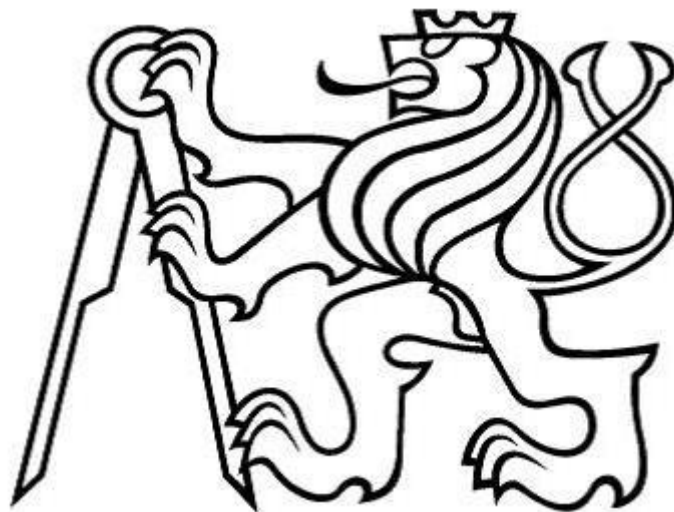


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Broušení neobvyklých strojírenských materiálů**

Praha 2015

Makarov Maxim

Vysoká škola: ČVUT v Praze  
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Fakulta: strojní  
Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro **Makarova Maxima**

obor **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

Název: **Broušení neobvyklých strojírenských materiálů**

Název anglicky: **Grinding unusual engineering materials**

### Zásady pro vypracování:

1. Vytipujte neobvyklé materiály, které se zpracovávají technologií broušení.
2. Popište hlavní problémy s broušením vybraných materiálů.
3. Provedte rozbor dostupných informací o řezných podmínkách broušení.
4. Případně zhodnoťte výsledky broušení vybraných materiálů.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lubomír Štajnochr


Datum zadání bakalářské práce: 30. 4. 2015

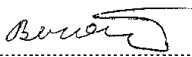
Termín odevzdání bakalářské práce: 19. 6. 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

*Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.*

Zadání bakalářské práce převzal dne: 28.04.2015

  
.....  
Diplomant

  
.....  
Vedoucí ústavu



  
.....  
Děkan

V Praze

dne 20. 3. 2015

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, články atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

Podpis autora

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Lubomiru Štajnochrovi za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi poskytoval v průběhu vypracování celé bakalářské práce.

## **ABSTRACT**

Tato práce se zabývá rozborem a definováním problémů při broušení neobvyklých materiálů. Popisuje hlavní problémy s broušením vybraných materiálu.

## **Klíčová slova**

Broušení, kompozity, plasty, sklo, broušící kotouč.

## **ABSTRACT**

This paper deals with the analysis and definition of problems during the grinding of unusual materials. It describes the main problems with sharpening the selected material.

## **Key words**

Grinding, composites, plastic, glass grinding wheel.

## OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	8
1. ÚVOD.....	9
2. BROUŠENÍ JAKO DOKONČOVACÍ OBRÁBĚCÍ PROCES.....	10
2.1 Popis procesu.....	10
2.2 Brousicí nástroje.....	11
2.2.1 Brousicí kotouče.....	11
2.3 Způsoby broušení.....	14
2.3.1 Obvodové broušení vnějších ploch dokulata.....	14
2.3.2 Obvodové broušení vnitřních ploch dokulata.....	14
2.3.3 Rovinné broušení.....	15
2.3.4 Tvarové broušení.....	15
2.4 Parametry broušení .....	15
2.4.1 Kinematika broušení.....	15
2.4.2 Ekvivalentní tloušťka broušení .....	16
2.4.3 Řezné síly .....	17
2.4.4 Jednotkový strojní čas.....	18
3. BROUŠENÍ STROJÍRENSKÝCH MATERIÁLŮ.....	19
3.1 Kompozity.....	19
3.1.1 Základní vlastnosti kompozitních materiálů.....	19
3.1.2 Klasifikace kompozitních materiálů.....	19
3.1.3 Broušení kompozitů.....	20
2.2 Plasty.....	23
2.2.1 Definice polymeru.....	23
2.2.2 Dělení polymerů dle makromolekulární struktury.....	23
2.2.3 Dělení polymerů dle teplotního chování.....	24
2.2.4 Obecné vlastnosti plastů.....	24
2.2.5 Vybrané plasty.....	24
2.2.6 Broušení plastů.....	29
2.3 Keramika.....	29
2.3.1 Obecné vlastnosti keramiky.....	29
2.3.2 Rozdělení konstrukčních keramických materiálů.....	30
2.3.3 Vybrané keramické materiály.....	30

3.3.4 Broušení keramiky.....	35
3.4 Sklo.....	35
3.4.1 Obecné vlastnosti skla.....	35
3.4.2 Broušení skla.....	35
4. ZÁVĚR.....	37
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	38
SEZNAM OBRÁZKU.....	40



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

$d_s$	průměr broušícího kotouče [mm]
$n_s$	frekvence otáčení broušícího kotouče [ $min^{-1}$ ]
$d_w$	průměr obrobku [mm]
$n_w$	frekvence otáčení [ $min^{-1}$ ]
$f_a$	axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku obrobku [mm]
$v_c$	řezná rychlost [ $m * s^{-1}$ ]
$v_w$	obvodová rychlost obrobku [ $m * min^{-1}$ ]
$n_w$	frekvence otáčení [ $min^{-1}$ ]
$v_{fa}$	axiální rychlost posuvu stolu brusky [ $m * min^{-1}$ ]
$F_c$	hlavní síla, leží ve směru řezné rychlosti [N]
$F_p$	pasivní síla, je kolmá k broušené ploše [N]
$F_f$	posuvová síla, působí ve směru podélného posuvu [N]
$a_e$	pracovní záběr [mm]
$l_a$	dráha prohybu stolu brusky v axiálním směru [mm]
$l_{na}$	délka náběhu v axiálním směru [mm]
$l_w$	délka obrobku [mm]
$l_{pa}$	délka přeběhu v axiálním směru [mm]
$b_s$	šířka broušícího kotouče [mm]
$p$	přídavek na broušení [mm]
$f_r$	radiální posuv stolu brusky na jeden axiální zdvih stolu [mm]

# 1. ÚVOD

Využití strojírenských materiálů závisí především na jejich konkrétních vlastnostech, mezi které patří především vlastnosti mechanické (houževnatost, tvrdost či modul pružnosti v tahu a ohybu), fyzikální (hustota, elektrické vlastnosti a tepelné vlastnosti – vodivost, roztažnost, odolnost, teplota tavení a skleného přechodu, hořlavost a degradace teplem), chemické a fyzikálně chemické (nasákavost, navlhavost, bobtnání, rozpouštění, odolnost vůči chemikáliím a koroze za napětí), a další vlastnosti, které u materiálu lze hodnotit, jako například tvářitelnost, obrobitelnost, optické vlastnosti. Obrobitelnost těchto materiálů je však velice problematická, a proto závisí na používaných nástrojových materiálech, geometrii a způsobu provádění obráběcích operací.

Proces broušení často zařazen jako poslední, tedy dokončovací proces. Proto je velmi důležitý výběr správného brousícího prostředku a správné nastavení podmínek broušení.

Předkládána bakalářská práce zaměřena na rozbor dostupných informací, které popisují neobvyklé materiály, které se zpracovávají technologií broušení. A také popisují hlavní problém s broušením vybraných materiálů.

## 2. BROUŠENÍ JAKO DOKONČOVACÍ OBRÁBĚCÍ PROCES

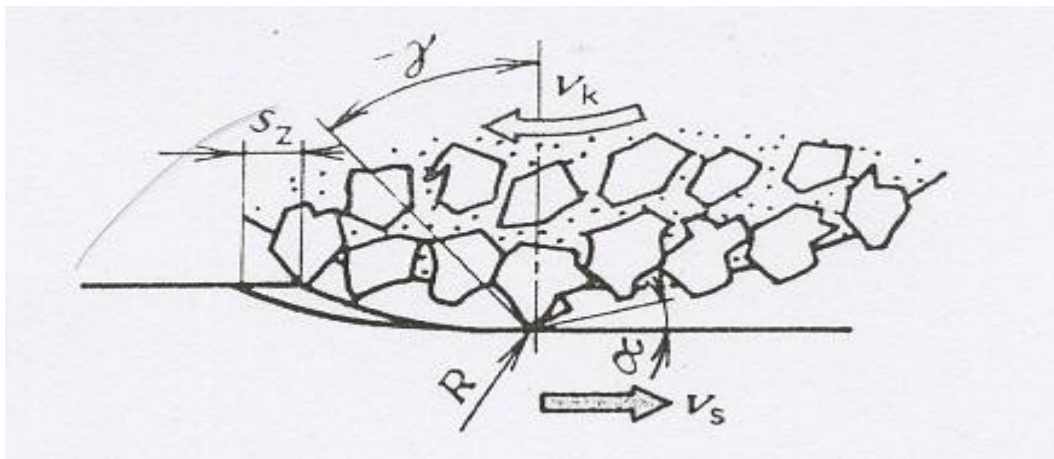
Broušení tvoří složitý technologický proces s mnohobřitými nástroji s nepravidelným rozložením břitů s nepravidelnou geometrií.

