

Hodnocení průběhu opotřebení progresivních brousících kotoučů

Jan Liška

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Liška**

Osobní číslo: **T11636**

Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Hodnocení průběhu opotřebení progresivních brousících kotoučů**

Zásady pro vypracování:

- 1) Vypracujte literární rešerši na téma broušení
- 2) Popište doprovodné jevy technologie broušení
- 3) Vyhodnoťte dynamické jevy procesu broušení
- 4) Určete vliv materiálu zrn brousících kotoučů na opotřebení
- 5) Porovnejte ekonomickou výhodnost použití progresivních brousících kotoučů

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle zadání vedoucího bakalářské práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Čop

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

10. února 2014

Termín odevzdání bakalářské práce:

23. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhajení práce.

Ve Zlíně 28.4.2014

Jan Liška

²⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce požítovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlíží k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá technologií broušení. Teoretická část bakalářské práce je věnována teorii broušení, která zahrnuje vznikání třísky, řezné síly, doprovodné jevy, procesní kapaliny, jakost a drsnost povrchu. Dále jsou uvedeny brousící kotouče z diamantu a kubického nitridu boru, u kterých jsou uvedeny vlastnosti, výroba a použití.

V praktické části jsou porovnány výsledky řezných sil pro materiál z oceli s různými řeznými podmínkami při použití třech brousících kotoučů a to kotouče z kubického nitridu boru, diamantu a bílého korundu.

Klíčová slova: Broušení, řezné síly, opotřebení nástroje, diamant, kubický nitrid boru.

ABSTRACT

In this bachelor thesis the technology of grinding is described. The theory of grinding is described in the theoretical part, which includes the proces of making splinter arise of chip, cutting force, accompanying, effects, proces liquids, quality and roughness of surface. The properties, production and aplication of grinding wheels with grains of diamond and CBN are also described in this part. Practipal part describes the result of cutting forces for conventional steel material using the diamond, cubic boron nitride and white corundum grinding wheels for different technological conditions. Finally, the wear of each grinding wheel is compared at the end of this bachelor thesis.

Keywords: Grinding, cutting force, tool wear, diamond, cubic boron nitride.

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Čopovi. Za jeho obětavý přístup, cenné připomínky a rady, za podklady a čas strávený nad touto prací. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Šálkovi za jeho odbornou pomoc při měření na brusce v laboratořích UVI.

Motto:

„ Musíš se mnoho učit, abys poznal, že málo víš. “

Michel De Montaigne

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 10 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 11 |
| 1 BROUŠENÍ..... | 12 |
| 1.1 VZNIK TRÍSKY PŘI BROUŠENÍ | 13 |
| 1.1.1 Primární plastická deformace..... | 13 |
| 1.1.2 Sekundární plastická deformace..... | 14 |
| 1.1.3 Dotyk hřbetu zrna | 14 |
| 1.2 ŘEZNÉ SÍLY PŘI BROUŠENÍ | 15 |
| 1.3 OPOTŘEBENÍ KOTOUČE | 17 |
| 1.4 PROCESNÍ KAPALINY | 18 |
| 1.5 INTEGRITA POVRCHU | 21 |
| 1.5.1 Drsnost povrchu | 22 |
| 1.5.2 Geometrická přesnost | 26 |
| 1.5.3 Změny tvrdosti | 26 |
| 1.5.4 Změny struktury | 27 |
| 1.5.5 Tepelné změny | 27 |
| 1.5.6 Trhliny | 28 |
| 1.5.7 Zbytkové napětí..... | 28 |
| 2 BROUSÍCÍ KOTOUČE..... | 29 |
| 2.1 ZNAČENÍ BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ | 29 |
| 2.1.1 Rozměry a tvary kotoučů..... | 30 |
| 2.1.2 Brusiva | 30 |
| 2.1.3 Zrnitost brusiva..... | 33 |
| 2.1.4 Tvrdost nástroje..... | 34 |
| 2.1.5 Struktura nástroje..... | 34 |
| 2.1.6 Pojivo | 35 |
| 3 DIAMANT..... | 36 |
| 3.1 VÝROBA | 36 |
| 3.1.1 Přírodní diamant | 36 |
| 3.1.2 Syntetický diamant | 37 |
| 3.2 VLASTNOSTI | 38 |
| 3.3 VYUŽITÍ..... | 38 |
| 4 KUBICKÝ NITRID BORU | 40 |
| 4.1 VÝROBA | 40 |
| 4.2 VLASTNOSTI | 41 |
| 4.3 VYUŽITÍ..... | 41 |
| II PRAKTICKÁ ČÁST | 43 |
| 5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE | 44 |
| 6 POUŽITÉ STROJE A PŘÍSTROJE..... | 45 |
| 6.1 BRUSKA BRH 20.03 F..... | 45 |
| 6.2 POUŽITÉ BROUSÍCÍ KOTOUČE | 46 |
| 6.2.1 Brousící kotouč z bílého korundu..... | 47 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.2.2 | Brousící kotouč z kubického nitridu boru..... | 47 |
| 6.2.3 | Diamantový brousící kotouč | 48 |
| 6.3 | MATERIÁL 14 109.4 | 49 |
| 6.4 | DVOUSLOŽKOVÝ TENZOMETRICKÝ DYNAMOMETR | 50 |
| 6.5 | 3D DRSNOMĚR TALYSURF CLI 500..... | 51 |
| 6.6 | MIKROSKOP | 53 |
| 7 | VYHODNOCENÍ ŘEZNÝCH SIL..... | 54 |
| 7.1 | VYHODNOCENÍ ŘEZNÉ SÍLY F _p PŘI ZMĚNĚ POSUVOVÉ RYCHLOSTI | 56 |
| 7.2 | VYHODNOCENÍ ŘEZNÉ SÍLY F _c PŘI ZMĚNĚ POSUVOVÉ RYCHLOSTI | 57 |
| 7.3 | VYHODNOCENÍ ŘEZNÉ SÍLY F _p , PŘI ZMĚNĚ HLOUBKY ÚBĚRU..... | 58 |
| 7.4 | VYHODNOCENÍ ŘEZNÉ SÍLY F _c , PŘI ZMĚNĚ HLOUBKY ÚBĚRU | 59 |
| 8 | VYHODNOCENÍ OPOTŘEBENÍ BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ..... | 60 |
| 8.1 | VYHODNOCENÍ OPOTŘEBENÍ PROGRESIVNÍCH BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ | 63 |
| | ZÁVĚR | 65 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 67 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 69 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 71 |
| | SEZNAM TABULEK | 73 |
| | SEZNAM PŘÍLOH | 74 |

ÚVOD

Broušení je vůbec první a nejstarší způsob obrábění. Již v dávné minulosti používal člověk přírodní brusiva k tomu, aby naostřil své pracovní nástroje (sekery, nože, kopí apod.) Vývoj broušení se značně urychlil vynálezem umělého brousícího kotouče v roce 1859 a sestavením prvních univerzálních brousících strojů v roce 1860. Neustálé zdokonalování brousících strojů a zlepšování vlastností brousících kotoučů umožnilo, že se broušení stalo jedním z velmi produktivních způsobů přesného obrábění různých materiálů (kovů, plastů, dřeva apod.) Broušením lze prakticky obrábět plochy všech druhů (rotační, vnější i vnitřní, rovinné či tvarové)

Broušením docházíme k přesným rozměrům a k dokonalému povrchu a na tom stojí moderní strojírenství. Teprve přesnost umožnila sériovou výrobu vyměnitelných součástí, jen dokonalý povrch snáší dynamické zatížení, opotřebení, korozi, tření atd.

Procesní kapaliny sehrávají v oblasti technologie obrábění velmi důležitou roli. V minulosti bylo jejich používání ještě významnější a to především kvůli nedostatkům nástrojových materiálů. Použití procesních kapalin při broušení má pozitivní vliv nejen na trvanlivost nástroje, ale také na jakost obrobku, což je podstatné především u dokončovacíh operací.

