



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA BROUŠENÍ ROVINNÝCH PLOCH NA KONVENČNÍCH STROJÍCH

ANALYSIS OF THE FLAT SURFACE GRINDING BY USING STANDARD
MACHINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Hanáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Strejček, Ph.D., MBA

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jan Hanáček**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce: **Ing. Jan Strejček, Ph.D., MBA**
Akademický rok: 2015/16

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

Analýza broušení rovinných ploch na konvenčních strojích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na analýzu současného stavu broušení rovinných ploch na konvenčních strojích.

Cíle diplomové práce:

1. Analýza současného stavu v broušení rovinných ploch
2. Analýza a výpočet sil při broušení
3. Experimentální ověření výpočtů na vzorcích
4. Technicko-ekonomické zhodnocení, výběr optimální varianty a přínosy pro výrobu

Seznam literatury:

KOCMAN, K., PROKOP, J., Technologie obrábění. 2. vyd. Brno:

CERM, 2004. 270 s., ISBN 80-214-3068-0

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 255 s. ISBN 80-214-2374-9.

HUMÁR, A. Technologie obrábění – Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2005 [online].

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 24. 11. 2015



prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

V první části této diplomové práce je pojednáváno o možnostech rovinného broušení. Jsou zde popsány jednotlivé metody broušení a popsány jejich parametry. Dále pak je zde uvedeno značení brousicích kotoučů a je zde pojednáváno o jejich složení a o výpočtu řezných sil. V druhé části této práce je prováděn experiment. Na vzorcích z různých materiálů jsou sledovány parametry drsnosti po broušení, k čemuž je využíváno konvenční brusky BPH 300 a karuselu firmy TDZ Turn.

Klíčová slova

brousicí kotouč, broušení, TDZ Turn, řezná síla, bruska BPH 300, VLC ATC (+C)

ABSTRACT

In the first part of this thesis is discussed of the possibilities of surface grinding. There are described various methods for grinding and describe their characteristics. Furthermore, there is shown the marking of grinding wheels and is discussed of their composition and of calculating the cutting forces. In the second part of this thesis the experiment is performed. On the samples of various materials are monitored parameters of roughness after grinding, which is used by conventional grinding BPH 300 and horizontal lathe from company TDZ Turn.

Key words

grinding wheel, grinding, TDZ Turn, cutting power, grinder BPH 300, VLC ATC (C+)

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HANÁČEK, J. *Analýza broušení rovinných ploch na konvenčních strojích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 64 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Strejček, Ph.D., MBA.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Analýza broušení rovinných ploch na konvenčních strojích** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

20. 5. 2016

Datum

Bc. Jan Hanáček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Janu Strejčkovi, Ph.D., MBA za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji firmě TDZ Turn za poskytnuté vzorky a možnosti provádění experimentů. Také děkuji svojí rodině a přátelům za podporu při mém studiu.

OBSAH

ABSTRAKT.....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD	9
1 Analýza současného stavu v broušení rovinných ploch	10
1.1 Obecná definice broušení	10
1.2 Rozdělení rovinného broušení	11
1.3 Kinematika broušicího procesu	14
1.4 Jednotkový strojní čas	15
1.5 Značení broušicích kotoučů.....	16
1.6 Specifikace standardních brusiv	20
1.6.1 Umělý korund.....	21
1.6.2 Karbid křemíku	23
1.7 Specifikace pojiv	24
1.7.1 Keramická pojiva	24
1.7.2 Pojiva z umělé pryskyřice	24
1.8 Orovnávání broušicích kotoučů.....	25
1.8.1 Bezdiamantové orovnávače	25
1.8.2 Diamantové orovnávače.....	26
1.8.3 Zásady orovnávání broušicích kotoučů.....	28
1.9 Vyvažování broušicích kotoučů	29
2 Analýza a výpočet sil při broušení.....	32
2.1 Stanovení řezných sil – obvodové broušení	33
2.2 Představení firmy TDZ Turn	35
2.3 Specifikace materiálů vzorků	36
2.3.1 Vzorek z materiálu ČSN 41 2050	36
2.3.2 Vzorek z materiálu ČSN 41 4220	37
2.3.3 Vzorek z materiálu ČSN 41 9312	37
2.4 Specifikace technologických postupů	37

2.4.1	Technologické postupy pro brusku BHP 300	37
2.4.2	Technologické postupy pro karusel VLC 1600 ATC (+C).....	38
2.5	Výpočet řezných sil	39
3	experimentální ověření výpočtů na vzorcích	42
3.1	Specifikace vzorků	42
3.2	Parametry vyhodnocované na vzorcích.....	43
3.2.1	Struktura povrchu.....	43
3.2.2	Geometrická tolerance rovinnosti	44
3.3	Specifikace strojů	45
3.3.1	Bruska BHP 300.....	45
3.3.2	Karusel VLC 1600 ATC (+C).....	46
3.4	Vyhodnocení vzorků	48
3.4.1	Vyhodnocení vzorků testovaných na brusce BHP 300	48
3.4.2	Vyhodnocení vzorků testovaných na karuselu VLC 1600 ATC (+C)	51
3.4.3	Závěry z vyhodnocení vzorků	52
4	Technicko-ekonomické zhodnocení	55
4.1	Výpočet strojních časů	55
4.2	Kalkulace nákladů	56
	ZÁVĚR	58
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	60
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	63

ÚVOD

Proces broušení je nejstarší metodou obrábění v dějinách lidstva. Tato metoda obrábění byla pravděpodobně využívána již člověkem vzpřímeným, který využíval abrazivních vlastností nejrůznějších hornin k ostření svých primitivních nástrojů. Je samozřejmě zřejmé, že se nejednalo o broušení v pravém slova smyslu, jak jej vnímáme dnes. [3]

V současnosti patří broušení k nenahraditelným metodám obrábění. V průmyslově vyspělých zemích představuje asi 20 až 25 % celkových nákladů vynaložených na obráběcí procesy. Broušení je také jako proces důležité pro ostatní metody obrábění (soustružení, frézování), jelikož umožňuje ostření ostatních nástrojů. Z tohoto důvodu jej lze považovat za nejdůležitější metodu obrábění. [3]

Tato diplomová práce poukazuje na další nespornou výhodu tohoto způsobu obrábění, a tím je možnost obrábění velmi tvrdých materiálů, při dosažení vysoké jakosti obrobeného povrchu. V současné době jsou kladeny stále vyšší nároky nejen na kvalitu obrobených ploch, ale také na snižování výrobních nákladů. S těchto dvou základních požadavků výroby vyplývá, že proces broušení je nenahraditelný a má cenu jej zkoumat.

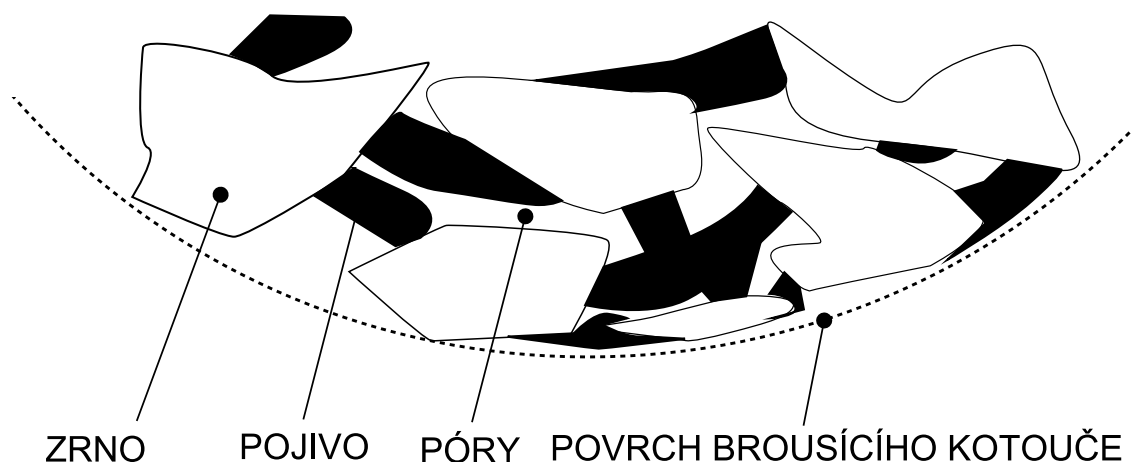
1 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU V BROUŠENÍ ROVINNÝCH PLOCH

1.1 Obecná definice broušení

Broušení lze charakterizovat jako abrazivní metodu obrábění mnohobřitým nástrojem s nedefinovanou geometrií břitu. Tímto procesem lze dosáhnout široké škály drsností povrchu a to od $Ra\ 3,2$ až $Ra\ 0,2$. V současnosti lze broušení považovat za nejpoužívanější dokončovací operaci ve strojírenství, o čemž svědčí například to, že v automobilovém průmyslu tvoří brusky a další dokončovací stroje asi 25 % všech obráběcích strojů. [1]

Oblast využití broušení je velmi široká. Kromě tradičního užití, jako je broušení kalených ocelí či litiny, lze broušení využít i v oblasti broušení nekovových materiálů. Další neméně důležitou oblastí užití je broušení jiných řezných nástrojů (soustružnických nožů, fréz a břitových destiček), takovou operaci nazýváme ostření. [2]

Nástrojem pro broušení je brousící kotouč, jehož schématické složení lze vidět na obrázku 1.1. Řezným nástrojem je zde zrno, jednotlivá zrna jsou mezi sebou propojována a držena pojivem. Mezi zrny a pojivem se nacházejí „volná místa“ tzv. póry, které jsou tvořeny nejen vzduchem, ale hlavně plyny, které vznikají při výrobě brousícího kotouče. Velikost zrna, druh pojiva a procento pórů určují složení brousícího kotouče a toto složení následně určuje nejen oblast využití daného kotouče, ale především výslednou kvalitu obráběného povrchu. Podrobněji bude popsáno složení brousícího kotouče v kapitolách 1.6 a 1.7. [3]

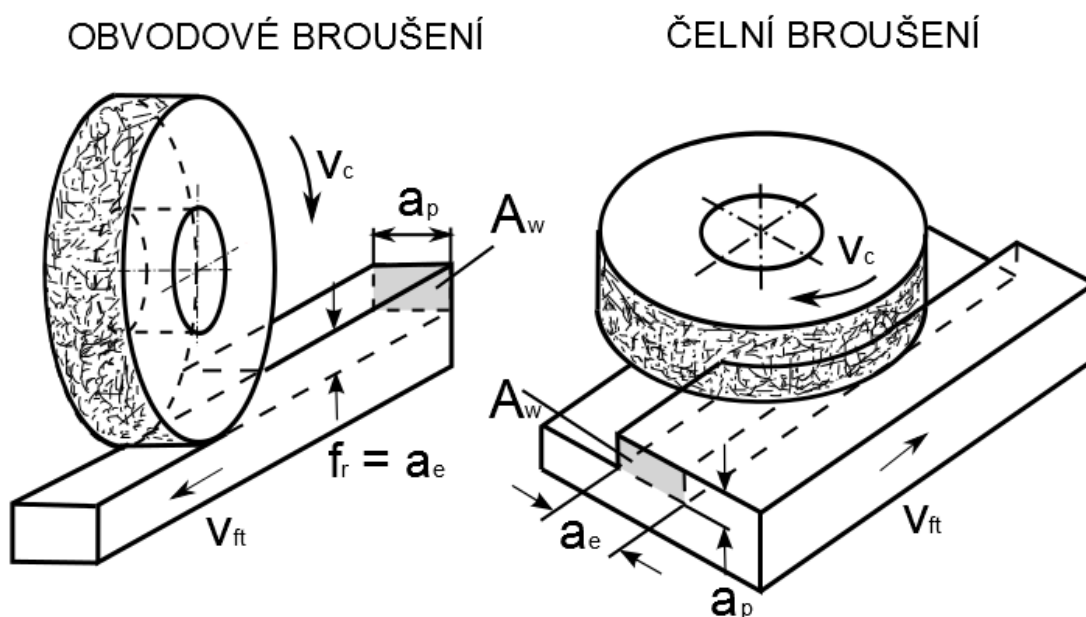


Obr. 1.1 Schéma brousícího kotouče, podle [4]

Proces broušení v sobě nese tyto charakteristiky [1]:

- Nepravidelný úběr třísek v důsledku nepravidelného rozmístění zrn v brousícím kotouči.
- Úhly čela jsou nepravidelné, ale většinou záporné.
- Relativně slabé upevnění zrna pojivem v brousícím kotouči, důsledkem toho je, že zrna jsou schopna vydržet pouze malé řezné síly. Tento jev je do určité míry žádaný, protože díky němu se mohou zrna vylamovat a dochází tak k procesu „samoostření“.
- Velké měrné řezné síly
- Vysoké řezné rychlosti (až 180 m.s^{-1} [10])
- Ze dvou výše uvedených charakteristik vyplývá i velké množství vzniklého tepla vyžadující chlazení obrobku. Toto tepelné zatížení má pak za následek vznik nepříznivých tahových napětí na povrchu obrobku, což může vést ke vzniku a následnému šíření trhliny.
- Póry jsou při procesu broušení zanášeny třískami, což negativně ovlivňuje „samoostřící“ proces. Tuto degradaci řezivosti nástroje lze obnovit pomocí různých orovnávačů popsanych v kapitole 1.8.

1.2 Rozdělení rovinného broušení



Obr. 1.2 Základní druhy rovinného broušení, podle [10]

Rovinné broušení je rozděleno podle aktivní části brousícího kotouče na broušení obvodové a broušení čelní.

Obvodové broušení patří k nejpřesnějším způsobům broušení, protože je zde malá oblast styku kotouče a obrobku, proto nedochází k takovému vzniku tepla, a tím pádem dochází k menším deformacím. Obrobek v tomto případě vykonává rotační nebo častěji přímočarý pohyb. [1]

Čelní broušení je oproti obvodovému broušení výkonnější, ovšem není dosahováno takových přesností. Podobně jako u obvodového broušení tak i v tomto případě může obrobek vykonávat přímočarý či rotační pohyb. Pro snížení tepelného namáhání se využívá naklonění osy vřetene o několik stupňů (maximálně o 4°) [1]. Při broušení čelem kotouče jsou také někdy využívány tzv. segmentové hlavy. Tyto segmentové hlavy mají několik výhod, jako je lepší využití brousícího materiálu, snadnější odvod třísek, snadnější přístup řezné kapaliny, menší styčné plochy mezi nástrojem a obrobkem a v neposlední řadě i menší zahřívání broušené součásti. [10]

Kromě tohoto způsobu se používá i orovnění čela brousícího kotouče, aby nebylo ve styku celé čelo, ale jen jeho část. [3]

Podrobnější rozčlenění rovinného broušení dle pohybů obrobku vzhledem k brousícímu kotouči je následující (viz *Obr 1.3 a 1.4*) [3]:

- Axiální broušení – v tomto případě je osa brousícího kotouče rovnoběžná s posuvem stolu.
- Radiální broušení – brousící kotouč je radiální k hlavnímu posuvu stolu v daném bodě.
- Tangenciální broušení – hlavní posuv stolu je tangenciální k vektoru řezné rychlosti v daném bodě.

		RADIÁLNÍ	TANGENCIÁLNÍ	AXIÁLNÍ
POHYB STOLU	PŘÍMOČARÝ			
	OTÁČIVÝ			

Obr. 1.3 Druhy čelního broušení, podle [10]

		RADIÁLNÍ	TANGENCIÁLNÍ	AXIÁLNÍ
POHYB STOLU	PŘÍMOČARÝ			
	OTÁČIVÝ			

Obr. 1.4 Druhy obvodového broušení, podle [10]

1.3 Kinematika brousicího procesu

Řezná rychlost je vyjádřena následujícím vztahem [10]:

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

d_s – průměr brousicího kotouče [mm],

n_s – frekvence otáčení brousicího kotouče [min^{-1}].

Podobným způsobem lze definovat i rychlost tangenciálního posuvu při broušení s otáčivým pohybem stolu:

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

d_w – průměr obrobku [mm],

n_s – frekvence otáčení obrobku [min^{-1}].

