie, se díky tomuto řešení podařilo velmi výrazně zredukovat neproduktivní časy. Nyní obsluha potřebuje k naložení obrobku a zahájení pracovního cyklu pouze 30 sekund oproti dřívějším 10 minutám



Obr. 3.5 Ustavení obrobku na otočném stole [15].

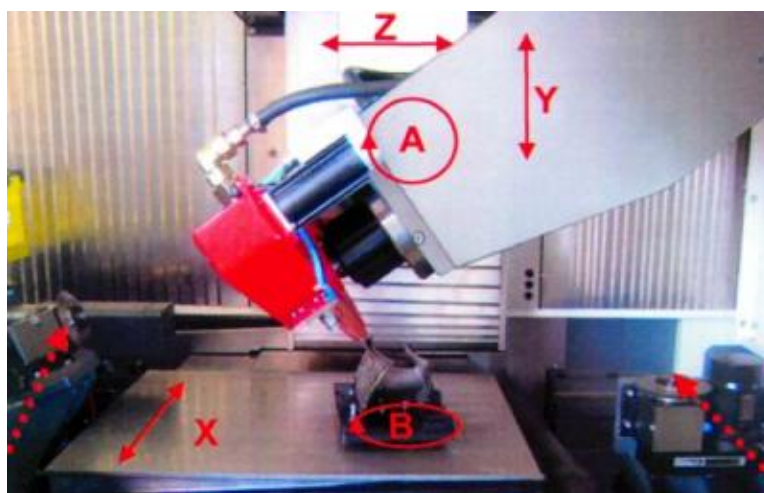
Brusky nové generace

V dnešní době je ve firmách zabývajících se produktivním broušením pětiosé obráběcí centrum běžně používaný stroj. Již méně obvyklá je bruska, která umožňuje kompletně obrobit 5 stran obrobku na jedno upnutí.

Např. brousící centrum Blohm Prokos (obr. 3.6, 3.7). Vřeteno stroje je umístěno v naklápěcím vřeteníku (osa) a může se pohybovat ve dvou lineárních osách. Obrobek je upnut na otočném stole (osa), který koná přísuv (osa). Vřeteno má maximální otáčky $12\,000\text{ min}^{-1}$ a výkon 35 kW. Lineární osy mají maximální posuvovou rychlost 120 m.min^{-1} , což lze využít při technologii broušení na plocho. Nástroje mají rozhraní HSK 63 a do zásobníku se jich vejde dvanáct. Díky automatické výměně nástrojů se zásobníkem umožňuje brousící centrum Blohm Prokos rovněž vrtání a frézování. Mezi tradiční zákazníky tohoto centra patří výrobci turbín a komponentů leteckých motorů [15, 16].



Obr. 3.6 Stroj Blohm Prokos [15].



Obr. 3.7 Pracovní prostor brousicího centra Blohm Prokos [16].



Obr. 3.8 Stroj Jung Vario [15].

3.2 Nástroje

Volba správného kotouče je ovlivněna celou řadou činitelů, např. [1]:

- vlastnostmi broušeného materiálu,
- podmínkami broušení,
- technickým stavem stroje,
- velikostí úběru materiálu atd.

Při volbě brousicího kotouče platí některé všeobecné zásady [1]:

- pro větší úběr material se volí hrubší zrnitost,
- pro tvrdší broušený materiál se volí měkčí kotouč,
- pro broušení materiálů se sklonem k zanášení kotouče (měď, mosaz, hliník) se volí kotouč měkký s hrubou zrnitostí,
- čím větší je styková plocha mezi kotoučem a obrobkem, tím hrubší se volí zrnitost a nižší tvrdost kotouče,
- pro materiál citlivý na změny teplot se volí měkčí kotouč,
- pro broušení přerušovaných ploch se volí tvrdší kotouč,
- při broušení obrobku čelem kotouče se obvykle volí kotouč měkčí než pro broušení obvodem kotouče.

Druh brusiva se volí podle tabulky 3.1.

Tab. 3.1 Druh brusného kotouče podle obráběného materiálu [3]

Obráběný nástrojový materiál	Brusivo			
	karbid křemíku		umělý korund	
	zelený	černý	bílý	normální
Titanové slinuté karbidy	+	0	-	-
Wolframové slinuté karbidy	+	0	-	-
Slinuté korundy	+	0	-	-
Rychlořezná ocel vysokolegovaná	0	0	+	0
Rychlořezná ocel úsporná	-	-	+	+
Uhlíková ocel	-	-	0	+

+ výhradně použit, 0 podmíněně použit, - nelze použít

Upínání brousicího kotouče

Před upnutím je nutné vyzkoušet, zda v kotouči nejsou trhliny. Kotouč se volně zavěsí na díru a poklepe se na něj dřevěnou paličkou. Kotouč, který není poškozený vydává jasný, čistý tón.

Brousicí kotouč je křehký, proto se mezi kotouč a upínací příruby musí vložit podložka ze silného papíru [3]. Podložka musí být širší než upínací příruby, aby nedošlo k přímému dotyku příruby s kotoučem.

Vyvažování brousicího kotouče

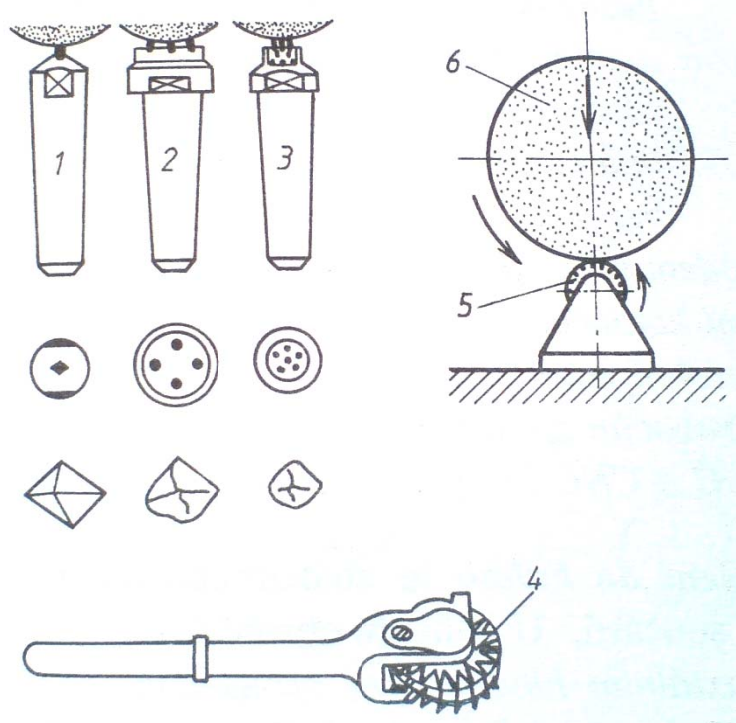
Kotouč se otáčí vysokými otáčkami a případná nevyváženost by způsobila chvění a zhoršení jakosti obrobeného povrchu. Proto se kotouče na trnu ve vyvažovacím stojánu se dvěma vodorovnými lištami staticky vyvažují pomocí pohyblivých vyvažovacích tělísek umístěných v přírubě kotouče. Velké kotouče se vyvažují i dynamicky [3].