Samotný vývoj řezných materiálů je od 19. století, kdy byly vyvinuty nástrojové oceli. Významným mezníkem pro vývoj řezných materiálů bylo zjištění, že se dá využít vlastností přírodního diamantu k výrobě syntetického diamantu a ten využít pro řezné materiály. Dalším syntetickým materiálem využívaným pro řezné materiály je kubický nitrid bóru, který je druhým nejtvrdějším materiálem. Tak došlo k vyvinutí supertvrдых materiálů, které zahrnují polykrystalický diamant a polykrystalický kubický nitrid bóru. Tyto materiály mají vysokou tvrdost a otěruvzdornost.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 BROUŠENÍ

Broušení je dokončovací operace, která se vyznačuje velkou přesností, správností geometrického tvaru, zpravidla velmi dobrou jakostí povrchu a patří k nejvýznamnější části technologie výroby dnešní doby. Operace broušení umožňuje vyšší tvarovou a rozměrovou kvalitu a v technologickém procesu je známa jako vysoce přesná dokončovací operace. Pro broušení je charakteristické rozložení zrn brousícího kotouče, která jsou rozložena nepravidelně na celém jeho povrchu a odebírají velké množství malých třísek. [6]

Práce brousících kotoučů od jiných způsobů obrábění se liší schopností tzv. samoostřící. Tahle to brousící vlastnost kotouče souvisí s poměrně málo pevným zakotvením brousícího zrna ve vazbě kotouče. Jakmile se zvýší řezné síly brousícího kotouče, tak otupená zrna se vylomí a jejich funkci přebírají neotupená zrna. [3]

Na rozdíl od jiných metod třískového obrábění, není zde pevně definována geometrie břitu. Úhel čela zrn se mění a obvykle bývá záporný. Při vysokých řezných rychlostech však rovněž platí, že s rostoucí řeznou rychlostí roste úhel roviny stříhu, snižuje se primární plastická deformace v oblasti tvorby třísky a snižuje se pěchování třísky. Toto vede do snížení třecí síly (sekundární plastická deformace), a zároveň se sniží čas kontaktu třísky a řezného klínu. Při překročení mezní hodnoty řezné rychlosti pak dochází ke snížení tepelného ovlivnění obrobku a nástroje. Volba správné hodnoty řezné rychlosti má pak značný vliv na vlastnosti nově vytvořené plochy. [6]

Brousící proces probíhá při značně vysokých rychlostech, nejčastěji do 50 m/s, a ve zvláštních případech až do 100 m/s. Na začátku obrábění nejprve zrna kloužou po povrchu a tím dochází k ohřevu a zlepšuje se tvárnost materiálu. Hlavní pohyb při broušení vykonává brousící rotující kotouč a vedlejší pohyb vykonává obrobek nebo nástroj.

Základním způsobem broušení je broušení vnějších válcových ploch s posuvem podél osy obrobku. V tomto případě jsou řeznou drahou zrna šroubovitá hypocykloidní křivka a řeznou plochou tvoří soubor hypocykloidních šroubovic. [3]

1.1 Vznik třísky při broušení

Tvorba třísky je provázána plastickou deformací v primární i sekundární oblasti. Brousící zrna u klasických brousících kotoučů mají nevhodnou geometrii z hlediska vzniku třísky vyvíjení tepla, zásahu deformací a tepla pod úroveň nastávajícího povrchu i dalších aspektů. Při broušení je geometrie břitu poměrně výrazně odlišná od nástrojů s danou geometrií břitu.

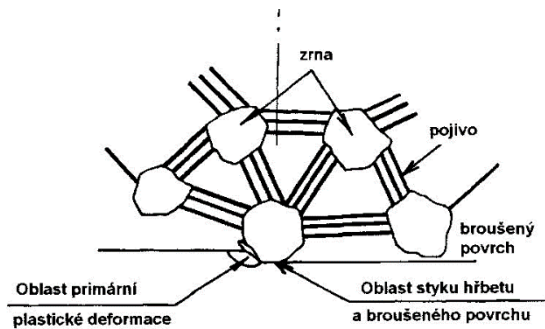
Při záběru vysokého množství zrn probíhá broušení s nepravidelnou geometrií a některými rozdíly geometrie v porovnání s jedním nebo s vícebřitými nástroji. Dochází tak k neustálému opotřebením zrn, jejím odlamování, lomu a uvolňování z brousícího kotouče. Vzhledem k vysoké rychlosti řezání, jsou tyto změny vysoce dynamické v porovnání s opotřebením soustružnického nože, frézy apod.

Broušením probíhá elastická a následně plastická deformace malého množství materiálu při záběru jednotlivého zrna, překročením pevnosti v rovině smyku dochází k vytvoření třísky. Broušením vysokou rychlostí do 150 m/s je tvorba třísky bez plastické deformace a při vysokých rychlostech nestačí materiál reagovat na záběr zrna a dojde k usmýknutí materiálu ve tvaru velmi malých třísek. Každé zrno, které odřezává materiál při pohybu v kontaktní zóně, prochází třemi oblastmi. První je oblast primární plastické deformace, druhou oblastí je sekundární plastické deformace a třetí oblast styku hřbetu zrna a broušeného povrchu. [3]

1.1.1 Primární plastická deformace

První oblastí, jejíž význam si při vytváření nového povrchu a tím i vlastností tohoto povrchu musíme uvědomit, je oblast primární plastické deformace.

Velikost oblasti primární plastické deformace závisí na geometrii zrna, řezných podmínkách, prostředí a vlastnostech broušeného materiálu. Uvedené hodnoty určují hloubku finálního povrchu, který je ovlivněn primární plastickou deformací. Vlastnosti povrchu jsou dány objemem tepla, které vzniká při tvoření třísky. [1]



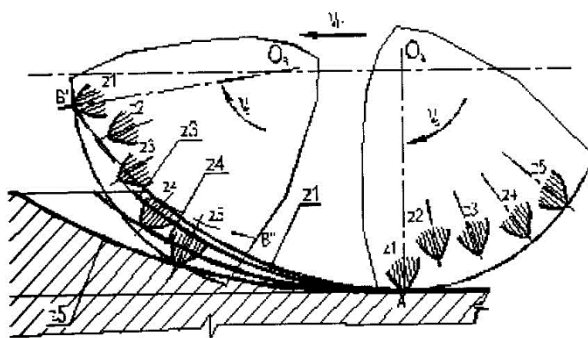
Obr. 1. Struktura broušícího nástroje [1]

1.1.2 Sekundární plastická deformace

Sekundární plastická deformace probíhá mezi čelem zrna a odcházející třískou, kde v místě styku vzniká vysoký tlak a teplota. Třísky mohou být nalepeny na zrno a zhoršovat jejich broušící vlastnost a poté může dojít k zanesení brusného kotouče tzv. zalepování brusného kotouče. V takovémto procesu jsou vyplňovány mezery mezi zrny a nalepené třísky se velmi těžce oddělávají. [1]

1.1.3 Dotyk hřbetu zrna

Dotyková oblast hřbetu zrna a broušeného povrchu ovlivňuje hlavně tvar a morfologii hřbetu, rádius ostří a úhel hřbetu. Hřbet zrna vyvolává deformaci broušeného povrchu, probíhá tření hřbetu a broušené plochy za vzniku tepla a jeho působení na povrch. [2]



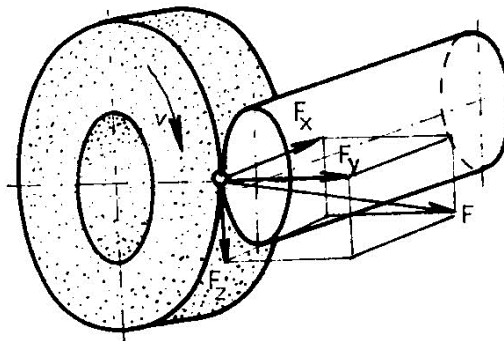
Obr. 2. Schéma broušení [2]

1.2 Řezné síly při broušení

Při broušení působí na brousící nástroj odstředivé a řezné síly, protože řezné síly jsou vzhledem k odstředivým silám malé a při úvahách o pevnosti brousícího nástroje se zanedbávají.