Řezná rychlost se při broušení běžně pohybuje v intervalu $30 - 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jsou-li aplikována speciální pojiva (zejména pojiva z umělé pryskyřice, viz kapitola 1.7), může být dosaženo i rychlosti vyšší než je $80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. [10]

Dalším kinematickým parametrem při broušení je stykový oblouk brousicího kotouče. Tato veličina je při obvodovém broušení do kulata kvantifikována pomocí geometrické délky styku l_g , kinematické délky styku l_k a skutečné délky styku l_e . [10]

Při rovinném broušení dochází při odvozování k určitému zjednodušení, a proto pro rovinné obvodové broušení můžeme psát, že pro stykový oblouk brousicího kotouče platí následující vztah [3]:

$$l_k \approx l_e = \sqrt{a_e \cdot d_s} \text{ [mm]}, \quad (1.3)$$

l_c – délka stykového oblouku brousicího kotouče [mm],

a_e – pracovní radiální záběr (viz Obr. 1.2) [mm].

Doporučené hodnoty řezných (kinematických) parametrů pro rovinné broušení jsou uvedeny v tabulce 1:

Tab. 1 Doporučené parametry rovinného broušení [10]:

Druh práce	Radiální posuv f_r [mm]	Axiální posuv f_a [mm]	Tangenciální rychlost posuvu stolu v_{ft} [m.min ⁻¹]
Rovinné broušení obvodové <i>Přímocárý pohyb stolu</i> - hrubování - broušení na čisto	0,01 až 0,04 0,005 až 0,01	(0,4 až 0,7). b_s (0,2 až 0,3). b_s	8 až 30 15 až 20
<i>Kruhový pohyb stolu</i> - hrubování - broušení na čisto	0,005 až 0,015 0,005 až 0,01	(0,3 až 0,6). b_s (0,2 až 0,25). b_s	20 až 60 40 až 60
Rovinné broušení čelní <i>Přímocárý pohyb stolu</i> - hrubování - broušení na čisto	0,015 až 0,04 0,005 až 0,01	- -	4 až 12 15 až 20
<i>Kruhový pohyb stolu</i> - hrubování - broušení na čisto	0,015 až 0,03 0,005	- -	10 až 40 10 až 40

Pozn.: b_s – šířka brousícího kotouče.

1.4 Jednotkový strojní čas

Pro pozdější technickoekonomické zhodnocení bude důležitá i velikost jednotkového strojního času. Velikost tohoto času závisí na způsobu broušení. Pro rovinné obvodové tangenciální broušení, kde je v každé úvratí stůl posunut v axiálním směru o hodnotu f_a (bez uvažování vyjiskřování) platí [1]:

$$t_{AS} = \frac{l_t}{1000 \cdot v_{ft}} \cdot \frac{l_a}{f_a} \cdot \frac{p}{a_e} \quad [\text{min}], \quad (1.4)$$

v_{ft} – je tangenciální rychlost posuvu stolu [m.min⁻¹],

p – přídavek na obrábění [mm],

a_e – pracovní (radiální) záběr [mm],

l_t – je dráha stolu v tangenciálním směru [mm],

l_a – je dráha stolu v axiálním směru [mm].

Dráha stolu v tangenciálním směru je vyjádřena vztahem [1]:

$$l_t = l_{nt} + l_w + l_{pt} \quad [\text{mm}], \quad (1.5)$$

l_w – délka obrobku [mm],

$l_{nt} = l_{pt}$ – je délka náběhu a přeběhu v tangenciálním směru, která je dána vztahem [1]:

$$l_{nt} = l_{pt} = \sqrt{3 \cdot d_s + 9} \text{ [mm]}, \quad (1.6)$$

d_s – průměr broušícího kotouče [mm].

Pro rovinné obvodové tangenciální broušení s přímočarým pohybem stolu, kde je axiální posuv f_a realizovaný na každý dvojzdvih stolu bez uvažování vyjiskřování, má jednotkový strojní čas tento tvar [1]:

$$t_{AS} = 2 \cdot \frac{l_t}{1000 \cdot v_{ft}} \cdot \frac{l_a}{f_a} \cdot \frac{p}{a_e} \text{ [min]}. \quad (1.7)$$

Veličiny mají stejný význam jako v rovnici 1.4, formálním rozdílem je pouze hodnota f_a , která je uvažována na dvojzdvih nikoliv na každou úvrať.

Uvážíme-li v rovnici 1.7 vyjiskřování, pak bude mít následující podobu [1]:

$$t_{AS} = 2 \cdot \frac{l_t}{1000 \cdot v_{ft}} \cdot \left(\frac{l_a}{f_a} + n_v \right) \cdot \frac{p}{a_e} \text{ [min]}, \quad (1.8)$$

n_v – počet vyjiskřovacích dvojzdvihů, ostatní veličiny mají stejný význam jak v rovnici 1.7.

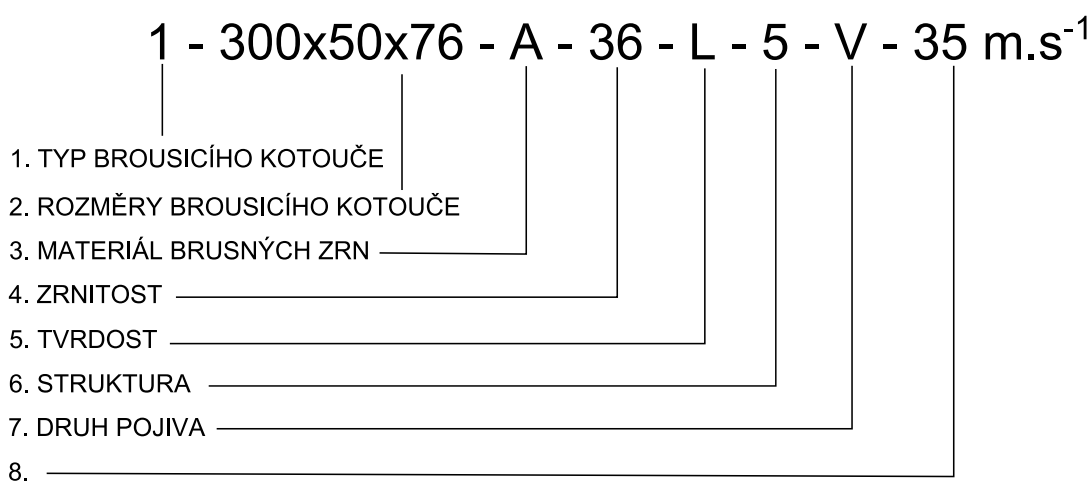
Velikost jednotkového strojního času pro obvodové tangenciální broušení s otáčivým pohybem stolu je vyjádřena rovnicí 1.9:

$$t_{AS} = \frac{l_{ar}}{f_a} \cdot \frac{1}{n_w} \cdot \frac{p}{a_e} \text{ [min]}, \quad (1.9)$$

n_w – otáčky obrobku [min⁻¹]

l_{ar} – dráha broušícího kotouče v axiálním směru [mm]

1.5 Značení broušících kotoučů



Obr. 1.5 Značení standardních broušících kotoučů, podle [1]

Na obrázku 1.5 lze vidět značení standardních (konvenčních) kotoučů (existuje ještě značení superabrazivních kotoučů, ve kterých jsou zrna tvořena diamantem nebo kubickým nitridem bóru) dle ČSN ISO 525 (22 4503). Nutno poznamenat, že tato norma specifikuje pouze body 3 až 7 na obrázku 1.5. První dva znaky jsou specifické znaky, určují typ a rozměry brousicího kotouče (viz obrázek 1.6). [1]

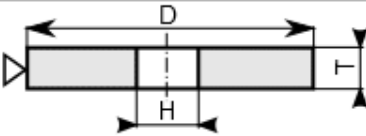
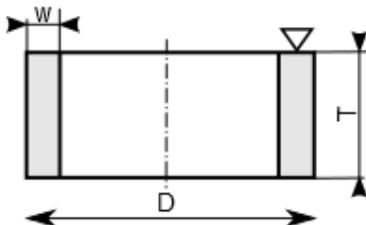
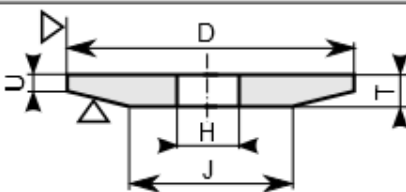
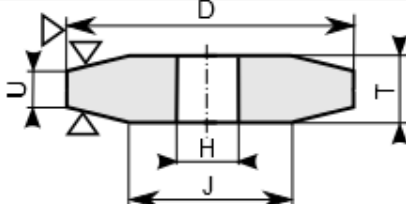
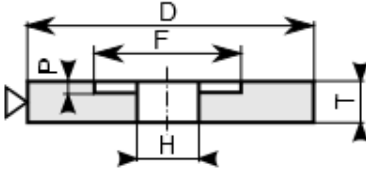
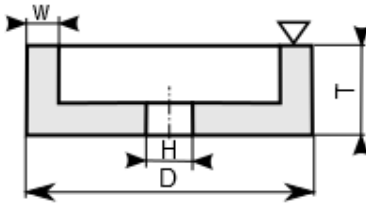
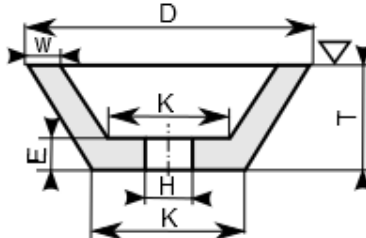
Třetí znak na tomto obrázku (*Obr. 1.5*) specifikuje materiál brousicího zrna. Norma ČSN ISO 525 (22 4503) určuje na tomto místě pouze dva symboly, které určují materiál brusných zrn [1]:

- C – karbid křemíku
- A – umělý korund (oxid hlinitý)

Toto rozdělení je velmi obecné, protože oba hlavní druhy materiálu brusných zrn mohou mít další modifikace. V rámci těchto modifikací se například u oxidu hlinitého můžeme pohybovat v rozsahu tvrdostí podle Knoopu od 13 GPa do 22 GPa [3].

Podrobnější značení pro materiál brusného zrna je následující [6]:

- C 48 – červený karbid křemíku
- C 49 – zelený karbid křemíku
- A 99 B – umělý korund bílý
- A 98 – umělý korund růžový
- A 96 – umělý korund hnědý
- AG 92 – mikrokrytalický korund
- A 95 – monokrytalický umělý korund
- 80 A – zirkonový korund

TYP	VYOBRAZENÍ	NÁZEV A ROZMĚRY
1		KOTOUČE PLOCHÉ D x T x H
2		KOTOUČE PRSTENCOVÉ D x T x W
3		KOTOUČE KUŽELOVÉ D/J x T/U x H
4		KOTOUČE OBOUSTRANNĚ KUŽELOVÉ D/J x T/U x H
5		KOTOUČE S JEDNOSTRANNÝM VYBRÁNÍM D x T x H - P, F
6		KOTOUČE HRNCOVÉ D x T x H - W, E
11		KOTOUČE MISKOVÉ D/J x T x H - W, E

Obr. 1.6 Označování tvarů a rozměrů brousicích kotoučů, podle [1]

Další znak na obrázku 1.5 poukazuje na zrnitost brousicího kotouče. V tomto případě lze brousicí kotouče dělit do čtyř kategorií. Podle tzv. „čísla zrna“ může být zrnitost [1]:

- 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

Toto číslo je bezrozměrné a vyjadřuje počet drátků v sítu na délce jednoho palce, kterým jsou zrna prosívána. Samotný proces určení tohoto čísla zahrnuje sadu sít, ve kterých se musí vždy dané procento zrn zachytit a zbytek musí projít v tzv. komínu sít. Tento způsob určování čísla zrna je ale užíván pouze do čísla 240. Vyšší čísla zrna se určují tzv. metodou plavením. [3]

Výsledné číslo zrna má poté spojitost se střední velikostí zrna, která může být určena různými způsoby [3]:

$$d_g = 15,2 \cdot M^{-1} [mm], \quad (1.10)$$

d_g - střední velikost zrna [mm]

M - zrnitost [-]

Podrobnější způsoby tvorby čísla zrna se můžeme dočíst v literatuře [3].

Tvrдост je další charakteristikou brousicího kotouče, která je normou rozdělena do tří skupin [1]:

- měkký: A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K
- střední: L, M, N, O, P, Q
- tvrdý: R, S, T, U, V, W, X, Y

Další charakteristikou brousicího kotouče v uvedeném způsobu značení je struktura. Toto číslo má souvislost s objemovou koncentrací zrn v kotouči. Jedná se o celočíselnou hodnotu v rozsahu 0 – 19, kde nízká hodnota indikuje kotouče s velkým objemovým procentem zrn (hutné kotouče) a vysoké číslo naopak značí více pórovité brousicí kotouče. [3]

Posledním normou specifikovaným znakem je druh pojiva. Norma v tomto ohledu specifikuje sedm druhů pojiv označených písmeny [1]:

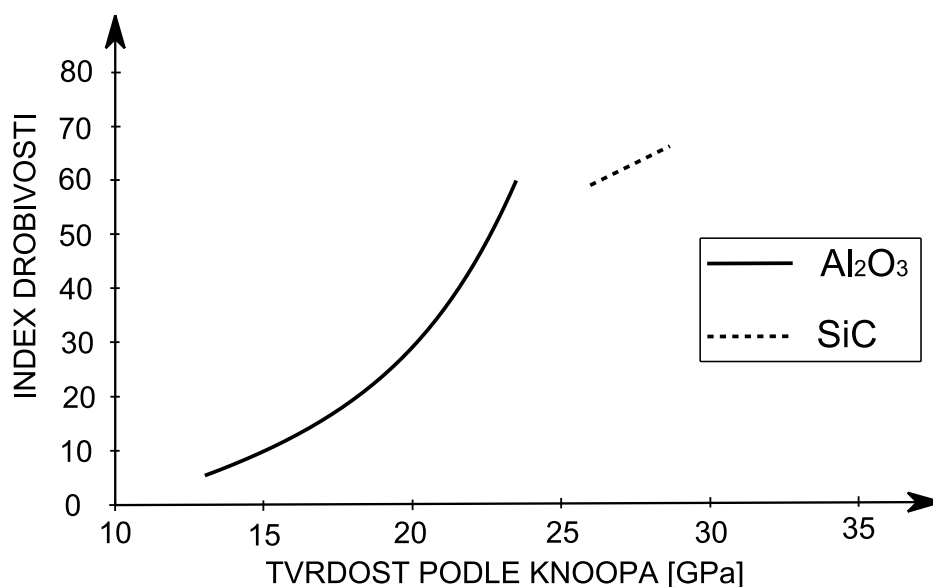
- keramické: V
- pryžové: R

- pryžové s výztuží: RF
- umělá pryskyřice: B
- umělá pryskyřice s výztuží: BF
- šelakové: E
- magnezitové: Mg

1.6 Specifikace standardních brusiv

Jak již bylo řečeno, nástrojem při technologii broušení jsou brusná zrna. Základním požadavkem je, aby brusivo (brusné zrno) bylo tvrdší než obráběný materiál. Brusné materiály můžeme v zásadě rozdělit do dvou kategorií – přírodní brusiva a syntetická (umělá) brusiva. Syntetické materiály zaznamenaly v posledním století velký rozvoj, proto jsou také využívány více. V zásadě se jedná o syntetické materiály založené buď na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3) nebo na bázi karbidu křemíku. [3]

Základní vlastností brusiv je jejich tvrdost. Ta je určována dvěma způsoby jako tzv. statická tvrdost (využívány jsou standardní zkoušky tvrdosti – Vickersova a Knoopova) a dynamická tvrdost (drobivost). Jedna z možností jak určit drobivost je tzv. rozmělnovacím testem. Jedná se o to, že zrna, která prošla sítím o velikosti 12 (12 drátků na délkový palec) jsou za definovaných podmínek mleta a následně přesívána přes síto o velikosti 16. Procento zrn, které prošlo jemnějším sítím, pak určuje tzv. „index drobivosti“. Tento způsob ovšem určí index drobivosti pouze pro jednu velikost zrna, a navíc menší zrna vykazují menší drobivost, proto způsobů určení existuje více. Obecně platí, že s rostoucí statickou tvrdostí roste i drobivost, která je ale do určité míry žádaná, protože má za následek proces „samoostření“. Závislost drobivosti na statické tvrdosti můžeme vidět na obrázku 1.7. [3]



