

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

**Ústav technologie obrábění, projektování
a metrologie**

**VLIV MODIFIKOVANÝCH BRUSNÝCH
MATERIÁLŮ NA INTEGRITU POVRCHU**

Bakalářská práce

Autor: Jan Mistr

Studijní obor: Teoretický základ strojího inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jan Šimota

Praha 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovával samostatně pod vedením svého vedoucího bakalářské práce a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

Jan Mistr

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Janu Šimotovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Bc. Richardu Stankovi za pomoc při překladu anglických textů a také mé rodině, která mě podporovala.

Anotace

Tato práce pojednává o využití modifikovaných brusných materiálů při hloubkovém broušení a jejich vlivu na integritu povrchu. V práci jsou popsány podstata a principy technologie broušení, jednotlivé složky integrity povrchu, struktura a rozdělení brusných kotoučů. Dále pak byl proveden rozbor silového zatížení při broušení hranolů z Inconelu 713LC (Low Carbon) dvěma vybranými kotouči. Brusné kotouče byly porovnány z hlediska silové zátěže, mikrostruktury, tvořené třísky, dosahované drsnosti a profilu povrchu.

Klíčová slova

Hloubkové broušení, modifikované materiály, Inconel 713LC

Annotation

This thesis deals with the use of innovated grinding materials used in creep feed grinding and their effect on the surface integrity. The thesis describes the basic principles of the technology of grinding, individual components of surface integrity, the structure and different categories of grinding wheels. Moreover an analysis of force load was conducted, during the grinding of a joist made of Inconel 713LC (Low Carbon), using two selected grinding wheels. These wheels were compared by different criteria: force load, microstructure, chip volume and the achieved surface roughness and profile.

Key words

Creep feed grinding, innovated grinding materials, Inconel 713LC

Obsah

Prohlášení	3
Poděkování	4
Anotace	5
Annotation	5
1. Seznam použitých symbolů a vzorců	8
2. Úvod	10
3. Broušení	11
3.1. Podstata broušení	11
3.2. Kinematika broušení	12
3.2.1. Řezné podmínky broušení	12
3.2.2. Síla řezání při broušení	13
3.2.3. Ekvivalentní tloušťka broušení	13
3.3. Integrita povrchu	14
3.3.1. Drsnost a profil	15
3.3.2. Tepelné jevy	17
3.3.3. Zbytková napětí	19
3.3.4. Trhliny	20
3.4. Tvorba třísky	21
3.5. Stroje	22
3.5.1. Rovinné brusky	23
3.6. Typy broušení	24
3.7. Rovinné broušení	26
3.7.1. Rovinné broušení obvodem kotouče	27
3.7.2. Rovinné broušení čelem kotouče	28
3.8. Tvarové broušení	30
3.9. Hloubkové broušení	31
4. Brusné kotouče	33
4.1. Pojivo	33
4.2. Materiály brusných kotoučů	34
4.2.1. Klasické (konvenční) materiály	34
4.2.2. Výkonové (supertvrdé) materiály	35
4.2.3. Modifikované (inovované) materiály	37
4.3. Otváření kotoučů	42
4.4. Řezné prostředí při broušení	43
5. Těžkoobrobitelné materiály	45

6. Návrh experimentálního broušení	46
6.1. Materiál obrobku – Inconel 713LC	47
6.2. Univerzální bruska na plocho Mikronex BRH 20 CNC	48
6.3. Nástroj	49
6.3.1. Brusný kotouč Tyrolit Strato Ultra	49
6.3.2. Brusný kotouč 3M Cubitron™ II 99% 99DA54/80	50
6.3.3. Mikrostruktura kotoučů	51
6.4. Řezné síly při broušení	54
6.5. Drsnost po broušení	55
6.6. Shrnutí experimentu	56
7. Závěr	58
8. Seznam literatury	59
9. Seznam tabulek	63
10. Seznam grafů	64
11. Seznam obrázků	65
12. Přílohy	66

1. Seznam použitých symbolů a vzorců

γ ...	úhel čela
v_c ...	řezná rychlost
v_w ...	obvodová rychlost obrobku
a_p ...	hloubka řezu
s_p ...	podélný posuv
F ...	výsledná řezná síla
F_c ...	hlavní síla
F_p ...	pasivní síla
F_t ...	posuvná síla
h_{eq} ...	ekvivalentní tloušťka broušení
a ...	hloubka průniku zrna
r_n ...	poloměr zaoblení řezné hrany
Q ...	celkové teplo
Q_o ...	teplo přecházející do obrobku
Q_k ...	teplo přecházející do kotouče
Q_t ...	teplo odcházející s třískami
Q_{ch} ...	teplo odebírané řeznou kapalinou
Q_v ...	teplo vyzářené
θ_o ...	okamžitá teplota
θ_d ...	styková teplota
θ_s ...	střední teplota
a_z ...	tloušťka materiálu
L ...	celková délka broušení
l_n ...	podélný náběh brousícího kotouče

$l \dots$	délka obrobku
$l_p \dots$	přeběh brousícího kotouče
$B \dots$	šířka dráhy nástroje
$s \dots$	boční posuv na zdvih
$v_s \dots$	rychlost posuvu stolu
$i \dots$	počet záběrů
$P_e \dots$	výkon elektromotoru
$R_a \dots$	průměrná aritmetická odchylka profilu
$R_z \dots$	největší výška profilu
$R_{sk} \dots$	šikmost profilu
$R_{mr} \dots$	materiálový poměr
$R_{max} \dots$	maximální výška profilu
$R_t \dots$	celková výška profilu
$R_q \dots$	průměrná kvadratická úchylka profilu

$$Q = F_c \cdot v_c = Q_o + Q_k + Q_t + Q_{ch} + Q_v \quad (1)$$

$$t_{As} = \frac{2 \cdot L \cdot B \cdot i}{v_s \cdot s} \quad (2)$$

$$l_n \geq \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - t\right)^2} \quad (3)$$

$$t_{As} = \frac{2 \cdot L \cdot i}{v_s} \quad (4)$$

2. Úvod

Broušení je jako metoda opracování a úběru materiálu známá člověku již od doby kamenné. Tímto procesem vytvářel člověk většinu nástrojů jak pro lov, tak i pro použití v domácnosti. [1; 2]

První klíčový zlom v broušení vyvolala však až průmyslová revoluce v 18. století v Anglii. Mohutný rozvoj v broušení vyvolala výroba prvního umělého brousícího kotouče (1859) a sestrojení první univerzální brusky (1860). [1; 2]

Od té doby došlo k neskutečnému zdokonalení brusek, a hlavně ke zlepšení vlastností brusných kotoučů. To umožňuje, že je broušení jedním z velmi produktivních způsobů přesného obrábění různých materiálů. [1; 2]

Broušení se v dnešní době využívá jak pro hrubovací, tak pro dokončovací operace. Od dalších metod obrábění lze však broušení využít i k opracování tvrdých až super-tvrdých materiálů. Navíc je možné i v případě supertvrdých materiálů dosahovat dobrých hodnot drsností broušeného povrchu (řádově i setiny μm). [3; 4]

Vývoj již zmiňovaných těžkoobrobitelných (supertvrdých) materiálů vede k potřebě vyvíjet adekvátní brusná abraziva a k výrobě mohutnějších a tužších strojů. [4]

Doposud nejtvrdějším známým brusným abrazivem je syntetický diamant, následovaný kubickým nitridem bóru (CBN). Jejich výroba je však náročná a nákladná. [5]

Hlavním cílem v posledních letech je proto vytvářet modifikovaná abraziva, která by měla obdobné vlastnosti jako diamant či CBN, avšak s menší náročností a přijatelnými náklady na výrobu. [5]

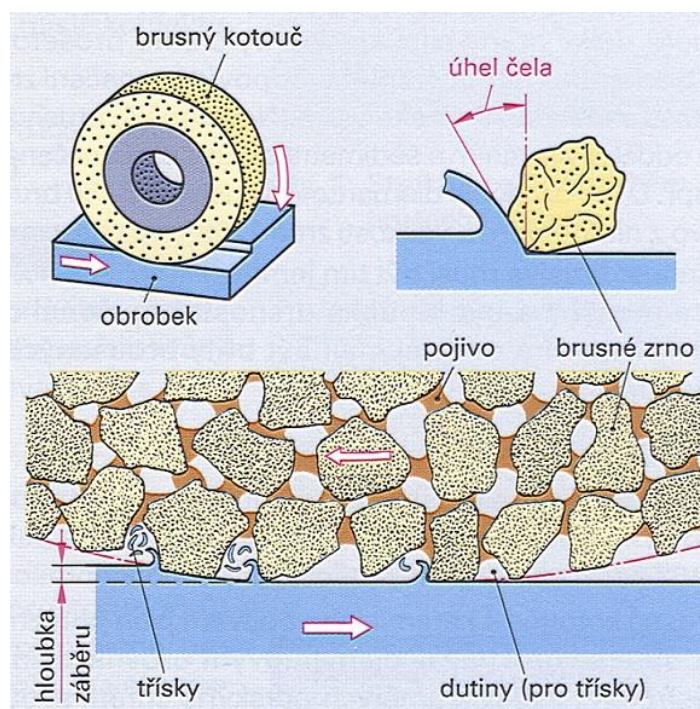
3. Broušení

3.1. Podstata broušení

Broušení je abrazivní metoda obrábění vícebřitým nástrojem, která je využívána pro opracování materiálu s vysokou pevností a tvrdostí. Při broušení je dosahováno takové rozměrové přesnosti a jakosti povrchu, kterých nelze dosáhnout žádnými jinými běžnými metodami obrábění. Broušení je možné využít jak pro hrubovací, tak pro dokončovací práce. [3]

Proces broušení spočívá v nepravidelném úběru materiálu v podobě třísek malých průřezů ($0,0001 - 0,0002 \text{ mm}^2$). K úběru třísek dochází tvrdými zrny brusiva brousícího nástroje (kotouče). Celý proces probíhá při vysokých hodnotách řezné rychlosti ($30 - 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Doba záběru zrn se tak díky daným hodnotám řezných rychlostí pohybuje mezi 10^{-4} až 10^{-5} sekundy. [3]

Brusný kotouč je tvořen zrny, která jsou spojena pomocí pojiv do požadovaného tvaru. Zrna tvoří břity daného kotouče. Jsou rozmístěna nepravidelně po obvodu kotouče, což způsobuje, že břit daného kotouče není souvislý. Geometrie břitu není definovaná a úhel čela γ je většinou záporný (viz obr. 1). [3]



Obr. 1 - Geometrie brusného kotouče [19]

3.2. Kinematika broušení

Kinematiku řezného procesu při broušení je třeba znát pro určení velmi důležitých vztahů jako je délka a tvar řezné dráhy brousících zrn, tloušťka odebírané vrstvy, tloušťka třísky odebrané jedním zrnem kotouče apod. Tyto vztahy nadále umožňují porovnat účinnost různých metod broušení. [6]

Kinematika broušení je jako u jiných metod obrábění určena hlavním (řezným) a vedlejším pohybem. Hlavním, respektive řezným pohybem je rotační pohyb brusného kotouče. Vedlejšími pohyby pak jsou buď přímočarý nebo rotační pohyb obrobku. Výsledný pohyb je dán kombinací hlavního a vedlejšího pohybu. Jednotlivé typy broušení jsou charakteristické svými pohyby a rychlostmi. [7]

3.2.1 Řezné podmínky broušení

Řezné podmínky při broušení se volí vzhledem k požadované přesnosti rozměrů, geometrickému tvaru součásti, drsnosti povrchu a se snahou o maximální efektivnost celé operace. Volbu řezných podmínek ovlivňují materiál obrobku a nástroje, způsob chlazení a broušení. V praxi se určují řezné podmínky pro broušení podle tabulek. [6]

Řezná rychlost v_c [$m \cdot s^{-1}$] je dráha, kterou opíše brusné zrnko na obvodu brusného kotouče za jednu sekundu. Volí se co největší, avšak s ohledem na způsob broušení a druh brusného kotouče. [8]

Při běžném broušení dosahuje řezná rychlost 30 až 35 $m \cdot s^{-1}$. Největší přípustné řezné rychlosti jsou označeny vždy na štítku brousícího kotouče. Nejčastěji se volí:

- 25 - 35 $m \cdot s^{-1}$ pro ocel
- 20 - 25 $m \cdot s^{-1}$ pro litinu [8]

Obvodová rychlost obrobku v_w [$m \cdot min^{-1}$] je 60 – 100 krát menší než obvodová rychlost (= řezná rychlost) brusného kotouče. Zjišťuje se při broušení rotačních částí. [8]

Hloubka řezu a_p [mm] je tloušťka vrstvy materiálu, která je odebrána na jeden záběr brusného kotouče. [8]

Podélný posuv s_p [mm] udává vzájemný pohyb obrobku a kotouče podél broušeného povrchu. Daný posuv se vzhledem k obrobku volí podle šířky kotouče B. Při hrubování je to od 0,3·B do 0,7·B za jednu otáčku. Při broušení načisto je to pak od 0,2·B do 0,3·B za jednu otáčku obrobku. [8]

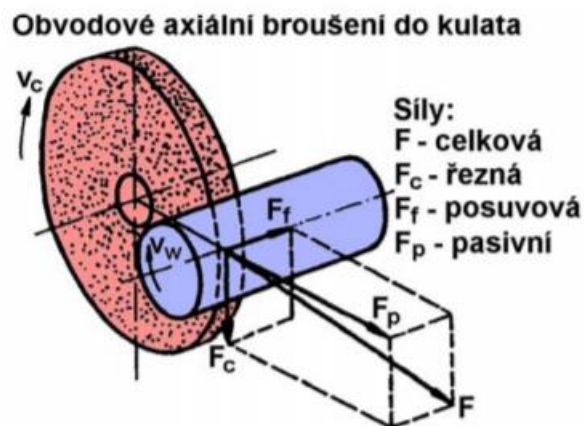
Příčný pohyb v axiálním směru neboli přísuv [mm] určuje hloubku odbrušovaného materiálu. Tento pohyb vykonává brousící kotouč po projetí celé dráhy obrobku, a to buď v jedné úvrati stolu nebo v obou. [8]

Přídavek po předchozí technologii se volí od 0,3 do 0,5 mm. [8]

3.2.2 Síla řezání při broušení

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 (viz obr. 2): [6]

- Hlavní síla F_c – leží ve směru řezné rychlosti
- Pasivní síla F_p – kolmá k broušené ploše
- Posuvná síla F_f – působí ve směru podélného posuvu



Obr. 2 - Síly při broušení [33]

Na velikost síly F má vliv především obráběný materiál, způsob broušení, řezné podmínky, zrnitost brusiva, druh a tvrdost pojiva a struktura brusného kotouče. Velikost síly se zvětšuje se zvětšujícím se otupováním brousícího kotouče. [6]

3.2.3 Ekvivalentní tloušťka broušení

Při broušení je velmi složité vypočítat tloušťku třísky ubírané jednotlivými zrny brusného kotouče. Proto je pro výpočty využita teoretická hodnota ekvivalentní tloušťky broušení h_{eq} . Při jejím odvození se vychází z kontinuity materiálu, který do oblasti řezání

vstupuje a materiálu, který z ní vystupuje. Vrstva odebíraného materiálu o určité tloušťce vstupuje do oblasti řezu určitou rychlostí. Množství vzniklých třísek pak lze teoreticky spojit v plynulou vrstvu, která z oblastí odchází řeznou rychlostí v_c . [3]

Výpočet ekvivalentní tloušťky broušení je závislý na typu broušení, který je pro úpravu materiálu zvolen. Různé rozborů a výzkumy dokázaly, že pomocí hodnoty ekvivalentní tloušťky broušení lze stanovit například řezné síly a odpory, měrné řezné síly a odpory, měrnou práci, výkon a měrný výkon apod. [3]

Za pomocí těchto veličin pak lze s dostatečnou přesností charakterizovat proces broušení i jeho výsledky z hlediska dosažených parametrů obrobené plochy (tvar, rozměry, drsnost získaného povrchu). [3]