Na obráběnou součástku působí výsledná síla F a ta se rozkládá na tři složky:

- a) Tangenciální složka F_c
- b) Radiální složka F_p
- c) Axiální složka F_f

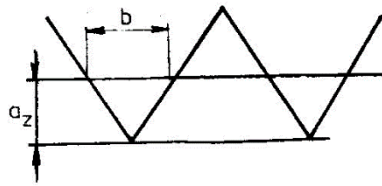


Obr. 3. Rozložení řezných sil při obvodovém axiálním broušení do kulata. [1]

Dále se tyto složky používají na výpočet:

- výkonu na vřeteno kotouče a součástky (síla F_c)
- tuhosti soustavy stroj-obrobek-nástroj přesnosti obrábění (síla F_p)
- výkonu pro posuv (síla F_f)

Pokud jsou při broušení na brousících zrnech záporné úhly čela, tak předpokládáme, že řezná síla F_p bude pokaždé větší než síla F_c . Radiální řezná síla F_p je o 1,5 až 3 krát větší než řezná síla F_c . Síla F_f je o mnoho menší než síla F_c . Řezná síla při broušení je součtová síla elementárních sil, která působí na materiál jednotlivým brousícím zrnem. Jednotlivé zrna zasahují do rozdílné hloubky, proto jsou elementární síly značně rozdílné z hlediska absolutních hodnot. Zde se vychází z určení skutečného průřezu odřezávaného kovu jedním brousícím zrnem S_z , z počtu současně zabírajících zrn z , ze zvolené hloubky řezu t , zrnitosti a struktury kotouče. [1]



Obr. 4. Zjednodušená plocha průřezu řezu při broušení. [1]

kde

$$S_z = a_z \cdot \frac{b}{2} \quad (1)$$

Kde a_z je střední hodnota hloubky odebírané vrstvy (mm)

b je šířka řezné části zrna (mm)

Řeznou sílu na jedno zrno spočítáme ze vzorce:

$$F_{1c} = k_b \cdot a_z \cdot \frac{b}{2} \quad (2)$$

Řezná síla na obvodě brousícího kotouče F_c při zrn v záběru bude:

$$F_c = F_{1c} \cdot z = k_b \cdot a_z \cdot \frac{b}{2} \cdot z \quad (3)$$

Matematickým zpracováním experimentálních údajů byla pro rotační broušení stanovena závislost:

$$F_c = C_{Fc} \cdot v_s^{0,7} \cdot s^{0,7} \cdot t^{0,6} \quad (4)$$

Kde C_{Fc} - konstantní

v_s – obvodová rychlost součástky

s - podélný posuv na otáčku

t - příčný posuv na jeden dvojzdvih (hloubka řezu)

Řeznou sílu můžeme vyjádřit v závislosti od obvodové rychlosti brousícího kotouče v_k .

Např. pro obrábění ocele platí:

$$F_c = 25 \cdot \frac{v_s}{v_k} \cdot t^{0,53} \cdot s^{0,53} \quad (5)$$

nebo pro obrábění litiny:

$$F_c = 21 \cdot \frac{v_s}{v_k} \cdot t^{0,33} \cdot s^{0,33} \quad (6)$$

1.3 Opotřebení kotouče

Opotřebení pracovní plochy brousícího kotouče je složitý fyzikálně chemický proces, jehož průběh závisí na všech podmínkách broušení, kterými je charakteristika kotouče, vlastnost obráběného materiálu, řezné podmínky.

Podle vlastností brousících kotoučů (tvrdosti, druhu pojiva, brusiva) a podle řezných podmínek probíhá při broušení buď otupení kotouče, nebo se uplatňuje jeho samoostření.

Otupení kotouče nastává v důsledku vylamování nevhodně položených zrn brusiva a jejich postupným štěpením a zaoblováním, takže zrna ztrácejí řezivost.

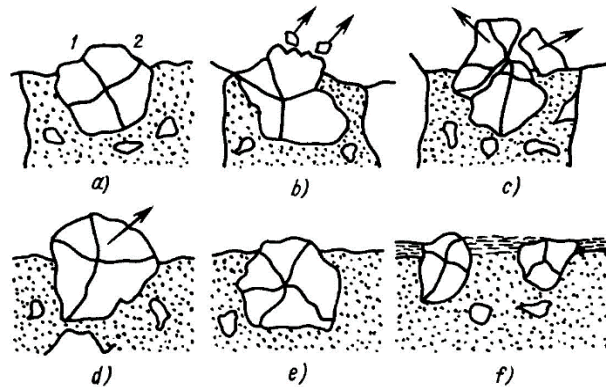
Samoostření brousícího kotouče probíhá v důsledku postupujícího otupování zrn brusiva, která jsou vzrůstajícím řezným odporem vylamována (celá nebo jen jejich části) z pojiva. Po vydrolení pojiva pak začínají pracovat nová zrna, takže se pracovní plocha kotouče neustále obnovuje. Tato schopnost obnovování řezné plochy je význačnou specifickou vlastností brousících kotoučů.

Na počátku činnosti kotouče se na vrcholech zrn vyvářejí opotřebené plošky, které se postupně zvětšují a podporují účinky všech činitelů broušení a růst řezných sil, jejichž působením se zrno i pojivo rozrušují. Jsou-li zrna s pojivem dostatečně pevně spojená, mohou být plošky opotřebení dosti velké. Opotřebení zrn je intenzivnější při vysokých teplotách broušení, snižujících jejich tvrdost.

Podle podmínek broušení (fyzikálně mechanické vlastnosti zrna, obráběného materiálu a pojiva, řezných podmínek atd.) rozlišujeme tyto základní druhy opotřebení:

- a) Otěr řezných částí (vrcholů) zrn brusiva se vznikem více či méně hladkých plošek
- b) Mikroskopické porušování (štěpení) zrn s oddělováním malých úlomků

- c) Porušování celých zrn s oddělováním celých částí zrna
- d) Úplné vylamování zrn z pojiva
- e) Porušením působením chemických vlivů ve styčném pásu zrna a obráběného materiálu
- f) Difúzní a adhezní opotřebení, které vzniká v zóně broušení při vysokých teplotách
- g) Zanášení prostoru mezi zrny (pórů) třískami a brusným odpadem. [3]



Obr. 5. Základní způsoby opotřebení brousicích kotoučů. [3]

1.4 Procesní kapaliny

Hlavní funkcí řezné kapaliny je účinný odvod tepla z místa řezání, jak už dokonalým chlazením, tak i mazáním, kdy přívodem řezné kapaliny dochází ke zmenšení vnitřního a vnějšího tření. Proto je nutné ve většině případů použít chladicí kapalinu, která má tři funkce:

- Odvádí část tepla, vzniklého při broušení
- Snižuje tření v místě řezu a tím i množství vzniklého tepla
- Odplavuje vzniklé třísky i odlomené části zrn kotouče

Chladicí kapalina by měla být přiváděná v dostatečném množství. Při běžném broušení asi 1 litr kapaliny za minutu na 1 mm šířky kotouče. Při rychlostním broušení je třeba přivádět kapalinu pod vysokým tlakem až 2 Mpa a ve větším množství. Pro běžné broušení se používá roztoků elektrolytů a emulzí, pro náročnější broušení se používají speciální chladicí kapaliny a řezné oleje určené pro broušení. [7]