Obr. 1.7 Závislost drobivosti na tvrdosti brusných zrn, podle [3]

1.6.1 Umělý korund

Jak již bylo řečeno, současná standardní brusiva jsou založena na bázi umělého korundu nebo na bázi karbidu křemíku. Umělý korund (oxid hlinitý) je typickým zástupcem syntetických brusiv. Syntetický oxid hlinitý je pro účely broušení používán ve své modifikaci α , která má, stejně jako přírodní korund, šesterečnou krystalickou mřížku. Tato sloučenina se navíc vyskytuje v různém stupni krystalizace a v různém stavu čistoty. [3]

Hnědý umělý korund je nejjednodušší na výrobu. Získává se tavením bauxitu s malým množstvím uhlí a železa. Výchozí surovina má v sobě jednotky procent oxidů titanu, které jsou pozůstatkem z výchozího bauxitu. Přítomnost těchto oxidů způsobuje, že hnědý umělý korund má menší tvrdost a zároveň také menší drobivost. Zrna hnědého umělého korundu mají kubický tvar. [3]



Obr. 1.8 Hnědý umělý korund [22]

Monokrystalický umělý korund se vyrábí podobnou fúzí jako hnědý umělý korund, ale ještě se přidávají sulfidy železa a alkalické sloučeniny za účelem rozložení nežádoucích oxidů titanu na jiné oxidy. Tímto procesem vznikne ingot, který je složený ze zrn oxidu hliníku a rozpustné sulfidové matrice. Tento ingot je drcen a proplachován vodou a jsou z něj získávána zrna oxidu hliníku. Tato zrna jsou mnohem čistější a obsahují minimum nežádoucích oxidů v porovnání s hnědým umělým korundem. Monokrystalický umělý korund je téměř výhradně používán pro dokončovací operace v broušení. [3]



Obr. 1.9 Monokrystalický umělý korund [23]

Nejčistší používanou formou umělého korundu pro účely broušení je bílý umělý korund. Tato sloučenina se složením blíží 100% Al_2O_3 . Bílý umělý korund slouží také jako výchozí látka pro výrobu modifikovaného umělého korundu, což probíhá přidáním různých rozpustných oxidů kovů, čímž je dosahováno požadovaných vlastností. [3]



Obr. 1.10 Bílý umělý korund [24]

Další druh korundu je slinutý umělý korund. Tato modifikace Al_2O_3 je vyráběna zcela jiným způsobem než hnědý umělý korund. Způsob výroby je takový, že jemná pasta bauxitu je stlačována a následně spékána při teplotě blízké teplotě tání. Slinutý umělý korund nachází využití v hrubovacích operacích při broušení. [3]

V hrubovacích brousicích operacích nachází využití i zirkonový umělý korund (směs Al_2O_3 a ZrO_2). Zajímavé je, že oxid zirkoničitý má asi poloviční tvrdost než oxid hlinitý a i přes velmi malou vzájemnou rozpustnost těchto látek je jejich eutektická fáze velmi tuhá. Tuhost zajišťuje oxid zirkoničitý, který zmenšuje drobitost a tím může výsledná směs snést větší zatížení, a proto nachází využití v produktivním broušení. [3]



Obr. 1.11 Zirkonový umělý korund [25]

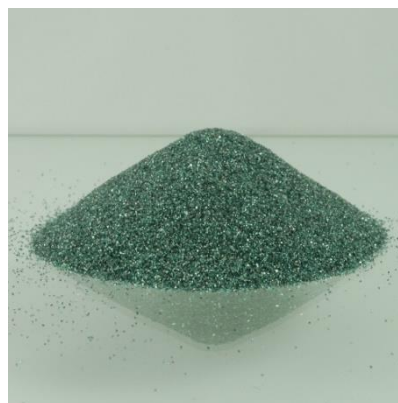
1.6.2 Karbid křemíku

Karbid křemíku (SiC) je druhým základním typem brusiv používaných pro výrobu standardních brousicích kotoučů. Podobně jako umělý korund má karbid křemíku různé modifikace. Modifikace α má šesterečnou mřížku, modifikace β má kubickou mřížku. Pro účely broušení je využívána především modifikace α . [3]

Karbid křemíku se vyrábí reakcí oxidu křemičitého s uhlím v pecích při teplotě asi $2000\text{ }^\circ\text{C}$. Tímto procesem vzniká černý nebo zelený karbid křemíku (zelený je čistější). Jak zelený tak černý karbid křemíku jsou obecně tvrdší než jakákoliv forma oxidu hliníku a mají přijatelnou drobitost, což by mohlo znamenat, že karbid křemíku bude při broušení využíván více, ovšem z důvodu chemické reaktivnosti s železem a ocelovými slitinami (karbid křemíku obsahuje uhlík) není jeho využití tak široké. [3]



Obr. 1.12 Černý karbid křemíku [21]



Obr. 1.13 Zelený karbid křemíku [5]

1.7 Specifikace pojiv

Na brousící kotouč jsou kladeny vysoké nároky. V obecném slova smyslu musí být brousící kotouč dostatečně pevný, aby vydržel nejen řezné síly, ale také teploty a v neposlední řadě také odstředivé síly vznikající z vysokých otáček. Dalšími požadavky na brousící kotouče jsou, aby byly chemicky stabilní vůči řezné kapalině a aby byly dostatečně tuhé. Všechny tyto požadavky musí zajistit pojivo brousícího kotouče. [3]

Ve výše uvedeném systému značení brousících kotoučů existuje sedm druhů pojiv. Standardní brousící kotouče jsou ale většinou vyráběna buď s pojivem keramickým, nebo s pojivem z umělé pryskyřice. [3]

1.7.1 Keramická pojiva

Jsou nejčastějším druhem pojiva zejména pro svoji univerzálnost [9]. V současnosti tvoří tento druh pojiva asi polovinu všech vyrobených standardních brousících kotoučů [3].

Zatímco ve starší literatuře [7] se můžeme dočíst, že řezné rychlosti dosahují hodnot do $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, tak novější prameny [10] uvádějí, že dnešní brousící kotouče dosahují i rychlostí $180 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tento trend zvyšování brousících rychlostí vede k tomu, že keramická pojiva jsou (zejména pro hrubovací operace při broušení) nahrazována pojivy z umělé pryskyřice.

Keramické brousící kotouče jsou vyrobeny ze směsi jílu, živce a frity (keramické nebo porcelánové trubičky [8]). Tato směs je následně mleta při teplotách $950 - 1400^\circ\text{C}$ (teplota závisí na konkrétním složení směsi). Keramická pojiva se většinou používají v kombinaci s brusivý z oxidu hlinitého, která jsou přidávána do směsi. Tato směs se poté pod tlakem tvaruje do finálního tvaru brousícího kotouče, který je následně vysoušen a vypalován při teplotě asi 1260°C . Ohřívání a výdrž brousících kotoučů na tuto teplotu a výdrž na této teplotě je zabere relativně málo času (asi 2 dny), ale ochlazování kotoučů může zabrat i týden, protože zde mohou vznikat zbytková napětí vlivem rychlého ochlazování, což může vést ke tvorbě trhlin. [3]

1.7.2 Pojiva z umělé pryskyřice

Výroba brousících kotoučů z umělé pryskyřice probíhá tak, že je vytvořena směs brusiva, fenolové pryskyřice a změkčovadla. Tato směs je opět tvarována a spékána při teplotě $150 - 200^\circ\text{C}$. Výsledné vlastnosti kotouče závisí na poměru pryskyřice a změkčovadla a na způsobu tepelného zpracování. Kotouče s umělou pryskyřicí jsou využívány při hrubovacím broušení, protože jsou schopny vydržet větší zatížení než

kotouče keramické. Další oblastí použití tohoto druhu pojiva jsou řezné kotouče. Tento druh pojiva je citlivý na chemikálie, proto u něj většinou není využíváno řezné kapaliny. [3]

1.8 Orovnávání brousicích kotoučů

Brusná zrna v brousicím kotouči mohou správně odebírat třískou, jsou-li ostrá a je-li mezi jednotlivými zrny dostatek místa pro odvod třísky. Pokud je mezera mezi zrny vlivem řezných podmínek zanesená, kotouč má hladký povrch a místo toho aby povrch brousil, tak ho „pálí“. Orovnáváním se zanesený povrch kotouče zdrsní. Tímto procesem v podstatě dochází k naostření brousicího kotouče. [9]

Jak již bylo řečeno, jeden z požadavků na brousicí kotouč je, aby měl schopnost „samoostření“. Pokud by ovšem měl optimální schopnost samoostření, tak by se rychle opotřebil, což je neekonomické. Proto jsou obvykle použity kotouče tvrdší a kotouče se v průběhu obrábění orovnáávají. Účelem orovnání tedy je [9]:

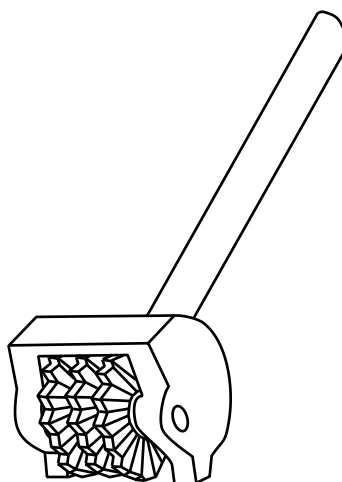
- obnovit nebo vytvořit na brousicím kotouči požadovaný geometrický tvar,
- obnovit řezivost kotouče,
- ovlivnit jakost broušeného povrchu způsobem orovnání.

Orovnávání se provádí „orovnávači“, které můžeme rozdělit do tří skupin [2].

1.8.1 Bezdiamantové orovnávače

Tyto typy orovnávačů většinou slouží pouze k vytvoření hrubého tvaru. Patří sem [9]:

- SK nůž – slouží pouze k odstranění nežádoucího materiálu, jedná se o nejjednodušší způsob orovnání.
- Orovnávací kolečka – jsou to na sobě navrstvené ocelové plíšky hvězdicového tvaru, mezi něž jsou vloženy ocelové plíšky nebo vlnitá kolečka (viz obrázek 1.14). Pro dosažení hrubšího povrchu kotouče jsou používány kolečka větších průměrů, pro dosažení jemnějšího povrchu kolečka menších průměrů. Tímto způsobem se orovnáává většinou ručně, při čemž držák kolečka musí být pevně opřený.



Obr. 1.14 Orovnávací kolečko

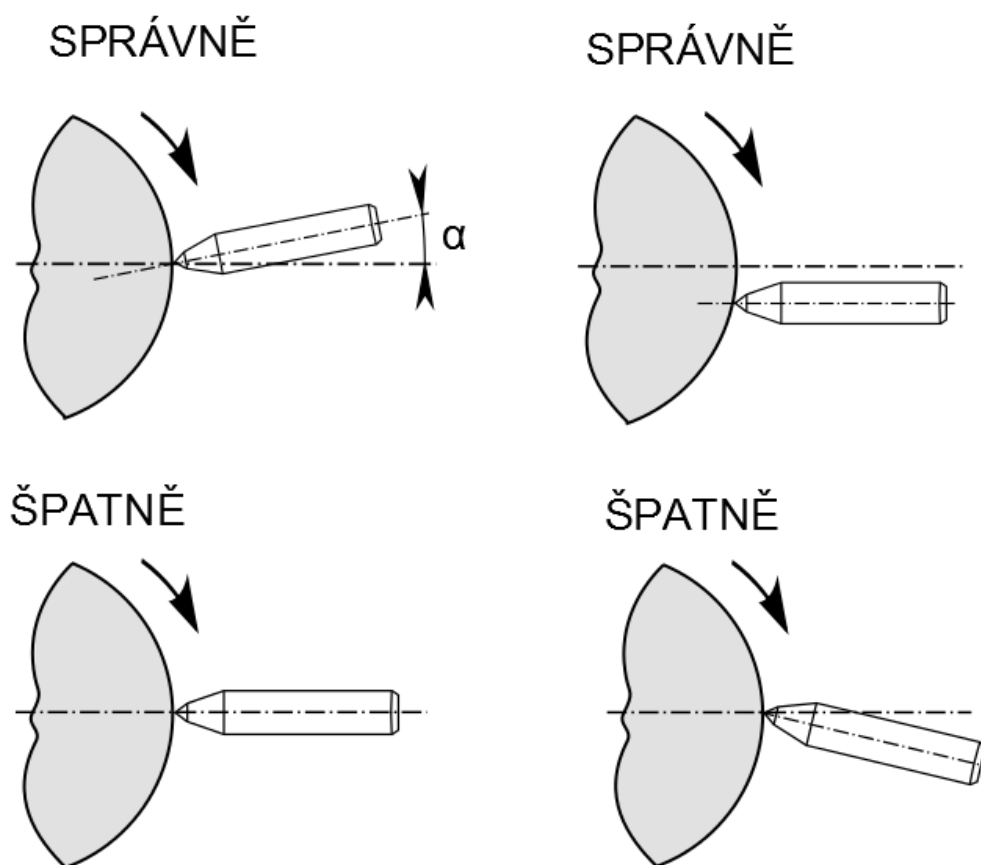
- Keramické orovnávače – jsou to nástroje z karborundu určené k orovnávaní brousících kotoučů. Orovnávací kotouč musí mít větší zrnitost než je kotouč orovnávaný.
- Zamačkávací kladky – jsou to kotouče vyrobené z tvrdé oceli nebo ze slinutých karbidů. Zamačkávací kladka je poháněná a je v neustálém kontaktu s brousícím kotoučem, ale relativní rychlost mezi kladkou a brousícím kotoučem je rovna nule. Tímto způsobem orovnáání je dosahováno vysokého opotřebení brousícího kotouče, ale zrna tímto způsobem orovnaná mají lepší geometrii než například při orovnávaní diamantem (diamant totiž některá zrna „otupuje“, vytváří negativní geometrii zrn), proto se orovnávaní kladkami používá hlavně u hrubovacích operací. Tento způsob orovnávaní je vhodný pouze pro kotouče s keramickým pojivem.

1.8.2 Diamantové orovnávače

Diamantové orovnávače se na rozdíl od bezdiamantových používají především na přesné orovnáání kotouče. Diamantové orovnávače jsou sice podstatně dražší, ale pro svoje přednosti jsou nejpoužívanější. Materiálem je uměle vyráběný diamant. Podle jeho velikosti a druhu má nástroj buď válcovou, nebo kuželovou stopku. Je důležité, aby byl brousící kotouč před orovnávaním diamantovým nástrojem dobře vyvážený, aby nedocházelo ke chvění. Další důležitou zásadou je, že nástroj musí být vůči radiálnímu směru brousícího kotouče pootočen o 10 až 15° , čehož může být dosaženo buď natočením nástroje, nebo posunutím nástroje pod osu rotace (viz Obr. 1.15). [9]

U menších diamantů (do 1 crt, 1 crt = 0,2 g) se používá maximálních přísuvů do 0,3 mm, pokud je použito chlazení. Není-li během orovnávaní použito chlazení, jsou maximální přísuvy do 0,01 mm, z důvodu rychlého zahřání diamantu. [9]

Neméně důležitou roli při orovnávaní hraje posuv. Velký posuvy ($250 - 500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) zajistí sice ostřejší povrch kotouče, ale takto upravený povrch zanechá stopy na broušeném povrchu. Pro dokončovací operace se tedy posuv volí menší, ale ne zase tak malý, aby byl výsledný povrch kotouče uhlazený. [9]



Obr. 1.15 Metodika orovnávaní brousicích kotoučů, podle [9]

Podle počtu diamantových kamenů rozeznáváme kotouče [9]:

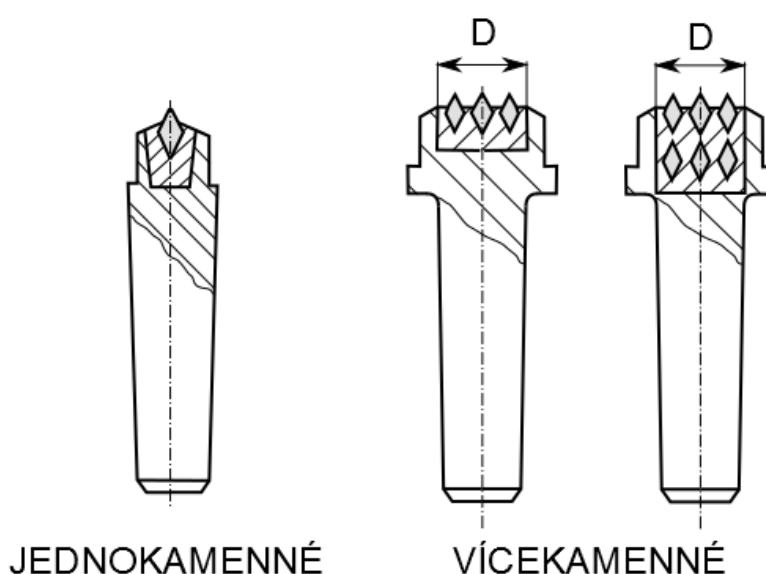
- jednokamenné,
- vícekamenné,
- prachové

Jednokamenné orovnávače jsou klasickým nástrojem pro orovnávaní brousicích kotoučů. Vybírány jsou větší, hodnotnější kameny, které by měly mít co největší vrcholový úhel. [9]

U vícekamenných orovnávačů je důležité, aby kameny které současně orovňávají, byly v jedné rovině. Výhodou vícekamenných orovnávačů je, že mohou v mnohých operacích nahradit jednokamenné. [9]

Prachové diamantové kotouče mají v sobě diamantový prach slinovaný s kovovým pojivem. Tento způsob orovňávání je vhodný spíše na tvarové broušení složitějších povrchů (např. při broušení závitů) [9].