3.3. Integrita povrchu

Pracovní povrch brousícího kotouče se skládá z abrazivních zrn rozmístěných v různých vzdálenostech od plochy dotyku brusného kotouče a obrobku. V návaznosti na tom bude při broušení v libovolném normálovém průřezu povrchu brousícího kotouče hloubka průniku abrazivních zrn do obráběného materiálu různá. [9]

Experimentálně se zjistilo, že charakter interakce abrazivního zrna s obráběným materiálem při stejných podmínkách závisí na velikosti poměru

$$\frac{a}{r_n}$$

kde:

a ... hloubka průniku zrna (tloušťka odřezávané vrstvy obráběného materiálu)

r_n ... poloměr zaoblení řezné hrany. [9]

Od daného poměru mohou vznikat tři typy interakce – řezání, plastické stlačení a tření. Pokud je poměr $\frac{a}{r_n} \geq 0,5$, pak nastává řezání. Jestliže je poměr $\frac{a}{r_n} \geq 0,01$, pak dochází k plastickému stlačení. Ke tření neboli k pružnému stlačení dochází v případě, že je poměr $\frac{a}{r_n} \leq 0,01$. [9]

Každé zrnó, které odřezává materiál v kontaktní zóně, prochází třemi stádii – pružnou deformací, plastickou deformací a odebráním třísky. Každé zrnó, které odřezává třísku, musí projít prvními dvěma stádii. Při skluzu projde pouze jedním. [9]

Množství zrn na pracovním povrchu brousícího kotouče, která způsobují jen pružnou deformaci, pružné a plastické stlačení a odebrání třísky, závisí na více faktorech – typu broušení, typu chladící kapaliny, technických charakteristikách brousícího kotouče, podmínkách a typu orovnění. [9]

3.3.1 Drsnost a profil

Drsnost broušených ploch charakterizované mikronerovnostmi a kvalitou povrchové vrstvy (struktura, zbytková napětí) má pro správnou funkci strojních součástí velký význam. Drsnost a profil broušeného povrchu patří mezi základní ukazatele jakosti povrchu a povrchové vrstvy. [6; 10]

Základní definice drsnosti dle normy ČSN EN ISO 4287 stanovuje, že drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě či jejím vlivem. [11]

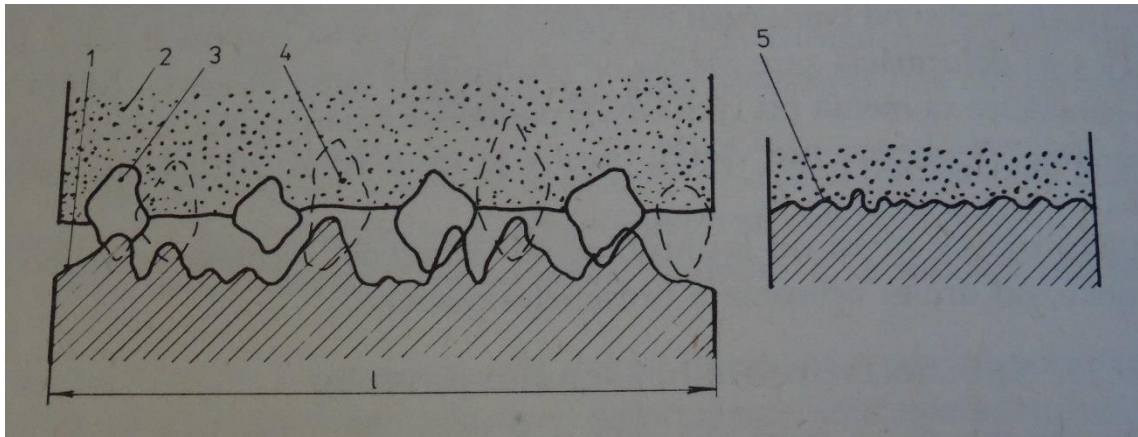
Na drsnosti broušeného povrchu závisí hlavně počáteční opotřebení součástí. Kvalita povrchové vrstvy má zase vliv na opotřebení během provozu. [6]

Při broušení dochází na povrchové vrstvě působením zrn k tvorbě mnoha mikroskopických rýh, které tvoří mikroprofil povrchové vrstvy. Povrchovou vrstvu lze popsat více jak 250 parametry. Nejčastěji se používají tyto parametry: [6; 12]

- průměrná aritmetická úchylka profilu R_a
- největší výška profilu R_z
- celková výška profilu R_t
- průměrná kvadratická úchylka profilu R_q
- materiálová (nosná) křivka

Broušená vrstva získá na daném úseku obrobku po velkém počtu průchodů brousícího kotouče ustálenou drsnost. Tato drsnost závisí na geometrických parametrech a vlastnostech zrna, stupni plastické deformace a chvění technologické soustavy. [6]

Přechod od počáteční k ustálené drsnosti broušeného povrchu lze ilustrovat promítnutím mikroprofilu řezné plochy kotouče a povrchu úseku broušené součásti, se kterým je brousící kotouč ve styku (viz obr. 3). [6]



1 - počáteční stav povrchu před broušením; 2 - brousící kotouč; 3 – první řada brusných zrn; 4 – následující řada brusných zrn; 5 – profil zbroušeného povrchu; l – délka sledovaného úseku

Obr. 3 - Schéma tvoření broušených povrchů [8]

Experimentální výzkumy a pozorování jednoznačně ukazují, že drsnost povrchu a přesnost rozměru závisí na všech podmínkách broušení: typ a charakteristika brousícího kotouče, řezné podmínky, orovnění brousícího kotouče apod. Na řezných podmínkách závisí drsnost nejméně. [8]

Drsnost povrchu a přesnost rozměru se zlepšují při zvyšování obvodové rychlosti kotouče, tj. při rychlostním broušení. Dále lze obojí zlepšit použitím jemnozrnných kotoučů, u kterých je tloušťka odebírané třísky menší. [8]

Zvětšením hodnot posuvů se zhoršuje drsnost povrchu i přesnost rozměru. Velmi dobrých výsledků se dosahuje při broušení bez posuvů tzv. vyjiskřování. Samozřejmě platí, že čím vyšší jsou nároky na kvalitu povrchu, tím dochází i ke zvýšení třídy přesnosti IT (viz tab. 1). [8; 10]

Tab. 1 – Dosahovaná přesnost rozměrů a drsnosti povrchu při broušení [13]

Typ broušení	Přesnost rozměru	Drsnost [μm]
Hrubování čelem kotouče	IT 9 – IT 11	Ra0,8 – Ra6,3
Hrubování obvodem kotouče	IT 9 – IT 11	Ra0,8 – Ra3,2
Načisto čelem kotouče	IT 5 – IT 7	Ra0,2 – Ra1,6
Načisto obvodem kotouče	IT 5 – IT 7	Ra0,2 – Ra0,8
Jemné broušení	IT 3 – IT 4	Ra0,05 – Ra0,4

Kromě drsnosti broušeného povrchu má veliký význam také jeho vlnitost. Vlnitost je souhrn periodických a neperiodických výstupků a prohlubenin. Tvoření vln je při broušení načisto nejvíce ovlivněno pracovními pohyby broušené součásti, brousícího vřeteníku, kotouče a jeho tvarovou odchylkou. Značný vliv má i poměr obvodových rychlostí kotouče a broušené součásti, jejich velikost, počet záběrů kotouče a fázový posun vln při dalších průchodech kotouče. [13]

3.3.2 Tepelné jevy

Broušení zapříčiňuje vznik vysokých teplot v zóně tvoření třísky, čímž dochází k ohřevu kontaktních vrstev brusných zrn a pojiva. Zároveň také dochází k ohřevu povrchové vrstvy obráběného materiálu. [9]

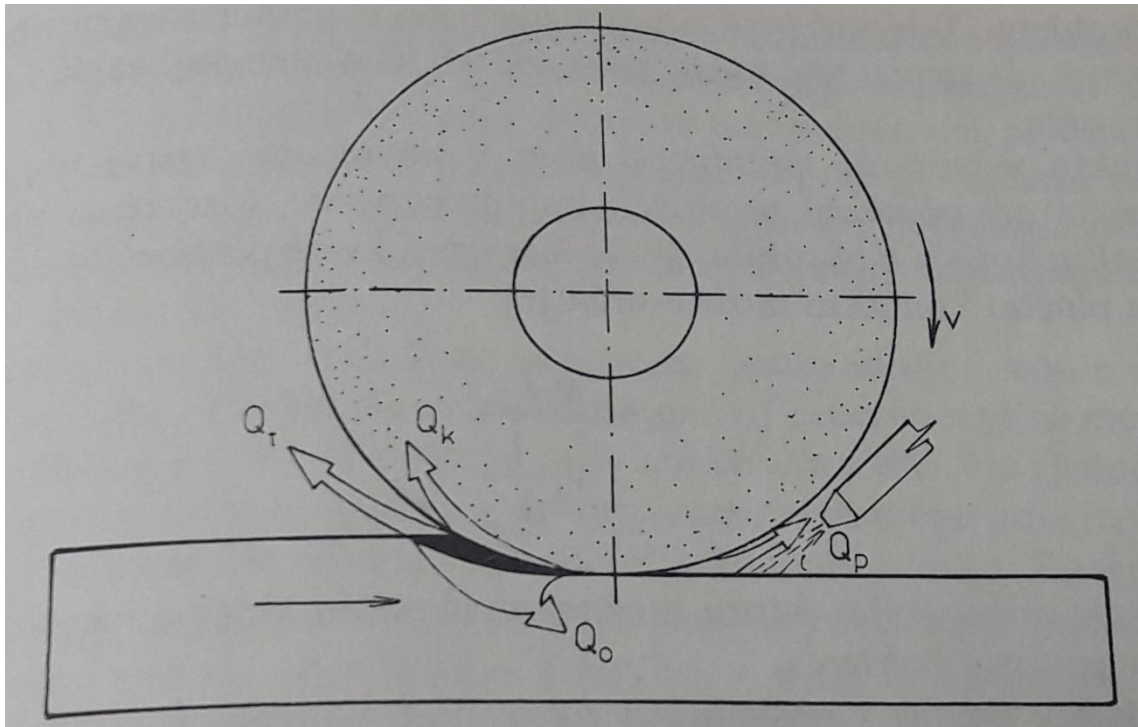
Tepelný proces v povrchové vrstvě se vyznačuje vysokou rychlostí místního ohřevu a krátkou prodlevou na této teplotě. Zároveň dochází k rychlému ochlazení (obzvlášť při použití řezné kapaliny). Většina mechanické práce v procesu mikrořezání se při broušení mění v teplo a pouze její zanedbatelná část se spotřebuje na přeměnu krystalické mřížky obráběného materiálu. [6]

Vzniklé teplo přechází při broušení do obrobku, kotouče, třísky, řezné kapaliny a okolí (viz obr. 4). Pro celkové teplo vznikající při broušení, platí:

$$Q = F_c \cdot v_c = Q_o + Q_k + Q_t + Q_{ch} + Q_v \quad (1)$$

kde:

- Q... celkové teplo
- F_c... hlavní síla ležící ve směru řezné rychlosti
- v_c... řezná rychlost
- Q_o... teplo přecházející do obrobku
- Q_k... teplo přecházející do kotouče
- Q_t... teplo odcházející s třískami
- Q_{ch}... teplo odebírané řeznou kapalinou
- Q_v... teplo vyzářené



Obr. 4 - Teplota při broušení [9]

Až 80 % tepla přechází při broušení do obrobku. Nejmenší část tepla se ztrácí vyzařováním do okolního prostředí. [6]

Vysoké teploty mohou při broušení způsobit poškození povrchové vrstvy obrobku (opal nebo trhlinky), čímž může dojít k znehodnocení obrobku. Tepelný vliv se tak stává jedním ze základních činitelů broušení. [6]

Teploty při broušení se rozdělují na:

- okamžitá teplota θ_o – tvoří se přímo v místě záběru zrna brusiva; po krátkou dobu dosahuje vysokých teplot;
- styková teplota θ_d – vzniká v oblasti styku kotouče a obrobku (v místě broušení);
- střední teplota θ_s – ustálená teplota na povrchu broušeného obrobku.

Okamžitá teplota θ_o se může při broušení materiálů s vysokou pevností za obtížných řezných podmínek přiblížit k teplotě tavení broušeného materiálu. O vysokých okamžitých teplotách pak svědčí proud jisker, a to při dostatečném množství použité řezné kapaliny. Tyto teploty zvyšují plastičnost obráběného materiálu, a tím příznivě ovlivňují odběr třísek v procesu mikrořezání. [6]

Vznik a rozdělení tepla při broušení závisí na všech podmínkách broušení, a to na typu kotouče, řezných podmínkách, mechanických a fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu, vlastnostech řezné kapaliny apod. [6]

Teplota při broušení může být snížena zmenšením intenzity působení zdrojů tepla nebo intenzivnějším odváděním tepla, a to:

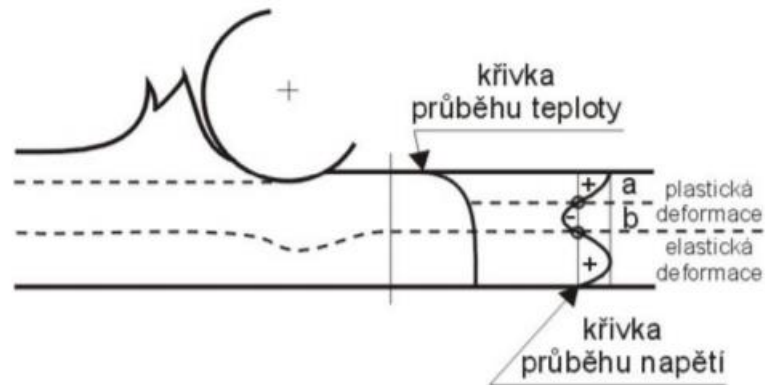
- technologicky – výběrem optimálního způsobu broušení, vhodným typem brousícího kotouče, řeznými podmínkami apod. nebo
- konstrukčně – vhodnou konstrukcí kotoučů pro dané podmínky obrábění, zdokonalováním čistících a chladících zařízení pro řeznou kapalinu apod. [6]

3.3.3 Zbytková napětí

Zbytková napětí jsou velmi důležitou, a v praxi velmi často opomíjenou záležitostí. Než se z počátečního materiálu vytvoří finální součást, projde daný materiál celou řadou operací, postupů a zpracování. Pokud je materiál při některé z těchto operací vystaven působení vnějších sil, tj. je přetvářen, dochází ke vzniku zbytkových napětí. Od těchto napětí jsou pak odvozovány elastické a plastické deformace, jež jsou podstatou tváření a obrábění. [10]

Zbytková napětí jsou taková napětí, která v materiálu existují i bez použití vnějších sil. Jejich velikost a smysl jsou různé podle použité technologie. Zbytková napětí lze rozdělit na napětí tlaková nebo napětí tahová. Tahová jsou kladná, tlaková jsou záporná. Daná napětí se sčítají v absolutních hodnotách, čímž dochází ke kumulaci napětí. Právě nastalou kumulací jsou zbytková napětí pro materiál nebezpečná. Díky tomu může docházet ke vzniku trhlin. [10]

V případě broušení dochází k úběru materiálu za vysokého mechanického zatížení vzájemným třením brousícího kotouče a broušeného materiálu. Toto tření následně vyvolává různě vysoké gradienty teploty. Materiál je tedy podroben vysokému mechanickému zatížení a zároveň vysokému teplu. Společně pak tyto okolnosti vyvolávají v materiálu napětí různých velikostí a smyslů. Vzniklá napětí mohou vyvolat poruchu či degradační stavy výsledné součásti. [10]



Obr. 5 - Průběh zbytkových napětí v povrchové vrstvě broušeného materiálu [10]

Vlivem mechanického zatížení a teploty dojde k rozdělení oblasti plastické deformace na dvě části (viz obr. 5): [10]

- oblast „a“ je oblast, kde dochází k velkému smrštění, a tudíž ke zkrácení vláken;
- oblast „b“ je oblast, kde nedojde ke smrštění vláken. Vlákná jsou tedy trvale protažená.