Broušení je dokončovací operace obrábění, kdy odebíráme drobné částičky třísky mnohobřitým nástrojem (brusným kotoučem), slouží k dosažení přesných rozměrů, požadovaných tvarů (rovinnost, válcovitost) a drsnosti povrchu  $R_a$  1,6 až 0,2  $\mu\text{m}$ . (1)

### 2.1 Popis procesu

Účelem broušení je dosažení vysoké přesnosti rozměrů, geometrického tvaru a polohy obráběných ploch, drsnosti povrchu a v neposlední řadě pozitivního průběhu zbytkových napětí. Ty značně ovlivňují zabezpečení vhodných provozních vlastností povrchové vrstvy obrobku. Složitost procesu je dána především nestálostí řezného nástroje. Povrch brousícího kotouče se skládá z velkého množství prostorově nepravidelně rozložených brousících zrn, které mají tvar nepravidelného mnohostěnu se zcela nahodilou orientací krystalografických os vzhledem k pracovní ploše kotouče. Řezné úhly závisí na uložení zrna v kotouči a z hlediska obrábění jsou značně nevhodné. (3)

Podstata broušení je oddělování třísek pomocí zrn brusiva spojenými pojivem v mnohobřítý řezný nástroj, brousící (brusný) kotouč. U zrn brusiva mají břity nepravidelný tvar, záporný úhel čela a jsou rozmístěny nerovnoměrně po části nástroje. (3)



Obr. 1. Geometrie brousícího nástroje (27)

Zrna jsou velká cca 0,003 až 3,000 mm, mají většinou záporné úhly čela a velké úhly hřbetu. Velká řezná rychlost vytváří velké teplo a vysokou teplotu odvedených třísek. Ty se zahřívají na teplotu 800-1200°C, to zapříčiňuje zahřívání obráběné plochy a velké vnitřní pnutí které může způsobit malé trhlinky v obrobku. Vzniku trhlinek se brání zvolením správného typu brusiva a velkým chlazením. (27)

Různé tvary zrn brusiva a jejich polohy v brusném nástroji a vůči obrobku způsobují, že dochází k řezání i zaškrabávání. (27)

## **2.2 Brousicí nástroje**

U brousicích nástrojů jsou zrna vázána pevně v tuhých nebo pružných tělesech různých velikostí a tvarů. Brousicí nástroje mají velký rozsah použití.

Jsou to: brousicí, řezací drážkovací kotouče,

brousicí tělíška,

superfinašovací a honovací kameny,

brousicí a obtahovací kameny a segmenty,

brousicí pilníky,

brousicí a lešticí ptátka a papíry.(2)

### **2.2.1 Brousicí kotouče**

Z uvedených typů nástrojů jsou pro brousicí operace nejčastěji používány brousicí kotouče. Všeobecná charakteristika brousicího nástroje (kotouče) je podle ČSN 22 4501 dána: druhem brousicího materiálu,

zrnitosti brousicího materiálu,

tvrdostí,

strukturou nástroje,

druhem pojiva,

rozměry kotouče. (2)

### **Brusivo**

Brusivo je krystalická látka nebo hmota zrnitého, někdy mikrokystalického slohu, jejíž zrna jsou tak tvrdá, houževnatá a ostrohranná, že jimi lze obrušovat jiné hmoty.

Používaný materiál brusiva:

- umělý – umělý korund  $Al_2O_3$  (99A, 98A, 96A, 85A), karbid křemíku SiC (49C, 48C), karbid boru B<sub>4</sub>C (B), kubický nitrid boru N<sub>2</sub>B<sub>3</sub> (BN), diamant (D)

- přírodní – granát (označení G), diamant (D), křemičitý písek, pískovec. (10)

## Pojivo

Pojivo, čili vazba brusných nástrojů, spojuje broušící zrna. Množství a druh zpracování pojiva určují též tvrdost nástroje. Druhy pojiv: keramická (označení V), pryžová (R), pryžová s textilní výztuží (RF), z umělé pryskyřice (B), z umělé pryskyřice s textilní výztuží (BF), šelaková (E), magnezitová (Mg), kovová, galvanická kovová, keramická, z umělé pryskyřice.(10)

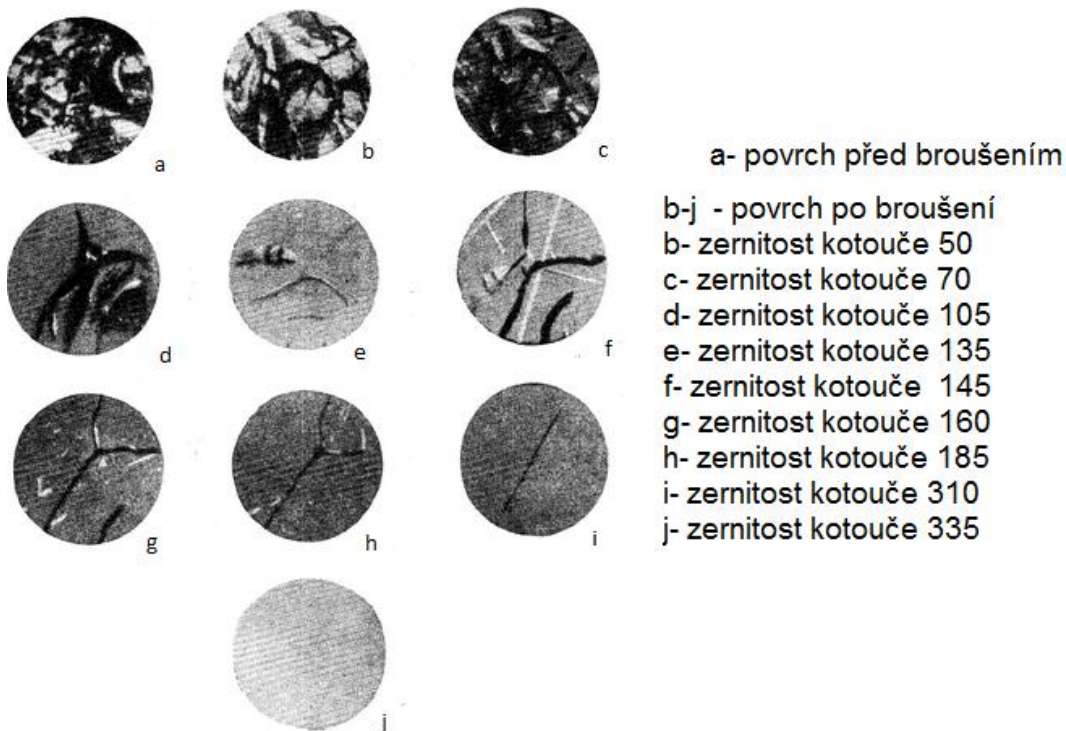
## Zrnitost

Velikost zrna je, dle normy ČSN ISO 525, dána číslem, které odpovídá počtu ok na délku jednoho anglického palce toho síta, jímž při třídění ještě zrna propadne

Velikost zrn se označuje od nejhrubšího po nejjemnější:

- hrubá 4, 5, 6,..., 24,
- střední 30, 36, 40,..., 60,
- jemná 70, 80, 90,..., 180,
- velmi jemná 220, 240, 280,..., 1200. (10)

Pro lepší pochopení druhu zrnitosti jsou následující obrázky, na kterých uveden povrch skla po broušení broušicím kotoučem.



Obr.2. Povrch skla po broušení (23)

## **Tvrдост**

Stupeň tvrdosti brousicího nástroje je určen druhem a obsahem pojiva. Je definován jako odpor, který klade zrno proti vylomení z brousicího nástroje. Běžně se používají kotouče:

- měkké I, J, K,
- střední L, M, N, O, P, Q,
- tvrdé R, S, T. (10)

## **Struktura**

Struktura je vzdálenost mezi zrny brousicího kotouče, tzn. pórovitost. Označuje se čísly od 0 do 14. Čím je číslo vyšší, tím je větší vzdálenost mezi zrny.

- velmi hutný ..... 1,2
- hutný..... 3,4
- polohutný..... 5,6
- pórovitý..... 7,8
- velmi pórovitý..... 9,10
- zvláště pórovitý ..... 11, 12, 13, 14. (10)

## **Značení brousicího kotouče**

<b>T5</b>	<b>300x50x76</b>	<b>A99</b>	<b>36</b>	<b>L</b>	<b>5</b>	<b>V</b>
<b>Typ kotouče</b>	<b>Rozměry kotouče</b>	<b>Typ zrna</b>	<b>Zrnitost</b>	<b>Tvrдост</b>	<b>Struktura</b>	<b>Typ pojiva</b>

*Obr.3. Značení brousicího kotouče (10)*

## **Některé zásady při broušení**

- pro větší úběr materiálu se volí hrubší zrnitost,
- pro tvrdší obrušovaný materiál se volí měkčí kotouč,
- pro broušení materiálů se sklonem k mazlavosti (měď, mosaz, hliník a podobně) se volí brousicí kotouč s hrubou zrnitostí,
- čím větší je styčná plocha (styčný oblouk násobený šířkou kotouče) mezi brousicím kotoučem a obrobkem, tím hrubší se volí zrnitost a nižší tvrdost brousicího kotouče,
- pro materiál citlivý na teplotní změny se volí měkčí brousicí kotouč,
- pro broušení přerušovaných ploch se volí kotouč tvrdší,
- při broušení obrobku čelem se obvykle volí kotouč měkčí než pro broušení obvodem kotouče. (26)

## **2.3 Způsoby broušení**

Metody broušení a typy broušicích strojů jsou charakterizovány tvarem broušených ploch, způsobem upnutí obrobku a kinematikou pracovních pohybů. (2)

### **2.3.1 Obvodové broušení vnějších ploch dokulata**

#### **Axiální broušení**

Toto broušení je často využíváno především při obrábění dlouhých rotačních součástek válcového nebo kuželového tvaru. (4)

#### **Hloubkové broušení**

Tento způsob se používá při malých přídavicích na dokončovací obrábění a patří k nejproduktivnějším metodám broušení do kulata. (4)

#### **Radiální broušení**

U tohoto způsobu broušení je velmi důležité mít tuhý obrobek. Je možné využít i šikmý posuv a to v případě, že se současně brousí několik ploch. Řezná i obvodová rychlost je srovnatelná s axiálním broušením, ale výkon broušení je až o 80 % vyšší než u axiálního broušení. (4)

#### **Bezhraté broušení**

Bezhraté broušení umožňuje vysokou produktivitu práce při průběžném (průchozím) i zapichovacím způsobu broušení a s úspěchem se používá zejména v hromadné a velkosériové výrobě. Za typickou aplikaci lze považovat např. broušení součástí valivých ložisek. (4)