Orovnávání brousicího kotouče

Orovnáváním se odstraňují nerovnosti kotouče a odstraňují se opotřebená zrna. Kotouč tak získá potřebný tvar a obnoví se jeho řezivost [3].

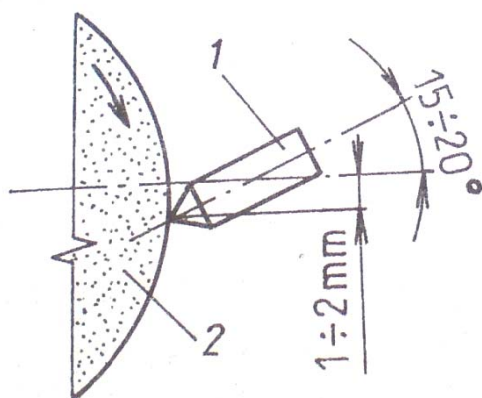
Používají se různé způsoby orovnávací (obr. 3.9, 3.10):

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



Obr. 3.9 Orovnávače [3].

1 – monokrystalický, 2 – polykrystalický, 3 – práškový, 4 – orovnávací kladka, 5 – kolečkový (pro hrubé orovnání), 6 – brousicí kotouč



Obr. 3.10 Princip orovnění monokrystalickým diamantovým orovnávačem [3].

1 – orovnávač, 2 – brousicí kotouč

Monokrystalické orovnávače se používají pro přesné orovnění brousících kotoučů. Je nutné orovnávač při orovnávání umístit 1 – 2 mm za osu a vyklonit ho o 15 – 20° jak ukazuje obrázek. Podle rychlosti přejetí je možné docílit buď hladšího povrchu kotouče (pomalé přejetí), nebo hrubšího povrchu kotouče (rychlé přejetí). Hrubší orovnění je vhodné pro hrubování a větší úběry materiálu a hladší orovnění je vhodné pro dokončovací broušení, dosáhneme tak vyšší kvality obrobené plochy.

Orovňavací diamantové kladky jsou velmi produktivní, mají profil požadovaného tvaru obrobku a tento profil vybrušují do brousícího kotouče najednou. Nevýhodou je jejich vysoká cena [3].

3.3 Řezné podmínky

3.3.1 Posuvy a rychlosti

Řezná rychlost broušícího kotouče při broušení houževnatých materiálů se volí 25 až 32 m.s⁻¹, u materiálů křehkých 18 až 25 m.s⁻¹.

Podélný posuv stolu při broušení obvodem kotouče se volí [1]:

- pro měkkou ocel 10 až 18 m.min⁻¹,
- pro tvrdou ocel 8 až 12 m.min⁻¹,
- pro litinu 10 až 15 m.min⁻¹.

Velikost příčného posuvu se volí [1]:

- při broušení na hrubo 2/3 až 4/5 šířky broušícího kotouče,
- při broušení na čisto 1/2 až 2/3 šířky broušícího kotouče,
- při zvlášť jemném broušení 1/10 až 1/3 šířky kotouče.

Velikost přísuvu broušícího kotouče se volí [1]:

- při broušení na hrubo 0.005 až 0.015 mm,
- při broušení na čisto 0.006 až 0.010 mm.

Při broušení čelem broušícího kotouče je styková plocha kotouče s obrobkem velká, a proto se volí **rychlost posuvu stolu** menší, a to [1]:

- při broušení na hrubo 4 až 12 m.min⁻¹,
- při broušení na čisto 2 až 3 m.min⁻¹.

Přísuv kotouče v úvratích stolu na 1 zdvih se volí [1]:

- při broušení na hrubo 0.015 až 0.040 mm,
- při broušení na čisto 0.005 až 0.010 mm.

Důsledky zvyšování řezné rychlosti

V posledních letech se do popředí dere broušení zvláště vysokými řeznými rychlostmi.

Broušící nástroje pro broušení zvláště vysokými řeznými rychlostmi posilují součinnost technologické soustavy stroj - obrobek - nástroj, neboť při zvýšení rychlosti broušícího nástroje se snižují řezné síly, zbytková napětí v povrchových vrstvách obrobků i opotřebení kotouče. Dochází ke zlepšení drsnosti povrchu součásti (při použití konstantní zrnitosti kotouče) a zvyšuje se trvanlivost broušícího nástroje.

Kromě zlepšení jakosti výrobků přispívají vyšší řezné rychlosti ke zvýšení úběrů. Dle výsledků výzkumů je možno u vnějšího zapichovacího broušení dosáhnout zvýšením řezné rychlosti z 30 na 60 m.s⁻¹ čtyřnásobného zvýšení úběru, aniž by došlo ke snížení parametrů jakosti. Zvyšuje-li se řezná rychlost až na 90 m.s⁻¹ při použití řezného oleje pod zvýšeným tlakem (1 MPa) jako chladicího a mazacího prostředku, je možné dosáhnout úběru, který se vyrovná až stonásobku úběru obvyklého v praxi. Dosažený úběr se tímto blíží k hodnotám dosud vymezeným nástrojům s definovaným břitem, jako jsou soustružnické nože nebo frézy.

Tvrdost brousicího kotouče je charakterizována odporem, který jednotlivá zrna kladou při vylamování z pojiva kotouče. Dokud je pevnost pojiva větší než řezná síla působící na zrno, vykazuje kotouč jen nepatrné opotřebení. Jsou-li však řezné síly větší, dochází k předčasnému uvolňování zrn a tím k většímu opotřebení brousicího kotouče. Řezná síla, která je toho příčinou, je současně také krajní mezí dosažitelného řezného výkonu.

Při broušení vysokými řeznými rychlostmi a řezným úběrem dochází v povrchové vrstvě obrobku ke zvýšenému tepelnému namáhání. Zvyšování obvodové rychlosti kotouče způsobuje zvyšování teplot. Výkon úběru má však mnohem větší vliv na teplotu než obvodová rychlost kotouče. Vliv zvyšování obvodové rychlosti obrobku v_w [m.min⁻¹] na ohřev místa styku kotouče s obrobkem při konstantním řezném výkonu se projeví až do obvodové rychlosti 40 m.min⁻¹ jako prudký pokles teploty. Nižší tepelné namáhání při stoupající rychlosti obrobku je způsobeno zkracováním doby působení jednotlivých zdrojů tepla v oblasti styku kotouče a obrobku. Při vyšších obvodových rychlostech odvádí bříty zrn značnou část tepla do třísek, čímž se vysvětluje pokles teplot při vyšších rychlostech obrobku a brousicího kotouče. Proto poměr rychlosti řezného kotouče k obvodové rychlosti obrobku $q = v_s/v_w$ má značný význam a při vysokých řezných rychlostech by neměl být volen větší poměr rychlostí než $q = 60$. Použití vhodného chladicího prostředku a uvedeného optimálního poměru umožňuje nejvyšší úběr bez negativního tepelného ovlivnění obrobku.