Vlákná se v oblasti elastické deformace snaží vrátit do původního stavu. Na povrchu materiálu tím dochází k tvorbě tahových napětí. [10]

V případě broušení jsou mnohem důležitější tahová napětí. Ta mají tendenci působit jako koncentrátoři napětí v nerovnostech a mikrotrhlinách. [10]

Cílem je eliminovat možná rizika se vznikem zbytkových napětí, která by mohla způsobovat již zmíněné problémy. Vznik nežádoucích tahových napětí ovlivňují druh zrna brousícího kotouče z hlediska tepelné vodivosti, geometrie, stavby zrna a v neposlední řadě také řezného prostředí. [10]

Kontrola a měření zbytkových napětí jsou časově náročné, a tím pádem jsou v pozadí zájmu kontroly. V případě výzkumu integrity povrchu však nemohou být zcela opomíjena. [10]

3.3.4 Trhliny

Broušením součásti se vytváří nový povrch, který je tvořen určitou topologií. Právě množství, velikost nerovností a zbytkových napětí vedou ke vzniku trhlin. Trhliny se

vyskytují u povrchových nerovností nebo na okrajích tepelných přechodů a souvisí s výskytem koroze a opotřebení. [10]

Působením vnějších sil na broušený materiál dochází k vyvolání napětí, která se koncentrují v již zmiňovaných nerovnostech, mikrotrhlinách, tepelných přechodech a struktuře materiálu. Pokud dojde k překročení určitých mezních stavů, dochází k růstu a šíření vzniklé trhliny. Ta se následně zvětšuje do různých směrů a orientace. Dochází ke změně mechanických vlastností, zejména pevnosti, čímž může docházet k různým opotřebením, únavovým lomům nebo i k destrukci celé součásti. [10]

3.4. Tvorba třísky

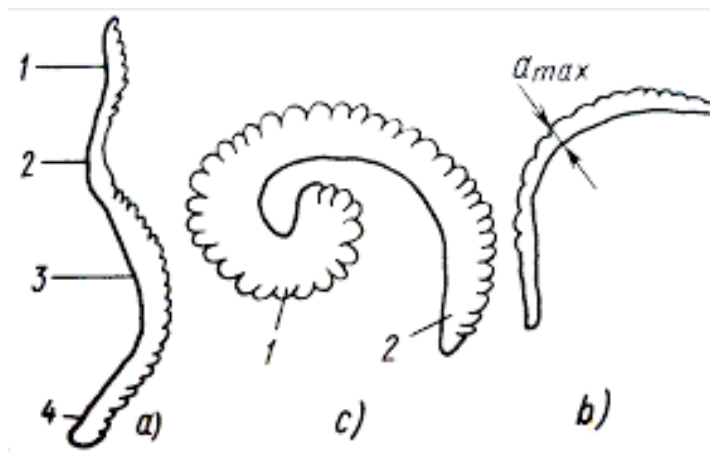
Pod pojmem tloušťka materiálu se rozumí tloušťka materiálu odebíraného jedním brusným zrnem a_z . Lze ji definovat jako vzdálenost mezi plochami řezu vytvářenými dvěma následujícími záběry břitů sousedních zrn. Měří se ve směru kolmém k ploše řezu. [6]

Šířka třísky závisí na tvaru části brusného zrna, které se vřezává do obráběného materiálu. Tloušťka třísky a její deformace zase závisí na profilu obráběné součástky. Všeobecně platí, že šířka třísky je 10 až 20násobně větší než je tloušťka dané třísky. Délka třísky závisí na její tloušťce, od vzájemné rychlosti brusného kotouče a obrobku, od druhu broušení a broušeného povrchu. [8]

Tloušťka materiálu a_z charakterizuje zatížení brusného zrna a ovlivňuje tedy celý proces broušení. Pokud se zvětší hodnota a_z , pak zrna pronikají hlouběji do obráběného materiálu, a tudíž se zrna i pojivo intenzivněji opotřebovávají. Na tloušťce třísky odebírané jedním zrnem brusiva však závisí také řezná síla připadající na jedno zrno, drsnost broušené plochy, okamžitá teplota v místě působení zrna apod. Se změnou a_z se tudíž mění pracovní režim kotouče i podmínky broušení. [6]

Nepravidelné rozložení zrn brusiva na pracovní ploše kotouče způsobuje různou konfiguraci a rozměry třísek vrstev odebíraných jednotlivými zrny. Tvary a rozměry třísek se pro určité typy brousících kotoučů odvíjejí od řezných podmínek. [6]

Při broušení se nejčastěji vyskytují tři tvary třísek: páskovité, zavinuté a segmentovité (viz obr. 6).



páskovitá b) zavinutá c) segmentovitá

Obr. 6 - Tvary třísek [6]

Nejčastější je páskovitá tříška, jejíž tloušťka se postupně zvětšuje v bodech 1 - 4. Zavinutá tříška se vyskytuje méně často. Při hrubování obrobků z houževnatých ocelí mohou být tyto typy třísek značně veliké. Za určitých rezných podmínek může vzniknout tříška segmentovitá, která je nejtlustší ve středí části, tj. v místech a_{max} . [6]

Pokud dojde ke zvýšení obvodové rychlosti obrobku a zachování obvodové rychlosti brousícího kotouče, zvýší se posuv na zrno a tvar třísky bude přecházet ze zavinutého na segmentovitý tvar. V praxi se při broušení objevují kombinace již popsaných tvarů třísek. [6]

Tříška vzniklá při procesu broušení se zachycuje v prostoru mezi sousedními zrny brusiva. Z tohoto prostoru vypadává, když se zrna dostanou mimo styčnou plochu kotouče a obrobku. Pokud je prostor mezi zrny nedostatečně veliký, může být tříška mezi zrna vtlačena tak, že ji proud rezné kapaliny nedokáže od kotouče oddělit. Odpad vznikající při broušení obsahuje kromě třísek také rozmělněné pojivo a drobné částice rozdrceného brusiva. [6]

3.5. Stroje

Stroje určené pro broušení se nazývají brusky. Brusky jsou brousící stroje, které se dělí podle jejich účelu. Pokud se na nich brousí nástroje (ostří se), pak se nazývají bruskami na nástroje (nástrojové). V případě, že se na nich brousí strojní součásti, pak jsou to brusky výrobní (produkční). [19]

Další dělení brusek:

podle přesnosti a tvaru broušení:

- brusky na hrubé broušení bez dostatečného vedení obrobku
- brusky na přesné broušení s dokonalým vedením obrobku
- brusky na ostření nástrojů
- univerzální brusky
- stroje na leštění a hlazení

podle druhu práce:

- brusky stojanové
- brusky hrotové
- brusky bezhroté
- brusky na díry
- brusky rovinné
- brusky na ostření nástrojů
- speciální brusky (na závity, na ozubená kola, klikové hřídele)

3.5.1 Rovinné brusky

Rovinné brusky se vyznačují rychlým obráběním. To je zapříčiněno velkým výkonem stroje a také proto, že na nich lze vyrobit hladké rovinné plochy. Pro hrubé broušení se na tomto typu stroje využívá segmentových nebo hrncových brusných kotoučů. K jemnému broušení pak rovných kotoučů. Brusky, které brousí bokem kotouče, mají větší výkon, brusky, které brousí obvodem kotouče, brousí přesněji. [19]

Rovinné brusky slouží k broušení rovinných ploch, úkosů i tvarů. Používají se hlavně při dokončovacích pracích. V takovém případě se z broušené součásti odebírá malé množství materiálu a obrobek tak získává přesný tvar a malou hrubost povrchu. [19]

Rovinná bruska se skládá ze stojanu s motorem a převodovkou, vodorovného stolu, lože a vřeteníku. Vřeteník slouží ke svislému posuvu brusného kotouče. [19]

K upnutí broušené součásti se využívá více způsobů upnutí. Nejčastějším způsobem je upnutí na elektromagnetickou nebo magnetickou desku. Mezi další způsoby upnutí broušené součásti patří upnutí přímo na stůl stroje nebo upnutí do strojních svěráků pevných, otočných nebo sklopných. [19]

Důležitým požadavkem na přesné broušení je dokonalost rovinné plochy, na kterou je obrobek upnut. Rovinnost upínací desky se pravidelně kontroluje a podle potřeb se přebroušuje přímo na stroji. [19]

Rovinné brusky lze rozdělit na svislé rovinné brusky, vodorovné rovinné brusky a pásové rovinné brusky. [19]

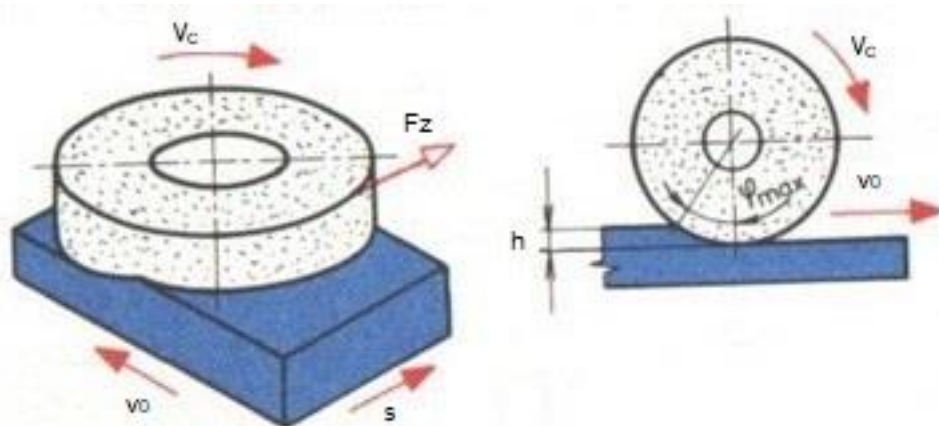
Podle pohybu stolu je možné rovinné brusky rozdělit na rovinné brusky s přímočarým pohybem stolu nebo rovinné brusky s kruhovým pohybem stolu. [19]

3.6. Typy broušení

Broušení lze rozdělit podle několika kritérií. Podle typu brousícího nástroje se broušení dělí na broušení vázaným nebo volným brusivem. Při broušení volným brusivem je využíváno brusivo ve formě prášku pro broušení v kapalině, pastě či obdobnými metodami. Tímto způsobem však nelze měnit tvar součásti, využívají se však všechny řezné hrany brusiva. [8]

Při broušení vázaným brusivem je obrobek broušen brusným kotoučem nebo brusným pásem. Tímto způsobem již lze změnit tvar daného obrobku. [6]

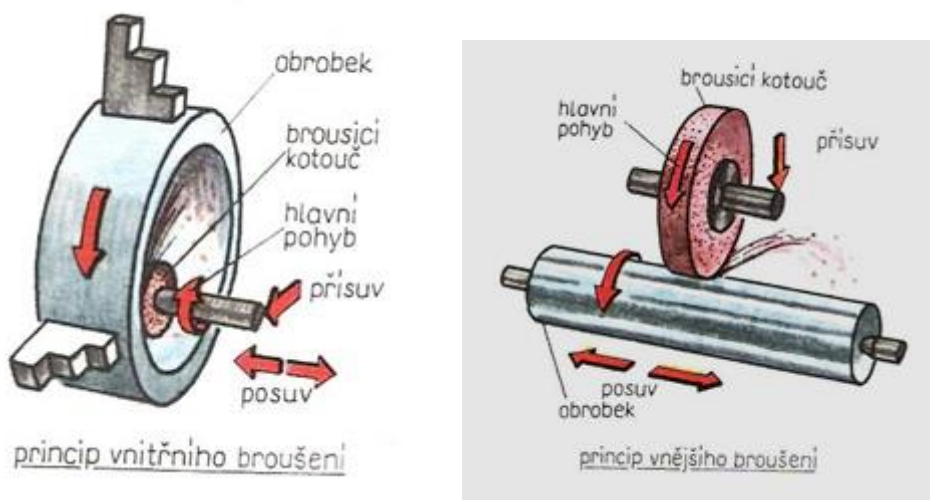
Broušení vázaným brusivem, resp. broušení brusným kotoučem je možné rozdělit podle aktivní části brusného kotouče na broušení obvodové nebo čelní (viz obr. 7). [6]



v_c ...řezná rychlost
 s ... podélný posuv
 v_0 ...posuv stolu

Obr. 7 - Broušení obvodem a čelem kotouče [19]

Podle vzájemné polohy brousícího kotouče a obrobku se broušení dělí na vnější a vnitřní (viz obr. 8). [6]



Obr. 8 - Vnější a vnitřní broušení [19]

Podle smyslu otáčí brusného kotouče a pohybu obrobku se broušení dělí na sousledné a nesousledné. Při sousledném broušení se brusný kotouč otáčí ve směru pohybu obrobku. Při nesousledném broušení se brusný kotouč otáčí proti směru pohybu obrobku. [4]

Podle tvaru broušeného povrchu a způsobu jeho vytváření lze broušení rozdělit na rovinné broušení, broušení dokulata, tvarové broušení, kopírovací broušení. [14]

Podle způsobu úběru materiálu je možné broušení rozdělit na zapichovací, axiální, oscilační, radiální, tangenciální, planetové, integrované a hloubkové. [14]

V případě procesu broušení jako dokončovací metody se metody rozdělují na honování, superfiniš a lapování. [3]

Vzhledem k zaměření praktické části se budu blíže zabývat rovinným, tvarovým a hloubkovým broušením. [3]

3.7. Rovinné broušení

Rovinné broušení je používáno všeobecně jako operace „načisto“ po předcházejícím frézování nebo hoblování. Často se však používá i namísto frézování při velmi tvrdých materiálech nebo při tvrdém povrchu materiálu. Tvrdý povrch v tomto případě podstatně nezkracuje trvanlivost brusných nástrojů. Tento typ broušení je možné rozdělit na broušení obvodem kotouče a broušení čelem kotouče. [15]

Stůl brusky s obrobkem může vykonávat podélný vratný nebo otáčivý pohyb. Přisuv kotouče je potřeba v případě, kdy šířka brousícího kotouče je menší než šířka broušené plochy. [15]

Podélný vratný pohyb stolu je podobný otáčivému pohybu obrobku při broušení rotačních ploch. Rychlost tohoto pohybu se udává v $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$; volí se obvykle v těchto mezích: [15]

Tab. 2 – Rychlost pohybu stolu v závislosti na daném materiálu [15]

Materiál	Rychlost stolu [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]
Měkká ocel	10 - 18
Tvrdá ocel	8 - 12
Litina	10 - 15
Lehké slitiny	10 - 20

Délka podélného vratného pohybu L , je větší než délka broušení plochy l o podélný náběh l_n a přeběh l_p , jejichž délka je zhruba po 10 mm, tedy celkem 20 mm. [15]

Tab. 4 – Přísuv a rychlost stolu v závislosti na broušení [15]

	Přísuv [mm]	Rychlost stolu [m·min ⁻¹]
Broušení nahrubo	0,01 - 0,04	8 - 30
Broušení načisto	0,005 - 0,01	15 - 20

Strojní čas je při rovinném broušení obvodem kotouče stanoven podle: [13]

$$t_{As} = \frac{2 \cdot L \cdot B \cdot i}{v_s \cdot s} \quad (2)$$

kde $L = l_n + l + l_p$

$$l_n \geq \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - t\right)^2} \quad (3)$$

$$l_n \doteq 5 \text{ mm}$$

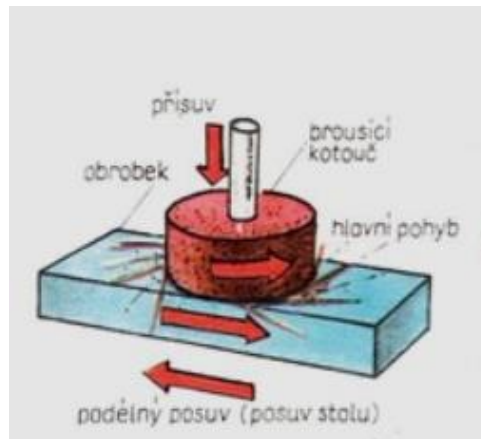
- L ... celková délka broušení [mm]
- l_n ... podélný náběh brousícího kotouče [mm]
- l ... délka obrobku [mm]
- l_p ... přeběh brousícího kotouče [mm]
- B ... šířka dráhy nástroje [mm]
- s ... boční posuv na zdvih [mm]
- v_s ... rychlost posuvu stolu [mm·min⁻¹]
- i ... počet záběrů