### **2.3.2 Obvodové broušení vnitřních ploch dokulata**

#### **Axiální broušení**

Využití této metody je především při obrábění obrobku, kdy jeho délka je větší než šířka broušicího kotouče. Kotouč se otáčí uvnitř obráběné díry a posouvá ve směru osy. Obrobek se otáčí kolem své osy proti směru pohybu broušicího kotouče. (4)

#### **Bezhraté broušení**

Bezhraté broušení je srovnatelné s axiálním broušením (jsou zachovány veškeré základní pohyby obrobku i broušicího kotouče). Rozdílné je upínání obrobku, kdy je součást vložena mezi 3 kotouče. Při bezhratém vnitřním broušení je možné dosáhnout větší přesnosti ve srovnání s axiálním vnitřním broušením. (4)

#### **Planetové broušení**

Otvory velkých a těžkých obrobků, které jsou upnuté do sklíčidla a případné obrábění je obtížné, se obrábí planetovým broušením. V tomto případě obrobek stojí a brusný nástroj koná všechny pracovní pohyby – otáčí se okolo vlastní osy, posouvá se ve

směru osy broušeného otvoru a současně obíhá okolo osy obrobku. Přesnost planetového broušení je z důvodu malé tuhosti vřetena nižší.(4)

### **2.3.3 Rovinné broušení**

Rovinné broušení se obvykle používá jako operace na čisto po předcházejícím frézování nebo hoblování, často se používá i místo frézování pro obrábění velmi tvrdých materiálů nebo materiálů s tvrdou kůrou. Rovinné plochy se brousí obvodem nebo čelem broušicího kotouče.(4)

#### **Obvodové broušení**

Broušení obvodem kotouče je nejpřesnější způsob broušení rovinných ploch, protože se pracuje s relativně úzkým kotoučem a obrobek se vlivem tepla vzniklého při broušení deformuje jen nepatrně. Tento způsob se používá zejména při broušení přesných rovinných ploch a dále při výrobě nástrojů, měřidel, přípravků atd., případně lze takto brousit i různé tvarové plochy.(4)

#### **Čelní broušení**

Broušení čelem kotouče není sice tak přesné jako broušení obvodem kotouče, je však mnohem výkonnější. Obrobek, podobně jako o obvodového broušení, může vykonávat pohyb otáčivý nebo přímočarý. Při přímočarém pohybu stolu se v sériové a hromadné výrobě brousí zejména menší součásti, např. čelní plochy ozubených kol, písní kroužky, čela kroužků kuličkových ložisek atd.(4)

### **2.3.4 Tvarové broušení**

Ve strojírenství se kromě rovinných, válcových a kuželových ploch často vyskytují i tvarové plochy (někdy značně složité). Tyto tvary se brousí tvarovými kotouči nebo kotouči běžných tvarů kopírováním. Broušení kopírováním se provádí pomocí šablon a pantografů. Při tomto způsobu broušení vykonává pracovní pohyb brusný kotouč nebo obrobek na speciálně upravených (kopírovacích) hrotových, bezhrotých i rovinných bruskách.(4)

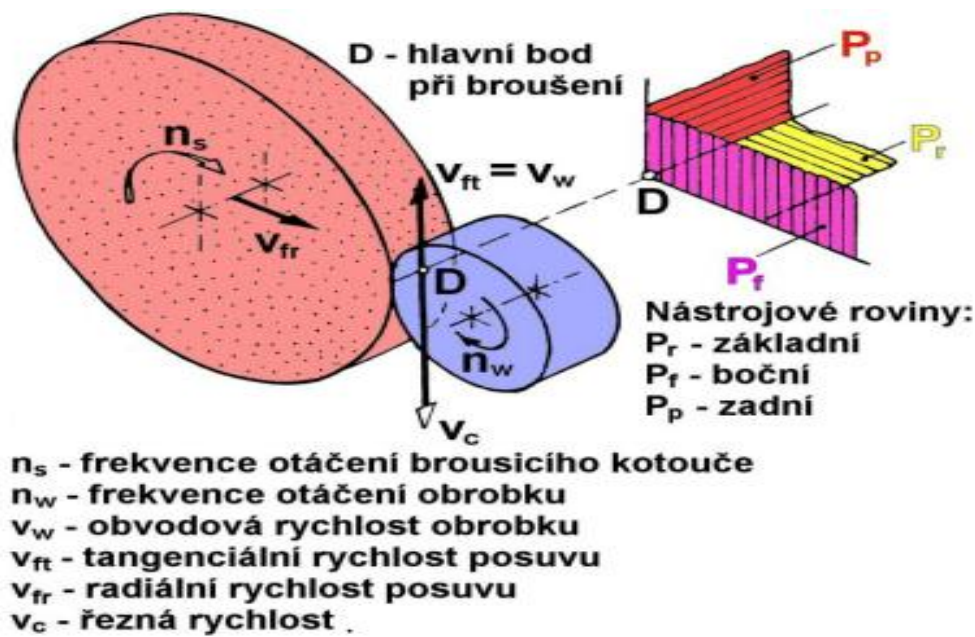
## **2.4 Parametry broušení**

### **2.4.1 Kinematika broušení**

Kinematika broušení určuje hlavní řezný a vedlejší posuvný pohyb. Obrobek vykonává přímočarý nebo rotační vedlejší pohyb a nástroj pracovní rotační pohyb, definovaný jako hlavní, respektive řezný pohyb.

Charakteristikou jednotlivých způsobů broušení jsou jeho pohyby a rychlosti při broušení. (29)





Obr.4. Obvodové vnější broušení „dokulata“ radiálním způsobem(29)

#### Vyjádření řezné rychlosti

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

**d<sub>s</sub>** - průměr brousícího kotouče [mm]

**n<sub>s</sub>** - frekvence otáčení brousícího kotouče [ $min^{-1}$ ]

#### Vyjádření obvodové rychlosti $v_w$ při broušení „dokulata“

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

**d<sub>w</sub>** - průměr obrobku [mm]

**n<sub>w</sub>** - frekvence otáčení [ $min^{-1}$ ]

Obvodová rychlost brusného kotouče je mnohokrát větší než rychlost posuvu obrobku. Proto se za řeznou rychlost považuje obvodová rychlost brusného nástroje.

Posuv je definován jako posun brusného kotouče za jednu otáčku obrobku. (29)

#### 2.4.2 Ekvivalentní tloušťka broušení

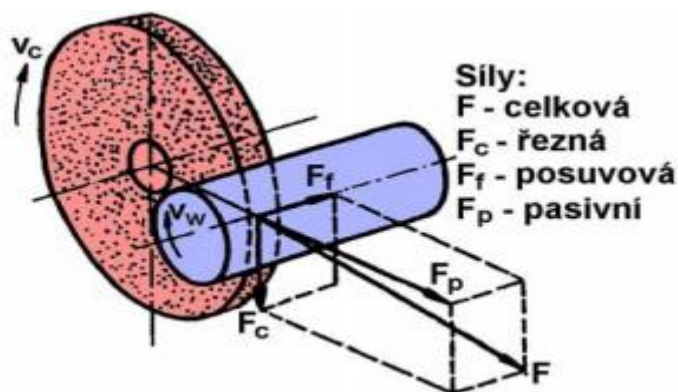
Při broušení je velmi složité vypočítat tloušťku třísky ubírané jednotlivými zrny brusného kotouče. Proto se při broušení počítá teoretická hodnota ekvivalentní tloušťky broušení  $h_{eq}$ , tato hodnota pomáhá stanovit např. síly a odpory při broušení, měrné řezné síly a odpory, měrnou práci a výkon.

#### **Ekvivalentní tloušťka pro vnější obvodové axiální broušení „dokulata“**

$$h_{eq} = \frac{v_w}{60 \cdot v_c} * f_a = \frac{v_w}{60 \cdot v_c} * \frac{1000 \cdot v_{fa}}{n_w} = \frac{v_w \cdot 100 \cdot v_{fa}}{60 \cdot v_c \cdot n_w} \quad [\text{mm}]$$

$f_a$ - axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku obrobku	[mm]
$v_c$ - řezná rychlost	$[m * s^{-1}]$
$v_w$ - obvodová rychlost obrobku	$[m * \text{min}^{-1}]$
$n_w$ - frekvence otáčení	$[\text{min}^{-1}]$
$v_{fa}$ - axiální rychlost posuvu stolu brusky	$[m * \text{min}^{-1}]$ (29)

### 2.4.3 Řezné síly



Obr.5. Silové poměry při obvodovém axiálním broušení „dokulata“ (29)

Při procesu broušení vznikají dynamické jevy, které se v čase stále mění. V ploše styku brusných zrn kotouče s obrobkem působí složky síly broušení, které se rozkládají do třech vzájemně kolmých směrů.

Výsledná síla řezání  $F$ , působící na nástroj, je součtem tří složek na sebe kolmých sil:

- hlavní  $F_c$  – leží ve směru řezné rychlosti,
- pasivní  $F_p$  – je kolmá k broušené ploše,
- posuvová  $F_f$  – působí ve směru podélného posuvu

Obráběný materiál, způsob broušení, řezné podmínky, zrnitost brusiva, druh a tvrdost pojiva a struktura brusného kotouče má vliv na velikost síly broušení.