Jakost povrchu obrobku je ovlivňována nejen řeznou rychlostí, ale i řezným úběrem. Se stoupajícím úběrem se jakost povrchu obrobku zhoršuje. Vzrůstající drsnost je způsobena zvětšující se tloušťkou třísky při zvyšování řezného výkonu. Zvýšení obvodové rychlosti kotouče zmenšuje tloušťku třísky, a umožňuje tak vyrovnat zhoršení jakosti povrchu zvýšením rychlosti [13].

3.3.2 Přídavky na broušení

Přídavek pro broušení je tloušťka povrchové vrstvy materiálu ponechaná na uvažované ploše součásti po předchozí obráběcí operaci, kterou je nutno při broušení odstranit, aby se dosáhlo předepsané přesnosti rozměru tvaru a drsnosti povrchu [6].

Velikost přídavku roste s rostoucím průměrem hřídele či rostoucími rozměry obrobku. Přídavek není vhodné volit příliš velký, jelikož pak dochází k prodlužování času na opracování součásti, zbytečnému plýtvání materiálem, potažmo ke zvyšování opotřebení nástrojů. Na druhou stranu příliš malý přídavek na obrábění může způsobit, že nebudeme schopni vyrobit danou součást v požadovaných rozměrech s potřebnou jakostí povrchu.

3.3.3 Prostředí

Při broušení vzniká značné množství tepla, které může: deformovat obrobek, popustit kalený obrobek, způsobit na povrchu barevné skvrny.

Při broušení za sucha chladí broušenou plochu pouze okolní vzduch, strhávaný rotujícím brousicím kotoučem. Výkonnost broušení je malá a výhoda je pouze v čistotě obrobků a strojů.

Chladicí kapalina odvádí teplo vznikající při broušení, očišťuje povrch obrobku a brousicího kotouče od třísek a udržuje řezivost kotouče. Má značný vliv na kvalitu obráběné plochy [1].

Emulze

Kdysi jeden uznávaný tribotechnik, specialista na obrábění, řekl: "Ideální kapalinou na broušení by byla voda, kdyby neměla pár negativních vlastností." Voda má nízkou viskozitu a z toho vyplývá její dobrá schopnost odvádět teplo, tedy chladit obráběný dílec. Má velmi dobrou oplachovací schopnost, což je důležité pro odvod brusného kalu, který se skládá z částic obráběného materiálu a brusiva. Je ekologicky nezávadná a je levná. Proces broušení lze díky její čirosti dobře sledovat.

Proč tedy nepoužíváme k broušení čistou vodu? Protože má několik negativních vlastností pro tento proces - nemá téměř žádný mazací účinek a neposkytuje žádnou ochranu proti korozi.

Podívejme se nyní na emulzi typu olej ve vodě. Olej, kterého bývá při broušení obvykle od 2 do 8 %, zlepší mazací schopnost kapaliny, ale zhorší odvod tepla a navzdory obsahu emulgátoru, který je povrchově aktivní látkou, a má částečně i máčecí a oplachovací schopnost. Emulze jsou navíc buď mléčně bílé nebo mají bělavý nádech, čímž se zhorší sledovatelnost procesu.

Minerální olej má jen omezenou odolnost vůči vlivu tepla a mechanickému zatížení. Kvalita vody je také důležitá pro stabilitu emulze a její pěnivost. V příliš tvrdé vodě se může emulze rozpadnout, v příliš měkké může zase pění. Emulze z minerálního oleje a vody je navíc doslova rájem pro anaerobní mikroorganismy (žijí bez přístupu vzduchu), a když není dostatečně provzdušněná, rychle se může objevit hnilobný zápach. Ten je jen průvodním jevem dalších negativních procesů, jako je snížení pH a ruku v ruce jej provázející koroze. Přidané inhibitory koroze sice dočasně zlepší protikorozní odolnost broušených dílců, ale účinné jsou právě jen v omezené oblasti pH. Čím menší je koncentrace emulze, tím větší je její citlivost vůči napadení bakteriemi, houbami a plísněmi. Na boj s mikroorganismy je potřebné nasadit buď biocidy nebo použít emulgátory s biostatickými vlastnostmi. Ale tady je nutné si uvědomit, že tyto působí stejně nejen v emulzi, ale i v životním prostředí, do kterého mohou proniknout. Správné řešení je proto někde jinde [7].

Roztok

Jsou jím speciální syntetické kapaliny na broušení, které neobsahují minerální olej a s vodou netvoří bílé emulze, ale čiré transparentní roztoky. Většinou se vyrábějí na bázi syntetických polyalkylenglykolů, které mají, v porovnání s minerálními oleji, mnohem vyšší odolnost vůči termickým a mechanickým vlivům. Také mnohem lépe odolávají napadnutí

mikroorganismy, a proto si dlouhodobě udrží stabilní pH. Na rozdíl od "klasických" emulzí nemají tendenci pění ani ve velmi měkké vodě. Moderní inhibitory koroze použité v těchto systémech zabezpečí dostatečnou dočasnou ochranu proti korozi. Negativa? Pouze o něco vyšší cena v porovnání s emulzemi na bázi minerálního oleje. Agresivita těchto kapalin vůči nátěrovým hmotám použitým na strojích je minulostí, protože výrobci strojů už delší dobu používají vícesložkové polymerní laky, které těmto kapalinám dobře odolávají. Tento moderní výrobní prostředek lze najít i v sortimentu syntetických obráběcích kapalin Agip, který nabízí kapaliny na broušení ocelí, ale i problematické litiny či barevných kovů, jakož i tvrdokovů. Podle obráběných materiálů lze vybírat z produktů Aquamet SGZ, Aquamet OSL, Aquamet SBH. Agip Aquamet SHM je navíc určen speciálně na broušení tvrdokovů a je inhibovaný vůči vyplavování kobaltu z nich [7].

Olej

Na broušení houževnatých materiálů při velkých rychlostech, jako jsou např. součástky pro automobilový nebo elektrotechnický průmysl (např. klikové či vačkové hřídele atd.), se používají řezné oleje. U nich se vyžaduje nízká viskozita (kvůli dobrému odvodu tepla a dobré oplachovací schopnosti) a dobrá mazací schopnost, která se zvyšuje přidáním speciálních aditiv. Z pracovní-hygienického hlediska je důležité, aby se na pracovišti netvořila olejová mlha. Kapaliny, které splňují všechny tyto náročné požadavky, lze opět nalézt i v sortimentu společnosti Agip pod obchodními názvy Agip MetalGrind. Kapalina MetalGrind S 5 HM je určena na broušení ocelí, litiny a hlavně tvrdokovů, MetalGrind S 10 CBN obsahuje syntetické estery a je určen pro procesy broušení, při kterých se jako brusivo používá diamant nebo kubický bornitrid (CBN). Univerzálním produktem pro velmi široké spektrum aplikací je Agip MetalGrind S 15 UNI [7].