3.6.2 Rovinné broušení čelem kotouče

Při tomto typu rovinného broušení se brousí rovnou čelní plochou kotouče (viz obr. 10). Rovinné broušení čelem kotouče není sice tak přesné, ale na rozdíl od broušení obvodem kotouče je mnohem výkonnější. Obvykle je při tomto způsobu broušení průměr

kotouče větší, než je šířka broušené plochy. Pohyb obrobku může být stejně jako u broušení obvodem kotouče přímočarý vratný nebo kruhový. [8]

Technika čelního rovinného broušení zapříčiňuje, že v záběru je stále velká plocha kotouče, která je tak zanesena třískami. Kotouč má proto při pevně nastaveném přísuvu veliký tlak na obrobek, velký brousicí výkon a velký odběr třísky, kvalita broušeného povrchu však není valná. [16]



Obr. 10 - Princip rovinného broušení čelem kotouče [19]

Přímocharý pohyb stolu se využívá především pro sériovou a hromadnou výrobu především malých součástí, jakými jsou např. čelní plochy ozubených kol, pístní kroužky atd. Pro výkonné čelní broušení se používají speciální brusky se dvěma protilehlými brousíci kotouči. Při broušení kotouči větších rozměrů se obvykle používají segmentové hlavice. [8]

Při broušení čelem kotouče koná obdélníkový stůl s obrobkem pouze podélný pohyb, nikoli však příčný posuv. Průměr brusného kotouče D je totiž obvykle větší než šířka broušené plochy b . Brusný kotouč se na konci každého zdvihu nebo dvojdzvihu přisouvá do záběru. Protože styková plocha kotouče s obrobkem je velká, volí se rychlost pohybu stolu v_0 menší než při broušení obvodem kotouče, a to: [8]

Tab. 5 – Přísuv a rychlost stolu v závislosti na broušení [15]

	Přísuv [mm]	Rychlost stolu [$m \cdot min^{-1}$]
Broušení nahrubo	0,015 - 0,04	4 - 12
Broušení načisto	0,005 - 0,01	2 - 3

Při broušení čelem kotouče na bruskách s kruhovým stolem je podélný vratný pohyb nahrazen plynulým otáčivým pohybem kruhového stolu. Obvodová rychlost obrobku v_0

se volí 10 - 40 m·min⁻¹. Přísuv se volí při vyhrubování 0,015 – 0,030 mm a při broušení načisto 0,005 mm na jednu otáčku. [8]

Strojní čas je pro rovinné broušení čelem kotouče stanoven takto: [13]

$$t_{As} = \frac{2 \cdot L \cdot i}{v_s} \quad (4)$$

kde $L = l_n + l + l_p$ při hrubém broušení

a $L = l_n + l + l_p + D$ při broušení načisto

$$l_n \geq \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - t\right)^2} \quad (3)$$

$$l_n \doteq 5 \text{ mm}$$

- L ... celková délka broušení [mm]
- l_n ... podélný náběh brousícího kotouče [mm]
- l ... délka obrobku [mm]
- l_p ... přeběh brousícího kotouče [mm]
- D ... průměr brousícího kotouče [mm]
- v_s ... rychlost posuvu stolu [mm·min⁻¹]
- i ... počet záběrů

3.8. Tvarové broušení

Kromě jednoduchých tvarů je ve strojírenství třeba často vybrousit také složité tvary například u kotoučových nožů, stopkových fréz, vrtáků, šablon nebo různých tvarových kalibrů. Těchto tvarů lze docílit v zásadě dvěma způsoby: [3]

- profilovými kotouči (viz obr. 11),
- kotouči s obvyklými tvary, přičemž kopírovací pohyb vykonává brusný kotouč nebo obrobek, případně je tvar definován číslíkově v programových blocích a realizován pomocí číslíkového řízení (CNC brusky).



Obr. 11 - Broušení lopatek profilovými kotouči [17]

Pro tvarové broušení se používají jednoduché nebo speciálně upravené (kopírovací) hrotové brusky, dále pak bezhroté brusky, rovinné brusky s vodorovným vřetenem, speciální brusky. Obecné tvary na obvodu kotouče se pro přesné práce profilují orovnáváním pomocí diamantu upnutého v přípravku, jehož kopírovací palec se pohybuje po šabloně. Při méně přesných pracích se vytlačuje profil v broušicím kotouči ocelovými kladkami. Přesné profily, tvořené kruhovými oblouky, se tvarují diamantem upevněným v otočných přípravcích (brusičských kolébkách). [3]

3.9. Hloubkové broušení

Hloubkové broušení patří mezi vysoce výkonný způsob broušení. Při tomto typu broušení dochází k úběru materiálu v hloubce několika milimetrů, často i na jeden průchod broušícího kotouče. Použitá rychlost obrobku se pohybuje od 40 do 500 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Řezná rychlost broušícího kotouče se obvykle používá okolo 35 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Speciálním případem je vysokorychlostní broušení, kdy řezná rychlost překračuje 125 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Hloubkové broušení vyžaduje účinné chlazení, které je zajištěno prouděním chladicí kapaliny do zóny broušení za účelem odvodu tepla a zabránění tepelného poškození. Průtok kapaliny skrz zónu broušení může být zvýšen použitím porézních brusných kotoučů. [17]

V případě využití sousledného hloubkového broušení dochází k odbourávání vznikajícího tepla. V případě nesousledného hloubkového broušení může vznikající teplo zasahovat pod hloubku řezu broušení. Vzniklé teplo tak může poškodit již obrobený materiál. [4]

Stroje pro hloubkové broušení musí disponovat vysokou tuhostí. Vzniklé vysoké teploty musí být eliminovány vysokým množstvím chladicí kapaliny, jejíž objem je minimálně 250 – 500 $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$. Porovnání klasického a hloubkového broušení viz tabulka 6. [4]

Tab. 6 – Porovnání technologií broušení [18]

	Klasické broušení	Hlubkové broušení
Rezná rychlost v_c [$m \cdot s^{-1}$]	Do 50 (i do 100)	Až 125 (běžně 35 - 40)
Hloubka řezu a_p [mm]	0,01	Několik mm
Počet pracovních záběrů	Několik	Jeden
Dosahovaná drsnost R_a [μm]	1,6 – 0,2	1,6 – 0,2
Procesní kapalina	Při vyšší v_c	Vždy
Nutnost orovnění kotouče	Ne	Ano
Výkon elektromotoru P_e	2 kW	20 kW

4. Brusné kotouče

Brusné kotouče jsou nástroje, které obsahují zrna brusiva vázaná pojivem v pevný celek. O použití brusného kotouče pro daný typ broušení rozhoduje jeho technická charakteristika: [10]

- tvar kotouče
- druh broušeného materiálu
- velikost zrn
- tvrdost brusného kotouče
- struktura brusného kotouče
- druh pojiva
- rozměry brusného kotouče
- maximální použitelná rychlost kotouče

Brousící kotouče jsou vyráběny lisováním nebo litím směsi brousících zrn a pojiva. Do směsi jsou přidávány pórotvorné látky – spalitelné (např. vosk) a nespalitelné (např. chemická nadouvadla). Tyto látky snižují těsnost vazby pojiva a zrna abrazivního materiálu. Další přísadou je také impregnační látka, která ovlivňuje chování brousícího kotouče (síra, parafín). Brousící kotouče se volí podle tvaru broušené plochy a podle zvoleného typu broušení. [10]

4.1. Pojivo

Pojivo je látka, která spojuje brusná zrna tak, aby měl brusný nástroj požadovaný tvar, rozměr a vhodnou mechanickou odolnost. [10]

Hlavní funkce pojiva:

- udržuje abrazivní zrno při broušení v nástroji
- uvolňuje zrna z vazby kotouče vzhledem k jejich opotřebení
- vytváří podmínky pro styk zrna s obrobkem k vytváření třísky odebíraného materiálu
- odolává odstředivým silám (nejvíce při vysokorychlostním broušení)

Pojiva lze rozdělit na organická a anorganická. Organická pojiva se dělí na pryžová (R) a umělá pryskyřice (B). Anorganická pojiva se dělí na keramická (V), silikátová (S), magnezitová (Mg) a kovová. [10]

4.2. Materiály brusných kotoučů

Při výzkumu nových technologií vznikají nové materiály, které podstatně zvyšují technické a ekonomické parametry brousících kotoučů, a tak i samotné brousící operace. Díky tomu přechází výzkum k vývoji nových modifikací základních druhů brusiva umělého korundu Al_2O_3 a karbidu křemíku SiC , výrobě zušlechtěného abrazivního zrna a k vývoji nových typů abraziv. [10]

Podle obvyklého dělení se materiály brusných kotoučů rozdělují na přírodní a umělé. Mezi přírodní materiály patří například korund, křemen, smirek, diamant. Mezi umělé kotouče patří například umělý diamant, umělý korund, karbid křemíku, karbid boru, kubický nitrid boru. [6]

Brusné materiály lze však také rozdělit na klasické abrazivní materiály, výkonové (super tvrdé) materiály, modifikované (inovované abrazivní materiály). [10]

4.2.1 Klasické (konvenční) materiály

Do skupiny klasických brusných materiálů je možné zařadit umělý korund Al_2O_3 a karbid křemíku SiC . Tyto materiály se používají převážně pro obvodové rychlosti brousícího kotouče od 20 do 50 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Materiály jsou tvrdší a pevnější než jejich běžné přírodní formy. Vykazují nižší opotřebení a jsou vhodné pro vyšší úběry. Jejich hlavní předností však vyniknou pouze u tvrdých povrchů (např. kalených). Nejsou vhodné pro měkké materiály a materiály se zpevňovací schopností. [20]

- **Umělý korund (elektrokorund)**

Umělý korund je krystalický oxid hlinitý (Al_2O_3), který se vyrábí přetavováním oxidu hlinitého v obloukové elektrické peci. Podle obsahu oxidu hlinitého má umělý korund různou barvu, strukturu a vlastnosti. Nejvíce se používá na broušení ocelí, ocelí na odlitky, temperované litiny a tvrdého bronzu. [19]

Dělení umělého korundu a jeho použití:

Tab. 7 – Rozdělení umělého korundu [10]

Označení umělého korundu	Použití
A 99 - bílý	Ocel – kalená, legovaná, feritická, austenitická, ocel na odlitky, litina, tvrdý bronz, nízkouhlíková ocel
A 98 - růžový A98M - manganový	Univerzální pro tvrdé a měkké oceli, legované oceli vyšší pevnosti, šedá litina, ocel na odlitky
A 96 - hnědý	Nízkolegovaná ocel, ocel na odlitky, temperovaná litina
A 97P – polokřehký A97M – mikrokrystalický A97E - zirkonový	Ocel kalená, tvrdé povrchy včetně povrchů zušlechťených

- **Karbid křemíku (karborondum)**

Karbid křemíku je sloučenina křemíku s uhlíkem (SiC), která se vyrábí v elektrických pecích při teplotách 2100 až 2200 °C. Je tvrdší, houževnatější a odolnější než umělý korund. Vyrábí se z křemičitého písku a látek obsahujících uhlík (koks, antracit). Využívá se pro broušení litin, velmi tvrdých a křehkých materiálů (slnuté karbidy), mědi, hliníku, měkkého bronzu apod. [6; 19]

Dělení karbidu křemíku:

Tab. 8 – Rozdělení karbidu křemíku [10]

Označení karbidu křemíku	Použití
C 49 – zelený	Bronz, hliník, slnuté karbidy, vytvrzovaná litina, austenitická a feritická ocel, nástrojové oceli
C 48 - černý	Šedá a bílá litina, mosaz, měď

4.2.2 Výkonové (supertvrdé) materiály

Zvýšené používání těžkoobrobitelných slitin a současné požadavky na zlepšení kvality přispěly k rozhodujícímu vývoji adekvátních strojů a brusných kotoučů. Existují materiály, které není možné jednoduše brousit ekonomicky efektivním způsobem za použití klasických abraziv. Pro broušení takových materiálů se využívají výkonové materiály. [4]

Do této skupiny se řadí umělý diamant a kubický nitrid boru (CBN). Oba materiály vynikají jak vysokou tvrdostí, dobrou ostrotí hran i relativní pravidelností zrn. Výkonové materiály se používají k broušení tvrdých a velmi tvrdých materiálů, superslitin, feritů, keramických materiálů (karbid křemíku, nitrid křemičitý apod.). Vzhledem k dosažení vysoké produktivity a jejich vysoké pořizovací ceně se kotouče z daných materiálů používají při vyšších obvodových rychlostech. Porovnání vlastností obou materiálů viz tabulka 9.[20]

Tab. 9 – Porovnání diamantu a CBN [20]

Charakteristika	Diamant	CBN
Měrná hustota [g·cm ⁻³]	3,52	3,48
Tvrdost podle Knoop [GPa]	60 – 110	40 – 70
Koeficient teplotní roztažnosti [mm · °C ⁻¹]	4,8	5,6
Hranice tepelné odolnosti [°C]	800	1200

- **Diamant**

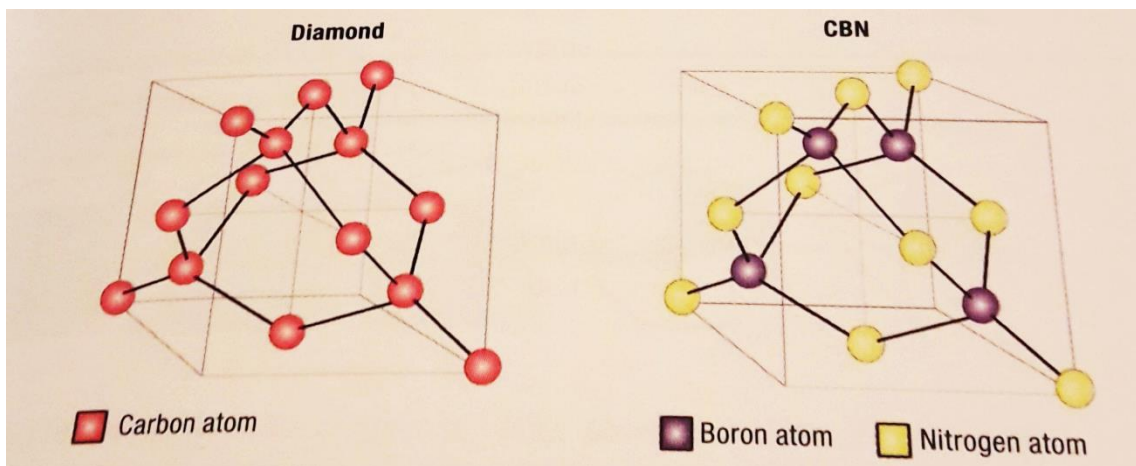
Diamant je netvrším řezným materiálem, který je doposud znám. Z hlediska broušení je důležitá jeho tepelná stálost asi do 800 °C, dobrá tepelná vodivost, vysoký modul pružnosti apod. Není však vhodný pro broušení vysoce pevných ocelí. Je to jediný materiál, který se stále získává z přírodních zdrojů. Více je však využíván ve své synteticky získávané formě. [5]

Přírodní diamant se dobývá na rýžovištích nebo v primárních ložiscích. Diamantové krystaly mají různý geometrický tvar a nejčastěji se používají na výrobu orovnávacích nástrojů kotoučů. [5]

Syntetický diamant se získává pomocí katalyzátoru (chrom, nikl apod.) z materiálu obsahujícího uhlík (grafit). Ke vzniku syntetického materiálu je třeba extrémních tlaků a teplot. Syntetická forma diamantu se používá převážně na výrobu brusných kotoučů. První syntetický diamant byl vytvořen v roce 1955. [6; 5; 21]

- **Kubický nitrid boru (CBN)**

Kubický nitrid boru je syntetický materiál s podobnými vlastnostmi jako má diamant. Po diamantu se jedná o druhý netvrší řezný materiál, který je znám. Krystalická mřížka má stejnou stavbu jako mřížka diamantu, avšak obsahuje atomy boru a dusíku (viz obr. 12). Oproti diamantu má vyšší chemickou stálost a tepelnou odolnost asi do 1200 °C. Disponuje vysokou tepelnou vodivostí a velmi nízkým koeficientem tření. Využívá se hlavně pro broušení vysoce pevných ocelí. [4; 5; 21]