Řezné kapaliny se obecně dělí do následujících skupin:

- a) Vodní roztoky
- b) Emulzní roztoky
- c) Mastné oleje
- d) Zušlechtěné řezné oleje
- e) Syntetické kapaliny

a) Vodní roztoky

Vodní roztoky jsou nejjednodušší řezné kapaliny, ale nejsou příliš výhodné z hlediska aplikace. Základem je voda, která vyžaduje řadu úprav, jako je její změkčování, přidávání přísad proti korozi, pro zlepšení sočivosti a proti pěnovosti. Vodní roztok musí být vždy alkalický. U těchto kapalin vzniká nebezpečí rozmnožování anaerobních bakterií, které způsobují tvorbu kalů a nepříjemný zápach.

b) Emulzní kapaliny

Emulzní kapaliny jsou disperzní soustavou dvou vzájemně nerozpustných kapalin, z nichž jedna tvoří mikroskopické kapky, rozptýlené v kapalině druhé. Obvykle se jedná o olej ve vodě. Přitom je třeba využít další složky tzv. emulgátory. Tyto látky zmenšují mezipovrchové napětí emulgovaných kapalin a stabilizují emulzi. Emulzní kapaliny spojují do jisté míry přednosti vody a mazacích olejů. Chladicí účinek emulzní kapaliny závisí na koncentraci emulze. Schopnost ochrany proti korozi závisí na hodnotě pH emulze, ale v daleko menší míře než u vodných roztoků. Emulgační prostředky musí splňovat požadavky především na jakost a spolehlivost účinku při vysokých tlacích. Provozní vlastnosti emulzních kapalin závisí na jejich přípravě.

c) Mastné oleje a tuky

Mastné oleje a tuky jsou látky živočišného a rostlinného původu a mají prakticky stejné vlastnosti jak olej minerální, ale mají menší povrchové napětí a tím i lepší sočivost, což přispívá k účinnějšímu odvodu tepla. Velkou nevýhodou těchto

mastných látek je značný sklon ke stárnutí, tzv. se zvyšuje jejich kyselost a tvoří se pryskyřičné látky. Mezi mastné látky užívané při obrábění patří řepkový olej, ricinový olej, lněný olej a další.

d) Minerální oleje

Minerální oleje jsou výrobky z ropy, s dobrými mazacími vlastnostmi, ale horším chladícím účinkem, ale mají dobrý ochranný účinek a dobrou odolnost proti stárnutí. Minerální oleje mají velmi dobré provozní vlastnosti, proto se využívají jako základ pro oleje řezné.

e) Řezné oleje

Řezné oleje jsou zušlechtěné minerální oleje. Přísady, které se používají, mají vyšší tlakovou únosnost a také lepší mazací vlastnosti.

Přísady, které zlepšují mazací schopnosti řezných olejů, jsou:

- mastné látky
- organické sloučeniny
- pevná maziva

Do první skupiny mastných látek patří zmýdelnitelné mastné oleje, mastné kapaliny nebo syntetické estery. Tyto přísady zvětšují přilnavost oleje ke kovu a zlepšují mazací schopnosti, ale ne za extrémních tlaků.

Do druhé skupiny patří organické sloučeniny určitých prvků, jako je síra, chlor, fosfor. Všechny tyto látky se osvědčily jako vysokotlaké přísady. Na povrchu vytvářejí vrstvičku kovových mýdel, která zabraňují kovovým svarům a usnadňují kluzný pohyb troucích se ploch.

Do třetí skupiny pevných maziv patří grafit a sirník molybdenu. Pevná maziva, která se používají jako přísady do řezných olejů, působí při řezání mechanickým účinkem. Svou afinitou ke kovu vytvářejí mezní vrstvu odolnou proti tlakům a zlepšují mazací schopnosti oleje. Jejich nevýhodou je, že se v kapalinách nerozpouští a musí se proto udržovat v rozptýleném stavu. [7]

1.5 Integrita povrchu

Integrita povrchu je souhrn charakteristik, kterými lze hodnotit kvalitu povrchové vrstvy ve vztahu k jeho funkčním vlastnostem a provozní spolehlivosti. Kvalita obrobeného povrchu, kterou požaduje konstruktér je základním vstupním údajem životnosti a spolehlivosti strojů i samostatného výrobního procesu. Špatná drsnost ohrožuje kvalitu výrobku, trvanlivost a provozuschopnost strojů. Neúměrná vysoká kvalita povrchu neúčelně a zbytečně zvyšuje výrobní náklady. Ukazatelem kvalitního hodnocení obrobku je míra dodržení všech předepsaných výkresových rozměrů, odchylek tvaru a polohy a požadované drsnosti obrobených ploch. Při výrobě součástku nezhotovíme nikdy úplně přesně. Skutečné hodnoty se vždy odchylují od jmenovité hodnoty nahoru nebo dolů tzv. s plusovou nebo minusovou tolerancí. Geometrie obrobené plochy se liší od ideální geometrie zadané výkresem. Na obrobené ploše jsou vlivem stop po řezném nástroji a plastických deformací určité mikronerovnosti. Stav a jakost obrobeného povrchu mají vliv na únavovou pevnost, odolnost vůči opotřebení, protikorozní stabilitu, životnost a provozuschopnost strojů. Stav a jakost obrobené plochy posuzujeme z hlediska geometrie obrobeného povrchu, fyzikálně-mechanických vlastností povrchové vrstvy, struktury i deformace, případně i dalším mimořádných jevů povrchové vrstvy. Při zkoumání geometrických odchylek skutečného tvaru od ideálního se všímáme makrogeometrických a mikrogeometrických odchylek a vlnitosti. [8]

Podle následujících hledisek můžeme posuzovat integritu povrchu:

- a) Přesnost rozměru a tvaru – je dána vlastní přesností stroje, tuhosti systému stroj-nástroj-obrobek-přípravek a dalšími faktory, které působí přímo na technologický proces.
- b) Drsnost a mikrostruktura – je ovlivněna bezprostředně procesem broušení. Nejvýznamnější prvky tohoto vlivu je řezná rychlost, tvar nástroje, působení různých brousících materiálů, jejich opotřebení apod.
- c) Vlastnost povrchové vrstvy – je vyjadřována strukturními změnami, stupněm zpevnění, které jsou úměrné velikosti zbytkových napětí.

Na kvalitu obrobeného povrchu má vliv míra i velikost zpevnění a hloubka zpevněné vrstvy. Velký vliv mají také zbytková napětí pod obrobeným povrchem. Tyto jevy se vyskytují především u broušených povrchů. Zabezpečení přiměřené stability jakostních

parametrů obráběním nejehospodárnějším způsobem je základní úlohou optimální technologie. [8]

Složkami integrity povrchu jsou:

- Drsnost povrchu
- Geometrická přesnost
- Změny tvrdosti
- Změny struktury
- Tepelné změny
- Trhliny
- Zbytkové napětí

1.5.1 Drsnost povrchu

Drsnost je souhrn nerovnosti povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Do drsnosti se nepočítají vady povrchu, tj. náhodné nepravidelné nerovnosti, které se vyskytují jen ojediněle (rysky, trhliny, důlky apod.) a které vznikají vadami materiálu, poškozením aj. Podle převládajícího směru nerovnosti se drsnost posuzuje v příčném nebo podélném směru.

Definice geometrických parametrů:

P - parametr: parametr vypočítaný ze základního profilu. Je to nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými mezními přímkami z nefiltrovaného profilu povrchu uvnitř měřené délky l_n .

R – parametr: parametr vypočítaný z profilu drsnosti. Je to svislá vzdálenost od nejvyšší špičky k nejhlubším filtrovaném profilu drsnosti uvnitř měřené délky l_n .