#### **$F_c$ pro obvodové axiální broušení vnějších rotačních ploch**

$$F_c = 25 * v_w^{0,6} * f_a^{0,6} * a_e^{0,5} \quad [\text{N}]$$

$v_w$  - obvodová rychlost obrobku  $[m * \text{min}^{-1}]$

$f_a$  - axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku obrobku [mm]

$a_e$  - pracovní záběr [mm] (29)

#### 1.4.4 Jednotkový strojní čas

Výpočet hodnoty jednotkového strojního času je závislý na způsobu broušení.

$$t_{AS} = \frac{l_a}{f_a \cdot n_w} \cdot \frac{p}{2 \cdot f_r} = \frac{l_a \cdot p}{v_{fa} \cdot f_r \cdot 2 \cdot 10^3} \quad [\text{min}]$$

$l_a = l_{na} + l_w + l_{pa}$  - dráha prohybu stolu brusky v axiálním směru [mm]

$l_{na} = 3 \text{ mm}$  - délka náběhu v axiálním směru [mm]

$l_w$  - délka obrobku [mm]

$l_{pa} = l_{na} + \frac{b_s}{2}$  - délka přeběhu v axiálním směru [mm]

$b_s$  - šířka broušícího kotouče [mm]

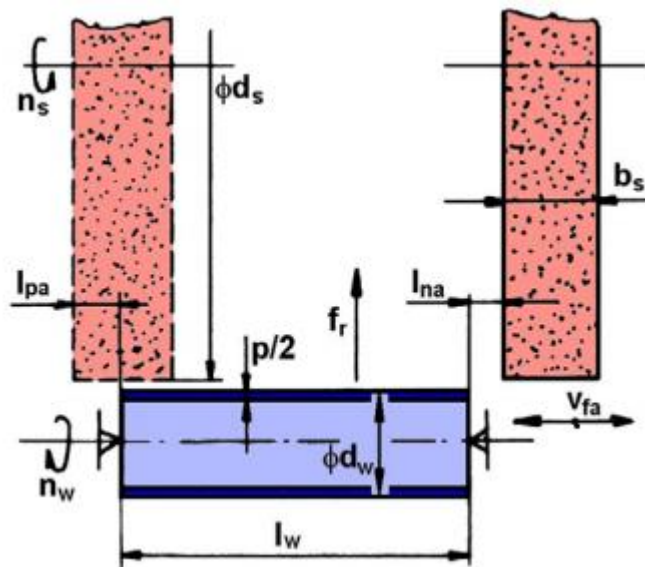
$f_a$  - axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku obrobku [mm]

$n_w$  - frekvence otáčení obrobku [ $\text{min}^{-1}$ ]

$p$  - přídavek na broušení [mm]

$f_r$  - radiální posuv stolu brusky na jeden axiální zdvih stolu [mm]

$v_{fa}$  - axiální rychlost posuvu stolu brusky [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ] (29)



Obr.6. Obvodové axiální broušení (29)

### **3. BROUŠENÍ STROJÍRENSKÝCH MATERIÁLŮ**

#### **3.1 Kompozity**

Jedná se o skupinu materiálů, které se skládají z jedné nebo několika nespojitých fází, ponořených ve fázi spojitě. Nejčastěji používaným typem kompozitního materiálu je houževnatá matrice (pojivo), která je zpevněna vysokopevnými vlákny nebo tvrdými částicemi určité velikosti (výztuž)..(5)

##### **Materiály používané pro matrici:**

- pryskyřice, polymery:
  - reaktoplasty (PET - polyestery, EP - epoxidy, PIM - polyimidy, bismaleimidy)
  - termoplasty (PP - polypropylény, PA - polyamidy, PEEK - polyéter éterketony, PC - polykarbonáty)
  - kaučuky (kordy)
- silikáty (sklo, cement, keramika)
- kovy (zejména hliník a jeho slitiny) (11)

##### **Materiály používané pro výztuž:**

- přírodní (bavlna, sisal, juta, celulóza)
- anorganická (skelná, uhlíková, kovová, bórová, SiC)
- organická (aramidy - Kevlar, polyimidy) (11)

#### **3.1.1 Základní vlastnosti kompozitních materiálů**

- elektrická nevodivost,
- nulový útlum elektromagnetických vln,
- nízká tepelná vodivost,
- nízká měrná hmotnost,
- dobré mechanické vlastnosti
- korozivzdornost,
- snadná montáž a údržba(10)

#### **3.1.2 Klasifikace kompozitních materiálů**

Kompozity můžeme rozdělit několika způsoby, například podle vlastností výztuže nebo druhu matrice. Jako kritérium se také používá geometrický tvar, velikost, orientace a rozměry vyztužujících částic.(9)

##### **Vybraný materiál**

*CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic)*. Plastické materiály vyztužené uhlíkovými vlákny (CFRP) jsou mimořádně lehké a korozivzdorné, a pro svoji vysokou pevnost a

stabilitu (5-10krát vyšší než ocel) jsou vysoce ceněné v leteckém a kosmickém průmyslu. Tyto otěru odolné materiály mají rovněž vysoký modul pružnosti (tuhost), hmotnost mají o 60 % nižší než hliník, netrpí tepelným namáháním a mají i nízký koeficient tření. Protože jejich koeficient tepelné roztažnosti je blízký nule, dosažitelná rozměrová přesnost je neobyčejně vysoká. Pro tyto vlastnosti je CFRP jedním z nejužívanějších materiálů pro výrobu součástí skeletu. (24)

### **3.1.3 Broušení kompozitů**

Metoda obrábění broušením kompozitů se používá, stejně tak jako u broušení kovových částí, převážně pro získání požadovaného hladkého povrchu nebo lepší rozměrové přesnosti. Pro získání kvalitnějšího povrchu se používají klasické brusné papíry, kotouče či jiné brusné elementy. (28)

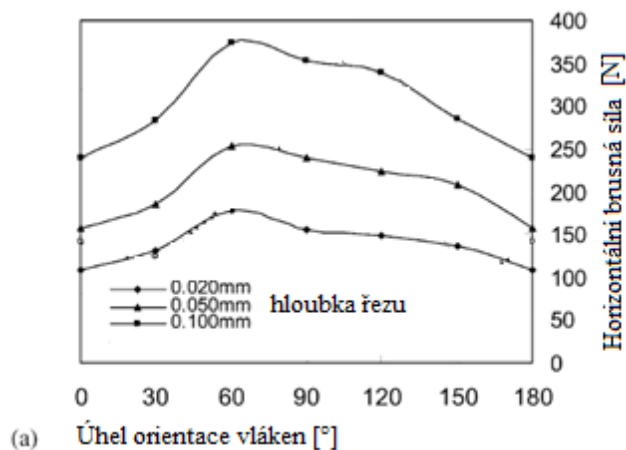
Jiným důvodem broušení těchto materiálů je získání povrchu pro následné nanesení barvy nebo přebroušení nanesené barvy před následným lakováním. Pro brusný proces se využívá rotačních brusných kartáčů. Jednotlivé kartáče jsou vsazovány do brusné hlavy, která koná rotační pohyb. Výhodou používání kartáčů je stejnoměrné vybroušení tvarových profilů. Kartáč se totiž chová jako brusivo přitlačované rukou. Trvanlivost brusiva je přitom delší než u použití tradičních postupů. (28)

#### **Broušení kompozitu CFRP**

Bylo provedeno broušení kompozitu CFRP. Velikost vzorků používaných při experimentu byla 45 mm x 15 mm x 4 mm (délka × šířka × tloušťka). Tyto vzorky byly odebrány tak, aby se dosáhlo požadované orientace vláken u vzorku. Materiál pro brusný kotouč byl použit oxid hlinitý (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). (22)

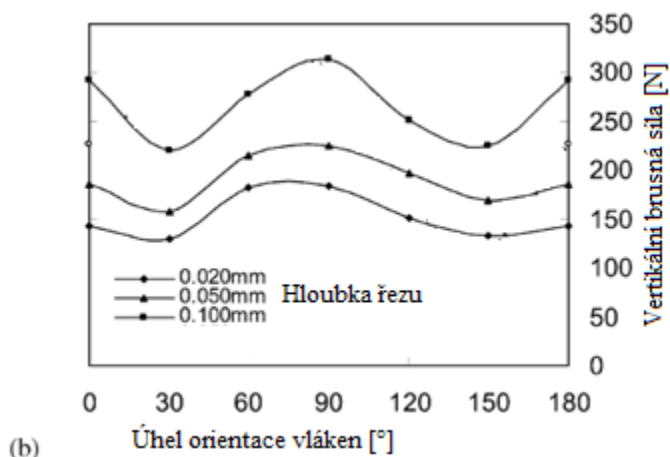
#### *Řezné síly*

Řezné síly závisejí především na hloubce řezu a na úhlu orientaci vláken. Zobrazení závislosti horizontální brusné síly na úhlu orientace vláken pro různé hloubky řezu na obrázku 7. Hodnota horizontální brusné síly stoupá společně s úhlem orientace vláken, dosahuje hodnoty 60° - horizontální síla dosahuje maxima. S dalším nárůstem úhlu orientace vláken mírně klesá až do hodnoty 180°. (22)



Obr.7. Závislost horizontální brusné síly na úhlu orientace vláken. (22)

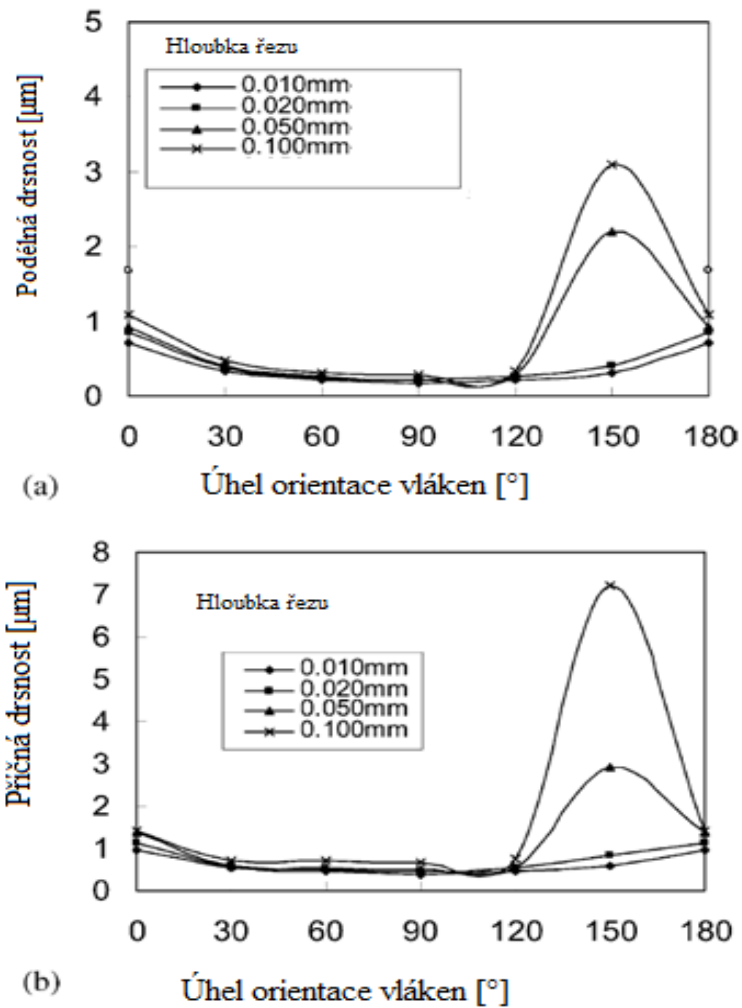
Závislost vertikální brusné síly na úhlu orientace vláken opět pro různé hloubky řezu je uvedena na orazku 8. Vysoké hodnoty této síly je dosahováno pro úhel okolo 0° nebo 90°. Nejmenší vertikální síla se objevuje při úhlu natočení vláken okolo 30° a 150°. Z obou grafů je patrné, že pro větší hloubku řezu, jsou větší i brusné síly. (22)