Obr. 12 - Porovnání krystalických mřížek diamantu a kubického nitridu bóru (červeně atomy uhlíku, fialově atomy bóru, žlutě atomy dusíku) [4]

CBN je stoprocentní syntetický materiál, který byl poprvé vytvořen v roce 1957. Vzniká syntézou šesterečného nitridu boru za přítomnosti katalyzátoru ve speciálních kontejnerech na hydraulických lisech při vysokých tlacích a teplotách. CBN je oproti diamantu neutrální vůči železu. [6]

Zrna CBN mohou být díky složitější atomové struktuře formována do více tvarů než v případě diamantu. Zrna mohou nabývat tvarů od osmistěnu až po krychli, nebo od osmistěnu až po čtyřstěn. [4]

4.2.3 Modifikované (inovované) materiály

Tato skupina abraziv je tvořena materiály, které jsou vytvořeny metodou Sol – Gel (řízená krystalizace z roztoku). Touto metodou vzniklá abraziva mají oproti svým konvenčním protějškům relativně pravidelný tvar a delší trvanlivost řezných hran. Oproti výkonným materiálům jsou levnější. A pokud dojde k jejich správnému použití, dokáží zvýšit množství odbrušovaného materiálu, redukovat síly při řezání a snížit teplotu povrchu

broušeného materiálu. Modifikované materiály jsou díky svým vlastnostem, pořizovací ceně a jednoduchosti orovnávaní využívány jako dobrá náhrada CBN kotoučů. [10; 20; 22]

Sol – gel hliníková zrna jsou vyráběná procesem slučování a peptizace roztoku oxidu hlinitého, dokud nevznikne gel. Ten je následně usušen a vstříknut do formy. Počáteční roztok může obsahovat různé minerály, oxidy, zirkonový prach, zirkonový prekurzor nebo jiná kompatibilní aditiva. Aditiva jsou do roztoku přidávána, aby upravila výsledné vlastnosti jako tvrdost, tuhost, vlastnosti sušení a odlamování. Zformovaný gel může být následně tvarován různými metodami jako je lisování, vytlačování či lití. Tvarovaný gel potom musí být opatrně vysušen, aby nedošlo k poškození požadovaného tvaru prasklinami. Po vysušení je možné výsledný produkt vyřezat nebo obrobít do požadované formy nebo rozdrtit na zrna či částice. Po vytvarování může být usušený gel kalcinovaný, aby došlo k odstranění prchavých látek a přeměně všech jednotlivých zrn na oxidy kovů. Kalcifikovaný materiál je potom sprážen a držen na teplotě okolo 1500 °C, dokud nedojde k přeměně alfa alumin monohydrátů na alfa alumina. Výsledná mikrostruktura materiálu sehrává důležitou roli ve výkonu brusných produktů a vysokoteplotních tvrdostech. [22]

Do skupiny inovovaných materiálů lze zařadit materiál SG a jeho další formy TG a DG. [10; 20]

SG abrazivum bylo poprvé vytvořeno americkou firmou Norton Company v roce 1986. Jedná se o keramický oxid hlinitý (Al_2O_3) vyrobený procesem spékání. Výjimečným prvkem těchto abraziv je submikronová velikost zrn, díky níž dochází při broušení k samoostření brusných zrn SG abraziva. Brousící kotouč díky samoostření je pak schopen odřezávat více materiálu, což zvyšuje produktivitu procesu broušení. [5; 23]

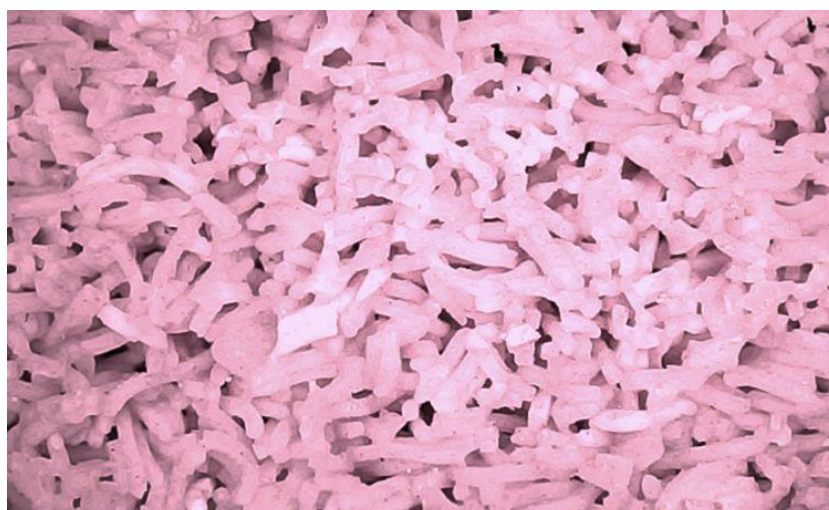
Poněvadž dochází ke stálému ostření řezných hran zrn, dochází k minimalizování vzniku tepla, než jak je tomu u broušení klasickými materiály. [5; 23]

SG abrazivum je tak pevné, že se mísí s běžně taveným abrazivem. Toto mísení zabraňuje nadměrnému vzniku sil při broušení. Typické směsi jsou 5SG (50%), 3SG (30%) a 1SG (10%). Stupně mísení mohou zvýšit životnost kotouče až desetinásobně v porovnání s tavenými abrazivy, ale mohou zvýšit náklady na výrobu samotného kotouče. SG abraziva se používají pro broušení tvrdých, kalených povrchů, ložiskových a nástrojových ocelí. Porovnání SG abraziva a CBN viz tabulka 10. [5; 23]

Tab. 10 – Porovnání CBN a SG [23]

Charakteristika	SG	CBN
Měrná hustota [g·cm ⁻³]	3,87	3,48
Velikost krystalů [μm]	<1	>50
Tvrdoost podle Knoop [GPa]	2150	4500

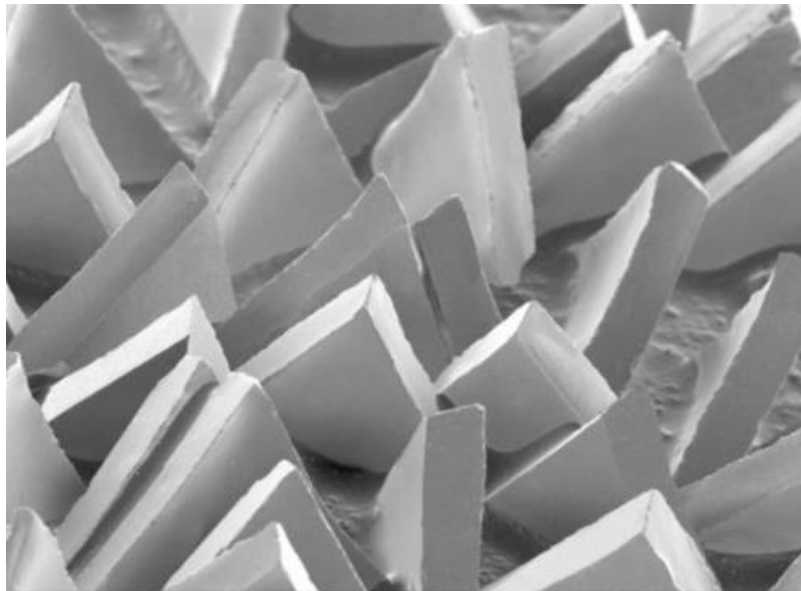
Tvar SG zrna lze řídit také extrudováním (= vytlačování tlakem). Firma Norton dovedla tento koncept až do extrému a představila TG a TGX zrna (viz obr 13). **TG** zrno mělo poměr stran 4:1, **TGX** zrno dokonce poměr 8:1. Zrna TGX mají díky tomuto poměru stran vzhled „červů“. Podlouhlé tvary zrn vedou k náhodné orientaci během procesu míchání. To má za následek vysokou pevnost brusného kotouče, jeho lehkou konstrukci s pórovitostí sedmdesát a více procent a v neposlední řadě také vysokou propustnost. Zrna se dotýkají pouze v několika bodech, kde se jejich vazba koncentruje jako „bodové svary“. Brusné kotouče nabízejí jak vyšší rychlost odstraňování materiálu, tak vyšší rychlost brusných kotoučů v důsledku jejich pevnosti a hustoty. To vše vede ke zvýšení produktivity celého procesu broušení. TG abraziva se používají pro broušení ložiskových a nástrojových ocelí. [10; 5; 24]



Obr. 13 - Struktura TGX zrna [21]

Hlavním cílem dalšího vývoje SG zrna jsou jeho nové formy. Takto byl představen nový inovovaný abrazivní materiál **DG**. Při zatížení dochází k lasturovitému lomu zrn a současně ke zvýšení počtu a ostroty řezných hran. Dochází k zajištění samoostření brusného kotouče a ke zvýšení hodnoty řezivosti kotouče. To umožňuje zvýšit hodnotu úběru materiálu broušeného povrchu. DG abraziva se používají pro broušení tvrdých materiálů vysokými úběry. [10]

Mezi modifikované materiály vytvořené metodou sol-gel patří také abrazivní materiál **Cubitron**. Tento materiál byl poprvé vyroben americkou firmou 3M v roce 1981. Brusné kotouče z tohoto materiálu se skládají z přesně tvarovaných, rovnoměrných trojúhelníků keramického oxidu hlinitého (viz obr 14). Trojúhelníky materiálu jsou navrženy tak, aby při jejich zlomení způsobeném opotřebením došlo ke vzniku sekundárních řezných hran. Na rozdíl od konvenčních materiálů jsou tyto sekundární hrany ostré. [4]



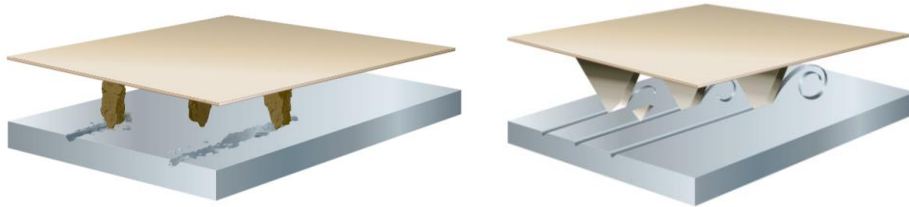
Obr. 14 - Struktura materiálu Cubitron [32]

V případě broušení Cubitron lamelovými kotouči, brusnými disky a pásy jsou trojúhelníky nanášeny vertikálně k podkladu. V případě broušení brusnými kotouči Cubitron jsou trojúhelníky umístěny náhodně vůči broušené ploše. [4]

Podle normy DIN 8580 je broušení definováno jako proces s nedefinovanými řeznými hranami. V případě materiálu Cubitron je však možné broušení označit jako proces s geometricky definovanými řeznými hranami. [4]

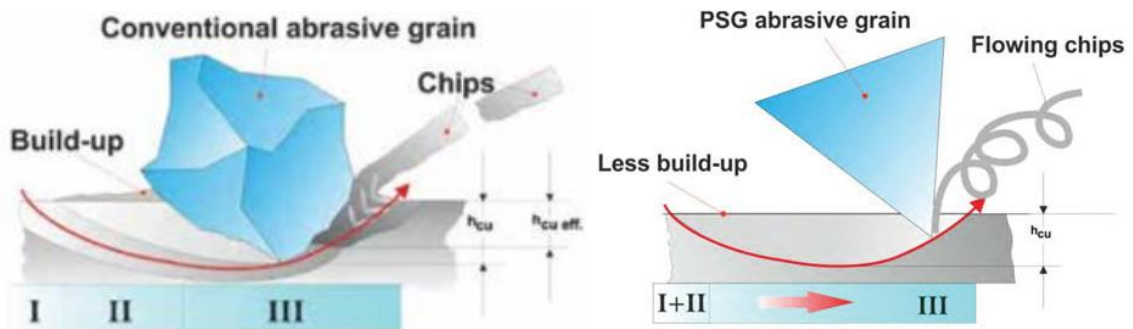
Cubitron díky svým vlastnostem umožňuje rychlejší broušení a delší životnost kotouče. Navíc při broušení Cubitronem nedochází ke vzniku takového tepla jako při broušení konvenčním abrazivem. [4]

Při broušení Cubitronem nedochází v první fázi broušení k pěchování materiálu a v další fázi k vytlačení akumulovaného materiálu po stranách zrna (nedochází k „orbě“) jako je tomu u konvenčních abraziv (viz obr. 15). [4]



Obr. 15 - Porovnání průchodu konvenčního (vlevo) a Cubitron (vpravo) zrna broušeným materiálem [4]

Od prvního záběru zrna do materiálu dochází ke vzniku třísek podobných třískám vznikajícím při soustružení či frézování (viz obr. 16). Kvůli tvaru třísek lze broušení Cubitronem označit také jako mikro frézování. Celý proces broušení probíhá díky tvaru třísek a jejich následnému odvodu s nižším příkonem energie a menším tepelným namáháním broušeného povrchu. [4]



Obr. 16 - Porovnání tvorby třísky u konvenčních abraziv (vlevo) a abraziva Cubitron (vpravo) [4]

Materiály SG, TG, DG a Cubitron jsou materiály na bázi oxidu hlinitého vytvořené metodou sol-gel. Kromě vývoje této technologie dochází také k vývoji elektrofúzní technologie. Výsledkem této technologie je materiál **Abral** (Al-O-N zrna). Materiál byl poprvé vyrobený francouzskou firmou Pechiney Electrometallurgy Abrasives & Refractories v roce 2000. [10; 25]

Výroba brusných zrn AION spočívá v přípravě jemného zrnitého mixu prekurzoru (Al_2O_3 a AlN). Ten se následně tepelně opracuje v oxidačním prostředí, a nakonec nechá zdrsnit pomocí pražení. Celý tento proces vede ke vzniku pravidelné polykrystalické struktury spinelu aluminum oxynitridu. [10; 25]

Abral vykazuje samoostřící vlastnosti a tvorbu nových řezných hran blízké materiálům vytvořených metodou sol-gel. Abrazivum je vhodné pro výrobu brusných nástrojů s keramickým a pryskyřičným pojivem. Jeho využití je dále vhodné pro přesné a vysoce výkonné broušení. Je vhodné pro broušení ocelí s tvrdostí 45 – 60 HRC jako jsou například svařované nerezové oceli. [25]

V budoucnosti se očekává, že materiály jako SG, TG, Cubitron, Abral a další podobné materiály budou stále více dominovat brusnému trhu a bude docházet k vývoji dalších modifikovaných materiálů. [5]

4.3. Orovnávání kotoučů

Orovnáváním brusného kotouče se rozumí jemné obrábění povrchu brousícího kotouče. Při tom dochází k vylamování a tříštění brusných zrn a odstraňování již opotřebovaných zrn brusného kotouče. [19; 26]

Hlavními účely orovnávaní jsou:

- obnovení nebo vytvoření požadovaného geometrického tvaru kotouče
- obnovení řezivosti kotouče
- odstranění broušeného materiálu a prachu z brusného kotouče – nedochází k uhlazení a následnému pálení kotouče
- docílení požadované jakosti broušeného povrchu

Dokonalý brusný kotouč by měl být schopen ostřit se sám. To by bylo možné jen tehdy, kdyby jeho charakteristika (brusivo, zrnitost, tvrdost, pojivo), obvodová rychlost, i rychlost a druh obrobku byly vždy takové, že by docházelo k tříštění nebo uvolňování opotřebovaných zrn dříve, než by kotouč mohl pálit. Tak ideální kotouč je však k dispozici jen málokdy, protože charakteristiku kotoučů nelze udržet v dostatečné a stálé přesnosti. [19; 26]

Brousící kotouče je možné orovnávat:

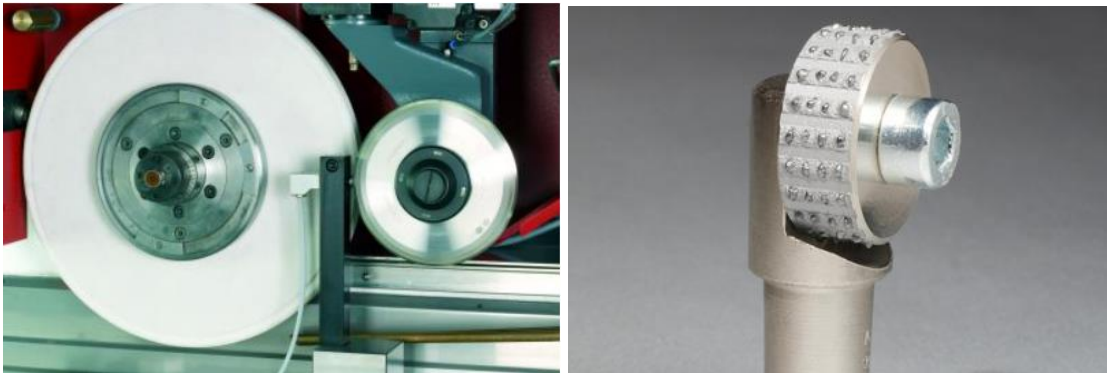
- ručně
- strojně nástroji, tzv. orovnávači

Orovnávání lze provádět:

- kontinuálně – orovnávač je ve stálém kontaktu s brusným kotoučem
- v cyklech

Druhy orovnávačů:

- diamantové orovnávače – monokrystalické, polykrystalické, práškové
- drtící orovnávací nástroje kolečkové či kladkové – kolečkové, kladkové (viz obr. 17)
- orovnávací kameny – karbid křemíku s tvrdým pojivem (viz obr. 17)



Obr. 17 - Kontinuální orovnávač (vlevo) a orovnávač s kotoučem (vpravo) [19]

4.4. Řezné prostředí při broušení

Při broušení se používají různé řezné prostředky v pevném, plynném (vzduch, aerosoly) a kapalném stavu (řezná kapalina). Tyto prostředky mají různá složení a fyzikálně chemické vlastnosti a podstatně ovlivňují produktivitu broušení a kvalitu broušené plochy. [6]

Nejčastěji se používá řezných kapalin. Tyto kapaliny mají chladicí, mazací, řezný a čistící účinek. [6]

Hlavní funkce řezné kapaliny: [20]

- odvod tepla z oblasti styku brusného kotouče a broušeného materiálu
- snížení vznikajícího tepla snížením tření mezi brusným kotoučem a broušeným materiálem
- odvod třísky a zamezení ucpávání pórů brusného kotouče
- podpora tvorby třísky
- ochrana před korozi
- bezpečnost před požárem a explozí

Procesní kapaliny používané pro broušení mají v současné době téměř vyvážený účinek mazací a chladící. Podle jejich složení se dělí na:

- oleje
- emulze
- vodní roztoky chemických látek
- syntetické a polosyntetické kapaliny [27]

V případě olejů se jedná o zušlechtěné minerální oleje, kdy jejich přísady zvyšují tlakovou únosnost a mazací vlastnosti. Moderní oleje disponují sníženou viskozitou a prokazují tak i jisté chladící schopnosti. Pořizovací náklady jsou vyšší, ale jsou kompenzovány vysokou životností. [20; 27]

V případě emulze se většinou jedná o mastné látky rozptýlené pomocí tzv. emulgátoru ve vodě. Emulze spojuje přednosti chladících účinků vody a mazacích účinků olejů. Poskytují i ochranu proti korozi. Tvoří největší skupinu procesních kapalin. [20; 27]

Vodní roztoky chemických látek mají velmi dobré chladící účinky. Jedná se o alkalické roztoky s nedostačující stálostí. Obsahují také přísady k ochraně proti korozi, zlepšují smáčivost a potlačují pěnovost. [20; 27]

Polysyntetické kapaliny obsahují nižší množství minerálních olejů, syntetické pak neobsahují žádné. Složkou kapalin jsou glykoly, které ve vodě emulgují nebo se rozpustí. Tyto kapaliny mají mazací i antikorozi účinky. [20; 27]

5. Těžkoobrobitelné materiály

Mezi těžkoobrobitelné materiály se řadí tzv. superslitiny. Superslitiny jsou skupinou slitin niklu, železa a kobaltu. Disponují vysokou pevností, dlouhou únavovou životností, lomovou houževnatostí, odolností proti tečení (creepu) a prasknutí při vysoké teplotě. Navíc odolávají korozi a oxidaci při vysokých teplotách. [28]

Výhodou superslitin jsou výše zmiňované vlastnosti. Největším problémem však je jejich tvrdost z hlediska obrábění. Z těchto důvodů se pro úpravu tvarů těchto materiálů volí právě broušení. [28; 29]

Kvůli svým výborným vlastnostem se superslitiny využívají při výrobě turbínových lopatek. To jsou strojní součásti, které lze najít od turbín letadlových motorů přes turbíny námořních lodí až po turbíny elektráren. Vzhledem k tomu, že dochází k navyšování účinností těchto strojů, dochází i ke zvyšování nároků na materiály lopatek. U všech turbín jsou nejvíce namáhány lopatky na vstupu turbíny, kdy teploty mohou dosahovat 1500°C i více. Lopatky musí kromě vysoké teploty fungovat dlouhou dobu také v náročném prostředí namáhané vysokým tlakem, vysokou rychlostí otáčení, vibracemi apod. [28; 29]

Materiál vystavený vysoké teplotě, která je pod bodem tání, se však chová jiným způsobem než za normálních podmínek. Když je materiál dlouhodobě vystaven vysokým teplotám v blízkosti bodu tání a zároveň vysokému namáhání, začíná deformace, která vede k poruše namáhaného materiálu. [28; 29]

Z těchto důvodů se na vstupu používají vysoce legované superslitiny na bázi kobaltu (X45, FSX 414 apod.) a niklu (Inconel 713LC, Inconel 718, UDIMET 720, CMSX-6, Rene´N5 apod.). Koncové části jsou z důvodů snížení hmotnosti a menších teplot vyráběny ze superslitin na bázi titanu (Ti811, Ti-6Al-4V, Ti 834 apod.) [30]

V případě, že bude docházet k dalšímu zvyšování teploty v turbínách, bude pravděpodobně potřeba vývoj kompozitních materiálů s keramickou maticí. [30]

6. Návrh experimentálního broušení

Vzhledem k výše popsaným těžkoobrobitelným materiálům určených například k již zmíněné výrobě turbínových lopatek, bylo navrženo experimentální broušení Inconelu 713LC.

Experiment spočívá v porovnání brusných kotoučů Tyrolit Strato Ultra a 3M™ Cubitron II 99 % při rovinném broušení hranolů z Inconelu 713LC (viz obr. 18) za předem stanovených řezných podmínek.

Hranoly jsou ve formě odlitků. Jejich délka je 195 mm a šířka 45 mm. Brusný kotouč je při broušení jedinou proměnnou (stejné podmínky chlazení, stejný NC kód, stejné nastavení měřicí techniky). Pro oba brusné kotouče byly vytipovány dva typy řezných podmínek uvedené v tabulce 11. Z důvodu nízkého výkonu elektromotoru nebyla pro broušení využita celá šíře brusného kotouče. Oba kotouče byly proto orovnány na nižší hodnotu šířky, než byla jejich skutečná. Oba brusné kotouče byly vždy před broušením drážky orovnány.

Tab. 11 – Stanovené řezné podmínky

v_c [$m \cdot s^{-1}$]	a_p [mm]	f [$mm \cdot min^{-1}$]
35	0,8	400
16	0,3	300

Porovnání obou kotoučů spočívá v porovnání řezných sil a příkonů při broušení, dosažených drsností, mikrostruktury kotoučů a tvarů třísek vznikajících při broušení.

Předpoklady experimentu:

- menší řezné síly při broušení v případě kotouče 3M™ Cubitron II 99 %
- menší potřebný příkon při broušení v případě kotouče 3M™ Cubitron II 99 %
- lepší dosažená drsnost broušeného hranolu v případě kotouče 3M™ Cubitron II 99 %

6.1. Materiál obrobku – Inconel 713LC



Obr. 18 – Hranoly z Inconelu 713LC

Inconel 713LC je superslitinou niklu. Tyto superslitiny jsou polykomponentní, žárovevné a žáruvzdorné slitiny pro použití v prostředích s vysokými provozními teplotami. [29]

Slitina Inconelu 713LC (Low carbon) je zhotovena procesem přesného lití metodou vytavitelného modelu. Celkové přípustné složení Inconelu 713LC je v přiložené tabulce 12. Slitina je modifikací slitiny Inconel 713C, avšak obsahuje méně uhlíku. Ke snížení obsahu uhlíku dochází proto, aby teploty solidu a likvidu byly co nejvyšší, ale také kvůli tomu, aby nedocházelo ke tvorbě karbidů. [31]

Tab. 12 – Přípustné rozmezí chemického složení Inconelu 713LC [31]

Prvek	Hmotnostní podíl [%]
Chrom	11 - 13
Molybden	3,8 – 5,2
Uhlík	0,04 – 0,07
Křemík	≥0,05
Síra	≥0,015
Zirkonium	0,05 – 0,15
Niob + Tantal	1,5 – 2,5
Hliník	5,5 – 6,5
Bor	0,005 – 0,015
Titan	0,4 – 1,0
Nikl	Základ

Měrná hmotnost Inconelu 713LC je $8010 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a předpokládané rozmezí teplot likvidu a solidu je od 1288 do 1321 °C. Lící teplota slitiny je běžně 1420 °C. [31]

S růstem teploty do oblasti až 700 °C dochází k nárůstu pevnostních a poklesu deformačních charakteristik. To zapříčiňuje těžkou obrobiteľnost superslitiny kvůli jejímu zpevňování vlivem tepla. Následkem toho dochází k vysokému opotřebení nástroje. Pro opracování materiálu a dosažení požadované přesnosti se nejčastěji používá broušení a leštění. [31]

6.2. Univerzální bruska na plocho Mikronex BRH 20 CNC

Použitý stroj pro experiment (viz obr. 19). Popis a základní parametry přiloženy v příloze.



Obr. 19 - Bruska BRH 20 CNC [34]

Základní technické parametry:

Rozměr pracovního stolu	200 x 600 mm
Otáčky brousícího vřetena	2670, 3820 ot·min ⁻¹
Výkon hlavního motoru	2,2 kW
Hmotnost stroje	1850 kg

6.3. Nástroj

6.3.1 Brusný kotouč Tyrolit Strato Ultra

První brusný kotouč využitý pro experiment je od firmy Tyrolit (viz obr. 20). Jedná se o plochý kotouč vyrobený z umělého korundu s keramickým pojivem. Rozměry kotouče jsou 240x15x50 mm. Je určen ro rovinné a hloubkové broušení zámků lopatek turbín. Vlastnosti kotouče viz tabulka 13.



Obr. 20 - Kotouč Tyrolit Strato Ultra [35]

Tab. 13 – Vlastnosti kotouče Tyrolit Strato Ultra

Průměr	240 mm
Velikost zrna	33
Šíře	15 mm
Tvrдость	A
Průměr uchycení	50
Typ zrna	Umělý korund
Pojivo	Keramické
Tvar	Plochý kotouč
Použití	Hloubkové broušení naplocho

6.3.2 Brusný kotouč 3M Cubitron™ II 99% 99DA54/80

Druhý brusný kotouč využitý pro experiment je od firmy 3M™ (viz obr. 21). Jedná se o plochý kotouč vyrobený z umělého korundu s keramickým pojivem. Je charakterizován přesnou geometrií zrn a jejich trojúhelníkovým tvarem. Ostré řezné hrany kotouče Cubitron II spotřebují méně energie než kotouče z konvenčních materiálů, navíc dobře odvádějí teplo z obrobku. Rozměry kotouče jsou 240x15x50 mm. Určen je pro rovinné a hloubkové broušení zámků lopatek turbín. Doporučené hodnoty broušení s kotouči Cubitron II 99DA viz tabulka 14. [32]



Obr. 21 - Kotouč 3M Cubitron™ II 99%

Tab. 14 – Doporučené hodnoty broušení pro Cubitron II 99DA [32]

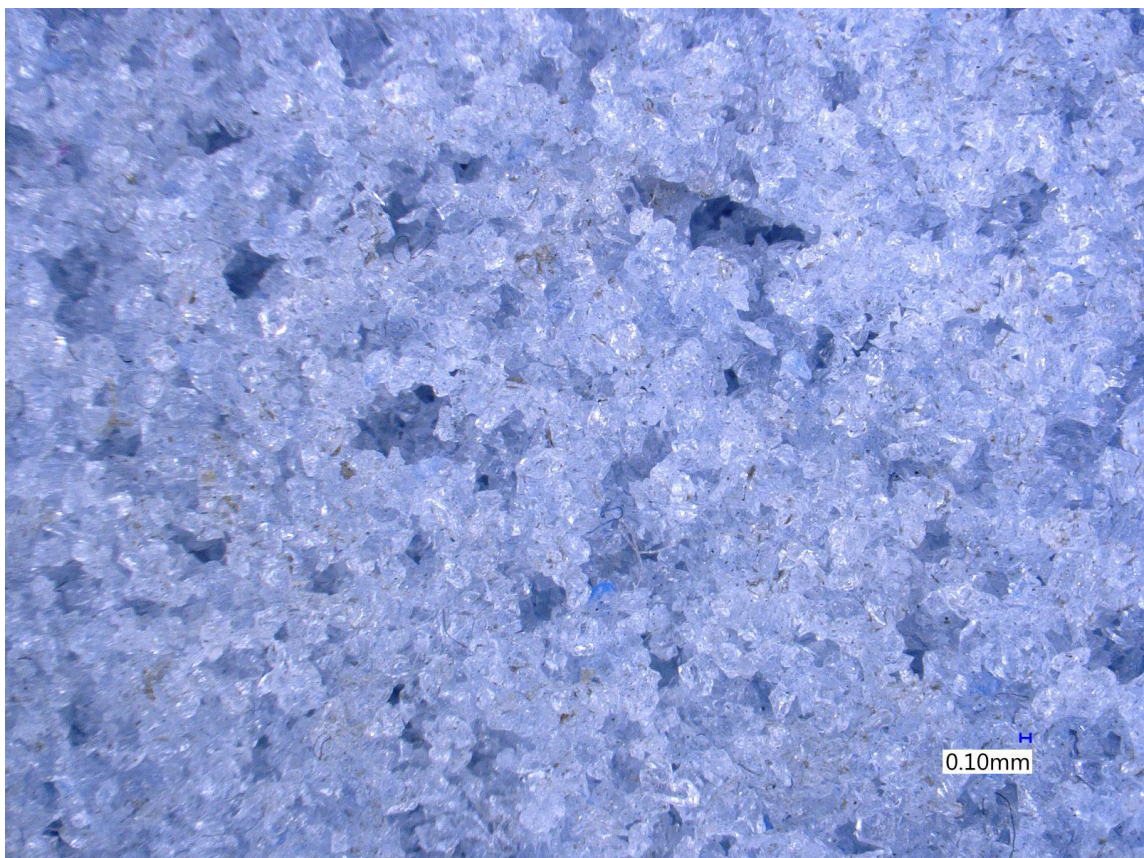
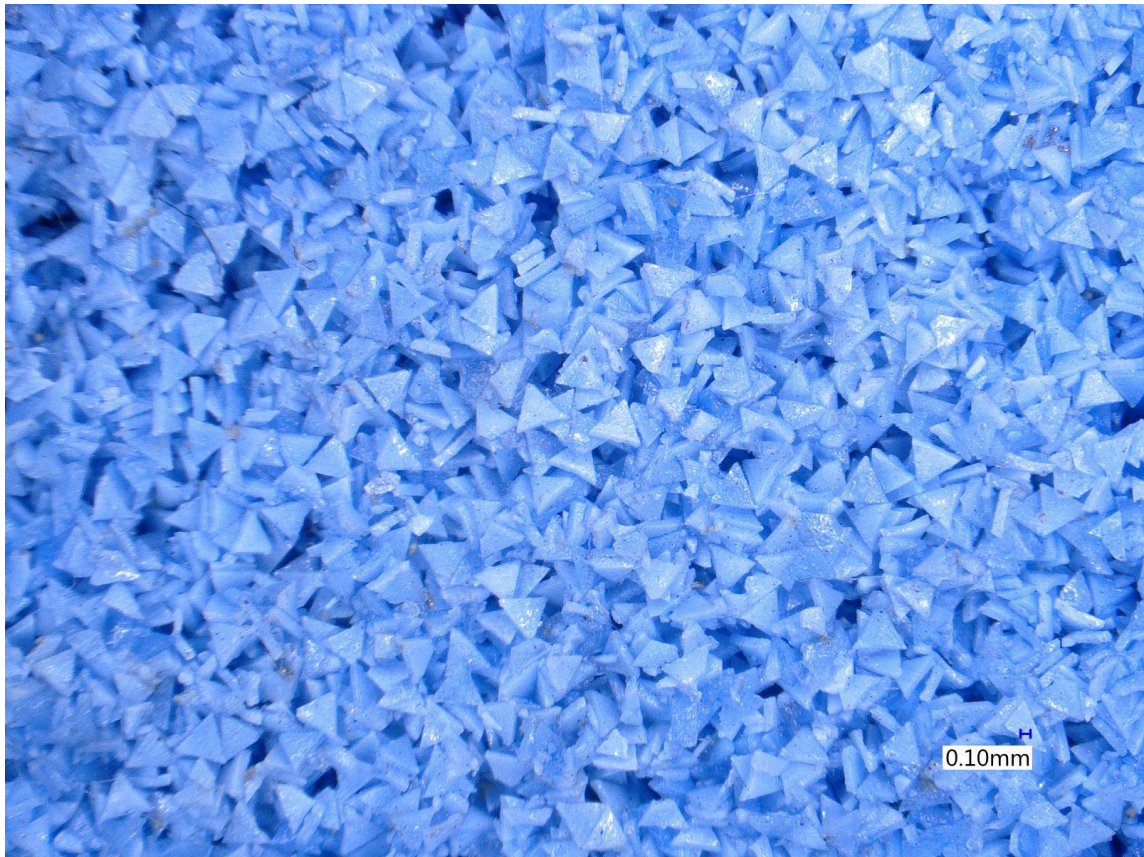
Řezná rychlost v_c	Kalená ocel	$30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
	Zchlazené a temperované	$35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Obvodová rychlost obrobku v_w	Standartní stroje	$3\,500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$
	Vysokovýkonné stroje	$9\,000 - 12\,000 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$
Rychlost odstraňování materiálu $Q'w$	Kalená ocel	$24 - 30 \text{ mm}^3\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
	Zchlazené a temperované	$20 - 23 \text{ mm}^3\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
Množství třísek $V'w$	Hrubování	$4\,000 - 6\,000 \text{ mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$
	Dokončování	$300 - 700 \text{ mm}^3\cdot\text{mm}^{-1}$