4 STATISTICKÁ INTERPRETACE PŘESNOSTI BROUSICÍHO PROCESU

4.1 Obecné definice

4.1.1 Metody popisné statistiky [17]

Statistický soubor

Soubor kvantitativních, popř. kvantifikovaných kvalitativních údajů, které zjišťujeme pozorováním hromadných náhodných jevů, tvoří statistický soubor, který je základním pojmem statistického zkoumání.

Statistický soubor je konečný soubor hodnot náhodné veličiny. Nebere se v úvahu její rozdělení pravděpodobností. Rozsah souboru je n .

Relativní četnost

Počet případů, v nichž se určitá hodnota x_i vyskytne ve statistickém souboru, se nazývá absolutní četnost výskytu této hodnoty a značí se n_i . Podíl případů z celkového rozsahu souboru n , v nichž se hodnota x_i vyskytne ve statistickém souboru se nazývá relativní četnost f_i výskytu hodnoty x_i a je tedy definována vztahem 4.1.

$$f_i = \frac{n_i}{n} \quad (4.1)$$

Aritmetický průměr statistického souboru

Základním ukazatelem polohy statistického souboru $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ je průměr statistického souboru (aritmetický průměr) $\bar{X}$ definovaný vztahem 4.2.

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

Medián (prostřední hodnota) statistického souboru

Jiným ukazatelem polohy je medián statistického souboru $\tilde{X}$, což je číslo ležící uprostřed variační řady statistického souboru $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)}$. Přesněji řečeno, je-li n liché je medián definován vztahem 4.3, kde $k = (n+1)/2$.

$$\tilde{X} = x_{(k)} \quad (4.3)$$

Je-li n sudé, pak je medián definován vztahem 4.4, kde $k = n/2$.

$$\tilde{X} = \frac{x_{(k)} + x_{(k+1)}}{2} \quad (4.4)$$

Modus (nejčetnější hodnota) statistického souboru

Je dalším jednoduchým ukazatelem polohy statistického souboru, značí se $\hat{X}$. Je to nejčetnější hodnota znaku v souboru. Má význam v souborech, kde existuje jediná nejčetnější hodnota.

Rozptyl statistického souboru

Přirozeným základem ukazatele rozptýlení hodnot statistického souboru jsou odchylky těchto hodnot od aritmetického průměru.

Aby velikost ukazatele nebyla ovlivněna rozsahem statistického souboru n , používá se jako ukazatel průměrný součet čtverců odchylek od aritmetického průměru. Tento ukazatel rozptýlení se nazývá rozptyl statistického souboru a značí se S^2 a je definován vztahem 4.5.

$$S^2 = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]$$

(4.5)

Směrodatná odchylka statistického souboru

Vhodným ukazatelem rozptýlení v mnoha situacích je směrodatná odchylka statistického souboru S definovaná jako kladná druhá odmocnina rozptylu.

$$S = +\sqrt{S^2}$$

(4.6)

Rozpětí statistického souboru

Jiným ukazatelem rozptýlení je rozpětí statistického souboru (variační rozpětí) W definované jako rozdíl největší a nejmenší hodnoty ve statistickém souboru a je tedy definováno vztahem 4.7.

$$W = x_{(n)} - x_{(1)}$$

(4.7)

Je-li $x_{(1)}$ první a $x_{(n)}$ poslední prvek variační řady.

Příklad 4.1. Ukázání výpočtu rozptýlení [17].

U deseti vzorků byly naměřeny hodnoty uvedené v tabulce 1.

Tabulka 1

Číslo vzorku	Naměřená hodnota x_i	Pořadí podle velikosti	x_i^2
1	40.60	10	1648.3600
2	40.29	8	1623.2841
3	37.51	3	1407.0001
4	38.90	6	1513.2100
5	38.13	4	1453.8969
6	38.15	5	1455.4225
7	34.81	1	1211.7361
8	37.00	2	1369.0000
9	39.95	7	1596.0025
10	40.43	9	1634.5849
Součet	385.77		14912.4971

Průměr statistického souboru ze vzorce 4.2:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = \frac{1}{10} \cdot 385.77 = 38.58\%$$

Medián statistického souboru ze vzorce 4.4:

$$\tilde{X} = \frac{x_{(5)} + x_{(6)}}{2} = \frac{38.15 + 38.90}{2} = 38.53\%$$

Rozptyl statistického souboru ze vzorce 4.5:

$$S^2 = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] = \frac{1}{10} \left[14912.4971 - \frac{385.77^2}{10} \right] = 3.0648$$

Směrodatná odchylka statistického souboru podle 4.6:

$$S = +\sqrt{S^2} = +\sqrt{3.0648} = 1.75\%$$

Rozpětí statistického souboru podle 4.7:

$$W = x_{(10)} - x_{(1)} = 40.60 - 34.81 = 5.79\%$$

4.1.2 Náhodný výběr [17]

Základní soubor

Základním souborem se rozumí množina hodnot náhodné veličiny s daným rozdělením pravděpodobnosti, v níž jsou tyto hodnoty zastoupeny s četnostmi odpovídajícími pravděpodobnostem výskytu těchto hodnot. Základní soubor si tak lze představit jako zásobník (generátor) hodnot náhodné veličiny. S každou realizací náhodného pokusu nebo pozorování se některá z hodnot „uložených“ v základním souboru „stane známou“.

Základní soubor je konečný nebo nekonečný soubor všech možných (teoreticky dosažitelných) hodnot náhodné veličiny. Je popsán rozdělením pravděpodobností náhodné veličiny, jejíž rozdělení není zcela určeno. Z toho důvodu můžeme základní parametry μ a σ^2 pouze odhadnout.

Realizujeme-li z téhož základního souboru náhodné veličiny více náhodných výběrů stejného rozsahu, obsahují tyto výběry různé hodnoty. Z toho vyplývá, že se i hodnoty výběrových charakteristik u každého výběru liší. Můžeme tak na výběrové charakteristiky pohlížet jako na náhodné veličiny.

Výběrový průměr

Máme-li náhodný výběr $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ rozsahu n . Výběrový průměr $\bar{x}$ je definován stejně jako průměr statistického souboru $\bar{X}$, je tedy:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.8)$$

Výběrový medián

Je charakteristikou založenou na pořadí hodnot v náhodném výběru podle velikosti. Výběrový medián $\tilde{x}$ je definován stejně jako medián $\tilde{X}$ a tedy vzorci 4.3, případně 4.4.