Jak diamantové tak bezdiamantové orovnávače mohou být buď pevně stojící (jsou vzhledem k broušicímu kotouči nehybné) nebo volné. [2]



Obr. 1.16 Druhy diamantových orovnávačů, podle [9]

1.8.3 Zásady orovňávání broušicích kotoučů

Ve většině případů jsou broušící kotouče orovňávány diamantovými orovnávacími nástroji. Následující výčet obsahuje zásady pro orovňávání těmito nástroji [9]:

- Zvolit správný způsob orovnění.
- Jednokamenné orovnávače se používají jen k orovňávání tvarově složitých ploch. K orovnění jednoduchých a rovinných tvarů jsou používány orovnávače prachové nebo vícekamenné, jejich využití je hospodárnější.
- Diamant je materiál, který je citlivý a změny teplot a na nárazy, proto je třeba se těmito jevy vyvarovat.
- Hrubé úpravy tvaru kotouče a orovňávání silně znečištěných je třeba nejprve dělat bezdiamantovými orovnávači.

- Orovnávače musí být dobře mechanicky vedeny bez možnosti otřesů. Při ručním orovnávaní musí být orovnávač opřen o pevnou podložku a veden.
- Orovnávače jsou přistavovány a odstavovány pouze při plném počtu otáček. Stejně tak celý proces orovnávaní probíhá beze změny otáček kotouče.
- Při orovnávaní je zapotřebí hojně chladit. Diamantový nástroj nesmí být náhle ochlazen, protože by mohlo dojít k prasknutí.
- Obvodová rychlost při orovnávaní nemá vliv na kvalitu povrchu orovnávaného kotouče, má však vliv na trvanlivost diamantového nástroje. Proto jsou při orovnávaní voleny nižší obvodové rychlosti (15 až 20 m.s^{-1}).
- Hloubka záběru při orovnávaní je maximálně $0,05 \text{ mm}$. Hloubka záběru nemá zásadní vliv na kvalitu orovnávaní, je takto volena s ohledem na optimální výdrž diamantu.
- Posuv při orovnávaní má vliv na povrch kotouče, a tím i na výsledný obrobený povrch. Čím je posuv větší, tím je hrubější obrobený povrch. Optimální hodnota posuvu je $0,1 \text{ mm}$ pro jednokamenné orovnávače a $0,3 - 0,5 \text{ mm}$ pro vícekamenné orovnávače.
- Celkový odběr má být co nejmenší. Pochopitelně je třeba zajistit odstranění vadné vrstvy a vytvořit vrstvu novou, ovšem je třeba volit pouze nutný počet zdvihů, je tak zajištěno dobré hospodaření s kotoučem i s orovnávačem.
- Při orovnávaní vzniká na diamantu opotřebovaná ploška, je-li větší než 1 mm , je zapotřebí diamant přebrousit nebo přesadit.
- Zrno diamantu musí být v držáku pečlivě usazené. Materiál držáku musí dobře odvádět teplo a zároveň být dostatečně tuhý. Při opětovném nasazení by měl být diamant zvážěn a tento údaj by měl být uveden na držáku.
- Pro hospodárné orovnávaní je dobrá znalost optimálních podmínek obrábění.

1.9 Vyvažování brousicích kotoučů

Při vyšších nárocích na obráběný povrch je zapotřebí, aby byl brousicí kotouč dobře vyvážený [10]. Špatně vyvážený brousicí kotouč může způsobovat tyto nežádoucí jevy [2]:

- chvění brousicího kotouče,
- nepřiměřené namáhání ložisek vřetene,
- snižování výkonu brusky,

- velké odstředivé síly, které mohou způsobit roztržení kotouče.

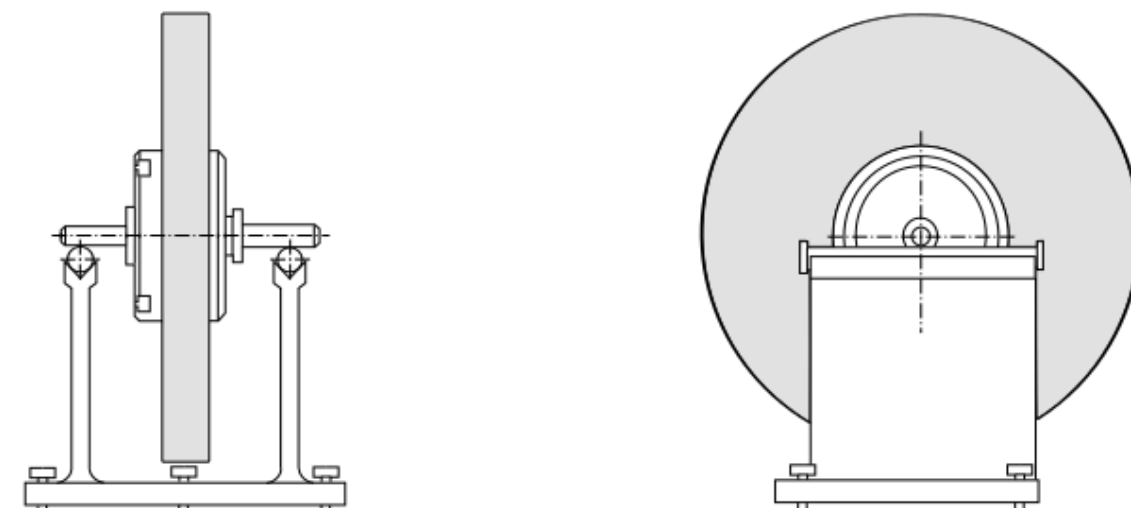
Všechny tyto jevy vedou ke snížení kvality obráběného povrchu. Důvodem těchto nežádoucích jevů jsou následující příčiny [2]:

- nerovnoměrné rozložení hmoty v brousicím kotouči,
- neválcový obvod kotouče,
- výstřednost upínacího otvoru vůči obvodu kotouče,
- kotouč je jednostranně nasáklý řeznou kapalinou.

Vyvažování brousicího kotouče dělíme na [10]:

- statické vyvažování,
- dynamické vyvažování

Statické vyvažování je realizováno tak, že brousicí kotouč s přírubami je nasazen na vyvažovací trn a položen na odvalovací válečky, které jsou součástí vyvažovacího stojánu, který musí být ve vodorovné poloze (viz *Obr. 1.17*). Následně je kotouč ručně roztočen a je-li nevyvážený, tak zůstane nejhmotnější část kotouče dole. Na protější straně je kotouč označen a jsou na něj připevňována vyvažovací tělíska. Tento proces se opakuje tak dlouho, dokud nezůstane brousicí kotouč po položení na vyvažovací stojánek při jakémkoliv jeho natočení nehybný. Po takovém vyvážení je kotouč upnut do vřetene, orovnan a následně opět (je-li to zapotřebí) vyvážen. [2]



Obr. 1.17 Statické vyvažování brousicího kotouče, podle [2]

Je-li při procesu broušení dosahováno větších obvodových rychlostí než 50 m.s^{-1} a šířka kotouče je větší než 30 mm , tak je pro dosažení kvalitního povrchu potřeba použít

dynamického vyvažování. Tato metoda vyvažování eliminuje i tzv. vliv momentových dvojic nevyvážených hmot. [10]

Samotný proces dynamického vyvažování probíhá tak, že je na řemenici brousícího vřetene nebo na přírubu brousícího kotouče přimontováno zařízení pro dynamické vyvažování. Spuštěním dynamického vyvažování je měněna poloha vyvažovacího závaží, která má za následek změnu polohy rotujícího těžiště. Spolu se závažím jsou použity snímače chvění, pomocí nichž lze chvění převádět na křivky. Následně je hledána taková poloha závaží, které má za následek nejmenší chvění. [2]

V současnosti jsou některé brusky vybaveny zařízením, které je schopné vyvážit kotouč přímo na vřetení automaticky nebo poloautomaticky [10].

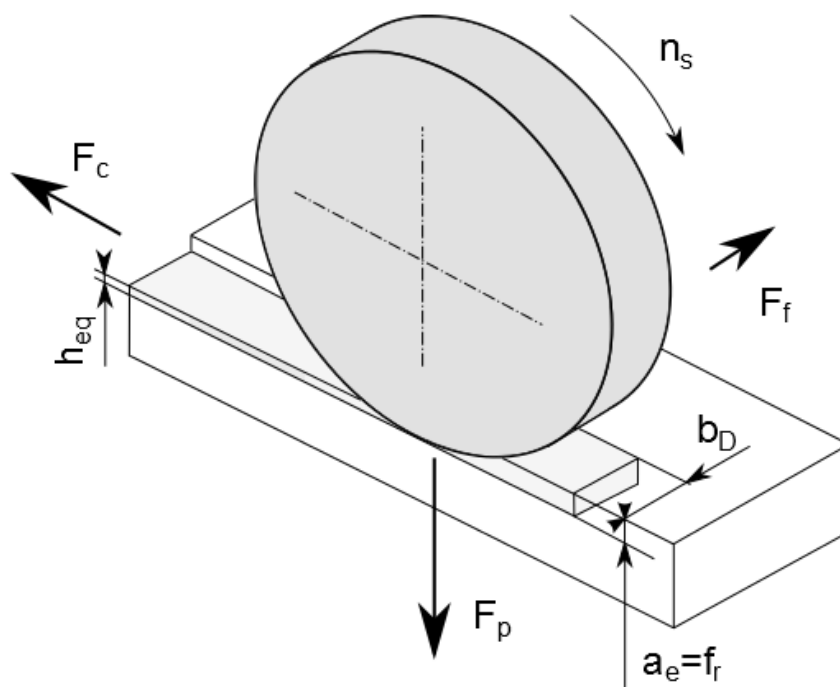
2 ANALÝZA A VÝPOČET SIL PŘI BROUŠENÍ

Řezné síly při broušení vznikají vzájemným působením pracovní plochy brousícího kotouče a obrobku. Jednotlivé břity odebírají velmi malé třísky, a tím pádem vyvolávají relativně malé řezné síly, které ovšem ve svém součtu dosahují relativně vysoké hodnoty, protože při broušení pracuje současně velké množství zrn [7].

S nárůstem řezných sil rostou i síly v technologické soustavě stroj-nástroj-přípravek-obrobek, brousící kotouč se více opotřebovává a zkracuje se doba jeho trvanlivosti, dochází k nárůstu teploty na povrchu obrobku a dochází ke snížení přesnosti a kvality brousícího procesu [7].

Při broušení rozeznáváme následující síly [1]:

- F_c – (tangenciální síla), působí ve směru řezné rychlosti,
- F_p – pasivní síla, je kolmá k broušené ploše a k síle F_c ,
- F_f – posuvová síla, působí ve směru podélného posuvu tj. kolmo na rovinu otáčení kotouče
- F – celková řezná síla, působí v obecném směru a je dána vektorovým součtem síly tangenciální, pasivní a posuvové.



Obr. 2.1 Síly při broušení, podle [10]

Velikost řezných sil závisí zejména na druhu obráběného materiálu a na řezných podmínkách (zejména průřez třísky), dále pak na zrnitosti brusiva, druhu pojiva a na struktuře brousicího kotouče. S otupováním brousicího kotouče dochází k nárůstu řezných sil a to až na několiknásobek své původní hodnoty. [1]

Obvykle u broušení platí, že $F_p > F_c > F_f$, dále platí, že poměr sil F_p/F_c dosahuje hodnot 1,2 až 3. U obvodového broušení jsou někdy brousící síly F_p , F_c , F_f převáděny na jednotku tloušťky brousicího kotouče, nejčastěji na 1 mm. [1]

2.1 Stanovení řezných sil – obvodové broušení

Pro určení řezných sil při broušení je nejprve nutné zavést pojem „ekvivalentní tloušťka broušení“ h_{eq} . Je to veličina, která je vztažena na jednotku aktivní šířky brousicího kotouče a obecně ji lze vyjádřit následující rovnicí [10]:

$$h_{eq} = \frac{Q_w}{b_D \cdot v_c} [mm] , \quad (2.1)$$

Q_w – rychlost odebrání materiálu (tzv. objemový výkon) [$mm^3 \cdot s^{-1}$]

b_D – šířka aktivní části brousicího kotouče,

kde objemový výkon je dán vztahem [10]:

$$Q_w = \frac{\Delta V_w}{\Delta t} [mm^3 \cdot s^{-1}] , \quad (2.2)$$

ΔV_w – odebraný materiál za časový interval [mm^3].

Pro jednotlivé metody broušení lze po úpravách obecné rovnice dosáhnout konkrétnějších vzorců. Pro rovinné obvodové tangenciální broušení s přímočarým pohybem stolu lze ekvivalentní šířku broušení vyjádřit za pomoci Obr. 2.1 takto [10]:

$$h_{eq} = \frac{v_{ft}}{60 \cdot v_c} \cdot a_e [mm], \quad (2.3)$$

a_e – pracovní záběr [mm],

v_{ft} – tangenciální rychlost posuvu stolu [$m \cdot min^{-1}$]

Velikost řezné síly F_c je pak stanovena pomocí měrné řezné síly [10]:

$$F_c = k_c \cdot A [N], \quad (2.4)$$

k_c – měrná řezná síla [MPa]

A – průřez odebírané vrstvy [mm^2]

Měrná řezná síly nabývá následujících hodnot [10]: ocel $k_c = 10\,000 - 35\,000\,MPa$

litina $k_c = 4\,000 - 12\,000\,MPa$,

při čemž platí, že vyšších hodnot měrné řezné síly je dosahováno při jemném broušení a při broušení na čisto.

Vyjádření průřezu odebírané vrstvy je závislé na způsobu broušení. Pro obvodové tangenciální broušení s přímým pohybem stolu je [10]:

$$A = b_D \cdot h_{eq} \text{ [mm}^2\text{]}. \quad (2.5)$$

Zatímco velikost průřezu třísky ve vztahu 2.4 lze snadno a přesně určit, stanovení velikosti měrné řezné síly je poměrně složité, protože oblast měrných řezných sil pro ocel je relativně široká. V určení měrné řezné síly může být nápomocný vztah 2.6. Tento vztah určuje velikost příkonu na vřetení P_c . Pro stanovení tohoto příkonu platí [10]:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{10^3}, \text{ [kW]}. \quad (2.6)$$

Příkon na vřetení je snadné stanovit a v případě známě hodnoty P_c je jedinou neznámou řezná síla F_c . Takto nepřímou zjištěná velikost řezné síly F_c může být následně dosazena do vztahu 2.4 a tímto způsobem nepřímou stanovena měrná řezná síla k_c .