Obr.8. Závislost vertikální brusné síly na úhlu orientace vláken (22)

#### Povrchová drsnost

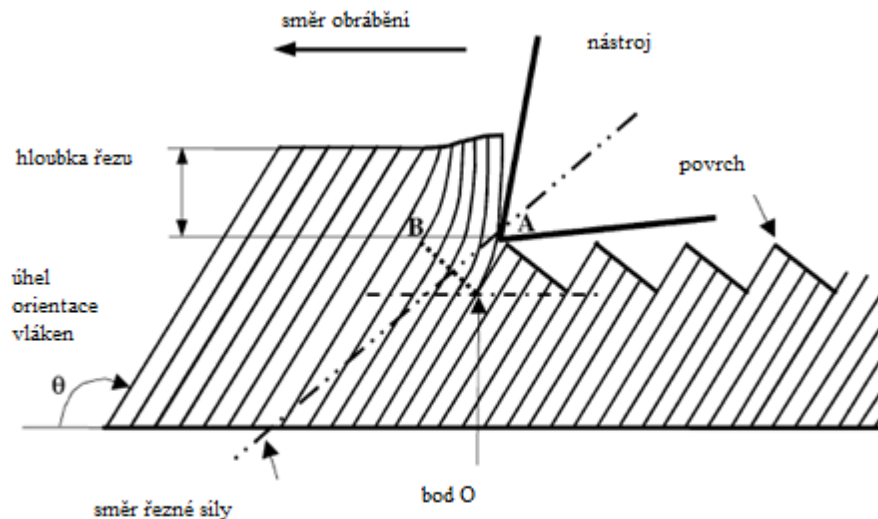
Úhel natočení vláken má obrovský vliv i na povrchovou drsnost. Na obrázku 9 je vidět vliv úhlu natočení vláken na podélnou a příčnou drsnost. (22)



Obr.9. Vliv úhlu orientace vláken na drsnost (22)

Z grafu je zřejmé, že při překročení hranice úhlu natočení  $120^\circ$  se náhle zvýší drsnost a při  $150^\circ$  začne znovu klesat. Drsnost tedy dosahuje nejvyšších parametrů mezi  $120^\circ$  a  $180^\circ$ . Nejlepší drsnost byla získána při úhlu natočení vláken  $90^\circ$  až  $120^\circ$  a hloubka řezu zde má nejmenší vliv. Testy byly prováděny se stejnými parametry jako při určování brusných sil u jednosměrně vinutých kompozitů. (22)

Experimentálně bylo dokázáno, že výsledky broušení odpovídají ortogonálnímu obrábění stejného obrobku při použití nástroje s úhlem hřbetu  $7^\circ$  a s úhlem čela  $-20^\circ$ . Řezná rychlost musí být  $1\text{m}/\text{min}$ . To, proč vniká horší povrch při úhlech natočení vláken mezi  $120^\circ$  a  $180^\circ$ , je vidět na obrázku 10. (22)



Obr. 10. Schéma odebírání materiálu s orientací vláken  $\theta > 90^\circ$  (22)

Řezný nástroj ohýbá vrstvy vláken. K přerušení vlákna dojde až po dosažení potřebného napětí v ohybu a k přerušení vlákna dojde až v bodě O. Tímto způsobem vzniká drsnější povrch a dochází k hlubšímu průniku do povrchu obrobku. Toto chování je zcela odlišné od oddělování materiálu při úhlu orientace vláken mezi  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , kde jsou vlákna oddělována tahem, a proto se lámou v blízkosti ostří. (22)

### 3.2 Plasty

#### Definice plastu

Plasty jsou makromolekulární látky, které vznikají polyreakcemi. Základem každého plastu je polymer, ke kterému jsou přidány přísady a plniva. (6)

#### 3.2.1 Definice polymeru

Polymer je chemicky čistá, makromolekulární látka, která má jasně definovaný chemický vzorec. Základním strukturním prvkem polymerů je atom uhlíku C, který je díky své atomové struktuře schopen vytvořit čtyři kovalentní vazby. Jednotlivé atomy uhlíku mohou být mezi sebou vázány buď jednoduchou vazbou, nebo vazbou násobnou (dvojnou, resp. trojnou). (6)

#### 3.2.2 Dělení polymerů dle makromolekulární struktury.

**Lineární polymery** – monomery tvoří jeden hlavní řetězec, ve kterém jsou řazeny za sebou.

**Rozvětvené polymery** – monomery tvoří hlavní řetězec, ze kterého vystupují další vedlejší větve.



**Polymery se zkříženými články** – sousední řetězce jsou vázány články pomocí silné kovalentní vazby.

**Síťované polymery** – vznikají síťováním lineárního nebo rozvětveného polymeru. Síťované polymery mají nejlepší mechanické vlastnosti.(7)

### 3.2.3 Dělení polymerů dle teplotního chování

**Termoplasty** - plasty teplem tavitelné. Působením zvýšené teploty na hranici teploty tání měknou. Poté se dají tvarovat, ohybat, tahnout, lisovat a vyfukovat. Mezi důležité termoplasty patří: polyvinylchlorid (PVC), polystyren (PS), polyvinylacetát (PVAC), polyetylen (PE), akrylátové (PMMA), polyizobutylene(PIB).(8)

**Reaktoplasty**- plasty teplem tvrditelné. Dodávány ve formě tekutých látek medové konzistence pryskyřice. K nim jsou dodávána tvrdidla. Po smíšení se zpracovávají a následným zahřátím měknou a dalším zahřátím dochází k ztvrdnutí. Mezi reaktoplasty patří: fenolová pryskyřice (PF), melaminoformaldehydová pryskyřice (MF), polyuretanové pryskyřice (PUR) (8)

**Elastomery**- plasty s elastickými vlastnostmi. Je možné je snadno tvarovat a po odlehčení napětí zaujmou opět svůj tvar. Mezi elastomery patří: kaučuky (syntetické a přírodní)- butylkaučuk (IIR), posulfidový kaučuk (SR), polyuretanový kaučuk (PUR) a silikonový kaučuk (Si).(8)

### 3.2.4 Obecné vlastnosti plastů

V literatuře se člení na výhodné a nevýhodné vlastnosti.

**Výhodné vlastnosti:** malá hustota (malá hmotnost), stálost vůči vodě, velká chemická odolnost a odolnost proti korozi, nízká tepelná vodivost, nízká zvuková vodivost, nevedou elektrický proud, možnost barvení ve hmotě, snadné zpracování, fyziologická nezávadnost, pružnost a odolnost vůči biologickým činitelům.

**Nevýhodné vlastnosti:** malá tepelná stálost, velká tepelná roztažnost, měkký povrch, hořlavost, tvorba elektrostatického náboje a nízká odolnost vůči ultrafialovému záření.(8)

### 3.2.5 Vybrané plasty

#### **Polyvinylchlorid (PVC)**

Polyvinylchlorid (PVC) je nejstarší a jednou z nejpoužívanějších plastických hmot. Tento termoplast je dobře svařitelný i lepitelný, je také tepelně tvárný, a to opakovaně.



Obr.11. Polyvinylchlorid (PVC) (17)

*Všeobecná použití:* chemická zařízení a přístroje, zařízení pro úpravu vody, galvanizace, výroba bazénů, čistírny odpadních vod, vzduchotechnika.

Nejvýznamnější polyvinylchloridy:

-*PVC-U normal impact (PVC-NI)* je běžný polyvinylchlorid s rázovou houževnatostí bez změkčovadel. PVC-NI lze mnohostranně použít díky mechanické pevnosti a chemické odolnosti při konstrukci přístrojů a zařízení pro chemický průmysl. Kromě toho je možné bezproblémově tepelně tvařit.

-*PVC-U raised impact (PVC-RI)* je modifikovaný PVC s rázovou houževnatostí. PVC-RI se používá při výrobě samonosných konstrukcí s vysokými požadavky na pevnost, tuhost a rázovou houževnatost.

-*PVC-U high impact (PVC-HI)* je modifikovaný polyvinylchlorid s vysokou rázovou houževnatostí. PVC-HI se používá v průmyslu všude tam, kde je vyžadována vysoká rázová houževnatost.

-*PVC-C (dodatečně chlorovaný)* je polyvinylchlorid s normální rázovou houževnatostí, ale s vysokou tepelnou odolností (do +90°C). PVC-C má vysokou odolnost i vůči silně oxidačním kyselinám, u nichž je použití PE a PP nevhodné.

- *PVC-P (plastifikovaný)* je v důsledku přidání změkčovadel. PVC-P se používá pro obložení galvanických lázní, ale rovněž jako ochrana proti otěru a uderu. (16)(17)

### **Polyethylén (PE)**

Všechny typy PE mají vysokou krystalinitu. Tepelná odolnost není příliš vysoká. PE má vysokou houževnatost a tažnost, je velmi dobře stálý vůči většině kyselin a zásad. Zcela odolává vodě.

*Všeobecná použití:* skladovací a přepravní nádoby, mořící vany, zaklady řezacích strojů, ozubena kola.