6.3.3 Mikrostruktura kotoučů

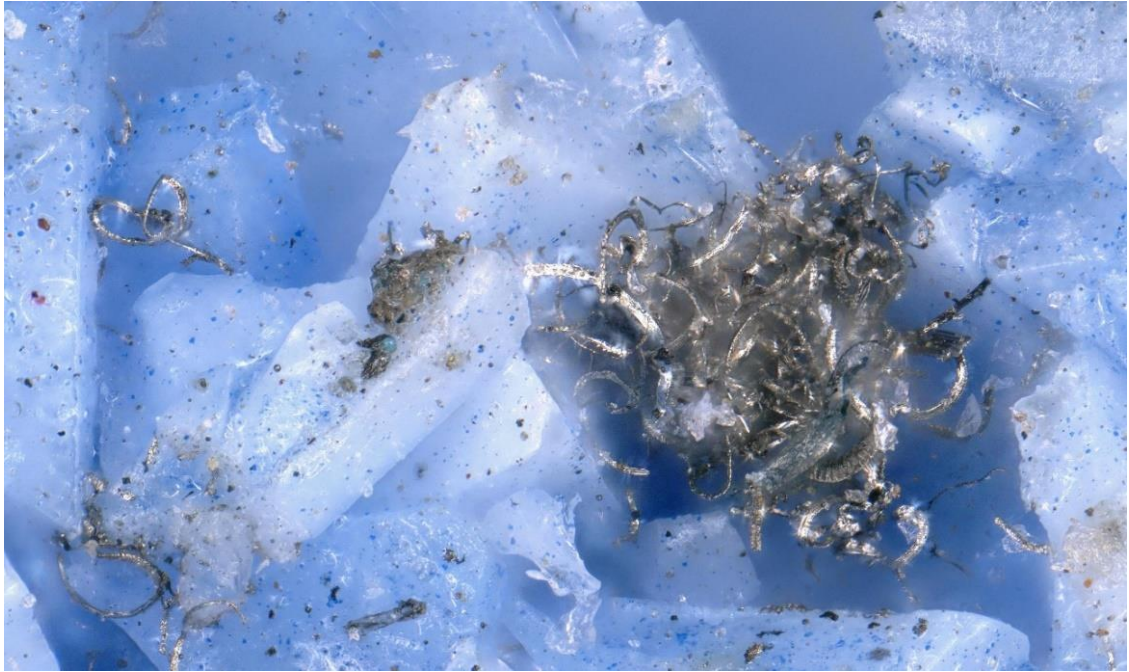
Pod digitálním mikroskopem Keyence VHX – 6000 (viz obr. 22) byla porovnána mikrostruktura obou brusných kotoučů (viz obr. 23). Na fotografiích je vidět rozdílná struktura i rozdílný tvar zbylých třísek na brusných kotoučích (viz obr. 24).



Obr. 22 - Keyence VHX – 6000 [36]



Obr. 23 - Porovnání mikrostruktury kotouče 3M Cubitron™ II 99% 99DA54/80 (nahore)
a kotouče Tyrolit Strato Ultra (dole)



*Obr. 24 - Porovnání tvaru třísek kotouče 3M Cubitron™ II 99% 99DA54/80 (nahore)
a kotouče Tyrolit Strato Ultra (dole)*

Na obrázcích je možné vidět, že v případě kotouče 3M Cubitron™ II 99% vznikají třísky podobné třískám vznikajícím při soustružení či frézování (viz obr. 24). Třísky tedy mají

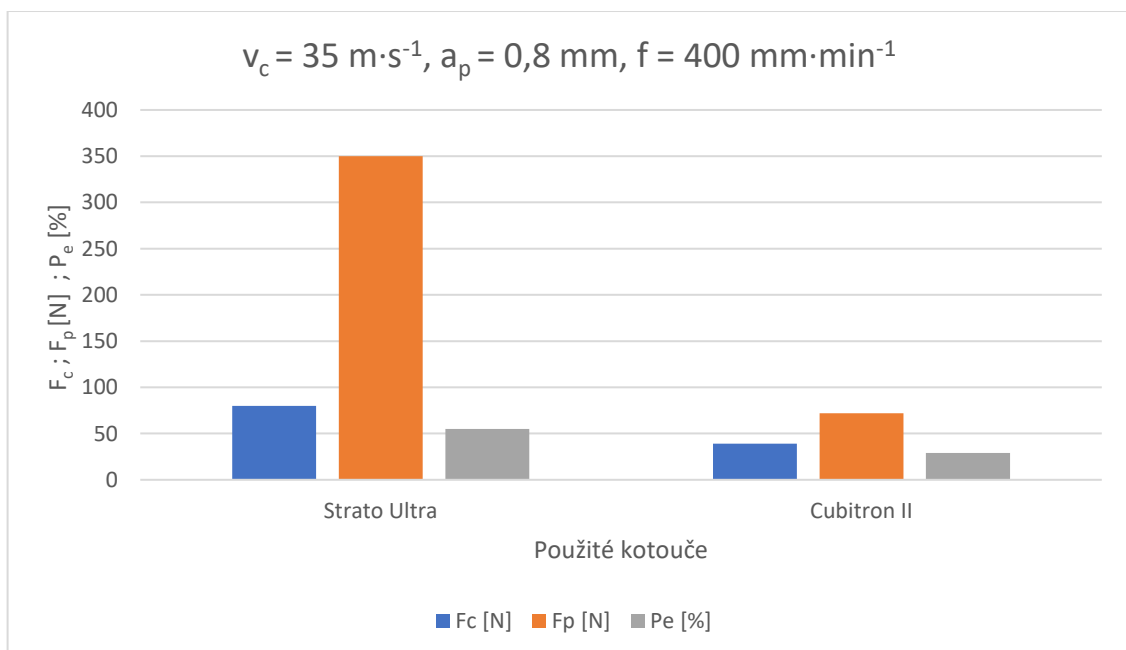
definovaný tvar a rozměry. V případě kotouče Tyrolit Strato Ultra třísky nemají definovaný tvar ani rozměr (viz obr. 24). Není vyloučené, že by v případě kotouče Tyrolit Strato Ultra nevznikly takové podmínky, kdy by mohlo dojít ke vzniku třísky stejného tvaru a rozměru jako u druhého kotouče.

6.4. Řezné síly při broušení

Pro měření složek byl použit dynamometr Kistler. Výsledné síly a potřebný příkon jsou zaneseny v tabulce 15.

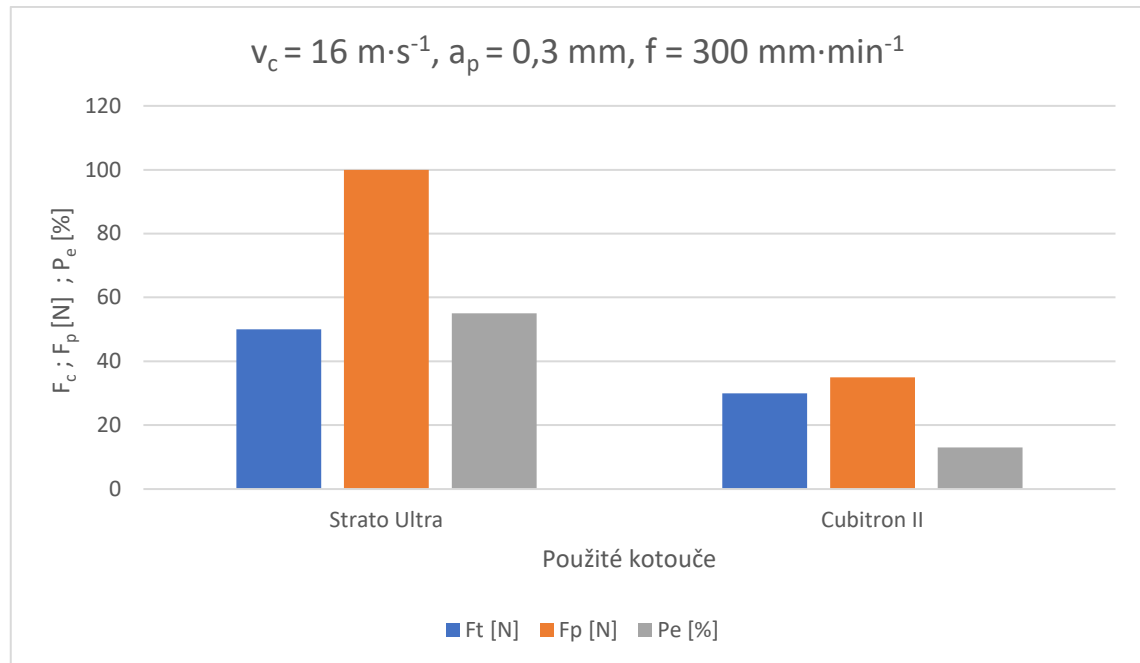
Tab. 15 – Porovnání řezných sil při broušení

v_c [m·s ⁻¹]	a_p [mm]	f [mm·min ⁻¹]	Kotouč	F_c [N] řezná	F_p [N] pasivní	P_e [%] příkon
35	0,8	400	Strato Ultra	80	350	55
			Cubitron 99%	39	72	29
16	0,3	300	Strato Ultra	50	100	55
			Cubitron 99%	30	35	13



Graf 1 – Porovnání kotoučů při $v_c = 35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $a_p = 0,8 \text{ mm}$, $f = 400 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

V případě těchto řezných podmínek je v grafu 1 vidět velký rozdíl v pasivní síle u použitých kotoučů. U kotouče Strato Ultra je pasivní síla skoro o 5násobek větší než u kotouče 3M™ Cubitron II 99 %. Potřebná řezná síla je u kotouče Strato Ultra o více než dvojnásobek větší, než je tomu v případě kotouče 3M™ Cubitron II 99 %.



Graf 2 – Porovnání kotoučů při $v_c = 16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$, $f = 300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

Při těchto zvolených řezných podmínkách je v grafu 2 vidět, že v případě kotouče Strato Ultra došlo ke snížení pasivní síly o více jak dvě třetiny. Příkon elektromotoru však dosahuje stejné hodnoty jako u prvních řezných podmínek v grafu 1. Oproti kotouči 3M™ Cubitron II 99 % je u kotouče Strato Ultra potřeba vyšších sil a vyššího příkonu, jako tomu bylo v případě prvních řezných podmínek.

6.5. Drsnost po broušení

Pro měření drsnosti a profilu povrchu bylo využito profiloměru Mahr XCR 20. Drsnost a profil povrchu byly měřeny na počátku, uprostřed a na konci drážky. Broušením hranolů z Inconelu 713LC vznikly 4 drážky.

Na zkoumaných místech se zjišťovaly hodnoty průměrné aritmetické odchylky profilu R_a , největší výšky profilu R_z , šikmost profilu R_{sk} , materiálový poměr R_{mr} a maximální výška profilu R_{max} .

Získané hodnoty jsou na ukázkou uvedeny v tabulkách 16 a 17. Pro zjednodušení jsou uvedena data pouze ze začátku a z konce drážek.

Tab. 16 – Porovnání dosažených drsností a profilů povrchu při řezných podmínkách
 $v_c = 35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $a_p = 0,8 \text{ mm}$, $f = 400 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ na začátku a na konci drážky

	Tyrolit Strato Ultra		3M™ Cubitron II 99 %	
	začátek	konec	začátek	konec
Ra	1,603 μm	2,170 μm	0,549 μm	2,087 μm
Rz	11,080 μm	13,667 μm	5,078 μm	13,169 μm
Rmax	13,369 μm	15,984 μm	6,484 μm	15,686 μm
Rsk	-0,862	-0,346	-1,272	-0,865
Rmr (-1 mm)	19,12 %	9,93 %	43,05 %	13,00 %
Rmr (-3 mm)	61,68 %	27,13 %	98,01 %	43,89 %

Tab. 17 – Porovnání dosažených drsností a profilů povrchu při řezných podmínkách
 $v_c = 16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$, $f = 300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ na začátku a na konci drážky

	Tyrolit Strato Ultra		3M™ Cubitron II 99 %	
	začátek	konec	začátek	konec
Ra	0,556 μm	1,481 μm	0,555 μm	0,754 μm
Rz	3,734 μm	9,322 μm	3,967 μm	5,246 μm
Rmax	5,539 μm	10,002 μm	5,196 μm	6,016 μm
Rsk	-0,969	-0,605	-0,849	-0,803
Rmr (-1 mm)	49,88 %	19,48 %	53,38 %	40,56 %
Rmr (-3 mm)	98,12 %	63,06 %	99,22 %	93,94 %

V tabulkách 16 a 17 je vidět, že kotouč 3M™ Cubitron II 99 % dosahoval lepších hodnot drsností a profilu povrchu než kotouč Tyrolit Strato Ultra. Pouze v případě řezných podmínek $v_c = 35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $a_p = 0,8 \text{ mm}$, $f = 400 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ dosáhl kotouč Tyrolit Strato Ultra lepších hodnot šikmosti profilu než kotouč 3M™ Cubitron II 99 %.

6.6. Shrnutí experimentu

V rámci experimentu došlo k porovnání brusného kotouče Tyrolit Strato Ultra a kotouče 3M Cubitron™ II 99% při dvou typech řezných podmínek.

Oba kotouče mají specifickou strukturu a rozdílný tvar třísky tvořící se při broušení (viz 6.3.3). U kotouče Tyrolit Strato Ultra vzniká tříska s nedefinovaným tvarem i rozměrem.