W – parametr: parametr vypočítaný z profilu vlnitosti. Je to vzdálenost mezi nejvyšším a nejhlubším bodem vyrovnaného profilu vlnitosti uvnitř měřené délky l_n . [1]

Parametry textury povrchu:

1) **Amplitudové parametry** představují skupinu parametrů prostorového hodnocení, která vychází z rozložení výšek souřadnic profilu povrchu.

- **Ra** – Průměrná aritmetická úchylka povrchu
- **Rq** – Průměrná kvadratická úchylka (Rms) povrchu

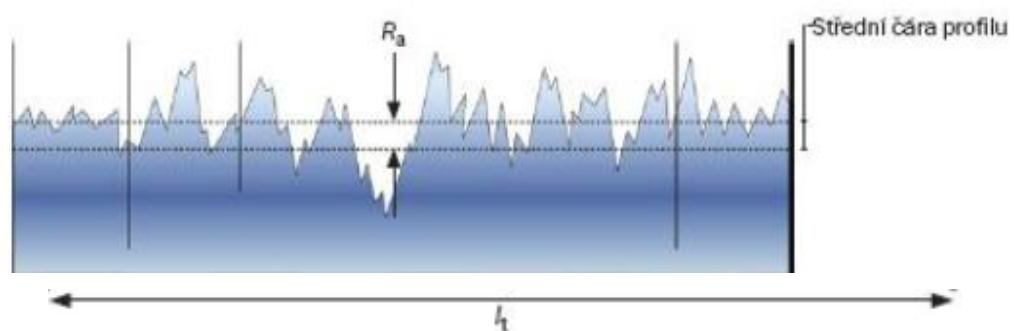
- **R_t** – Celková výška povrchu
- **R_p** – Maximální výška výstupků
- **R_v** – Maximální hloubka prohloubení
- **R_z** – Největší výška profilu drsnosti
- **R_{sk}** – Šikmost křivky rozdělení výšek

Průměrná aritmetická úchylka povrchu **R_a**

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu je přednostní výškovou charakteristikou drsnosti povrchu. Je to střední aritmetická hodnota absolutních úchylek profilu v rozsahu měřené délky l_r .

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (7)$$

Střední aritmetická odchylka profilu R_a je základní charakteristikou pro popis mikrogeometrie povrchu. Naměřené hodnoty této veličiny vykazují při opakovaném měření poměrně značnou přesnost. Střední aritmetická odchylka profilu nám neumožňuje představu o tom, jak povrch vytvořený technologickou operací skutečně vypadá. Udává pouze střední hodnotu vzdáleností souřadnic jednotlivých bodů profilu zkoumaného povrchu od střední čáry profilu. [3]

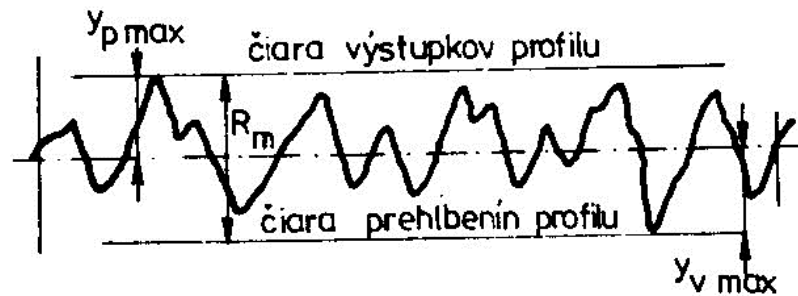


Obr. 6. Vyjádření hodnoty R_a .

Největší výška nerovnosti profilu **R_m**

Největší výška nerovnosti profilu R_m udává pouze největší hloubku profilu kontrované plochy v rozsahu základní délky. Používá se jako doplňkové měřítko drsnosti povrchu. Jako míra drsnosti povrchu má u funkčních povrchů malý význam, protože v řadě případů nevyjádří správně drsnost povrchu. Je výšková charakteristika drsnosti povrchu určená vzdáleností mezi čarou výstupku profilu a čarou prohlubní profilu v rozsahu základní délky a má vztah: [3]

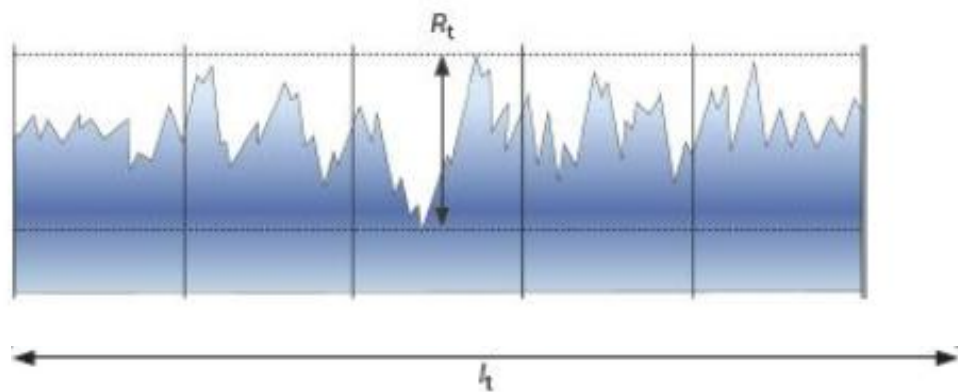
$$R_m = y_{pmax} - y_{vmax} \quad (8)$$



Obr. 7. Vyjádření hodnoty R_m . [1]

Celková výška profilu R_t

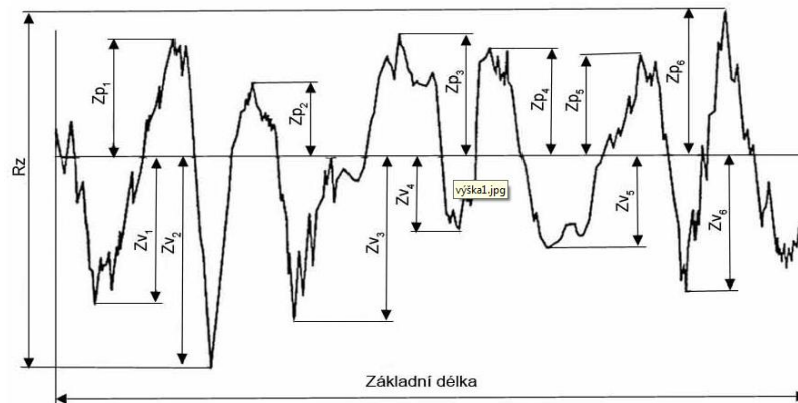
Celková výška profilu je součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky l_n .



Obr. 8. Vyjádření hodnoty R_t . [1]

Největší výška profilu drsnosti R_z

Je součet největší výšky Z_p a nejnižší hloubky Z_v v rozsahu základní délky. [3]



Obr. 9. Vyjádření hodnoty Rz. [1]

2) Plošné a objemové parametry

- **Rmr** – Nosný poměr v dané hloubce
- **Rdc** – Výškový rozdíl řezů povrchem
- **Rmvr** – Střední hodnota poměru nezaplňného objemu
- **Rmmr** – Střední hodnota poměru materiálového objemu

3) Hybridní parametry

Hodnocení textury, které charakterizují spojení kritérií amplitudových s prostorovými jako jsou sklony, zakřivení atd.

- **Sdq** - Kvadratický sklon povrchu
- **Ssc** – Aritmetický průměr zakřivení výstupků povrchu
- **Sdr** – Poměrná rozvinutá styková plocha

4) Funkční parametry

Nazývají se také jako parametry nosného podílu. Jsou skupinou parametrů charakterizující funkční aspekty povrchu, především mazání a broušení. Jsou speciálně určeny kontrole v automobilovém průmyslu.