Výběrový rozptyl a směrodatná odchylka

Definice výběrového rozptylu s^2 je odlišná od definice statistického souboru S^2 , platí pro ni vztah 4.9. Směrodatná odchylka se pak spočítá stejně jako v případě statistického souboru a tedy $s = +\sqrt{s^2}$.

$$s^2 = \frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{případně} \quad s^2 = \frac{n}{n-1} S^2 \quad (4.9)$$

Výběrové rozpětí

Je definováno stejně jako rozpětí statistického souboru a tedy:

$$w = x_{(n)} - x_{(1)} \quad (4.10)$$

Je-li $x_{(1)}$ první a $x_{(n)}$ poslední prvek variační řady.

4.1.3 Odhady parametrů normálního rozdělení μ a σ^2 [17]**Bodový a intervalový odhad střední hodnoty μ**

Pro bodový odhad platí $\mu \doteq \bar{x}$ a tedy ze 4.8:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Kde $x_1, x_2, \dots, x_n$ jsou hodnoty náhodného výběru rozsahu n . Víme, že odhad je konzistentní, nestranný, nejvydatnější a maximálně věrohodný.

Meze oboustranného intervalu spolehlivosti parametru jsou dány výrazy:

- dolní mez:

$$\bar{x} - t_{\alpha}(n-1) \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.11)$$

- horní mez:

$$\bar{x} + t_{\alpha}(n-1) \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.12)$$

Hodnota $t_{\alpha}(n-1)$ je kritická hodnota rozdělení t s $n-1$ stupni volnosti a je tabelována v tab. 2 příloze 2 této práce a s je výběrová směrodatná odchylka odvozená ze vzorce 4.9. Uvedený postup osvětluje příklad 4.2.

Příklad 4.2. Ukázání výpočtu intervalového odhadu [17].

Bylo provedeno 12 měření průměrů strojní součástky. Aritmetický průměr těchto měření byl $\bar{x} = 14.306$ mm, směrodatná odchylka $s = 0.572$ mm. Je třeba odhadnout střední hodnotu μ základního souboru průměrů dosahovaných při stejných podmínkách výroby, při jakých byl odebrán náhodný výběr.

Bodovým odhadem μ je $\bar{x} = 14.306$ mm, přesnost tohoto odhadu umožňuje zjistit interval spolehlivosti. Předpokládá se, že průměr součástky je je normálně rozdělená náhodná veličina.

Koeficient spolehlivosti volíme $1 - \alpha = 0.95$.

Po dosazení do 4.11 a 4.12 dostaneme:

- dolní mez:

$$14.306 - 2.201 \cdot \frac{0.572}{\sqrt{12}} = 13.943$$

- horní mez:

$$14.306 + 2.201 \cdot \frac{0.572}{\sqrt{12}} = 14.669$$

kde $t_{0.05}(11) = 2.201$ z tab. 2 přílohy 2.

$$13.943 \leq \mu \leq 14.669$$

Skutečná střední hodnota průměrné součástky je s pravděpodobností 95% pokryta intervalem $\langle 13.943; 14.669 \rangle$

Příklad 4.3. Určení přibližného rozsahu výběru n [17].

Při zadání příkladu 4.2 chceme určit přibližný rozsah výběru n , který nám umožní odhadnout skutečnou střední hodnotu průměru s přesností 0.2 mm (přesností se rozumí polovina délky intervalu spolehlivosti).

Spolehlivost výpovědi dané intervalem spolehlivosti chceme udržet na výši 95% ($1 - \alpha = 0.95$).

Pro jednoduchost můžeme předpokládat stálou hodnotu $s = 0.572$, která byla vypočtena z náhodného výběru rozsahu $n = 12$ (viz. příklad 4.2).

Potřebujeme pak volit n takové, pro které platí:

$$t_{0.05}(n-1) \cdot \frac{0.572}{\sqrt{n}} = 0.2$$

Zkusmo dosadíme $n = 16, 25, 36$ (hodnoty, jejichž odmocniny jsou celá čísla) a dostaneme:

pro $n = 16$

$$2.131 \cdot \frac{0.572}{\sqrt{16}} = 0.305$$

pro $n = 25$

$$2.064 \cdot \frac{0.572}{\sqrt{25}} = 0.236$$

pro $n = 36$

$$2.030 \cdot \frac{0.572}{\sqrt{36}} = 0.194$$

Hledaný rozsah výběru n leží mezi 25 a 36, dalším zkoušením najdeme správnou úroveň $n = 34$, neboť

$$t_{0.05}(33) \cdot \frac{0.572}{\sqrt{34}} = 0.200$$

Můžeme očekávat, že rozsah výběru $n = 34$ nám zajistí přesnost odhadu střední hodnoty průměru součástky 0.2 mm se spolehlivostí 95% (s koeficientem spolehlivosti 0.95). Toto zjištění je ovšem orientační, protože s je náhodná veličina, jejíž hodnota se změní při změněném rozsahu výběru (přibráním dalších hodnot).

Bodový a intervalový odhad rozptylu σ^2

Bodový odhad parametru σ^2 je uveden v 4.9:

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

Kde $x_1, x_2, \dots, x_n$ jsou opět hodnoty náhodného výběru rozsahu n . Odhad je konzistentní, nestranný a asymptoticky nejvydatnější.

Meze oboustranného intervalu spolehlivosti parametru σ^2 jsou dány výrazy:

- dolní mez:

$$\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)} \quad (4.13)$$

- horní mez:

$$\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)} \quad (4.14)$$

Kde $\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)$, popř. $\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)$ jsou kritické hodnoty rozdělení $\chi^2(n-1)$ uvedené v tab. 1 příloze 1 této práce.

Příklad 4.4. Ukázání výpočtu intervalového odhadu rozptylu σ^2 [17].

Máme odhadnout přesnost výšky vnitřního kroužku kuličkového ložiska měřenou v mm. Předpokládejme, že tato výška je náhodná veličina s rozdělením $N(\mu, \sigma^2)$ s neznámými parametry μ a σ^2 . Přesnost výšky vhodně charakterizuje její směrodatná odchylka, kterou vypočteme z rozptylu. Naším úkolem je provést bodový a intervalový odhad rozptylu.

Z náhodného výběru hodnot výšky vnitřního kroužku rozsahu $n=20$ byl vypočítán výběrový rozptyl $s^2=0.1264$, který je bodovým odhadem neznámého rozptylu σ^2 .

Směrodatnou odchylku σ odhaduje $s=\sqrt{0.1264} = 0.3555$.

Meze oboustranného intervalu spolehlivosti pro σ^2 s koeficientem spolehlivosti $1 - \alpha = 0.95$ určíme dosazením do 4.13 a 4.14.