Pro stanovení činného příkonu pro třífázový asynchronní motor platí [17]:

$$P_\xi = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi, \text{ [W]}, \quad (2.7)$$

I – proud protékající jednou fází [A],

U – napětí mezi fázovým a nulovým vodičem [V],

$\cos \varphi$ – účinník [-].

Příkon na vřetení je následně určen pomocí vztahu, který bere v potaz účinnost samotného motoru [17]:

$$P_c = P_\xi \cdot \eta \text{ [W]}, \quad (2.8)$$

η – účinnost [-].

Jiný způsob vyjádření řezné síly F_c je pomocí empirického vztahu. Pro obvodové tangenciální broušení platí [1]:

$$F_c = c_{Fc} \cdot v_c^{x_{Fc}} \cdot f_a^{y_{Fc}} \cdot a_e^{z_{Fc}} \text{ [N]}. \quad (2.9)$$

Pro přibližné určení řezné síly F_c jsou hodny koeficientů $x_{Fc} = y_{Fc} = z_{Fc} = 0,8$ a hodnota koeficientu $c_{Fc} = 6$.

Řeznou sílu F_c lze také stanovit přímou metodou, tedy přímým měřením pomocí dynamometru.

V kapitole 3 budou testovány čtyři sady vzorků každá po třech kusech, bližší specifikace materiálů a technologických postupů je uvedena níže. Pro tyto vzorky bude

výše uvedenými metodami počítána řezná síla F_c . Vzorky budou testovány na dvou strojích, z nichž jeden bude testován na stroji od firmy TDZ Turn. Touto firmou byly poskytnuty vzorky, na kterých byl prováděn experiment.

2.2 Představení firmy TDZ Turn

Poslední ze čtyř testovaných sad vzorků byla broušena na stroji firmy TDZ Turn, jehož specifikace je uvedena v následující podkapitole. Firma TDZ Turn je strojírenská společnost, která je úspěšná především na českém a slovenském trhu, nicméně působí i v řadě dalších evropských zemích, jako je Polsko, Německo, Srbsko. Společnost ale působí i v mimoevropských zemích jako je Rusko. Do roku 2014 se společnost specializovala pouze na dodávání jediné řady produktů, a to na karuselů série VLC. Největší stroj z této řady je schopen obrábět na průměru až 5 000 mm. Na karuselech řady VLC, které jsou vybaveny náhonem rotačních nástrojů a osou „c“, lze kromě standardních soustružnických operací brousit, frézovat, vrtat, závitovat, či využívat úhlovou hlavu. [20]



Obr. 2.2 Ukázka broušení na stroji firmy TDZ Turn

Od roku 2014 společnost dodává i těžké soustruhy, a to jak konvenční tak CNC řízené. Tato řada strojů nese označení HLC. Největší stroj této řady má vzdálenost mezi hroty až 12 000 mm. Tyto stroje vykazují kromě robustnosti také velkou variabilitu, díky které je společnost silně orientovaná na zákazníka a snaží se vždy uspokojit jeho potřeby. Stroje

této série umožňují obrábění velkých průměrů (až 3 000 mm) a těžkých obrobků. Existuje pouze malá skupina dodavatelů, kteří jsou schopni nabídnout konkurenční produkt. [20]

Jak již bylo řečeno, nabídka firmy je zákaznický orientovaná a všechny speciální požadavky je možné individuálně řešit a ke strojům je možné dodávat širokou škálu příslušenství, nicméně už v základním vybavení je stroj plně funkční bez nutnosti dalších investic. Všechny stroje procházejí před dodáním zákazníkovi tzv. „předpřejímkou“. V rámci této „předpřejímky“ je stroj kompletně testován, případně je prováděno reálné obrábění, které bude zákazník na stroji realizovat. [20]

Poslední testovaná série vzorků byla obráběna na stroji řady VLC. Bylo při něm využíváno úhlové hlavy s brousicím kotoučem, který bude specifikován níže. Stávající úhlová hlava je dodávána dodavateli společnosti TDZ Turn, nicméně ve společnosti je již vytvářen model, který je schopen nahradit úhlovou hlavu dodávanou dodavateli.



Obr. 2.3 Ukázka vytvářené úhlové hlavy s brousicím kotoučem

2.3 Specifikace materiálů vzorků

2.3.1 Vzorek z materiálu ČSN 41 2050

Ocel ČSN 41 2050 je hojně používaná nelegovaná ocel k zušlechťování. Je vhodná pro výrobu méně namáhaných strojních součástí ve stavu normalizačně žíhaném nebo ve stavu zušlechtěném (kaleném a popuštěném). [11]

Předepsané tepelné zpracování vzorků z materiálu ČSN 41 2050 bylo „zušlechtěno na pevnost $750 \pm 20\text{MPa}$, (povrchová tvrdost po tepelném zpracování měla hodnotu 45 HRC)

2.3.2 Vzorek z materiálu ČSN 41 4220

Materiál ČSN 41 4220 je nízkolegovaná mangan-chromová ocel vhodná k cementování. Výhodou této oceli je, že je ve stavu normalizačně žíhaném velmi dobře obrobitelná, ale zároveň po cementaci a kalení je dosaženo velké tvrdosti v povrchové vrstvě a velké pevnosti v jádře. [12]

Předepsané tepelné zpracování vzorků z materiálu ČSN 41 4220 bylo „cementováno a kaleno na tvrdost 60 HRC do hloubky 0,5 mm ($0 +0,2\text{ mm}$)“.

2.3.3 Vzorek z materiálu ČSN 41 9312

Jednou z nejpoužívanějších nástrojových ocelí je ocel ČSN 41 9312. Tato ocel se vyznačuje rozměrovou stálostí při tepelném zpracování a zároveň dobrou prokalitelností v oleji. Má vhodný poměr povrchové tvrdosti a houževnatosti po kalení. Ve vyžíhaném stavu je dobře obrobitelná a dobře se tváří za tepla. Kromě širokého použití v oblasti výroby nástrojů se tato ocel používá i pro výrobu měřidel a kalibrů a také se z ní vyrábějí desky pro stavbu jednoúčelových strojů. [13]

Předepsané tepelné zpracování vzorků z materiálu ČSN 41 9312 bylo „kaleno na tvrdost 59 HRC“.

2.4 Specifikace technologických postupů

2.4.1 Technologické postupy pro brusku BHP 300

Tři sady vzorků byly broušeny podle níže uvedených technologických postupů. Při broušení bylo užito kotouče s označením 1–250x25x76 – A99B – 60 – J – 9 – V – 50 m.s^{-1} . S označení kotouče je zřejmé, že jeho vnější průměr d_s je 250 mm. Pro vypočtení řezné rychlosti je tento parametr dosazen do rovnice 1.1. Při hrubovacím cyklu byly otáčky vřetene nastaveny na hodnotu $2\,280\text{ min}^{-1}$ a při broušení načisto na $2\,600\text{ min}^{-1}$.

$$v_{c\text{ hrub.}} = \frac{\pi \cdot 250 \cdot 2280}{60 \cdot 1000} = 29,85\text{ m.s}^{-1},$$

$$v_{c\text{ čisto}} = \frac{\pi \cdot 250 \cdot 2600}{60 \cdot 1000} = 34,03\text{ m.s}^{-1}.$$

Všechny parametry pro broušení první sady vzorků jsou přehledně uvedeny v tabulce 2, axiální posuv stolu byl realizován na každý zdvih.

Tab. 2 Parametry při broušení první sady vzorků na stroji BHP 300:

	Radiální posuv f_r [mm]	Axiální posuv f_a [mm]	Řezná rychlost v_c [m.s ⁻¹]	Tangenciální rychlost posuvu stolu [m.min ⁻¹]
Hrubování	0,03	4	29,85	16
Broušení načisto	0,02	4	34,03	16

Parametry broušení pro druhou sadu vzorků jsou uvedeny v tabulce 3, axiální posuv byl realizován opět na každý zdvih.

Tab. 3 Parametry při broušení druhé sady vzorků na stroji BHP300:

	Radiální posuv f_r [mm]	Axiální posuv f_a [mm]	Řezná rychlost v_c [m.s ⁻¹]	Tangenciální rychlost posuvu stolu [m.min ⁻¹]
Hrubování	0,03	4	29,85	16
Broušení načisto	0,005	4	34,03	16

Při broušení třetí sady byla navíc zařazena operace vyjiskřování. Parametry tohoto broušení pro tuto sadu jsou uvedeny v tabulce 4. Uvedený axiální posuv byl realizován opět na každý zdvih, ale celá operace byla provedena ještě jednou bez radiálního posuvu.

Tab. 4 Parametry při broušení třetí sady vzorků na stroji BHP300:

	Radiální posuv f_r [mm]	Axiální posuv f_a [mm]	Řezná rychlost v_c [m.s ⁻¹]	Tangenciální rychlost posuvu stolu [m.min ⁻¹]
Hrubování	0,03	4	29,85	16
Broušení načisto	0,005	4	34,03	16

2.4.2 Technologické postupy pro karusel VLC 1600 ATC (+C)

Čtvrtá sada vzorků byla obráběna na stroji firmy TDZ Turn. Specifikace tohoto stroje bude uvedena níže ve 3 kapitole. Tento stroj se od brusky BPH 300 podstatně liší. Operaci broušení zde lze provádět pouze metodami, kde je pohyb stolu otáčivý. V tomto případě byla využita metoda tangenciálního broušení s otáčivým pohybem stolu. Pro tuto operaci byl využit brousící kotouč s označením 5–200x32x32 – A99B – 60 – J – 9 – V – 50 m. s⁻¹.

Tento brousicí kotouč je kromě rozměrů totožný jako kotouč použitý při obrábění na brusce BPH 300. Metodika broušení i brousicí kotouč jsou tedy podobné, čímž je do určité míry zaručeno, že jednotlivé vzorky bude možné mezi sebou porovnávat. Při broušení byly otáčky brousicího vřetene $2\,500\text{ min}^{-1}$. Po dosazení do rovnice 1.1 je opět získána řezná rychlost:

$$v_{c\text{ kar.}} = \frac{\pi \cdot 200 \cdot 2500}{60 \cdot 1000} = 26,18\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Velikost řezné rychlosti je co do velikosti také podobná jako na brusce BPH 300. Řezná rychlost byla totožná pro hrubovací i dokončovací operaci. Otáčky stolu při broušení byly nastaveny na 45 min^{-1} , a vzorek byl upnut ve vzdálenosti 50 mm od středu. Po dosazení do vztahu 1.2 je vypočtena tangenciální rychlost obrobku:

$$v_{ft} = \frac{\pi \cdot 100 \cdot 45}{1000} = 14,14\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}.$$

Z vypočtené tangenciální rychlosti vyplývá, že je opět srovnatelná s tangenciální rychlostí na brusce BPH 300. Všechny parametry pro broušení na karuselu VLC 1600 ATC (+C) jsou uvedeny v tabulce 5:

Tab. 5 Parametry při broušení čtvrté sady vzorků na stroji VLC 1600 ATC (+C):

	Radiální posuv f_r [mm]	Axiální posuv f_a [mm/ot.]	Řezná rychlost v_c [m.s ⁻¹]	Tangenciální rychlost posuvu stolu [m.min ⁻¹]
Hrubování	0,03	4	26,18	14,14
Broušení načisto	0,01	4	26,18	14,14

2.5 Výpočet řezných sil

Na základě výše uvedených teoretických vztahů jsou v této části stanoveny velikosti řezné síly F_c . Při tomto stanovování se vychází z parametrů broušení uvedených v tabulce 2, 3 a 4 tedy z konkrétních parametrů, na kterých byl prováděn experiment. Pro stanovení přibližné hodnoty řezné síly F_c je nejprve využito rovnice 2.9. V této rovnici je využíváno čtyř konstant, jejichž hodnoty mají spíše teoretický význam, proto je pro výpočet využito doporučených hodnot. Z tohoto způsobu volby konstant je zřejmé, že výpočet síly nebude brát v potaz změnu obráběného materiálu a na stanovení této síly bude mít vliv pouze změna kinematických parametrů broušení.

Výpočet řezné síly pro první sadu vzorku (parametry z tabulky 2) má následující podobu:

$$F_{c1HRUB.} = 6 \cdot 29,85^{0,8} \cdot 4^{0,8} \cdot 0,03^{0,8} = 16,65 \text{ N}$$

$$F_{c1ČISTO.} = 6 \cdot 34,03^{0,8} \cdot 4^{0,8} \cdot 0,02^{0,8} = 13,36 \text{ N}$$

Analogicky byla řezná síla vypočtena pro druhou a třetí sadu vzorků (využito parametrů z tabulky 3 a 4):

$$F_{c2HRUB.} = 6 \cdot 29,85^{0,8} \cdot 4^{0,8} \cdot 0,03^{0,8} = 16,65 \text{ N}$$

$$F_{c2ČISTO.} = 6 \cdot 34,03^{0,8} \cdot 4^{0,8} \cdot 0,01^{0,8} = 7,68 \text{ N}$$

$$F_{c3HRUB.} = 6 \cdot 29,85^{0,8} \cdot 4^{0,8} \cdot 0,03^{0,8} = 16,65 \text{ N}$$

$$F_{c3ČISTO.} = 6 \cdot 34,03^{0,8} \cdot 4^{0,8} \cdot 0,005^{0,8} = 4,41 \text{ N}$$

Přesnější metodou, jak stanovit řeznou sílu F_c je pomocí využití měrné řezné síly. Aby mohla být měrná řezná síla stanovena, musí být nejprve vypočtena ekvivalentní tloušťka broušení (viz rovnice 2.3). Výpočet je již realizován pro všechny tři sady vzorků.

$$h_{eq1HRUB} = \frac{16}{60 \cdot 29,85} \cdot 0,03 = 2,68 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

$$h_{eq1ČISTO} = \frac{16}{60 \cdot 34,03} \cdot 0,02 = 2,35 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

$$h_{eq2HRUB} = \frac{16}{60 \cdot 29,85} \cdot 0,03 = 2,68 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

$$h_{eq2ČISTO} = \frac{16}{60 \cdot 34,03} \cdot 0,01 = 7,84 \times 10^{-5} \text{ mm}$$

$$h_{eq3HRUB} = \frac{16}{60 \cdot 29,85} \cdot 0,03 = 2,68 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

$$h_{eq3ČISTO} = \frac{16}{60 \cdot 34,03} \cdot 0,005 = 3,92 \times 10^{-5} \text{ mm}$$

Dalším krokem pro stanovení řezné síly touto metodou je stanovení průřezu třísky A. Toho bylo dosaženo dosazením do rovnice 2.5:

$$A_{1HRUB} = 4 \cdot 2,68 \cdot 10^{-4} = 1,07 \times 10^{-3} \text{ mm}^2,$$

$$A_{1ČISTO} = 4 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4} = 9,40 \times 10^{-4} \text{ mm}^2,$$

$$A_{2HRUB} = 4 \cdot 2,68 \cdot 10^{-4} = 1,07 \times 10^{-3} \text{ mm}^2,$$

$$A_{2ČISTO} = 4 \cdot 7,84 \times 10^{-5} = 3,14 \times 10^{-4} \text{ mm}^2,$$

$$A_{3HRUB} = 4 \cdot 2,68 \cdot 10^{-4} = 1,07 \times 10^{-3} \text{ mm}^2,$$

$$A_{3ČISTO} = 4 \cdot 3,92 \cdot 10^{-5} = 1,57 \times 10^{-4} \text{ mm}^2.$$

V této fázi výpočtu je nyní třeba určit měrnou řeznou sílu k_c , aby bylo možné dosadit do vztahu 2.4. Vzorky z materiálů ČSN 41 4220 a ČSN 41 9312 mají velmi podobnou povrchovou tvrdost, proto bude stanovení měrné řezné síly u těchto materiálů podobné. Tvrdost na vzorcích z materiálu ČSN 41 2050 nebyla předepsána, proto byla po tepelném zpracování změřena a byla stanovena na 45 HRC. Tvrdost materiálů ČSN 41 4220 a ČSN 41 9312 je vysoká, proto lze předpokládat, že měrná řezná síla bude volena z horní poloviny intervalu měrných řezných sil pro ocel (interval měrných řezných sil pro ocel je $10\,000 - 35\,000 \text{ MPa}$), naopak měrné řezné síly materiálu ČSN 41 2050 budou voleny z dolního intervalu. Výpočet síly F_c pro materiál ČSN 41 2050 se stanovenými hodnotami měrných řezných sil podle rovnice 2.4 pro tři sady vzorků je uveden níže (parametry pro hrubování jsou pro všechny sady stejné):

$$F_{C12iHRUB} = 12\,000 \cdot 1,07 \times 10^{-3} = 12,84 \text{ N},$$

$$F_{C12iČISTO} = 13\,000 \cdot 9,40 \times 10^{-4} = 12,22 \text{ N},$$

$$F_{C122ČISTO} = 20\,000 \cdot 3,14 \times 10^{-4} = 6,28 \text{ N},$$

$$F_{C123ČISTO} = 27\,000 \cdot 1,57 \times 10^{-4} = 4,24 \text{ N}.$$

Jelikož materiály ČSN 41 4220 a ČSN 41 9312 mají velmi podobné tvrdosti, byly pro ně stanoveny stejně velké měrné řezné síly.

$$F_{C49iHRUB} = 17\,000 \cdot 1,07 \times 10^{-3} = 18,19 \text{ N},$$

$$F_{C49iČISTO} = 18\,000 \cdot 9,40 \times 10^{-4} = 16,92 \text{ N},$$

$$F_{C492ČISTO} = 25\,000 \cdot 3,14 \times 10^{-4} = 7,85 \text{ N},$$

$$F_{C493ČISTO} = 32\,000 \cdot 1,57 \times 10^{-4} = 5,02 \text{ N}.$$

Z obou metod, pomocí kterých byly realizovány výpočty, je zřejmé, že řezná síla F_c nabývá, pro zadané parametry broušení, řádově jednotek až desítek Newtonů. Je však zřejmé, že těchto hodnot bylo dosaženo pomocí určitých zjednodušení, proto bude v další kapitole při reálném experimentu měřen příkon na vřetení a z tohoto příkonu bude nepřímo stanovena řezná síla F_c .