- **Sk** – Hloubka drsnosti jádra
- **Spk** – Výška výstupků drsnosti
- **Svk** – Hloubka drsnosti prohloubení
- **Sr1** – Horní materiálový poměr
- **Sr2** – Dolní materiálový poměr [3]

1.5.2 Geometrická přesnost

Geometrická přesnost je určena odchylkami tvaru, jedná se zejména o souosost, kruhovitost, válcovitost, kolmost. S vlnitostí povrchu mohou souviset textury, na které je nanesena (vytvořena) drsnost. To může být způsobeno chvěním, deformací obrobku a zpevněním materiálu. Vlnitost může způsobovat vliv stroje, např. nevyváženost broušícího kotouče, nepřesnost vodících částí nebo malá tuhost.

Odstranění minimální vlnitosti je třeba hledat ve volbě vhodného brusného kotouče, jeho tvrdosti a zrnitosti. Brusný kotouč i při jemném orovnění si musí zachovat řezivost a jeho povrch nesmí být uhlazený. Tam, kde požadujeme především vysokou kvalitu broušeného povrchu (vlnitost, drsnost povrchu, vzhledová bezzávadnost) je vhodné volit kluzné, případně kombinované vedení brusného větveníku. [15]

1.5.3 Změny tvrdosti

Změna tvrdosti v povrchové vrstvě je dána jak mechanickým, tak tepelným zatížením povrchu při obrábění. Deformační zpevnění obráběného materiálu při plastické deformaci můžeme charakterizovat velikostí tangenciálního napětí τ , které vyvolává smyk. V prvním přiblížení jej lze charakterizovat tangenciálními napětími v třech rozlišných zónách – v zóně tvoření třísky a v zóně kontaktu třísky s obráběným materiálem na čele a na hřbetu zrna. Takové rozdělení podmiňuje to, že ve sledovaných zónách je gradient deformace, rychlosti deformace a teploty. Zpevnění obráběného materiálu při plastické deformaci v zóně tvoření třísky můžeme přibližně charakterizovat střední hodnotou smykového napětí na plochu smyku τ . Podobně můžeme charakterizovat zpevnění při plastické deformaci v kontaktních vrstvách střední hodnotou smykového napětí deformovaných vrstev třísky podél čela zrna τ_{ky} a střední hodnotou smykového napětí plasticky deformovaných vrstev obráběného materiálu podél hřbetu zrna τ_{ka} . Protože teploty a rychlost deformace na čele a hřbetu zrna se odlišují málo, můžeme přibližně napsat $\tau_{ka} = \tau_{ky}$. Velikost poměrné deformace ε a rychlost deformace $\dot{\varepsilon}$ obráběného materiálu jsou v místě smykové plochy a v kontaktních vrstvách neobyčejně velké a mnohokrát převyšují deformaci materiálu při standardních deformačních zkouškách.

V začáteční fázi se zvětšováním deformace materiálu intenzivně zpevňuje a napětí prudce roste. Dalším zvětšováním deformace se snižuje přírůstek napětí a křivka deformačního zpevnění se asymptoticky blíží k určené hranici. [3]

1.5.4 Změny struktury

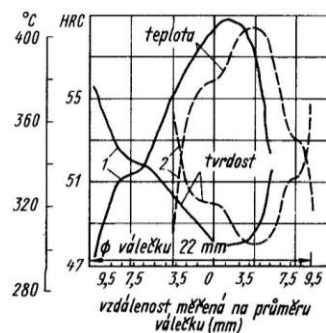
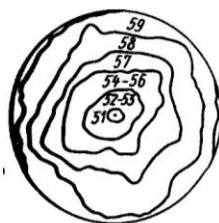
Vlivem vysokého mechanického zatížení a vznikajícího tepla při broušení, může dojít ke změnám struktury materiálu. Všechny tyto změny v negativním směru jsou nežádoucí, neboť nám ovlivňují následné užité vlastnosti materiálu. Tyto změny struktury v povrchové vrstvě během používání součástí, působí jako koncentrátoři napětí, což vede k iniciaci trhlin, pettingu, a tím se snižují požadované mechanické vlastnosti součástí.

1.5.5 Tepelné změny

Opaly jsou velmi vážné defekty kalených ocelí. Při opalu vzniká změna struktury povrchové vrstvy broušeného obrobku, způsobena vysokými okamžitými teplotami a intenzivním teplem působícím na velice malé úseky povrchové vrstvy obrobku. Opaly s drobnými trhlinami zhoršují mechanické vlastnosti povrchové vrstvy, hlavně jejich tvrdost a odolnost proti opotřebení.

Příčinou vzniku opalu mohou být:

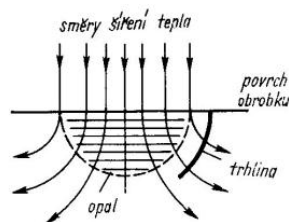
1. Obtížné podmínky broušení, kdy vznikají velké tlaky a intenzivní ohřev obrobku
2. Volba příliš tvrdého kotouče, který rovněž způsobuje růst zatížení zrn brusiva působící na broušený kov
3. Silné otupení nebo taky zanešení pracovní plochy brousícího kotouče kovovými třískami
4. Nedostatečný chladicí účinek řezné kapaliny při broušení tvrdých nebo taky kalených ocelí
5. Házení kotouče, špatné upnutí obrobku [3]



Obr. 10. Čelo válečku s opalem a povrchová tvrdost opalu s odpovídající teplotou [3]

1.5.6 Trhliny

Za vysokých okamžitých teplot broušení a vzniku opalů často vznikají trhliny v povrchové vrstvě obrobku, také vznikají trhliny na okrajích opalů, které zevnitř ohýbají. Zpravidla se vyskytují v pásmu, které není opalem zasaženo. Je to způsobeno tím, že popuštěná vrstva s trostitovou strukturou je značně plastická a vnitřní napětí způsobují pouze nevelké plastické deformace. V pevné martenzitické struktuře se vnitřní napětí však projevuje porušením povrchové vrstvy. To však platí v případě, že trhlina vzniká kolem izolovaného opalu. Je-li na nevelké ploše několik opalů, je vznik a rozložení trhlin složitější. Vyskytují-li se na povrchu silné opaly, nemusí někdy trhliny vzniknout, i když by se jinak při slabých opalech vytvořily. Vnitřní napětí působící v obrobku ještě před broušením, mají tedy pravděpodobně stejný význam jako napětí vznikající při nesprávném režimu broušení. [3]



Obr. 11. Schéma vzájemného výskytu opalu a trhliny. [3]

1.5.7 Zbytkové napětí

Jsou definována jako napětí, která se v materiálu vyskytuje bez působení vnějšího zatížení. Jejich vznik je spojen s technologií výroby a úpravy materiálu. Velký význam mají povrchová zbytková napětí, přičemž jejich vliv může být prospěšný i škodlivý. Tahová napětí jsou považována za škodlivá. Tlaková napětí naopak zlepšují únavové vlastnosti materiálu a omezují vznik a rozvoj povrchových trhlin, Vysoké hodnoty zbytkového napětí a s nimi spojené relaxační procesy obecně ovlivňují pevnostní charakteristiky materiálu a mohou vést k nestabilitě tvaru a kvality povrchu. [3]

2 BROUSÍCÍ KOTOUČE

Základní část brousících materiálů tvoří brousící zrna, která jsou vázána pojivem a vytváří brousící, lapovací, honovací nástroje. Brousící kotouč lze definovat jako nástroj složený z velkého množství brousících zrn spojených v pevný celek s různě velkými póry. Nástroj může mít tvar kotouče, brousícího tělíška, segmentu, pásu s pružným podkladem apod. [3]

Brousící nástroj je přitom charakterizovaný následujícími veličinami:

- 1) Geometrickým tvarem a rozměry
- 2) Druhem (materiálem) brusiva
- 3) Zrnitostí brusiva
- 4) Tvrdostí nástroje
- 5) Strukturou nástroje
- 6) Pojivem