Pro dolní mez dostaneme:

$$\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi_{0,025}^2(n-1)} = \frac{19,0,1264}{32,852} = 0,0731$$

Pro horní mez dostaneme:

$$\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi_{0,975}^2(n-1)} = \frac{19,0,1264}{8,91} = 0,2696$$

Interval spolehlivosti $\langle 0,0731; 0,2696 \rangle$ pokrývá s pravděpodobností 0.95 neznámý rozptyl σ^2 výšky vnitřního kroužku ložiska.

Nyní určíme meze intervalu spolehlivosti pro parametr σ . Dolní mez je $\sqrt{0,0731} \doteq 0,27$ a horní mez $\sqrt{0,2696} \doteq 0,52$ mm.

4.2 Konkretizovaná aplikace

4.2.1 Maximální výška profilu Rz

V tab. 4.1 jsou uvedeny změřené hodnoty maximální výšky profilu Rz, které byly změřeny při obrábění pěti součástí.

Tab. 4.1 Změřené hodnoty maximální výšky profilu Rz

číslo vzorku	1	2	3	4	5
Rz [μm]	0,42	0,39	0,32	0,41	0,40

Bodový a intervalový odhad střední hodnoty μ max. výšky profilu Rz:

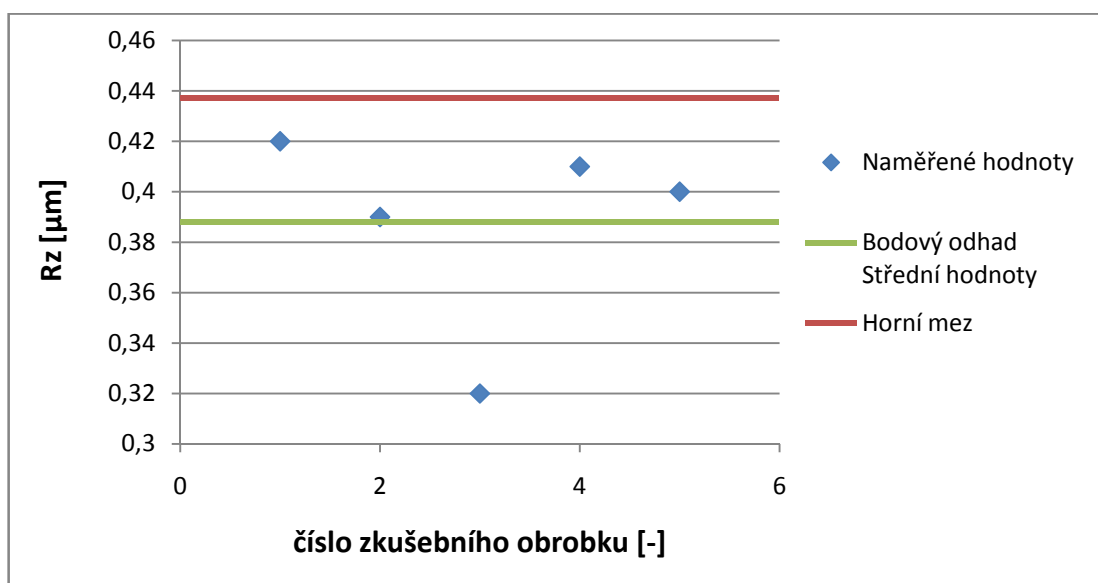
Bodový odhad lze spočítat ze vzorce 4.8 případně softwarem Minitab:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,388 \mu m$$

Intervalový odhad se spočítá jako jednostranný, jehož horní mez je ze vzorce 4.12. Kde s je směrodatná odchylka, která je odmocninou rozptylu, spočítaná na str. 83 této práce. $t_{\alpha}(n-1)$ zjistíme z tab. 2 přílohy 2 pro 0,05 a 4 hodnoty najdeme $t_{0,05}(4) = 2,7764$.

$$\bar{x} + t_{\alpha}(n-1) \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} = 0,388 + 2,7764 \cdot \frac{0,0396}{\sqrt{5}} = 0,4372 \mu m$$

Grafické znázornění maximální výšky profilu zkušebních obrobků a jejich statistická interpretace je na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Průběh maximální výšky profilu Rz a jejich statistická interpretace.

Bodový a intervalový odhad rozptylu σ^2 max. výšky profilu Rz:

Obdobně jako u odhadu střední hodnoty lze dosadit v tomto případě do vzorců 4.9, 4.13 a 4.14 nebo užít software Minitab. Zde budou již užity pouze hodnoty získané z Minitabu.

Bodový odhad:

$$s^2 = \frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,00157 \mu m^2$$

Intervalový odhad:

- dolní mez:

$$\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)} = 0,00056 \mu m^2$$

- horní mez:

$$\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)} = 0,01296 \mu m^2$$

Bodový a intervalový odhad směrodatné odchylky σ max. výšky profilu Rz:

Bodový odhad:

$$s = +\sqrt{s^2} = \sqrt{0,00157} = 0,0396 \mu m$$

Intervalový odhad:

- dolní mez:

$$\sqrt{0,00056} = 0,0237 \mu m$$

- horní mez:

$$\sqrt{0,01296} = 0,1139 \mu m$$

Závěr:

Z předchozích výpočtů plyne, že kdybychom za těchto technologických podmínek prováděli výrobu s 95% pravděpodobností bude střední hodnota maximální výšky profilu Rz všech vyrobených kusů do 0,4372 μm , rozptyl bude ležet v intervalu (0,00056; 0,01296) μm^2 a směrodatná odchylka v intervalu (0,0237; 0,1139) μm .

Pokud by nám tato přesnost nestačila, museli bychom zvýšit přesnost výroby případně zvýšit počet změřených kusů a tím zpřesnit odhady.

4.2.2 Střední aritmetická hodnota drsnosti Ra

V tab. 4.2 jsou uvedeny změřené hodnoty střední aritmetické hodnoty drsnosti Ra, které byly změřeny při obrábění pěti součástí.