Naopak u kotouče 3M Cubitron™ II 99% vzniká tříška s definovaným rozměrem i tvarem, podobná tříškám vznikajícím při frézování či obrábění.

Při silovém porovnání u broušení (viz 6.4.) dosahoval kotouč 3M Cubitron™ II 99% polovičních hodnot řezných sil, okolo pětinových hodnot pasivních sil a maximálně polovičních hodnot potřebného příkonu, než tomu bylo u kotouče Tyrolit Strato Ultra.

V porovnání dosažených drsností a profilů povrchu (viz 6.5.) dosahoval lepších výsledků kotouč 3M Cubitron™ II 99%. V obou případech byly dosažené hodnoty Ra na začátku broušených drážek okolo 0,55 μm .

Z experimentu však vyplývá, že při broušení docházelo u kotouče 3M Cubitron™ II 99% k většímu zanášení, a proto se dosažené hodnoty drsností a profilů povrchů na konci drážek blížily u obou porovnávaných kotoučů ke srovnatelným hodnotám. Nejvíce znatelný rozdíl nastal v případě řezné podmínky s hloubkou řezu $a_p = 0,8$ mm. Dosažená hodnota Ra se mezi počátkem a koncem drážky zhoršila o více jak 1,5 μm , hodnota Rz o více jak 8 μm , hodnota Rmax o více jak 9 μm a materiálový poměr Rmr v hloubce tří milimetrů klesl o více jak 50 %.

Tento jev potvrzuje i fakt, že výrobce u kotouče 3M Cubitron™ II 99% předepisuje při broušení kontinuální orovnávaní kotouče.

Předpoklady experimentu stanovené v Návrhu experimentu byly navzdory výše popsanému jevu splněny.

7. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala teorií a problematikou využití modifikovaných brusných materiálů při hloubkovém broušení. Technologie hloubkového broušení se využívá například při výrobě zámku turbínových lopatek.

Experimentálně proběhlo broušení drážek v hranolech z Inconelu 713LC (Low Carbon). Broušení bylo uskutečněno za pomoci dvou vybraných brusných kotoučů Tyrolit Strato Ultra a 3M Cubitron™ II 99% 99DA54/80, které jsou určeny pro hloubkové broušení. Daný experiment probíhal pro oba kotouče za dvou předem stanovených řezných podmínek, a to $v_c = 35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $a_p = 0,8 \text{ mm}$, $f = 400 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a $v_c = 16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$, $f = 300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Vše bylo provedeno tak, aby kotouč byl jedinou proměnnou, tedy za stejných podmínek chlazení, stejného NC kódu a při stejném nastavení měřicí techniky. Oba kotouče byly porovnány z hlediska silového namáhání a potřebného příkonu elektromotoru, dosahované drsnosti a profilu povrchu, mikrostruktury a tvaru tvořené třísky.

Oba porovnávané kotouče se liší mikrostrukturou i třískou vznikající při broušení. V případě kotouče Tyrolit Strato Ultra vzniká tříška nedefinovaného tvaru i rozměru. U kotouče 3M Cubitron™ II 99% 99DA54/80 vzniká díky přesně tvarově i rozměrově definovaným zrnům tříška obdobná třískám vznikajícím při frézování či soustružení. Tříška má definovaný tvar i rozměr.

Podle předpokladů vychází z porovnání lépe kotouč 3M Cubitron™ II 99%, který při silovém porovnání u broušení dosahoval polovičních hodnot řezných sil, okolo pětinových hodnot pasivních sil a maximálně polovičních hodnot potřebného příkonu elektromotoru, než tomu bylo u kotouče Tyrolit Strato Ultra.

V případě porovnání drsností a profilů povrchu dosahoval kotouč 3M Cubitron™ II 99% na počátku drážky hodnoty R_a okolo $0,55 \mu\text{m}$. Na konci drážky však byly hodnoty R_a u obou kotoučů srovnatelné. Tento rozdíl byl u kotouče 3M Cubitron™ II 99% nejvíce znatelný v případě řezné podmínky s hloubkou řezu $a_p = 0,8 \text{ mm}$. Mezi počátkem a koncem drážky se hodnota R_a zhoršila o více jak $1,5 \mu\text{m}$, hodnota R_z o více jak $8 \mu\text{m}$, hodnota R_{max} o více jak $9 \mu\text{m}$ a materiálový poměr R_{mr} v hloubce 3 milimetrů klesl o více jak 50 %.

Z toho jeví lze usoudit, že se kotouč 3M Cubitron™ II 99% při broušení zanáší více než kotouč Tyrolit Strato Ultra. To potvrzuje i fakt, že výrobce pro dosažení hodnot předepisuje kontinuální orovnávání kotouče. Navzdory popsanému jevu byly předem stanovené předpoklady experimentu splněny.

8. Seznam literatury

- [1] Istoriya shlifovaniya i abrazivnogo instrumenta. *Alexandr Torkovij dom* [online]. 2013, 1.2.2016 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <http://www.alexander-td.com/ru/blog/istoriya-shlifovaniya-i-abrazivnogo-instrumenta>
- [2] SANDROMIRSKIJ, I. Stranitsy iz biografii shlifoval'nykh instrumentov. *Yunyy tekhnik* [online]. 1960, 5.(09), 42-44 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <http://zhurnalko.net/=sam/junyj-tehnik/1960-09--num50>
- [3] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. část*. Brno: VUT Brno, 2005. [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonven-cni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
- [4] *Handbook surface grinding*. 3M Abrasive Systems Division, 2015
- [5] MARINESCU, Ioan D. *Handbook of machining with grinding wheels*. Boca Raton, Fla.: CRC / Taylor & Francis Group, 2007. ISBN 9781574446715.
- [6] MASLOV, Je. N. *Teorie broušení kovů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979.
- [7] ČEP, R., PETRŮ, J. *TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ: 5 BROUŠENÍ A DOKONČOVACÍ OPERACE OBRÁBĚNÍ* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_001/Technologie%20Obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20elearning/Technologie%20obrabeni%2005%20Brou%C5%A1en%C3%AD%20a%20dokon%C4%8Dovac%C3%AD%20operace%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD.pdf
- [8] LIPTÁK, Ondrej. *Technológia výroby: obrábanie: vysokoškolská učebnica*. Bratislava: Alfa, 1979. Edícia strojárkej literatúry (Alfa).
- [9] VASILKO, Karol a Givi Vladimirovič BOKUČAVA. *Brúsenie kovových materiálov*. Bratislava: Alfa, 1988. Edícia strojárkej literatúry (Alfa).
- [10] MÁDL, Jan a František HOLEŠOVSKÝ. *Vliv dokončovací technologie na chování povrchu strojních součástí při zatížení*. Ústí nad Labem, UJEP FVTM, 2012. ISBN 978-80-7414-561-2.
- [11] *Měření drsnosti: Profily povrchu a parametry profilu povrchu* [online]. [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <https://www.mbcailibr.cz/mereni-drsnosti.html>

- [12] ŠPERKA, Petr. *Struktura povrchů vybraných strojních součástí* [online]. 2009 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/Struktura_povrchu_vybranych_techнологii_obrabeni.pdf
- [13] HNILICA, Jaroslav, Dobroslav NĚMEC a Jan ODEHNAL. *Strojírenská technologie: učebnice pro 3. ročník středních průmyslových škol strojnických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979. Řada strojírenské literatury.
- [14] MÁDL, Jan, Martin VRABEC, Jindřich KAFKA a Rudolf DVOŘÁK. *Technologie obrábění 3. díl*. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [15] *Investice do rozvoje vzdělání: Broušení rovinných ploch* [online]. [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=45416&revision=-1&instance=2>
- [16] *Způsoby a postupy rovinného broušení-* [online]. Česká Třebová, 2019 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <https://www.prodejbrusiva.cz/zpusoby-a-postupy-rovinneho-brouseni>
- [17] C. Andrew. Trevor D. Howes and . Tom R.A. Pearce, *Creep feed grinding*. London: Holt, Rinehart and Winston, 1985.
- [18] HOLEŠOVSKÝ, František, Jan URBAN, Jan ŠIMOTA a Zdeněk PITR-MUC. *Utilization of new modified materials in creep-feed grinding* [online]. [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: https://stc.fs.cvut.cz/pdf18/8560.pdf?_id=1522661745
- [19] HEJL, Miroslav a Petr JALŮVKA. *ELUC* [online]. 2014 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1240>
- [20] MATĚJKA, Michael. *Progresivní technologie II* [online]. [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2004245/>
- [21] Broušící kotouče ze supertvrdých řezných materiálů. *MM Průmyslové spektrum*. Praha: MM publishing, 40. 2001, 2001(7).
- [22] WEBSTER, J. a M. TRICARD. Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Elsevier, 2004, 597-617. ISSN 0007-8506.
- [23] *Seeded gel abrasives keep sharper during grinding processes*. 1989. Dostupné z: <https://kundoc.com/pdf-seeded-gel-abrasives-keep-sharper-during-grinding-processes-.html>

- [24] Analytical considerations of highly porous bond systems: Analytical considerations of highly porous bond systems for precision grinding. *Norton Abrasives* [online]. 2019, 16.2.2017 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <https://www.nortonabrasives.com/en-gb/resources/expertise/analytical-considerations-highly-porous-bond-systems>
- [25] NADOLNY, Krzysztof a Pawel SUTOWSKI. Analysis of aluminum oxynitride AION (Abral®) abrasive grains during the brittle fracture process using stress-wave emission techniques. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2015, 6/2015 [cit. 2019-07-06]. DOI: 10.1007/s00170-015-7338-1. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/279154764_Analysis_of_aluminum_oxynitride_AION_AbralR_abrasive_grains_during_the_brittle_fracture_process_using_stress-wave_emission_techniques
- [26] Orovňávání brusných keramických kotoučů. *Tumlikovo* [online]. 2010, 5.1.2011 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/orovnavani-brusnych-keramicky-kotoucu/>
- [27] HOLEŠOVSKÝ, František a Martin NOVÁK. *VLIV PROCESNÍ KAPALINY PŘI BROUŠENÍ* [online]. 2009 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/16422/1/Holesovsky.pdf>
- [28] 13 - Polymers for aerospace structures. MOURITZ, Adrian. *Introduction to Aerospace Materials*. Australia: Woodhead Publishing, 2012, s. 268-302. ISBN 9780857095152.
- [29] ESTRADA, Carlos. NEW TECHNOLOGY USED IN GAS TURBINE BLADE MATERIALS. *Scientia et Technica Año XIII* [online]. Universidad Tecnológica de Pereira, 2007, 9/2007, 2007(36), 297-301 [cit. 2019-07-06]. ISSN 0122-1701. Dostupné z: https://www.academia.edu/8305844/NEW_TECHNOLOGY_USED_IN_GAS_TURBINE_BLADE_MATERIALS
- [30] OKURA, TAKEHIRO. *Materials for Aircraft Engines* [online]. 2015 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: https://www.colorado.edu/faculty/kantha/sites/default/files/attached-files/73549-116619_-_takehiro_okura_-_dec_17_2015_1027_am_-_asen_5063_2015_final_report_okura.pdf

- [31] VLIV PODMÍNEK ZATĚŽOVÁNÍ NA STRUKTURU A PORUŠOVÁNÍ LITÉ NIKLOVÉ SUPERSLITINY. *VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ: Edice Habilitační a inaugurační spis* [online]. VUT Brno, 2005, 2005, (181) [cit. 2019-07-06]. ISSN ISSN 1213-418X. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-3018-4.pdf>
- [32] *Precision grinding expertise* [online]. 2012 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <http://multimedia.3m.com/mws/media/8420200/3mtm-cubitrontm-ii-gear-grinding-wheels-brochure-pdf.pdf>
- [33] *Technologie II - 2. díl* [online]. [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf
- [34] *UNIVERSÁLNÍ BRUSKA NA PLOCHO BRH 20 CNC* [online]. [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <http://www.mikronex.cz/BRH20CNC.pdf>
- [35] Výroba Turbín. *Tyrolit* [online]. [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <https://www.tyrolit.cz/oblasti/obrabeni-kovu-precizni-brouseni/odvet-vi/vyroba-turbin.html>
- [36] PAGÁČ, Marek. Digitální mikroskop VHX-6000 pomáhá hodnotit kvalitu hliníkových odlitků. *Konstruktér* [online]. 31.1.2018 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/digitalni-mikroskop-vhx-6000-pomaha-hodnotit-kvalitu-hlinikovych-odlitku/>

9. Seznam tabulek

Tabulka 1	Dosahovaná přesnost rozměrů a drsnosti povrchu při broušení	16
Tabulka 2	Rychlost pohybu stolu v závislosti na daném materiálu	26
Tabulka 3	Obvodová rychlost a přísuv v závislosti na typu broušení	27
Tabulka 4	Přísuv a rychlost stolu v závislosti na broušení	28
Tabulka 5	Přísuv a rychlost stolu v závislosti na broušení	29
Tabulka 6	Porovnání technologií broušení	32
Tabulka 7	Rozdělení umělého korundu	35
Tabulka 8	Rozdělení karbidu křemíku	35
Tabulka 9	Porovnání diamantu a CBN	36
Tabulka 10	Porovnání CBN a SG	39
Tabulka 11	Stanovené řezné podmínky	46
Tabulka 12	Přípustné rozmezí chemického složení Inconelu 713LC	47
Tabulka 13	Vlastnosti kotouče Tyrolit Strato Ultra	49
Tabulka 14	Doporučené hodnoty broušení pro Cubitron II 99DA	51
Tabulka 15	Porovnání řezných sil při broušení	54
Tabulka 16	Porovnání dosažených drsností a profilů povrchu při řezných podmínkách $v_c = 35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $a_p = 0,8 \text{ mm}$, $f = 400 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ na začátku a na konci drážky	56
Tabulka 17	Porovnání dosažených drsností a profilů povrchu při řezných podmínkách $v_c = 16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$, $f = 300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ na začátku a na konci drážky	56

10. Seznam grafů

Graf 1	Porovnání kotoučů při $v_c = 35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $a_p = 0,8 \text{ mm}$, $f = 400 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$	54
Graf 2	Porovnání kotoučů při $v_c = 16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$, $f = 300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$	55

11. Seznam obrázků

Obrázek 1	Geometrie brusného kotouče	11
Obrázek 2	Síly při broušení	13
Obrázek 3	Schéma tvoření broušených povrchů	16
Obrázek 4	Teplo při broušení	18
Obrázek 5	Průběh zbytkových napětí v povrchové vrstvě broušeného materiálu	20
Obrázek 6	Tvary třísek	22
Obrázek 7	Broušení obvodem a čelem kotouče	25
Obrázek 8	Vnější a vnitřní broušení	25
Obrázek 9	Princip rovinného broušení obvodem kotouče	27
Obrázek 10	Princip rovinného broušení čelem kotouče	29
Obrázek 11	Broušení lopatek profilovými kotouči	31
Obrázek 12	Porovnání krystalických mřížek diamantu a kubického nitridu bóru	37
Obrázek 13	Struktura TGX zrna	39
Obrázek 14	Struktura materiálu Cubitron	40
Obrázek 15	Porovnání průchodu konvenčního a Cubitron zrna broušeným materiálem	41
Obrázek 16	Porovnání tvorby třísky u konvenčních abraziv a abraziva Cubitron	41
Obrázek 17	Kontinuální orovnávač a orovnávač s kotoučem	43
Obrázek 18	Hranoly z Inconelu 713LC	47
Obrázek 19	Bruska BRH 20 CNC	48
Obrázek 20	Kotouč Tyrolit Strato Ultra	49
Obrázek 21	Kotouč 3M Cubitron™ II 99%	50
Obrázek 22	Keyence VHX – 6000	51
Obrázek 23	Porovnání mikrostruktury kotouče 3M Cubitron™ II 99% 99DA54/80 a kotouče Tyrolit Strato Ultra	52
Obrázek 24	Porovnání tvaru třísek kotouče 3M Cubitron™ II 99% 99DA54/80 a kotouče Tyrolit Strato Ultra	53

12. Přílohy

- Naměřené hodnoty drsností a profilů drážek Inconelu 713LC
- Popis a základní parametry brusky Mikronex BRH20 CNC [34]