2.1 Značení brousících kotoučů

Značení brousících kotoučů podle ČSN ISO 525 se skládá z určení tvaru, rozměrů, specifikace složení brousícího materiálu a maximální obvodové rychlosti. Brousící materiál charakterizuje druh brousícího materiálu, rozměr, zrnitost, tvrdost, strukturu a druh pojiva. [3]

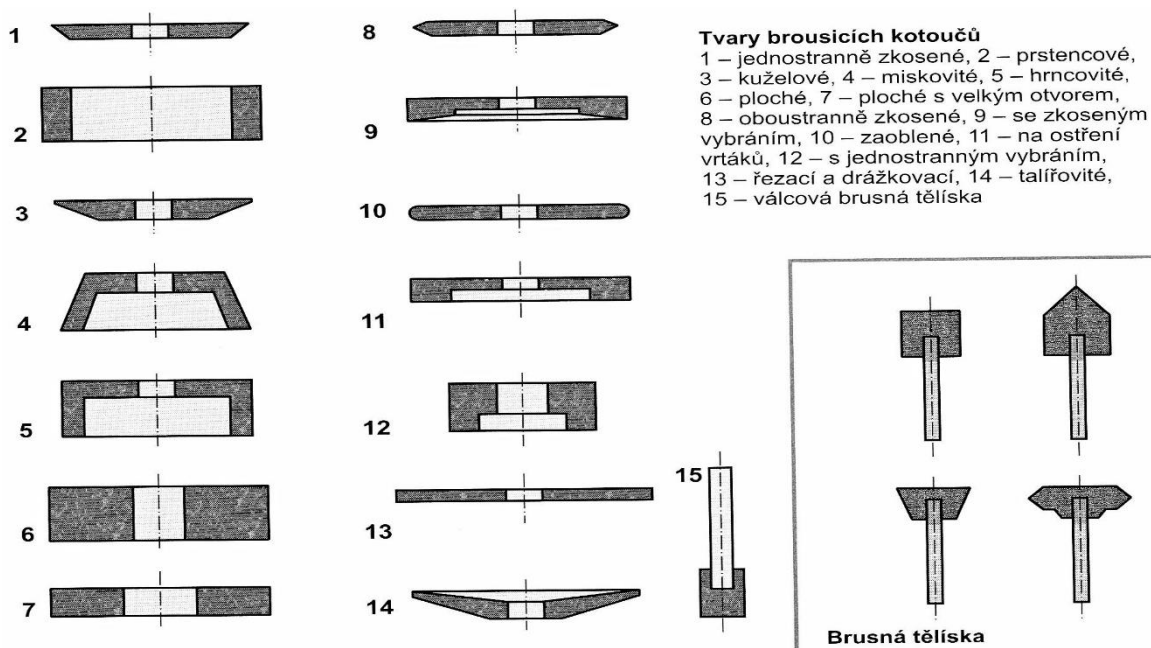
T1 125x16x20 A96 60 K 9 V 35m.s⁻¹

| | |
|---------------------------|-------------------|
| T1 | TVAR KOTOUČE |
| 125x16x20 | ROZMĚR |
| A96 | BRUSIVO |
| 60 | ZRNITOST |
| K | TVRDOST |
| 9 | STRUKTURA |
| V | POJIVO |
| 35m.s⁻¹ | OBVODOVÁ RYCHLOST |

2.1.1 Rozměry a tvary kotoučů

Rozměr brousícího kotouče nebo tělíska je dán typem stroje a druhem prováděné operace. Čím větší je průměr brousícího kotouče, tím delší je ochlazovací dráha, na které je brusné zrna namáháno, což je příznivé pro životnost kotouče. Pokud zvětšíme průměr brousícího kotouče při jeho stálé obvodové rychlosti, sníží se drsnost obráběného povrchu, protože se prodlužuje stykový oblouk kotouče, obrobku a zmenšuje se tloušťka třísky odebíraná jedním zrnem. Zvětší-li se průměr kotouče nepodstatně, tak kvalita broušené plochy se nezlepšuje.

Tvary kotoučů jsou normalizovány, nejčastěji se používáme tvary uvedené na obr. 13. Mezi příložky se vkládá pružná vložka z pryže, nebo lepenka. [3]



Obr. 12. Tvary brousících kotoučů. [3]

2.1.2 Brusiva

Jsou tvrdé, houževnaté, ostrohranné krystalické látky, kterými lze brousit měkčí materiály.

Značení brousících kotoučů:

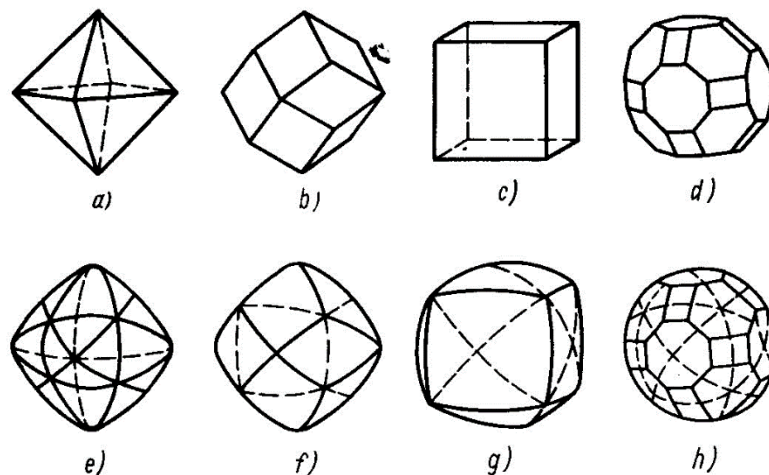
A – brusné materiály založené na oxidu hlinitém Al_2O_3 korundy se používají na broušení železa, oceli. (A- korund, 38A- korund bílý, 86A- korund rubínový, 32A- monokrystalický korund).

C- brusné materiály založené na karbidu křemíku se používají na broušení neželezných kovů, nekovových materiálů, skla, keramiky. (37C- černý karbid křemíku, 39C- železný karbid křemíku).

Základní druhy přírodních a umělých brousících materiálů:

a) Přírodní brousící materiály

- Přírodní diamant (A) je modifikací uhlíku krystalické struktury, která obvykle obsahuje množství příměsí různých chemických prvků. Různorodost krystalů přírodního diamantu je podmíněna jak krystalickou formou, tak i různou stavbou stěn tvarem si blízkých krystalů a jejich deformacemi. Diamantové krystaly mají různý geometrický tvar, který se blíží ke geometricky pravidelnému tvaru. Nejčastěji se vyskytují tyto krystalické tvary: [3]



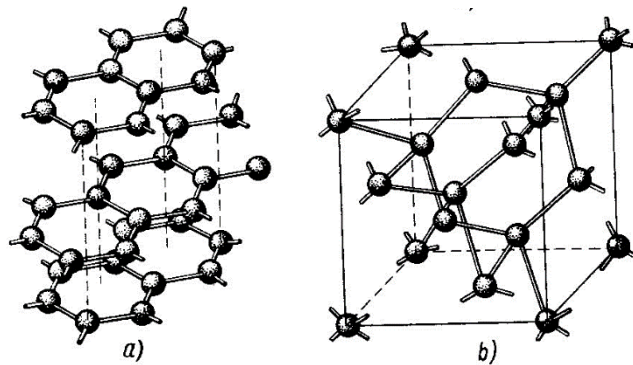
Obr. 13. Tvar krystalů přírodního diamantu. [3]

- Korund € je minerál skládající se hlavně z krystalického oxidu hlinitého (80 až 90 % Al_2O_3) s příměsí dalších minerálů. Je to velmi tvrdý a lehce křehký materiál. Přírodní korund krystalizuje v hexagonální krystalové soustavě ve tvaru protáhlých dipyramidálních hranolovitých, klencových a pinakonálních krystalů. Dipyramidální tvary jsou tvořeny stěnami ve tvaru pyramid s málo vyvinutými stěnami základního klence.
- Smirek (N) je minerál na bázi krystalického oxidu hlinitého, který obsahuje do 60% Al_2O_3 . Různé vedlejší příměsí snižují s porovnáním s korundem jeho brusné vlastnosti.