Obr.12. Polyethylén (PE) (17)

Nejvýznamnější polyethylény:

- *PE-High Density (PE-HD)* je polyetylén s vysokou hustotou, vyrobený nízkotlakým lisováním.
- *PE-High Molecular Weight (PEHMW)* má zvýšenou molekulovou hmotnost, a tedy i vyšší pevnost.
- *PE-Ultra High Molecular Weight* je typ polyetylénu s maximální molekulovou hmotností. V důsledku toho má PE-UHMW vynikající hodnoty, co se týče odolnosti proti oděru a kluzných vlastností. (17) (18)

### **Polypropylen (PP)**

Polypropylen (PP) je termoplastický polymer patřící mezi nejběžnější plasty. Polypropylen vyniká velmi dobrou chemickou a mechanickou odolností, má výborné dielektrické vlastnosti a je odolný proti stárnutí.

*Všeobecná použití:* používá se v mnoha odvětvích potravinářského a textilního průmyslu a v laboratorním vybavení. Obaly, fólie, vlákna, sterilizované lékařské potřeby.



Obr.13. Polypropylen (PP) (17)

Nejvýznamnější Polypropyleny:

-*PP-Homopolymer (PP-H)* je mnohostranně použitelný plast s vysokou odolností proti chemikáliím a vynikající tepelnou odolností.

-*PP-Homopolymer* je vhodný pro výrobu nádrží a konstrukčních dílů pro chemické přístroje a zařízení, vyžadující vysokou pevnost a vynikající odolnost proti chemikáliím.

-*PP-Random-Copolymer (PP-R)* má zlepšenou rázovou houževnatost ve srovnání s PP-H. Současně však má sníženou tuhost a pevnost.

-*PP-Block-Copolymer (PP-B)* má lepší rázovou houževnatost než PP-H, zvláště při nízkých teplotách. PP-B je tužší než PP-R.

-*PP-flame resistant (PP-F)* je homopolymerní polypropylén, vyplněný ochrannými látkami, které ztěžují zapálení/hoření. Tento materiál je i přes přidání ochranných látek proti ohni zdravotně nezávadný. (16)(17)(18)

### **Polyamid (PA)**

Typické polyamidy jsou v tuhém stavu ze 30 až 50 % krystalické a neprůhledné.

Mechanické vlastnosti jsou závislé na typu PA, molekulové hmotnosti a obsahu vody.

PA jsou pevné a houževnaté. Mají vysokou odolnost proti opotřebení a dobře tlumí rázy a chvění.

*Všeobecná použití:* ozubena kola, kluzná ložiska, těsnicí kroužky, vodící prvky.



Obr.14. Polyamid (PA) (17)

Nejvýznamnější polyamidy:

- PA 6 je univerzální plast pro konstrukci a údržbu strojů.
- PA 6 G (*Guss/odlitek*) je pevný homogenní materiál s nízkým napětím a vysokým stupněm krystaličnosti. Ve srovnání s PA 6 má zlepšenou odolnost proti oděru a opotřebování a vyšší rozměrovou stálost.

- *PA 6.6* je díky své mechanické a tepelné stálosti, zvýšené odolnosti proti tečení, dobrým kluzným vlastnostem a odolnosti proti oděru optimální pro automatické obrábění.

- *PA 12* je typ polyamidu s minimálním pohlcováním vlhkosti a tedy i nejvyšší rozměrovou stálostí.

- *PA 6 GF/PA 12 GF* Vykazuje – při dodržení vysoké odolnosti proti oděru – vyšší pevnost, tuhost, odolnost proti tečení a rozměrovou stálost ve srovnání s nezpevněným *PA 6*, popř. *PA 12*. Tento typ polyamidu umožňuje použití při vysokých teplotách a při obrábění má menší sklon k vytváření ostřin.

- *PA 6 + MoS<sub>2</sub>* vykazuje po přidání siřníku molybdenitého zlepšené kluzné vlastnosti a charakteristiky odolnosti proti oděru a velmi dobré vlastnosti pro nouzový chod. (17)(18)

### **Polyoxymethylen (POM)**

Pevný, tuhý, mimořádně houževnatý a rázuvzdorný, průhledný, odolný slabým kyselinám, benzínu, oleji, teplotě do 120 °C, neodolá zásadám a aromatickým uhlovodíkům; křehne při -190 °C.

*Všeobecná použití:* ložiska, pistní kroužky, těsnění, kluzné prvky, vodící součásti ventilační tělesa, kryty.



Obr.15. Polyoxymethylen (POM) (17)

Nejvýznamnější polyoxymethyleny:

- *POM Copolymer (POM C)* je mnohostranně použitelný technický plast s vysokou pevností a tvarovou stálostí.

- *POM Homopolymer (POM H)* vykazuje podobné vlastnosti jako *POM Copolymer*. Na rozdíl od *POM Copolymeru* má tento materiál poněkud lepší mechanické vlastnosti, zvláště co se týče pevnosti v tahu a tlaku. I modul pružnosti má vyšší hodnoty.

- *POM + PE* je polyoxymetylén, modifikovaný polyetylénem. Po přidání tuhého maziva PE (polyetylén) se zlepšují kluzné vlastnosti. Tato příměs působí jako suché mazivo – materiál vykazuje značně lepší vlastnosti chodu nasucho a nouzového běhu.(17) (18)

### **3.2.6 Broušení plastů**

#### **Broušení reaktoplastů**

Broušení reaktoplastů se provádí broušícími kotouči o velké zrnitosti. Je nutné použít vydatné chlazení. Chladicí kapalina brání rozšiřování vznikajícího prachu do okolí a zajišťuje jeho opláchnutí z obrobku.(25)

#### **Broušení termoplastů**

Broušení termoplastů je obtížnější z důvodů jejich nízké teploty tání, jehož výsledkem je zanesení povrchu broušícího kotouče. Broušení termoplastů se provádí broušícími kotouči o velké zrnitosti na bruskách určených pro broušení dřeva nebo na bruskách určených pro broušení kovů. (25)

### **3.3 Keramika**

Keramika je anorganický nekovový materiál s heterogenní strukturou, tvořenou krystalickými látkami o různém složení a uspořádání, které obsahují obvykle větší či menší množství pórů. (12)

#### **3.3.1 Obecné vlastnosti keramiky**

V literatuře se člení na výhodné a nevýhodné vlastnosti.

##### **Výhodné vlastnosti:**

Keramické materiály mají většinou dobrou chemickou odolnost, vysokou teplotu tání, malou tepelnou vodivost, vysokou tvrdost a pevnost v tlaku. Jedna z důležitých vlastností keramických materiálů je nízká elektrická vodivost, kterou využíváme pro výrobu elektroizolačních materiálů. (13)

##### **Nevýhodné vlastnosti:**

Za hlavní nevýhodu se považuje jejich velká křehkost, nesnadná obrobitelnost a velká citlivost na vnitřní defekty.

Korundová keramika je totiž kvůli svým mechanickým vlastnostem (tvrdost, křehkost) velmi obtížně obrobitelná mechanickou cestou. Je možné jen broušení a leštění pomocí diamantových nástrojů. (13)

### 3.3.2 Rozdělení konstrukčních keramických materiálů

Z hlediska zaměření na techniku pro konstrukční účely se držíme dělení podle chemického složení, které rozlišuje tři skupin:

#### Oxidová keramika

- čistá obsahuje 99%  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- polosměsná  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$  ,  
 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2+\text{CoO}$
- směsná  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$   
 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$   
 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2+\text{TiC}$   
 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}+\text{TiN}$  (12)

#### Neoxidová (nitridová) keramika

Jde o velmi širokou škálu materiálů, je možné je považovat za nekovové a kovové bez ostré hranice mezi oběma skupinami. Jsou to materiály s vysokou teplotou tání a to nad  $1800^\circ\text{C}$  a vykazují velmi vysokou tvrdost, dobrou tepelnou a elektrickou vodivost.

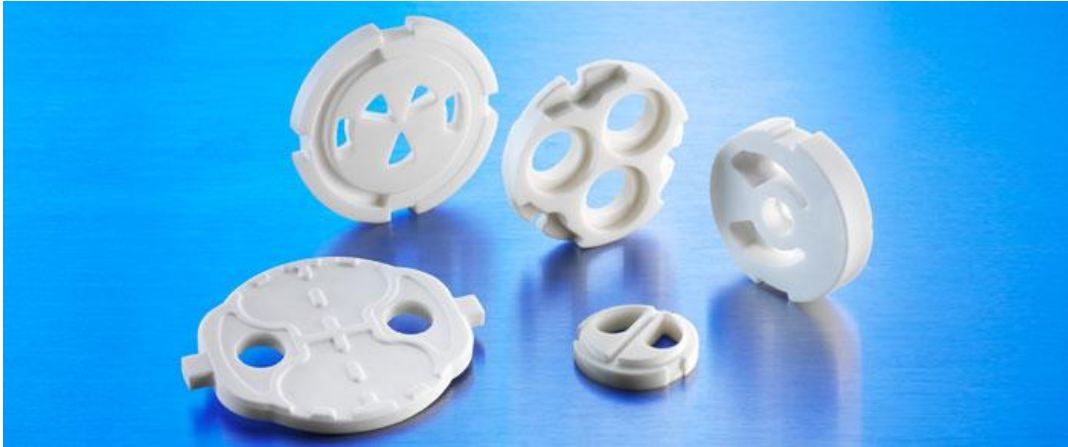
Konstrukční keramické materiály můžeme shrnout do pěti základních skupin:

- keramika na bázi oxidu hlinitého ( je nejrozšířenější konstrukční keramikou)
- karbid křemíku (je používán především pro svou vysokou tvrdost, dobrou odolnost vůči tečení při vysokých teplotách),
- nitrid křemíku (vůbec nejslibnější konstrukční keramický materiál pro vysokoteplotní aplikace),
- sialony – tuhé roztoky soustavy Si-Al-ON (představují spojnicí mezi oxidovými a neoxidovými keramikami)
- oxid zirkoničitý (velmi vysoký bod tání a jedinečná struktura, které umožňuje transformační zhouževnatění). (14)