Tab. 4.2 Změřené hodnoty střední aritmetické hodnoty drsnosti Ra

číslo vzorku	1	2	3	4	5
Ra [μm]	0,067	0,062	0,057	0,073	0,065

Bodový a intervalový odhad střední hodnoty μ střední aritmetické hodnoty drsnosti Ra:

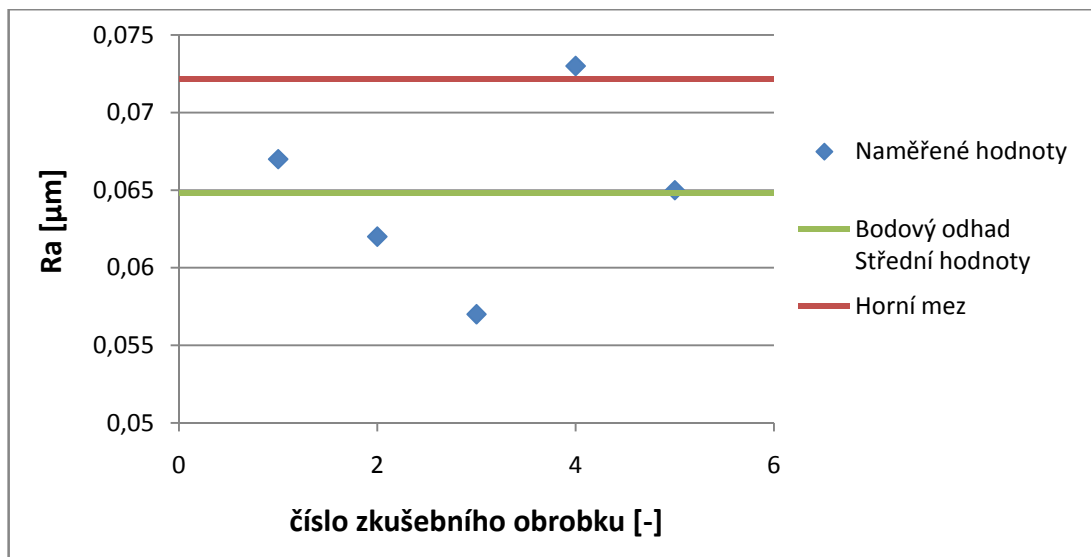
Bodový odhad:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,06480 \mu\text{m}$$

Intervalový odhad pro horní mez:

$$\bar{x} + t_{\alpha}(n-1) \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} = 0,07217 \mu\text{m}$$

Grafické znázornění střední aritmetické hodnoty drsnosti Ra zkušebních obrobků a jejich statistická interpretace je na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Průběh střední aritmetické hodnoty drsnosti Ra a jejich statistická interpretace.

Bodový a intervalový odhad rozptylu σ^2 střední aritmetické hodnoty drsnosti Ra:

Bodový odhad:

$$s^2 = \frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,000035 \mu m^2$$

Intervalový odhad:

- dolní mez:

$$\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)} = 0,000013 \mu m^2$$

- horní mez:

$$\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)} = 0,000291 \mu m^2$$

Bodový a intervalový odhad směrodatné odchylky σ střední aritmetické hodnoty drsnosti Ra:

Bodový odhad:

$$s = +\sqrt{s^2} = \sqrt{0,000035} = 0,00593 \mu m$$

Intervalový odhad:

- dolní mez:

$$\sqrt{0,000013} = 0,00355 \mu m$$

- horní mez:

$$\sqrt{0,000291} = 0,01705 \mu m$$

Závěr:

Stejně jako v případě maximální výšky profilu Rz intervalové odhady ukazují, kde budou s 95% pravděpodobností ležet skutečné hodnoty střední aritmetické hodnoty drsnosti Ra všech kusů vyrobených za těchto technologických podmínek. Konkrétně pro střední hodnotu se jedná o hodnotu max. do 0,07217 μm , pro rozptyl o interval (0,000013; 0,000291) μm^2 a pro směrodatnou odchylku (0,00355; 0,01705) μm .

Snížit velikost intervalů lze opět zvýšením přesnosti výroby případně větším počtem změřených kusů a zpřesněním odhadů.

ZÁVĚR

Mezi hlavní technologické vlivy na přesnost brousicího procesu patří vliv stroje, nástroje a řezných podmínek.

Základní rozdělení brousicích strojů je podle prováděných operací na hrotové brusky, brusky na díry, bezhroté brusky, rovinné brusky, nástrojařské brusky a pásové brusky. V dnešní době se ovšem již v produktivním broušení používají hlavně moderní pětiosá obráběcí centra, která umožňují kombinaci různých operací na jedno upnutí obrobku, čímž se zvyšuje jak produktivita obrábění, tak i přesnost výroby.

Vlastnosti brousicího nástroje jsou charakterizovány především druhem brusiva, druhem pojiva, zrnitostí brusiva, tvrdostí – soudržností brousicího nástroje, slohem neboli strukturou a geometrickým tvarem a rozměry. Z brusiv se používá hlavně umělý korund (Al_2O_3), který je nejpoužívanější na broušení ocelí, karbid křemíku (SiC) na broušení litiny a velmi tvrdých a křehkých materiálů jako jsou např. slinuté karbidy. Pro nejnáročnější broušení se pak používá diamant nebo kubický nitrid bóru (KBN). Diamant ovšem za vysokých teplot není vhodný k broušení ocelí a používá se k broušení slinutých karbidů, žárupevných a žáruvzdorných materiálů, porcelánů, keramiky a skla. Kubický nitrid bóru má své užití právě při broušení rychlořezných ocelí, cementovaných a vysoce legovaných ocelí, litin a tvrdých ocelových návarků.

Z řezných podmínek má největší vliv na přesnost velikost řezné rychlosti v_c , kterou volíme hlavně podle vlastností použitého brousicího kotouče a podle obrobitelnosti broušeného materiálu. U broušení do kulata záleží též na velikosti obvodové rychlosti obrobku v_w . Dalšími parametry, které ovlivňují přesnost a hospodárnost jsou velikosti radiálního, axiálního a tangenciálního posuvu stolu. Hospodárnost se dá dále zvýšit vhodně zvolenou velikostí přídkavku na broušení a veliký vliv má též brousicí prostředí – chlazení.

Ze statistické interpretace uvedené v této práci lze pak zjistit, jakou přesnost výroby lze očekávat, v případě zachování stejných technologických podmínek při jakých byly odebrány vzorky. Stačí odebrat několik (mělo by jich být alespoň pět) náhodně vybraných vzorků a tím získat výběrový soubor, ze kterého pak můžeme odhadnout bodový a intervalový odhad střední hodnoty μ , bodový a intervalový odhad rozptylu σ^2 případně bodový a intervalový odhad směrodatné odchylky σ . V takto získaných intervalech pak budou s 95% pravděpodobností ležet všechny hodnoty získané za stejných technologických podmínek. Pokud by nám tato přesnost nestačila, je nutné zvýšit přesnost výroby, případně zpřesnit odhady větším počtem změřených kusů a tím rozšířit výběrový soubor o více hodnot.

Nicméně je potřeba si uvědomit, že ne vždy je možné změřit velké množství kusů či snad dokonce všechny. Jednak by to bylo příliš časově a mnohdy i finančně náročné, jednak se kolikrát provádí tyto odhady již před zahájením výroby, tudíž více kusů ani nemusíme mít k dispozici a jednak je někdy nutné při měření sledovaný kus zničit (např. deformační zkoušky), abychom mohli získat potřebné hodnoty.