3 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VÝPOČTŮ NA VZORCÍCH

Na základě parametrů z kapitoly 2 byl realizován experiment, pro jehož účely byly vyhotoveny vzorky. Jak již bylo řečeno, šlo o čtyři sady vzorků o třech kusech, jejichž bližší specifikace je uvedena v následující podkapitole.



Obr. 3.1 Jedna sada vzorků před testováním

3.1 Specifikace vzorků

Jednotlivé vzorky jsou destičky, které měly před testováním a tepelným zpracováním jmenovité rozměry $50 \times 50 \times 10 \text{ mm}$. Jedná se o materiály ČSN 41 2050, ČSN 41 4220 a ČSN 41 9312. Na vzorcích bude následně sledována rovinnost, rovnoběžnost protilehlých stěn a drsnost těchto povrchů. Tyto vzorky byly řezány z plochých tyčí obdélníkového průřezu ČSN EN 10058, 50×10 [14]. Mezní úchylka tloušťky tohoto polotovaru je $10 \pm 0,5 \text{ mm}$ [14]. Při této toleranci není zcela jistě zaručená jakost povrchu protilehlých stěn, kterou by bylo možné následným broušením pouze zlepšit. Z tohoto důvodu byly vzorky před tepelným zpracováním nejprve na obou čelních stranách ofrézovány o hloubku řezu $a_{pfr.} = 0,5 \text{ mm}$ a posuvem na zub $f_z = 0,1 \text{ mm}$. Jako nástroj byla použita čelní fréza s osmi vyměnitelnými břitovými destičkami – 490-063C8-08H. Tato operace byla prováděna na stroji (karuseli) firmy TDZ Turn s označením VLC 1200 ATC (+C), jehož specifikace je uvedena v tabulce 5:

Tab. 5 Parametry stroje VLC 1200 ATC (+C):

Průměr upínací desky	1 250 mm
Max. oběžný průměr	1 600 mm
Max. průměr soustružení	1 350 mm
Max. výška obrábění	1 200 mm
Max. hmotnost obrobku	5 000 kg
Max. výsuv smykadla (osa Z)	900 mm
Max. otáčky upínací desky	350 min ⁻¹
Max. Otáčky rotačních nástrojů	2400 min ⁻¹
Počet poloh zásobníku	16
Pohon pracovní desky	37 kW
Pohon rotačních nástrojů	7,5 kW
Rozměry stroje	5 850 x 4 260 x 5 400
Hmotnost stroje	23 000 kg

3.2 Parametry vyhodnocované na vzorcích

Vzorky, testované v této diplomové práci, byly po dokončení experimentů vyhodnocovány. Na vzorcích byla zkoumána drsnost povrchu, rovinnost a rovnoběžnost dvou protilehlých stěn.

3.2.1 Struktura povrchu

Při posuzování struktury povrchu je nutné rozlišovat dva pojmy [14]:

- nedokonalost povrchu,
- struktura povrchu.

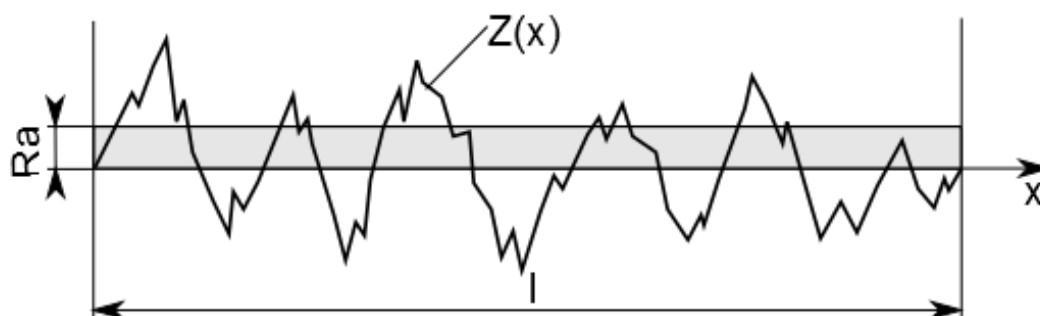
Nedokonalosti povrchu nejsou obecně zachyceny při hodnocení struktury povrchu, jedná se zejména o rýhy, trhliny a póry, které byly náhodně vytvořeny během výroby. Oproti tomu struktura povrchu je opakovaná nebo náhodná úchylka od geometrického povrchu. Při vyhodnocování struktury povrchu záleží, na členění jednotlivých úchylek povrchu vzorku podle jejich rozteče. Složky s nejmenší roztečí vytvářejí drsnost povrchu, při větší rozteči hovoříme o vlnitosti povrchu a největší rozteč úchylek posléze vytváří základní profil [14].

Při vyhodnocování drsnosti povrchu je důležitým výstupem střední aritmetická úchylka povrchu [15]:

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

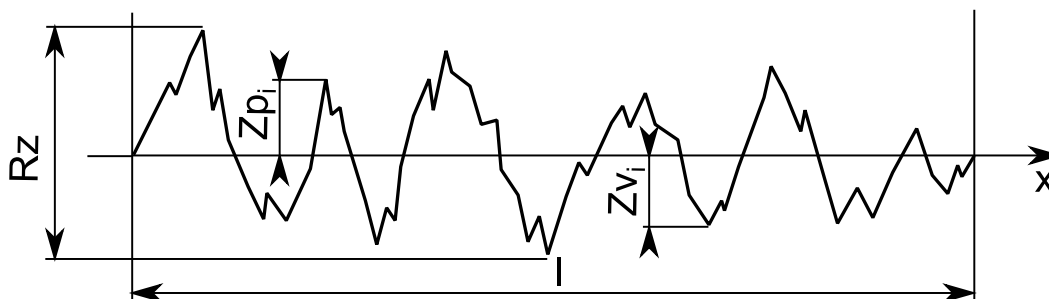
$Z(x)$ – hodnota pořadnice,

l – vyhodnocovaná délka (viz Obr. 3.2) [mm].



Obr. 3.2 Schéma střední aritmetické úchylky povrchu R_a , podle [15]

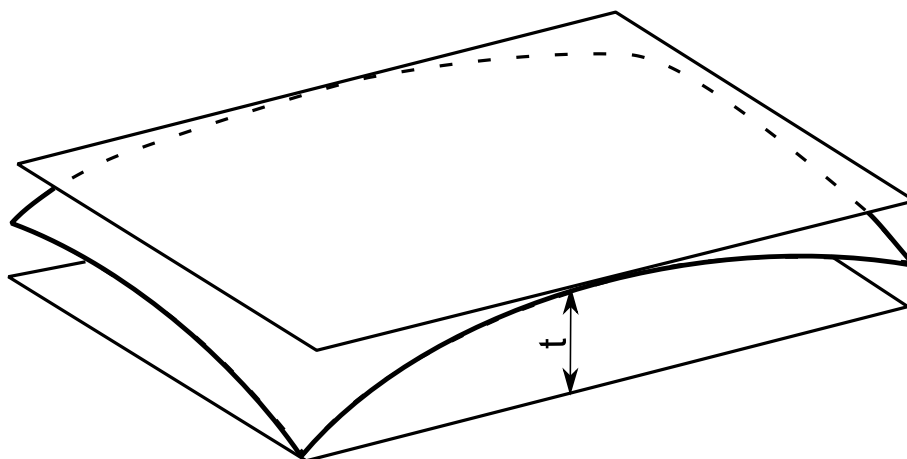
Dalším parametrem při vyhodnocování drsnosti je nejvyšší výška profilu R_z , jejíž určení je zřejmé z obrázku 3.3. Jedná se o součet největší výšky profilu $Z_{p_{max}}$ a nejmenší výškou profilu $Z_{v_{min}}$.



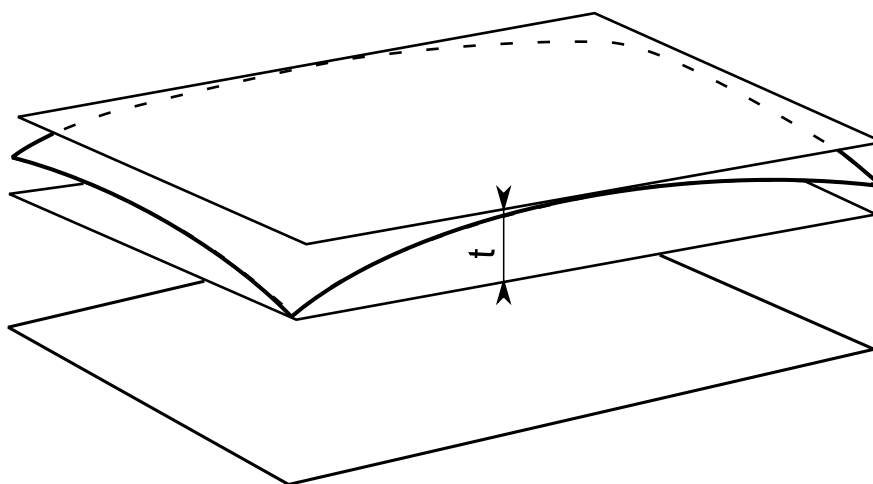
Obr. 3.3 Schéma nejvyšší výšky profilu R_z , podle [15]

3.2.2 Geometrická tolerance rovinnosti

Geometrické tolerance jsou obecně důležitým parametrem k zaměnitelnosti jednotlivých součástí. Geometrické tolerance předepisují meze, v jakých se určitý geometrický prvek musí nacházet. Pro účely této práce je důležitá geometrická tolerance rovinnosti a rovnoběžnosti, jejichž definice je zřejmá z obrázků 3.4 a 3.5.



Obr. 3.4 Geometrická tolerance rovinnosti, podle [14]



Obr. 3.5 Geometrická tolerance rovnoběžnosti, podle [14]

3.3 Specifikace strojů

3.3.1 Bruska BHP 300

Po tepelném zpracování vzorků byly tři sady testovány na brusce BHP 300, jejíž parametry jsou uvedeny v tabulce 6:

Tab. 6 Parametry brusky BHP 300:

Označení	BHP 300
Výrobce	TOS Hostivař
Typ	RPN 300
Rok výroby	1975
Výrobní číslo	173224
Upínací plocha stolu	300 x 1000 mm
Max. výška obrobku	350 mm
Rozměry stroje, délka x šířka x výška	4100 x 1910 x 2120 mm
Hmotnost	3000 kg
Výkon hlavního elektromotoru	2,2 kW
Max. zatížení stolu	2745 N
Celkový příkon stroje	7,5 kW
Brousicí kotouč, průměr x šířka x vrtání	250 x 25 x 76 mm
Min. průměr brousicího kotouče	120 mm
Rychlost podélného pohybu stolu	2 – 16 m.min ⁻¹
Svislý přísuv	1 dílek: 0,01 mm
Otáčky vřetene	2280, 2600 min. ⁻¹

3.3.2 Karusel VLC 1600 ATC (+C)

Poslední sada vzorků byla broušena na stroji firmy TDZ Turn, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 7



Obr. 3.6 Karusel VLC 1600 ATC (+C) od firmy TDZ Turn

Tab. 7 Parametry stroje VLC 1600 ATC (+C):

Průměr upínací desky	1 600 mm
Max. oběžný průměr	2 000 mm
Max. průměr soustružení	1 800 mm
Max. výška obrábění	1 200 mm
Max. hmotnost obrobku	8 000 kg
Max. výsuv smykadla (osa Z)	900 mm
Max. otáčky upínací desky	250 min ⁻¹
Max. Otáčky rotačních nástrojů	2400 min ⁻¹
Počet poloh zásobníku	16
Pohon pracovní desky	37 kW
Pohon rotačních nástrojů	7,5 kW
Rozměry stroje	5 850 x 4 510 x 5 400
Hmotnost stroje	25 000 kg

Podle parametrů, uvedených v tabulce 7 je zřejmé, že tento stroj není primárně určen k broušení vzorků menších rozměrů. U strojů firmy TDZ Turn je využíváno operace broušení pro rozměrnější součásti a to především jako operace, kterou je dosaženo lepší drsnosti, než stroj dosáhne soustružením. Protože je jakost povrchu po obrábění na těchto strojích důležitým parametrem pro zákazníky, byla jedna sada vzorků testována na stroji VLC 1600 ATC (+C) od firmy TDZ Turn. Při této zkoušce bylo využito brousícího kotouče s označením 5 – 200x32x32 – A99B – 60 – J – 9 – V – 50 m.s⁻¹ a úhlové hlavy dodávané dodavateli společnosti TDZ Turn.



Obr. 3.7 Brousicí kotouč využívaný při broušení čtvrté sady vzorků

3.4 Vyhodnocení vzorků

V následující podkapitole budou vyhodnocovány vzorky, které byly broušeny na výše specifikovaných strojích.

3.4.1 Vyhodnocení vzorků testovaných na brusce BHP 300

Na tomto stroji byly testovány tři sady vzorků. Kromě parametrů rovinnosti, rovnoběžnosti a drsnosti zde byl měřen i příkon na vřetení během obrábění, pomocí něhož lze nepřímo stanovit řeznou sílu F_c . Příkon byl měřen tak, že byl zjišťován proud protékající jednou fází třífázového motoru, který pohání vřeteno brusky. Na tento drát byl připojen ampérmetr RE 266. Hodnoty naměřeného proudu během obrábění se výrazně nelišily při změně obráběného vzorku, proto byla stanovena řezná síla pouze orientačně pro jeden hrubovací a jeden dokončovací cyklus libovolného materiálu.