### 3.3.3 Vybrané keramické materiály

#### Oxidová keramika – oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

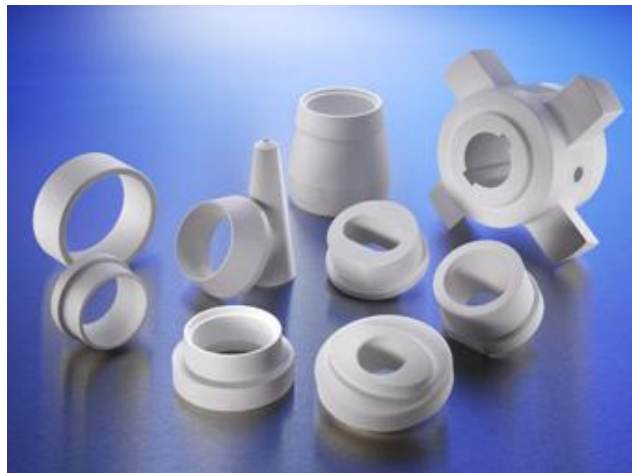
Alumina neboli oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve svých různých úrovních čistoty se používá častěji než jakýkoli jiný vyspělý keramický materiál. Vysoká odolnost proti korozi a opotřebení. (15)



Obr. 16. Oxidová keramika – oxid hlinitý ( $Al_2O_3$ ) (15)

**Oxidová keramika – aluminiumtitanát ( $Al_2TiO_5$ )**

Speciální vlastností aluminiumtitanátu ( $Al_2TiO_5$ ) je jeho vynikající odolnost proti tepelným rázům. Komponenty vyrobené z tohoto materiálu dokážou bez poškození vydržet i nejprudší změny teploty, až o několik set stupňů, ačkoli mají nízkou pevnost. (15)



Obr. 17. Oxidová keramika – aluminiumtitanát ( $Al_2TiO_5$ ) (15)

**Oxidová keramika – oxid zirkoničitý ( $ZrO_2$ )**

Na rozdíl od jiných keramických materiálů je oxid zirkoničitý ( $ZrO_2$ ) materiálem s velmi vysokou odolností proti šíření prasklin. Keramika na bázi oxidu zirkoničitého má rovněž velmi vysokou tepelnou roztažnost a často se proto používá jako materiál ke spojování keramiky a oceli. Je velice nízká tepelná vodivost a vysoká pevnost. (15)

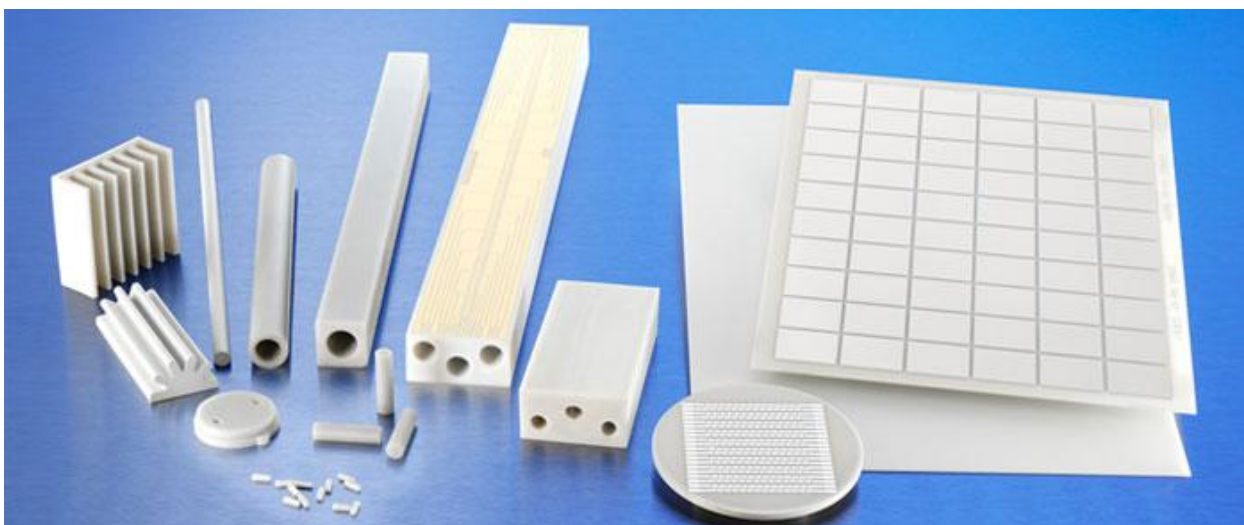




*Obr.18. Oxidová keramika – oxid zirkoničitý ( $ZrO_2$ ) (15)*

### **Neoxidová keramika – nitrid hlinitý (AlN)**

Nitrid hlinitý (AlN) je jediný technický keramický materiál, který nabízí nadmíru zajímavou kombinaci velmi vysoké tepelné vodivosti a vynikajících vlastností elektrické izolace. Díky tomu je nitrid hlinitý předurčen pro použití ve vysoce výkonných a mikroelektronických aplikacích. (15)



*Obr.19. Neoxidová keramika – nitrid hlinitý (AlN) (15)*

### **Neoxidová keramika – karbid křemíku (SiSiC/SSiC)**

Karbid křemíku se chová téměř jako diamant. Nejde jen o nejlehčí, ale také o nejtvrďší keramický materiál, který má vynikající tepelnou vodivost, nízkou tepelnou

roztlačnost a je velice odolný proti kyselinám a louchům. Díky těmto vlastnostem materiálů je karbid křemíku předurčený pro použití jako konstrukční materiál. (15)



*Obr.20. Neoxidová keramika – karbid křemíku ( $SiSiC/SSiC$ ) (15)*

#### **Neoxidová keramika – nitrid křemičitý ( $Si_3N_4$ )**

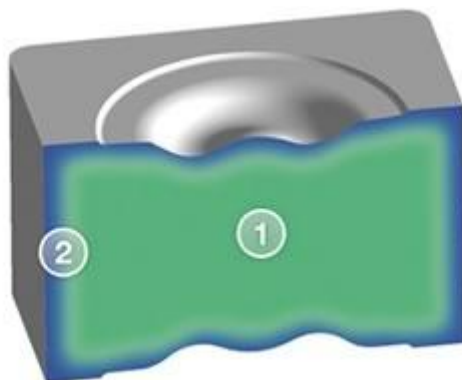
Nitrid křemičitý ( $Si_3N_4$ ) nabízí vynikající kombinaci materiálových vlastností. Tyto materiály jsou téměř stejně lehké jako karbid křemíku ( $SiC$ ), ale jejich mikrostruktura jim dodává vynikající odolnost proti tepelným rázům a jejich houževnatost při lomu zase odolnost proti nárazům a úderům. (15)



*Obr.21. Neoxidová keramika – nitrid křemičitý ( $Si_3N_4$ ) (15)*

#### **SiAlON – silikon alumina nitrid**

SiAlON keramika patří mezi nejnovější materiály používané v technické keramice a souvisí s nitridy křemíku. Vyskytuje se jen v určitých sloučeninách surovin. Keramické materiály pro cílené projektování mechanických vlastností. Charakteristiky tvrdosti a houževnatosti: Houževnaté jádro (1) je obklopeno velice tvrdým povrchem (2) odolným proti otěru. (15)



Obr.22. SiAlON – silikon alumina nitrid (15)

### **Kovový matricový kompozit (MMC)**

Řada aplikací pro vysoce pevné, lehké kovové komponenty – především hliník, ale také hořčík a titan – se neustále rozšiřuje. Motivací pro používání lehkých kovů v automobilovém průmyslu je snaha o redukci hmotnosti a následné snížení spotřeby paliva a emisí. Cíle technického a specifického aplikačního projektování struktur pro takovou keramiku jsou následující:

- Zvýšení mechanické pevnosti
- Ovlivnění tření a opotřebení
- Zlepšení tepelné stability (15)



Obr.23. Kovový matricový kompozit (MMC) (15)

### **3.3.4 Broušení keramiky**

Broušení keramických materiálů je vhodné zejména na rozměrově a tvarově přesné úpravy povrchových vrstev. Při broušení lze dosáhnout přiměřeného úběru materiálu a metoda broušení se obvykle používá mokré broušení diamantovým kotoučem. Diamantové kotouče s jemnými zrnky jsou výhodné proto, že dochází řezat materiál obrobku bez destrukce. Je to způsobeno malou plochou částí, které se dotýkají. Materiál se dostává do styku s pojivem, které se z kotouče vytrhávají a proto se kotouče značně opotřebovávají.

Při broušení keramických materiálů neplatí zákon minimální tloušťky, protože plastická a elastická deformace v zóně před brusným zrnem je téměř nulová. V praxi se tloušťka odřezávané vrstvy reguluje nastavením hloubky řezu, při které se trhliny netvoří - kolem 1 mm. (5)(12)

## **3.4 Sklo**

Sklo je anorganická látka ve stavu, který je analogickým, plynulým pokračováním kapalného stavu, tato látka však dosáhla ochlazení z roztaveného stavu tak vysokého stupně viskozity, že je pro všechny praktické účely pevná. (19)

### **3.4.1 Obecné vlastnosti skla**

Skelný stav vzniká plynulým přechodem z kapalného stavu do stavu pevného. Při tomto ochlazení skla dochází k plynulému růstu viskozity na tak vysokou hodnotu, že se materiál jeví navenek jako pevná látka. Timto způsobem vznikne průhledné sklo. (20)

### **3.4.2 Broušení skla**

Broušení obvykle se používá při obrábění anorganického skla. Málokdy se používá broušení celou plochy, častěji se provádí broušení určitých poškozených míst. (23)

#### **Proces broušení skla**

Společnost KLINGSPOR využívá již déle než 100 let standardy technologie broušení z celého světa a doporučuje další proces broušení skla:

Vytvarované vyfouknuté sklo se nasadí na pomalu se otáčející kotouč a natrhne se diamantem. Lehkým nárazem se odlomí horní část vytvarovaného foukaného skla. Zbude sklo s lehkým odlomeným okrajem, tzv. "ústním okrajem", který se poté například v okrouhlé plechové vaně zabrousí narovno. Ocelový disk je volně posypán brusnými zrnky SiC a je pokrytý vodním filmem. Sklenice se "ústním okrajem" přitiskne na ocelový kotouč a zabrousí se.