Příliš vysoká přesnost výroby nemusí být taky vždy nejlepší volbou, jelikož vysoká přesnost klade vysoké nároky na stroje a hlavně nástroje a často i prodlužuje samotný proces výroby. Např. nástroj bude nutné častěji měnit,

seřizovat, přestřovat apod., což s sebou nese další náklady a prodlužuje neproduktivní čas stroje. Z tohoto hlediska se někdy vyplatí raději nižší přesnost výroby a několik málo zmetků, vyrobených díky vyšší nepřesnosti, raději vyhodit, než zvýšit nákladně přesnost, aby 100% vyrobených kusů bylo přesných v rámci tolerancí.

Nicméně to, jakou nastavíme přesnost výroby a i jaké zvolíme technologie výroby je vždy individuální a odvíjí se hlavně od složitosti výrobku, požadované přesnosti a počtu vyráběných kusů. Poté je nutné zvážit všechny možnosti a rozhodnout se pokud možno pro tu optimální volbu. Což ovšem vyžaduje dobrou znalost věci a nemusí to být vůbec jednoduché se správně rozhodnout.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DRIENSKY D. a kol.: *Strojní obrábění I.* 1. vyd. Alfa Bratislava, 1985. 424s.
- [2] KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění.* 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0
- [3] ŘASA J., GABRIEL V.: *Strojírenská technologie 3 – 1. díl.* 2. vyd. Scientia Praha, 2005. 256s. ISBN 80-7183-337-1
- [4] ČSN ISO 3002-4 (22 0017) ZÁKLADNÉ VELIČINY PŘI ŘEZÁNÍ A BROUŠENÍ. Část 5: Základná terminológia brúsnych operácií používajúcich brúsiace kotúče. Český normalizační institut. Praha. 1993
- [5] SVOBODA P. a kol.: *Základy konstruování* vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 202 s. ISBN 80-7204-405-2
- [6] CNI-NORMY, *Přídavky pro broušení* [online]. [cit. 2009-03-21]. URL:< http://import.cni-normy.cz/nahledy/00154_nahled.htm>
- [7] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM, *Broušení – emulze, roztok nebo olej* [online]. [cit. 2009-04-03]. URL:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/brouseni-emulze-roztok-nebo-olej>>
- [8] KATEDRA STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE, *Povrchy povlaku* [online]. [cit. 2009-05-03]. URL:<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/povrchy%20povlaku.pdf>
- [9] SOŠ a SOU UNIČOV, *Studijní materiály* [online]. [cit. 2010-12-03]. URL:<<http://eduka.spaco.cz/wp-content/geomietricke-tolerance.doc>>
- [10] ČSN EN ISO 4287 (014450) GEOMETRICKÉ POŽADAVKY NA VÝROBKY (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Český normalizační institut, 1999
- [11] [online]. [cit. 2010-12-28]. URL:< <http://zcu.yc.cz/TD/TOLEROVANI.doc>>
- [12] FERMAT, *Brousicí stroje* [online]. [cit. 2011-02-06]. URL:<<http://www.fermatmachinery.com/cs/607-popis-modernizace-brousicich-stroju/>>
- [13] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM, *Optimalizace procesu broušení zvláště vysokými obvodovými rychlostmi* [online]. [cit. 2011-03-03]. URL:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/optimalizace-procesu-brouseni-zvlaste-vysokymi-obvodovymi-rychlostmi>>
- [14] ČSN ISO 2433 (200345) OBRÁBĚCÍ STROJE – Podmínky zkoušek hrotových brusek a hrotových univerzálních brusek s pohyblivým stolem – Zkoušky přesnosti. Český normalizační institut, 2005
- [15] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM, *Nové trendy v profilovém broušení* [online]. [cit. 2011-03-12]. URL:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-trendy-v-profilovem-brouseni>>
- [16] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM, *EMO Hannover potřetí – brousicí stroje* [online]. [cit. 2011-04-05]. URL:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/emo-hannover-potreti-brousici-stroje>>

- [17] EGERMAYER, F.; BOHÁČ, M.: *Statistika pro techniky*, SNTL, 1984. 295s.
- [18] DIAMANTOVÉ NÁSTROJE, *Dinas – kotouče* [online]. [cit. 2011-05-15]. URL:< <http://www.dinas.cz/html/kotouce/kotouce.html>>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
a_e	[mm]	pracovní radiální záběr
b_D	[mm]	šířka aktivní části brousicího kotouče
b_s	[mm]	šířka brousicího kotouče
D	[-]	hlavní bod při broušení
D_{max}, d_{max}	[mm]	horní mezní rozměry
D_{min}, d_{min}	[mm]	dolní mezní rozměry
d_s	[mm]	průměr brousicího kotouče
d_w	[mm]	průměr obrobku
ES	[mm]	horní mezní úchylka díry
es	[mm]	horní mezní úchylka hřídele
EI	[mm]	dolní mezní úchylka díry
ei	[mm]	dolní mezní úchylka hřídele
f_a	[m]	axiální posuv stolu
f_r	[m]	radiální posuv stolu
f_t	[m]	tangenciální posuv stolu
J	[mm]	jmenovitý rozměr
l_a	[mm]	délka axiální dráhy brousicího kotouče
l_{fa}	[mm]	aktivní délka posuvného pohybu stolu
l_{fH}	[mm]	celková délka posuvného pohybu stolu
l_{fo}	[mm]	neproduktivní délka posuvného pohybu stolu
l_e	[mm]	skutečná délka styku
l_g	[mm]	geometrická délka styku
l_k	[mm]	kinematická délka styku
l_w	[mm]	délka obrobku
n_m	[s ⁻¹]	frekvence otáčení

n_s	$[\text{min}^{-1}]$	stolu frekvence otáčení brousicího kotouče
P_f	$[-]$	nástrojová rovina boční
P_p	$[-]$	nástrojová rovina zadní
P_r	$[-]$	nástrojová rovina základní
q	$[-]$	poměr rychlosti
r_{eq}	$[\text{mm}]$	ekvivalent poloměru brousicího kotouče
r_s	$[\text{mm}]$	poloměr brousicího kotouče
r_w	$[\text{mm}]$	poloměr obrobku
n_w	$[\text{min}^{-1}]$	frekvence otáčení obrobku
s	$[\mu\text{m}]$	směrodatná odchylka
s^2	$[\mu\text{m}^2]$	bodový odhad rozptylu
T	$[\text{mm}]$	tolerance díry
t	$[\text{mm}]$	tolerance hřídele
U	$[-]$	poměr mezi šířkou aktivní části brousicího kotouče a axiálním posuvem stolu
v_c	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	řezná rychlost
v_{fa}	$[\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$	axiální rychlost posuvu stolu
v_{fr}	$[\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$	radiální rychlost posuvu stolu
v_{ft}	$[\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$	tangenciální rychlost posuvu stolu
v_w	$[\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$	obvodová rychlost obrobku
$\bar{x}$	$[\mu\text{m}]$	výběrový průměr
μ	$[\mu\text{m}]$	střední hodnota
σ^2	$[\mu\text{m}^2]$	rozptyl