Obr. 3.8 Zapojení ampérmetru RE 266

Ke stanovení řezného příkonu na vřetení bylo nejprve zapotřebí stanovit činný příkon motoru, což bylo realizováno dosazením do rovnice 2.7:

$$P_{\xi} = 3 \cdot 400 \cdot 1,6 \cdot 0,3 = 576 \text{ W},$$

kde proud I byl při zátěži naměřen na hodnotu $1,6 \text{ A}$, napětí $U = 400 \text{ V}$ je jmenovité napětí v síti, a hodnota účinníku byla stanovena na hodnotu $0,3$. Jmenovitá hodnota účinníku na motoru je sice rovna hodnotě $0,8$, ale velikost účinníku s klesajícím zatížením motoru klesá [18]. Podle naměřených velikostí proudů při obrábění je zřejmé, že motor neběžel v optimálním pásmu zátěže, spíše se jeho stav blížil chodu naprázdno. V těchto případech dosahuje hodnota účinníku velikosti $0,3$ [19].

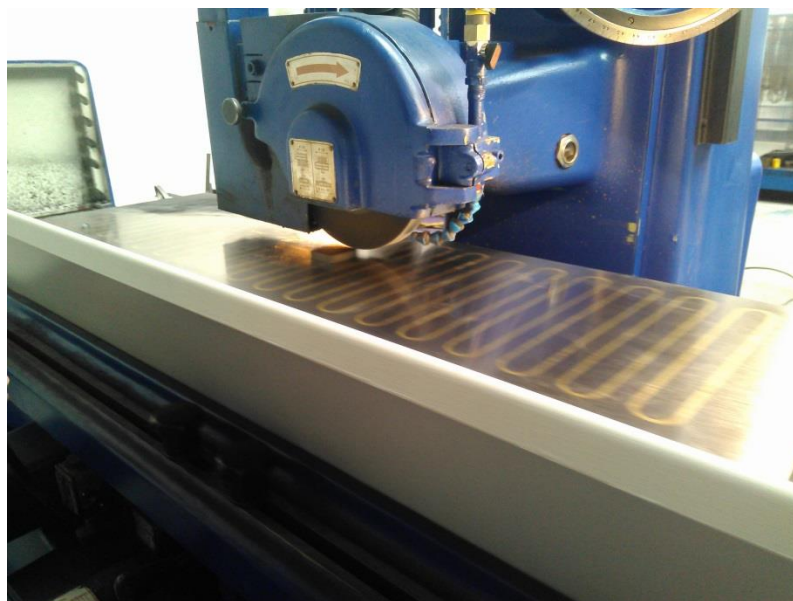
Nyní je již potřeba pouze určit příkon na vřetení podle rovnice 2.8. K tomu je zapotřebí znát účinnost, které se u obráběcích strojů pohybuje okolo hodnoty $0,7$ [19]:

$$P_c = 576 \cdot 0,7 = 403,2 \text{ W} = 0,4032 \text{ kW}$$

Ke stanovení řezné síly touto metodou je ještě zapotřebí vyjádřit řeznou sílu F_c z rovnice 2.6. Po dosazení do této rovnice jsou stanoveny přibližné hodnoty sil pro hrubování a broušení načisto:

$$F_{CHRUB} = \frac{P_c}{v_c} \cdot 10^3 = \frac{0,4032}{29,85} = 13,51 \text{ N},$$

$$F_{c\check{I}STO} = \frac{0,4032}{34,03} = 11,84 \text{ N.}$$



Obr. 3.9 Broušení na stroji BPH 300

V níže uvedené tabulce jsou přehledně shrnuty parametry, které byly na třech sadách vzorků vyhodnocovány. Rovinnost a rovnoběžnost byla vyhodnocována na 3D měřicím přístroji Mahr, Multiscope 250.

Tab. 8 Parametry vyhodnocené na prvních třech sadách vzorků

Označení vzorku	Drsnost Ra [μm]	Drsnost Rz [μm]	Rovinnost [mm]	Rovnoběžnost [mm]
2 1	0,35	2,40	0,001	0,006
4 1	0,29	2,00	0,002	0,011
9 1	0,33	2,17	0,002	0,010
2 2	0,21	1,52	0,001	0,005
4 2	0,20	1,48	0,001	0,009
9 2	0,21	1,33	0,001	0,012
2 3	0,22	1,46	0,001	0,007
4 3	0,17	1,29	0,001	0,008
9 3	0,17	1,20	0,001	0,006

Pozn.: V systému označení vzorků znamená první číslo materiál vzorku (ČSN 41 2050, ČSN 41 4220, ČSN 41 9312) a druhé číslo je číslo sady vzorků.

Rovinnost i rovnoběžnost byla měřena sedmi body, aby bylo dosaženo co nejpřesnějších výsledků měření. Drsnost broušených povrchů na vzorcích byla měřena přístrojem Mahr, Pocket Surf. Při měření drsnosti byl každý parametr na jednotlivých vzorcích měřen třikrát v různých místech a následné hodnoty byly průměrovány. Při měření drsnosti byla dodržena zásada, že drsnost byla měřena kolmo na posuv stolu brusky, tedy v axiálním směru brousícího kotouče. Drsnost měřená v tečném směru brousícího kotouče dosahovala hodnoty R_a a R_z asi o 50 % menší než drsnost měřená ve směru axiálním. Tato hodnota ovšem není vypovídající. Drsnost byla vyhodnocována na délce 4 mm.



Obr. 3.10 Měření drsnosti na vzorcích na přístroji Mahr, Pocket Surf

3.4.2 Vyhodnocení vzorků testovaných na karuselu VLC 1600 ATC (+C)

Na stejných měřicích přístrojích s využitím stejných měřicích postupů a za stejných podmínek měření byly vyhodnocovány i vzorky čtvrté sady. Zjištěné hodnoty jsou opět přehledně zaneseny v tabulce 9:

Tab. 9 Parametry vyhodnocené na prvních třech sadách vzorků

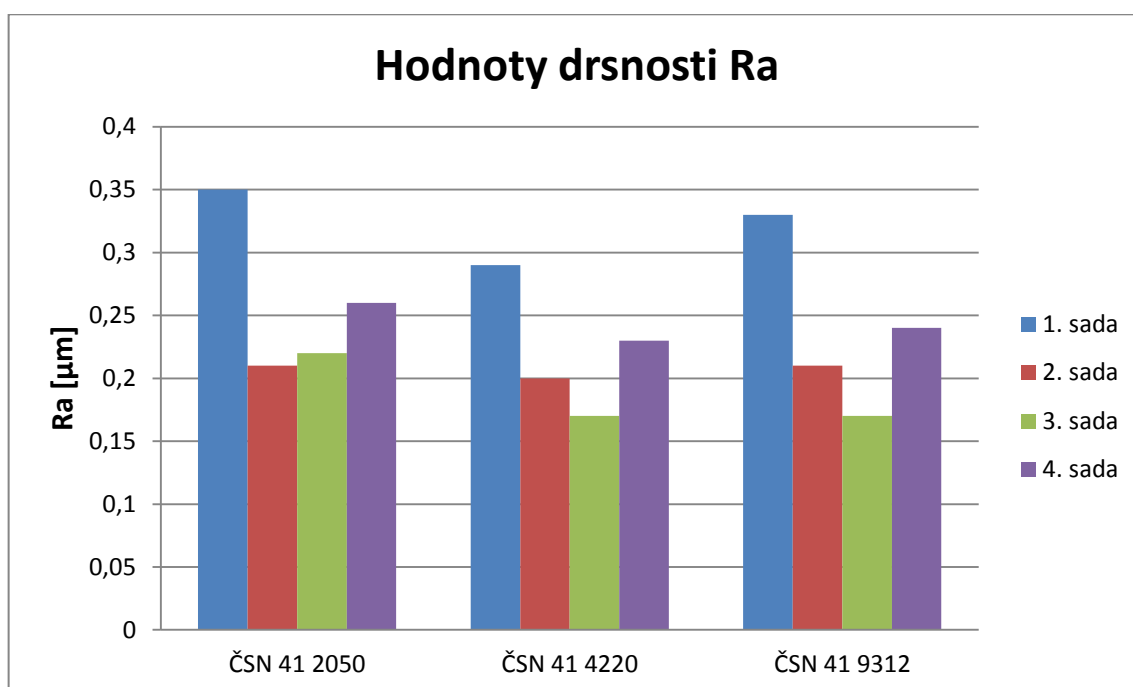
Označení vzorku	Drsnost R_a [μm]	Drsnost R_z [μm]	Rovinnost [mm]	Rovnoběžnost [mm]
2 4	0,26	1,56	0,001	0,014
4 4	0,23	1,55	0,001	0,007
9 4	0,24	1,48	0,002	0,006



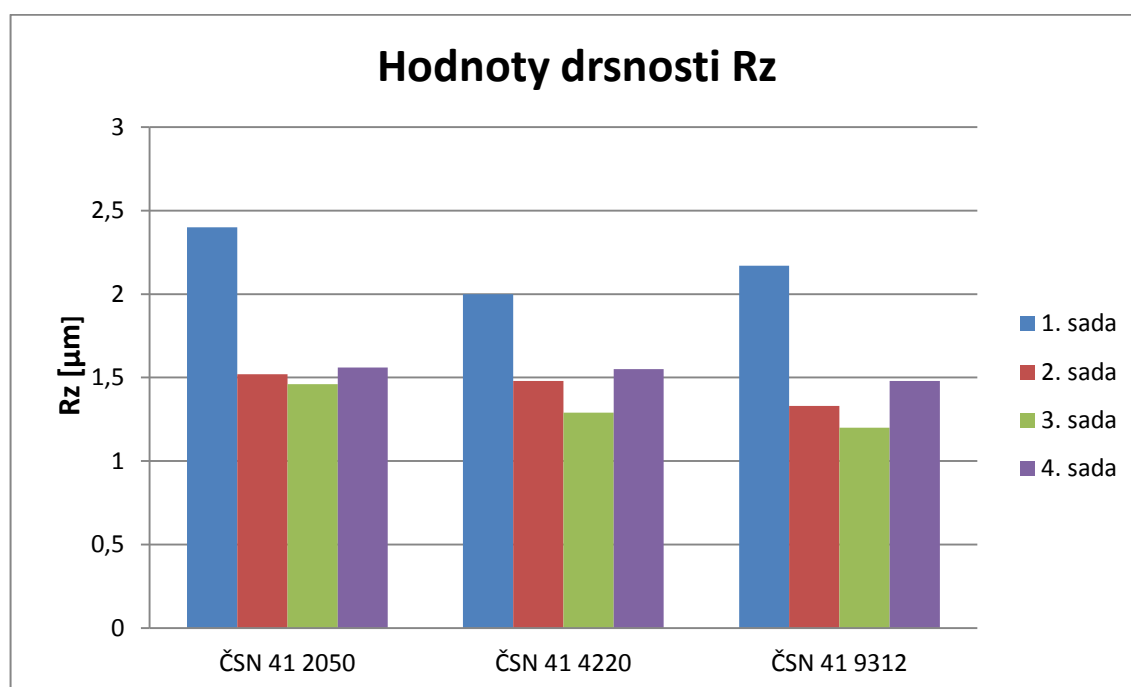
Obr. 3.11 Měření rovinnosti a rovnoběžnosti na přístroji Mahr, Multiscope 250

3.4.3 Závěry z vyhodnocení vzorků

V rámci přehledného vyhodnocování byly údaje o drsnostech z tabulek 8 a 9 přehledně zpracovány do grafů.



Obr. 3.12 Hodnoty drsnosti Ra naměřené na vzorcích



Obr. 3.13 Hodnoty drsnosti Rz naměřené na vzorcích

U prvních třech sad vzorků, broušených na brusce BPH 300, je zřejmé, že se zmenšující se hodnotou radiálního posuvu se zvyšuje kvalita obrobeného povrchu. Zatímco u první sady vzorků, která byla broušena s radiálním posuvem $0,02\text{ mm}$ je vesměs dosahováno drsnosti Ra vyšší jak $0,3\text{ }\mu\text{m}$ a Rz vyšší jak $2\text{ }\mu\text{m}$, tak pro třetí sadu vzorků (s radiálním posuvem $0,005\text{ mm}$ a s vyjiskřovacím cyklem) broušených na této brusce nabývají hodnoty Ra vesměs méně jak $0,2\text{ }\mu\text{m}$ a Rz méně jak $1,5\text{ }\mu\text{m}$. Je tedy zřejmé, že jednak snížená hodnota radiálního posuvu i vyjiskřovací cyklus zlepšují kvalitu broušeného povrchu. Zajímavým poznatkem je také skutečnost, že vzorky z materiálu ČSN 41 2050 dosahují téměř vždy vyšší hodnoty Ra i Rz než vzorky z materiálu ČSN 41 4220 a ČSN 41 9312, ačkoliv byl brousicí kotouč před každou sadou porovnáván a vzorek z materiálu ČSN 41 2050 broušen jako první z této sady. Pravděpodobným vysvětlením tohoto jevu je skutečnost, že ačkoliv je druh použitého brousicího kotouče pro tento materiál doporučovaný [6], tak zároveň platí, že pro měkčí materiály (obecně tedy materiály s povrchovou tvrdostí menší jak 50 HRC), jako je ocel ČSN 41 2050, která měla povrchovou tvrdost 45 HRC , by měly být podle jiného doporučení [6] broušeny tvrdšími kotouči (ideálně s označením M), než je tvrdost použitého kotouče (použitý kotouč měl hodnotu tvrdosti J).

Z obrázků 3.12 a 3.13 také vyplývá, že hodnoty drsnosti naměřené na čtvrté sadě vzorků, broušených na karuselu VLC 1600 ATC +(C), dosahují podobných hodnot, jako

jsou hodnoty naměřené na ostatních třech sadách. Asi nejvhodnější srovnání čtvrté sady vzorků je se sadou druhou, protože je zde použito stejného radiálního posuvu $0,01\text{ mm}$. V tomto srovnání mají vzorky broušené na karuselu VLC 1600 ATC +(C) vždy o něco větší hodnoty R_a a R_z , ovšem tento rozdíl se pohybuje maximálně v řádu setin μm . Stejně jako na brusce BPH 300 je i na karuselu VLC 1600 ATC +(C) pozorován jev, že materiál ČSN 41 2050 dosahuje nejvyšších hodnot drsnosti pro dané technologické postupy, vysvětlení tohoto jevu je stejné jako v případě brusky BPH 300, jelikož brousicí kotouč na brusce i na karuselu měl stejné složení.

Co se týče vyhodnocených parametrů rovinnosti, tak zde byla téměř ve všech případech naměřena hodnota $0,001\text{ mm}$, což je ale nejmenší díl na měřicím zařízení Mahr, Multiscope 250, je tedy pravděpodobné, že skutečná hodnota rovinnosti na většině vzorků bude ještě menší. Naměřené hodnoty rovnoběžnosti nevykazují žádné zlepšení se zmenšující se hodnotou radiálního posuvu na daných vzorcích ani zde není nějakým zásadním způsobem změněna rovnoběžnost na vzorcích čtvrté sady testované na odlišném stroji.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Prvním krokem v této kapitole bude výpočet strojních časů jednotlivých metod broušení. Při tom bude využíváno parametrů broušení uvedených v tabulce 2, 3, 4, a 5.