Lehkým šikmým držením sklenice se na vnějšku ústního okraje vytvoří „faseta“.

Časová náročnost této metody je vysoká, kromě toho se volná brusná zrna odplavují přes okraj kotouče, aniž by bylo dosaženo jejich úplného opotřebení.

Mnoho podniků se však této technologii a stávajících strojů nechtělo vzdát. Řešením byl vodě odolný brusný tkaninový kotouč, v němž brusná zrna SiC byla ukotvena pomocí pojiva z umělé pryskyřice. Tato změna garantovala nižší časovou náročnost a plné využití brusných zrn. Navíc se pro optimalizaci času na přípravu strojů využívaly většinou kotouče opatřené brusným zrnem po obou stranách.

Lepší metodou je broušení pomocí nekonečných brusných pásů na relativně jednoduchém pásovém stroji na broušení skla s horizontálním a vertikálním vedením brusného pásu. Rychlost řezu se pohybuje mezi 8 a 12 m/s. Permanentní přívod vody zabraňuje vzniku vyšších teplot, které by mohly vést k praskání skla. Brusný pás je zpravidla veden přes kontaktní desku z mechové pryže. Zde lze brousit i tenkostěnné sklenice, aniž by došlo k jejich poškození. Většinou se zde používá zrno 180 k předbroušení a 240 k dobrušování. Ve třetím kroku broušení se předbroušené okraje sklenice vyleští korkovým pásem. (21)

## 4. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo vytipovat neobvyklé materiály, které se zpracovávají technologií broušení. Dalším úkolem bylo popsat hlavní problémy s broušením vybraných materiálů.

V předložené práci jsem ukázal možnosti broušení nekovových materiálů.

Bakalářská práce se zaměřila na dvě oblasti: teorie obecného broušení, kde byli popsány metody broušení, brousící kotouče a brousící podmínky, a druhá, kde jsem ukázal možnosti broušení nekovových materiálů (kompozity, plasty, keramika, sklo) a jejich vlastnosti.

Účelem broušení je dosažení vysoké přesnosti rozměrů, geometrického tvaru a polohy obráběných ploch, drsnosti povrchu. Metody broušení a typy brousících strojů jsou charakterizovány tvarem broušených ploch, způsobem upnutí obrobku a kinematikou pracovních pohybů.

V bakalářské práci jsou podrobně charakterizovány materiály, jejich rozdělení a základní vlastnosti, kterými se tyto materiály vyznačují. Metoda obrábění broušením se používá převážně pro získání požadovaného hladkého povrchu nebo lepší rozměrové přesnosti.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- (1) HLUCHÝ, Miroslav. *Strojírenská technologie: učebnice pro 1. ročník SPŠ strojnických, studijní obor: strojírenská technologie*. 2., opr. vyd. Praha: SNTL, 1986.
- (2) VIGNER, M. – PŘIKRYL, Z. a kolektiv *Obrábění* SNTL-Nakladatelství technické literatury, n.p.1984
- (3) DÖMÉNY, T. Vliv podmínek broušení na průběh zbytkových napětí. Bakalářská práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2006. 42 s.
- (4) HUMÁR, A. TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. část. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program "Strojírnoství". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. 57 s. Dostupné na World Wide Web: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci\\_a\\_nekonvencni\\_metody\\_obrabeni/TI\\_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf)
- (5) MÍŠEK, B. Polymery, keramika, kompozity. 1. vyd. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, 1993. 155 s. ISBN 80-214-0521-X
- (6) KANDUS, Bohumil. Technologie zpracování plastů (HTZ). Přednášky a cvičení. Odbor technologie tváření kovů a plastů, Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojního inženýrství VUT Brno. 2012.
- (7) Pedagogická fakulta MU. Keramika, kompozity, polymery [online]. 2005 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z : <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/fmkomplet3.htm>
- (8) PECINA, P. *Materiály a technologie- plasty*. Brno: MU, 2006.
- (9) CHUNG, D. D. L. Composite materials: Science and applications. 2, illustrated edition. London: Springer, 2010. 349 p. ISBN 1848828306
- (10) ŘASA, J.; GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3- 1.dil*. 2nd ed. Praha: Scietia, 2005. ISBN 80-7183-337-1.
- (11) HUMÁR, ANTON, *Obrábění vláknově vyztužených kompozitů, teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru strojírenská technologie*, Brno : Vutium, 2004. sv. 143. ISBN 80-214-2740-X.
- (12) MENČÍK, J.: *Pevnost a lom skla a keramiky*. 1. vyd., Praha, SNTL- Na- kladatelství technické literatury, 1990, 389 s
- (13) POKLUDA, J., KROUPA, F., OBDRŽÁLEK, L.: *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek (kovy - keramika - plasty)*. 1. vyd., VUT Brno, PC-DIR, s.r.o.- Nakladatelství Brno, 1994, 385 s.



- (14) PTÁČEK, L. A KOLEKTIV: Nauka o materiálu II. 1. vyd., Brno, Akademické nakladatelství CERM,s.r.o., 2003, 392 s
- (15) Přehled material [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z:  
<http://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/aluminum-oxide/>
- (16) SOVA, Miloš a Josef, KREBS. Termoplasty v praxi. 1. vyd. Praha: Verlag Dashöfer, 2001. 2 sv. (580, 425 s.). ISBN 80-86229-15-7.
- (17) Přehled technických plastů [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z:  
[http://www.feronathyssen.cz/cms\\_dokumenty/ftp-prehled-technickyh-plastu.pdf](http://www.feronathyssen.cz/cms_dokumenty/ftp-prehled-technickyh-plastu.pdf)
- (18) BRANDŠTETR, Jiří a kolektiv. *Chemie pro posluchače Fakulty strojního inženýrství*. Brno: VUTIUM, 1999
- (19) ŠAŠEK, L.: Speciální technologie skla I. Praha: VŠCHT, druhé vydání, 1991, ISBN 80-7080-127-1, 146 s.
- (20) Sklo, materiály [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z:  
<http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/sklo.html>
- (21) KLINGSPOR [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z:  
[http://www.klingspor.de/html/index.php?site=3\\_20\\_74&lng=cz&sLanguage=Czech](http://www.klingspor.de/html/index.php?site=3_20_74&lng=cz&sLanguage=Czech)
- (22) HU, N. S., ZHANG, L., C., *Some observations in grinding unidirectional carbon fibrereinforced plastic*, N.S. Hu, L.C. Zhang, Some observations in grinding unidirectional carbon fibre-reinforced plastics, Journal of Materials Processing Technology, Volume 152, Issue 3, 30 October 2004, Pages 333-338, ISSN 0924-0136, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.374>.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604007514>)
- (23) KAČALOV, N.: *Technologie shlifovki i polirovki listovogo stekla*. Leningrad, 1958 (КАЧАЛОВ, Н.: *Технология шлифовки и полировки листового стекла*. Ленинградское отделение, Издательства академии наук СССР 1958 г.)
- (24) Letecký a kosmický průmysl [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z:  
[http://www.taegutec.cz/download/prumysl/TT\\_industry\\_AEROSPACE\\_2011-04cz.pdf](http://www.taegutec.cz/download/prumysl/TT_industry_AEROSPACE_2011-04cz.pdf)
- (25) ] ŘASA, Jaroslav, GABRIEL, Vladimír. *Strojírenská technologie 3 : Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 1. vyd. Praha : Scientia, 2000. 2 sv. (256, 221 s.). ISBN 80-7183-207-3.
- (26) CARBORUNDUM ELECTRITE [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z:  
<http://www.carborundum.cz/?p=ke-stazeni>



(27) Podstata broušení [online].[cit.2015-05-25]. Dostupné z:

<http://zoei.sssebrno.cz/brouseni---podstata-brousici-nastroje-tvary-a-znaci-kotoucu/>

(28) Sýkora, R., Obrábění kompozitních materiálů, ZČU v Plzni, 2012

(29) HUMÁR, A. Technologie I. [online]. Technologie obrábění-3.část. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005, 57 s. Dostupné na World Wide Web:

[http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci\\_a\\_nekonvencni\\_metody\\_obrabeni/TI\\_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf)

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr.1. Geometrie brousícího nástroje (27)
- Obr.2. Povrch skla po broušení (23)
- Obr.3. Značení brousícího kotouče (10)
- Obr.4. Obvodové vnější broušení „dokulata“ radiálním způsobem (29)
- Obr.5. Silové poměry při obvodovém axiálním broušení „dokulata“ (29)
- Obr.6. Obvodové axiální broušení (29)
- Obr.7. Závislost horizontální brusné síly na úhlu orientace vláken. (22)
- Obr.8. Závislost vertikální brusné síly na úhlu orientace vláken (22)
- Obr.9. Vliv úhlu orientace vláken na drsnost (22)
- Obr.10. Schéma odebírání materiálu s orientací vláken  $\theta > 90^\circ$  (22)
- Obr.11. Polyvinylchlorid (PVC) (17)
- Obr.12. Polyethylén (PE) (17)
- Obr.13. Polypropylen (PP) (17)
- Obr.14. Polyamid (PA) (17)
- Obr.15. Polyoxymethylen (POM) (17)
- Obr.16. Oxidová keramika – oxid hlinitý ( $Al_2O_3$ ) (15)
- Obr.17. Oxidová keramika – aluminiumtitanát ( $Al_2TiO_5$ ) (15)
- Obr.18. Oxidová keramika – oxid zirkoničitý ( $ZrO_2$ ) (15)
- Obr.19. Neoxidová keramika – nitrid hlinitý (AlN) (15)
- Obr.20. Neoxidová keramika – karbid křemíku (SiSiC/SSiC) (15)
- Obr.21. Neoxidová keramika – nitrid křemičitý ( $Si_3N_4$ ) (15)
- Obr.22. SiAlON – silikon alumina nitrid (15)
- Obr.23. Kovový matricový kompozit (MMC) (15)