4.1 Výpočet strojních časů

Je zřejmé, že jednotkový strojní čas první a druhé sady vzorků bude totožný, jelikož jediný rozdíl v technologických postupech první a druhé sady vzorků je v radiálním posuvu, který nemá vliv na velikost strojních časů. Ze všeho nejprve ale bude vypočten jednotkový strojní čas pro hrubovací cyklus, který je totožný pro první, druhou i třetí sadu. K tomu je nejprve zapotřebí vypočítat délku náběhu a přeběhu stolu, která je stejná pro první tři sady, což je realizováno dosazením do rovnice 1.6:

$$l_{nt} = l_{pt} = \sqrt{3 \cdot d_s + 9} = \sqrt{3 \cdot 250 + 9} = 27,5 \text{ mm}.$$

Dráha stolu v tangenciálním směru, totožná opět pro první tři sady, je následně vypočtena dosazením do rovnice 1.5:

$$l_t = l_{nt} + l_w + l_{pt} = 27,5 + 50 + 27,5 = 105 \text{ mm}.$$

Nyní již může být vypočten zmiňovaný jednotkový strojní čas hrubovacích cyklů první, druhé a třetí sady realizovaný dosazením do rovnice 1.4:

$$t_{Ash123} = \frac{l_t}{1000 \cdot v_{ft}} \cdot \frac{l_a}{f_a} \cdot \frac{p}{a_e} = \frac{105}{1000 \cdot 16} \cdot \frac{100}{4} \cdot \frac{0,06}{0,03} = 0,328 \text{ min}.$$

Následně je vypočten jednotkový strojní čas dokončovacího cyklu pro první dvě sady vzorků, které je opět realizováno dosazením do rovnice 1.4, přídavek na obrábění je v těchto případech shodný s pracovním (radiálním) záběrem a_e , tento člen je tedy roven jedné, a proto je ve výpočtu vynechán:

$$t_{Aš12} = \frac{l_t}{1000 \cdot v_{ft}} \cdot \frac{l_a}{f_a} = \frac{105}{1000 \cdot 16} \cdot \frac{100}{4} = 0,164 \text{ min}.$$

Třetí sada vzorků byla vyjiskřována, a to takovým způsobem, že celý dokončovací cyklus, který byl realizován u sady vzorků 1. a 2., byl realizován u třetí sady vzorků dvakrát. Takový způsob broušení odpovídá jednotkovému strojnímu času uvedenému v rovnici 1.7:

$$t_{Aš3} = \frac{l_t}{1000 \cdot v_{ft}} \cdot \frac{l_a}{f_a} = 2 \cdot \frac{105}{1000 \cdot 16} \cdot \frac{100}{4} = 0,328 \text{ min}.$$

V této fázi jsou již vypočteny jednotkové strojní časy hrubovacích a dokončovacích operací, nyní jsou již jednotlivé strojní časy hrubovacích a dokončovacích cyklů sečteny:

$$t_{AS1} = t_{Ash123} + t_{AS\check{c}12} = 0,328 + 0,164 = 0,492 \text{ min},$$

$$t_{AS2} = t_{Ash123} + t_{AS\check{c}12} = 0,328 + 0,164 = 0,492 \text{ min},$$

$$t_{AS3} = t_{Ash123} + t_{AS\check{c}3} = 0,328 + 0,328 = 0,656 \text{ min}.$$

Čtvrtá sada vzorků byla obráběna metodou obvodového tangenciálního broušení s otáčivým pohybem stolu, jehož jednotkový strojní čas je vypočten podle rovnice 1.9:

$$t_{AS4h} = \frac{l_{ar}}{f_a} \cdot \frac{1}{n_w} \cdot \frac{p}{a_e} = \frac{80}{4} \cdot \frac{1}{45} \cdot \frac{0,06}{0,03} = 0,889 \text{ min}.$$

Analogicky je proveden výpočet pro dokončovací cyklus:

$$t_{AS4\check{c}} = \frac{l_{ar}}{f_a} \cdot \frac{1}{n_w} \cdot \frac{p}{a_e} = \frac{80}{4} \cdot \frac{1}{45} \cdot \frac{0,01}{0,01} = 0,444 \text{ min}.$$

A stejně jako u předchozích sad jsou i v tomto případě sečteny jednotkové strojní časy pro hrubování a dokončování:

$$t_{AS4} = t_{AS4h} + t_{AS4\check{c}} = 0,889 + 0,444 = 1,333 \text{ min}.$$

Z vypočtených strojních časů je zřejmé, že pro tento konkrétní případ broušení je vhodnější strojem bruska BPH 300, jelikož dosahuje nejlepšího obrobeného povrchu (vzorky ze třetí sady) při menším strojním čase než je čtvrtá sada vzorků obráběna na karuselu VLC 1600 ATC (+C). Hlavní příčinou tohoto výsledku je skutečnost, že karusel je primárně určen pro obrábění kruhových obrobků. Primárním cílem tohoto experimentu bylo ale dokázat, že stroje firmy TDT Turn dosahují vysoké kvality obrobených povrchu, což bylo realizováno tak, aby bylo dosaženo co nejvíce shodných parametrů broušení na brusce BPH 300 a na karuselu firmy TDZ Turn, tedy i tvaru obrobku.

4.2 Kalkulace nákladů

Kalkulace nákladů pro tento konkrétní případ obrábění není relevantní, jelikož se jedná o obrábění vzorků nikoliv o sériovou výrobu, nicméně i přesto budou v tomto ohledu porovnávány stroje BPH 300 a VLC 1600 ATC (+C) konkrétně tedy druhá a čtvrtá sada, jelikož mají nejpodobnější parametry i kvality obrobených povrchů. To bude realizováno vypočtením nákladů na strojní práci podle rovnice 4.1 [16]:

$$N_s = t_{AS} \frac{N_{sn}}{60} \text{ [Kč]}, \quad (4.1)$$

N_{sn} – náklady na hodinu práce stroje [Kč/hod].

Dosazením do rovnice 4.1 pro karusel a brusku jsou vypočteny náklady na strojní práci. Při těchto výpočtech bylo použito interních informací ohledně hodinových sazeb stroje firmy TDZ Turn:

$$N_{Sbrus.} = 0,492 \cdot \frac{1\,100}{60} = 9,02 \text{ Kč},$$

$$N_{Skar.} = 1,333 \cdot \frac{2\,800}{60} = 62,20 \text{ Kč}.$$

Z vypočtených hodnot je zřejmé, že obrábění těchto konkrétních vzorků na karuselu VLC 1600 ATC (+C) je ne hospodárné, nicméně jak již bylo řečeno hlavním cílem bylo ukázat možnosti tohoto stroje.

Za zmínku stojí, že brousicí hlava, o které je řeč ve třetí kapitole, dodávaná dodavateli společnosti TDZ Turn, je společností prodávána asi za 150 000 Kč. Cena brousicí hlavy, vyvíjené momentálně ve společnosti, je odhadována na zhruba stejnou hodnotu. Důvod vyvíjení této hlavy není tedy primárně cena, ale velmi dlouhá doba dodání této hlavy od dodavatelů.

Dále je zřejmé, že porovnání Brusku BPH 300 a karuselu VLC 1600 ATC (+C) je nevhodné, jelikož se jedná o stroje rozdílné velikosti, proto jsou tyto stroje ve společnosti TDZ Turn samozřejmě primárně nabízeny na soustružnické operace a například tato brousicí hlava či další rotační nástroje ukazují pouze velkou variabilitu strojů společnosti TDZ Turn.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce pojednává o využití možností rovinného broušení. Pro uvedení do této problematiky je první část práce věnována analýze současného stavu v rovinném broušení. V tato část je věnována rozdělení rovinného broušení a zejména pak systému značení brousících kotoučů. Jednotlivé významy zavedeného systému značení jsou pak následně specifikovány (zejména specifikace brusiv a poživ brousících kotoučů uvedených v podkapitole 1.6 a 1.7).

V druhé kapitole jsou definovány jednotlivé metody výpočtu řezných sil při broušení. Jedna z metod, která je často uváděná v literatuře, je určení řezné síly pomocí příkonu na vřetení. Touto metodou byl tedy příkon na vřetení v dalších kapitolách měřen, a ukázalo se, že změna příkonu na vřetení je při broušení různých materiálů tak malá, že prakticky nelze rozeznat rozdíl mezi obráběním jednotlivých materiálů a metoda slouží spíše k orientačnímu určení řezné síly F_c .

V druhé kapitole je také ukázán příklad brousící hlavy (obrázek 2.6), která je vyvíjena ve TDZ Turn, která poskytovala svoje stroje a vzorky pro experiment. Tato hlava je vyvíjena proto, aby bylo dosaženo rychlejší možnosti dodání této hlavy pro zákazníky firmy TDZ Turn, jelikož stávající brousící hlavy (na kterých byl prováděn experiment) jsou dodávány od dodavatelů společnosti a jejich doba dodání je velmi zdlouhavá.

Jádru problematiky je pak věnována kapitola 3. V této kapitole je prováděn experiment na čtyřech sadách vzorků po třech kusech (materiál ČSN 41 2050 – zušlechtěný, ČSN 41 4220 – cementovaný a materiál ČSN 41 9312 – kalený). První tři sady těchto vzorků jsou prováděny na brusce BPH 300, kde je měněn pracovní (radiální) záběr a_e , jakožto jediný parametr a je následně sledována dosažená drsnost, rovinnost a rovnoběžnost na vzorcích. Podle očekávání se ukazuje, že se zmenšující se velikosti pracovního záběru dochází k lepší drsnosti povrchu a to až na hodnotu $Ra = 0,17 \mu m$.

Čtvrtá sada vzorků byla broušena na stroji firmy TDZ Turn, jednalo se o karusel s označením VLC 1600 ATC (+C). Hlavním cílem při broušení této čtvrté sady bylo dosáhnout co největší podobnosti brousících parametrů jako při broušení na brusce BPH 300, a tím porovnat kvalitu obrobených povrchu na brusce a na stroji od firmy TDZ Turn. Hodnoty drsnosti Ra a Rz všech testovaných vzorků jsou pak přehledně shrnuty na obrázku 3.12 a 3.13. Z těchto obrázku je patrné, že stroje firmy TDZ Turn dosahují při broušení podobných parametrů jako bruska BPH 300, ačkoliv nejsou primárně k broušení

určené (rozdíl v hodnotě Ra na vzorcích broušených na brusce a na karuselu je v řádech setin μm).

Při broušení na obou strojích bylo použito stejného složení brousicího kotouče A99B – 60 – J – 9 – V, který je obecně vhodnější pro obrábění tvrdších materiálů (v tomto konkrétním případě materiálů ČSN 41 4220 a ČSN 41 9312). Materiál ČSN 41 2050 dosahoval po tepelném zpracování (zušlechťování) povrchové tvrdosti 45 HRC. Při vyhodnocování drsnosti byly na tomto materiálu vždy naměřeny vyšší hodnoty drsnosti Ra i Rz než u ostatních vzorků obráběných stejným technologickým postupem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HUMÁR, Antonín. Technologie I, Technologie obrábění – 3. část. *ust.fme.vutbr.cz*. [online]. 14.10.2005 [cit. 2016-05-5]. Dostupné z: *ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a...obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf*
- [2] BARTOŇOVÁ, Renata. Technologie broušení. *VOŠ, SOŠ A SOU KOPŘIVNICE*. [online]. 2.11.2012 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: *moodle2.voskop.eu/download/teu/U01_Technologie_brouseni.pdf*
- [3] MALKIN, S. a Changsheng GUO. *Grinding technology: theory and application of machining with abrasives*. 2nd ed. New York: Industrial Press, 2008. ISBN 0831132477.
- [4] Abrasive processes. *slideshare.com*. [online]. 27. 11. 2013 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: *http://www.slideshare.net/lalukumar56027/l9-grinding2012*
- [5] Zelený karbid křemíku – SiC. *polpur.cz*. [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: *http://www.polpur.cz/polpur/eshop/1-1-UZITNE-SKLO/0/5/34-Zeleny-karbid-kremiku-SiC*
- [6] BEST – BUSINESS, a.s. *Brusivo*. Vyd. 1. [Kunštát]. 2015
- [7] MASLOV, Je. N. *Teorie broušení kovů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979.
- [8] Frity. *frity*. [online]. 20.9.2014 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: *http://frity.cz/*
- [9] Orovnávání brusných keramických kotoučů. *Tumlikovo*. [online]. 5.1.2011 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: *http://www.tumlikovo.cz/orovnavani-brusnych-keramickych-kotoucu/*
- [10] KOČMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
- [11] Ocel 12 050. *ust.fme.vutbr.cz*. [online]. 7.3.2010 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: *ust.fme.vutbr.cz/tvareni/databaze_modelu_soubory/ocel_12050.3.pdf*

- [12] Přehled vlastností oceli 16MnCr5. *Bolzano.cz*. [online]. 2011 [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN.../MOP_16MnCr5.pdf
- [13] 1.2842 (90MnCrV8, 19 312 / 19 313). *Preciz*. [online]. 2012 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal/1.2842>
- [14] SVOBODA, Pavel. *Základy konstruování*. Vyd. 4. Brno: CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-750-5.
- [15] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006. ISBN 80-7361-033-7.
- [16] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [17] Asynchronní motor. *vsch.cz*. [online]. 2005 [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <https://vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/uhrovah/skripta/Uloha%2011.pdf>
- [18] ZLEPŠENÍ ÚČINÍKU V ENERGETICE A NÁVRH VHODNÝCH KOMPENZAČNÍCH PROSTŘEDKŮ. *emcos.cz*. [online]. 2001 [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: www.emcos.cz/pdf/zlepseni_uciniku_MM-2001.pdf
- [19] Účíník. *spsoa-ub.cz*. [online]. 2003 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://int.spsoa-ub.cz/projekty/ob21/OP/EL/ZEL/OB21-OP-EL-ZEL-JAK-U-1-003.pps>
- [20] TDZ Turn. *tdz-turn.com*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <http://www.tdz-turn.com/>
- [21] Silicon carbide. *yasuenterprises.com*. [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.yasuenterprises.com/silicon-carbide.html#silicon-carbide>
- [22] Umělý hnědý korund A96 – abrazivo, tryskáč materiál. *abranova-eshop.cz*. [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.abranova-eshop.cz/umely-hnedy-kurund-a96/63759>
- [23] Mono-crystalline aluminum oxide. *ycrs.com*. [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.ycrs.com.cn/enhtm/cp-mcao.htm>

- [24] WHITE CORUNDUM. *mariopilato.com*. [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.mariopilato.com/white-corundum.htm>
- [25] Kar Zirconium oxide. *fusedzirconia-alumina.com*. [online]. 2009 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.fusedzirconia-alumina.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
A	[mm ²]	průřez odebírané vrstvy
a_e	[mm]	pracovní (radiální) záběr
A_w	[mm ²]	teoretický průřez odebírané vrstvy
b_D	[mm]	šířka aktivní části brousicího kotouče
b_s	[mm]	šířka brousicího kotouče
c_{Fc}	[-]	koefficient pro výpočet řezné síly F_c
$\cos\varphi$	[-]	účinník
d_g	[mm]	střední velikost zrna
d_s	[mm]	průměr brousicího kotouče
d_w	[mm]	průměr obrobku
F	[N]	celková řezná síla
f_a	[mm]	axiální posuv
F_c	[N]	tangenciální řezná síla
F_f	[N]	posuvová síla
F_p	[N]	pasivní síla
f_r	[mm]	radiální posuv
h_{eq}	[mm]	ekvivalentní tloušťka broušení
I	[A]	proud protékající jednou fází třífázového motoru
k_c	[MPa]	měrná řezná síla
l_a	[mm]	dráha stolu v axiálním směru
l_{ar}	[mm]	dráha brousicího kotouče v axiálním směru
l_c	[mm]	délka stykového oblouku brousicího kotouče
l_g	[mm]	geometrická délka styku
l_k	[mm]	kinematická délka styku
l_{nt}	[mm]	délka náběhu v tangenciálním směru
l_{pt}	[mm]	délka přeběhu v tangenciálním směru
l_t	[mm]	dráha stolu v tangenciálním směru
M	[-]	zrnitost
N_s	[Kč]	náklady na strojní práci

n_s	[min. ⁻¹]	otáčky brousicího kotouče
N_{sn}	[Kč/hod.]	náklady na hodinu provozu stroje
n_w	[min. ⁻¹]	otáčky obrobku
p	[mm]	přídavek na obrábění
P_c	[kW]	příkon na vřetení
$P_{\check{c}}$	[kW]	činní příkon
Q_w	[mm ³ .s ⁻¹]	rychlost odebrání materiálu (objemový výkon)
Ra	[μm]	střední aritmetická úchylka povrchu
Rz	[μm]	nejvyšší výška profilu
t_{as}	[min.]	jednotkový strojní čas
U	[V]	napětí mezi fázovým a nulovým vodičem
v_c	[m.s ⁻¹]	řezná rychlost
v_{fa}	[m.min ⁻¹]	axiální rychlost posuvu
v_{fr}	[m.min ⁻¹]	radiální rychlost posuvu
v_{ft}	[m.min ⁻¹]	tangenciální rychlost posuvu
x_{Fc}, y_{Fc}, z_{Fc}	[-]	exponenty pro výpočet řezné síly F_c
Δt	[s]	časový interval
ΔV_w	[mm ³]	odebraný materiál za časový interval
η	[-]	účinnost