- Křemen (Kr) je minerál, který obsahuje hlavně oxid křemičitý (až 97% SiO_2) a příměsi dalších minerálů.

b) Syntetické brousící materiály

- Syntetický diamant (AS) se získává pomocí katalyzátoru z materiálu obsahující uhlík. Pro výrobu umělého diamantu se používá grafit (častěji saze nebo dřevěné uhlí), katalyzátorem může být kov (chrom, nikl, kobalt, železo atd.). Katalyzátor se za vysokého tlaku a teploty taví a atomy uhlíku mění svou hexagonální strukturu charakteristickou pro grafit na krychlovou, která je typická pro diamant. Při tom se mění vlastnosti materiálu a z měkkého grafitu vzniká velmi tvrdý materiál neboli diamant.



Obr. 14. Krystalografická mřížka grafitu a diamantu. [1]

- Elektrokorund je krystalický oxid hlinitý (Al_2O_3), který se získává vytavením látek bohatých tímto oxidem (bauxity, čistý oxid hlinitý) v elektrických pecích. Podle obsahu oxidu hlinitého má elektrokorund různou barvu, strukturu a vlastnosti. Elektrokorund rozlišujeme třemi druhy: normální, bílý a monokorund. Vyráběný elektrokorund je vhodným brusivem na broušení materiálů s velkou pevností v tahu, a při broušení legovaných kalených ocelí s malou tepelnou vodivostí.
- Karbid křemíku (karbokorundum) je sloučenina křemíku s uhlíkem (SiC), která se vyrábí v elektrických pecích za teploty 2 100 až 2 200 °C. Výchozí surovinou je křemenný písek a látky obsahující uhlík což jsou koks a antracit. Výrobní proces spočívá v křečkování uhlíkových částic párami kyseliny křemičité. Technický karbid křemíku bývá dvojího druhu a tím prvním je zelený karbid křemíku (KZ) s obsahem alespoň 97% SiC , který je tvrdší ale méně houževnatý, používá se k ostření nástrojů ze slinutých karbidů, a tím druhým druhem je černý karbid křemíku (KČ), který mívá

černou nebo temně modrou barvu a kovový lesk. Obsahuje nejméně 95% SiC. Často se používá na broušení kovů s malou pevností v tahu, např. šedá a bílá litina, měď, mosaz, hliník, křehké druhy bronzu apod.

- Karbid boru (KB) obsahuje krystalický karbid boru (do 94% B₄C) a malé množství příměsí. Vyrábí se v elektrických pecích z technické kyseliny borité (B₂O₃) a uhličitého materiálu s malým obsahem popela ropného koksu.
- Kubický nitrid boru (KBN) je velmi tvrdý materiál, který obsahuje 43,6 % boru a 56,4 % dusíku. Krystalická mřížka KBN se podobá mřížce diamantu, tzn., že má stejnou stavbu, ale obsahuje atomy boru a dusíku.
- Polykrystalický kubický nitrid boru (CBN) je materiál s mimořádně vysokou tvrdostí za tepla, který lze používat při velmi vysokých řezných rychlostech. Vyznačuje se také velmi dobrou houževnatostí a odolností proti tepelným rázům. [3]

2.1.3 Zrnitost brusiva

Zrnitost se volí dle požadované drsnosti broušeného povrchu součásti a materiálu, z kterého se vyrábí. Čím vyšší jsou požadované drsnosti povrchu, tím jemnější je zrnitost. Pro větší úběr materiálu a případně broušení mědi, mosazi a hliníku se volí hrubší zrnitost. Značení zrnitosti dle ČSN ISO 525 (22 4503) koresponduje se světlostí ok třídících sít. Čím větší je údaj zrnitosti, tím je kontrolní síto i zrno jemnější. To je podstatná změna značení proti ČSN 22 4501, kde zrnitost vyjadřuje rozměr brusných zrn (číslo zrnitosti x 10 = rozměr zrna v μm). Jako brusivo se nejčastěji používá elektrokorund a karbid křemíku.

Tab. 1. Značení zrnitosti. [1]

| | OZNAČENÍ | |
|----------------------|---|---------------------|
| | ČSN ISO 525 (22 4502) | ČSN 22 4501 |
| Velmi hrubá | Není | 250, 200, 160 |
| Hrubá | 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 22, 24 | 125, 100, 80, 63 |
| Střední | 30, 36, 40, 46, 54, 60 | 50, 40, 32, 25 |
| Jemná | 70, 80, 90, 100, 120, 150, 180 | 20, 16, 12, 10 |
| Velmi jemná | 220, 240, 280, 320, 260, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200 | 8, 6 |
| Zvláště jemná | Není | 4, 3, M32, M22, M15 |

2.1.4 Tvrdost nástroje

Tvrdost brousícího kotouče je dána silou v brousícím kotouči jednotlivých zrn. Je do jisté míry závislá na podílu pojiva v brousícím kotouči a na velikosti lisovacího tlaku, kterým se brousící nástroj vytváří. Tvrdost je značena velkým písmenem abecedy. Čím je velké písmeno daleko od začátku abecedy, tím je brousící nástroj tvrdší.

Tab. 2. Značení tvrdosti. [1]

| Stupeň tvrdosti | Označení | Oblasti použití |
|-----------------|---------------|--|
| A, B, C, D | zvláště měkké | hloubkové a čelní broušení tvrdých materiálů |
| E, F, G | velmi měkké | |
| H, I, J, K | měkké | běžné broušení kovů |
| L, M, N, O | střední | |
| P, Q, R, S | tvrdé | broušení vnějších rotačních ploch (do kulata) broušení měkkých materiálů |
| T, U, V, W | velmi tvrdé | |
| X, Y, Z | zvláště tvrdé | |

2.1.5 Struktura nástroje

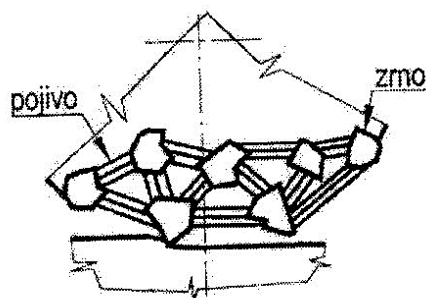
Vyjadřuje vzdálenost mezi brousícími zrny (tzv. pórovitost) nebo i hutnost brousícího nástroje. Značí se čísla od 0 do 14. Čím vyšší je číslo, tím je vzdálenost mezi zrny větší. Hutné brousící materiály se volí na broušení tvrdých a křehkých materiálů. Pórovité kotouče jsou vhodné na broušení houževnatých materiálů. Dále pórovité kotouče slouží k broušení součástí, které se nesmí broušením zahřívát. Podle této tabulky mají běžně používané kotouče strukturu:

Tab. 3. Rozdělení struktur brousících zrn. [1]

| Označení | Struktura | Objem pórů (%) |
|----------|-----------|----------------|
| 3 | hutná | 13 |
| 4 | | 18 |
| 5 | polohutná | 23 |
| 6 | | 28 |
| 7 | pórovitá | 33 |
| 8 | | 38 |

2.1.6 Pojivo

Vzájemně spojuje brousící zrna do brusného nástroje. Pojivo má za úkol umožnit, aby si při broušení uvolňovala opotřebovaná zrna a k řezání přicházela zrna s ostrými břity. Pojivo má u měkkých materiálů dlouho držet zrna brusiva a u tvrdých má umožnit rychlejší vylomení. [1]



Obr. 15. Struktura brousícího nástroje [1]

Tab. 4. Druhy pojiv. [1]

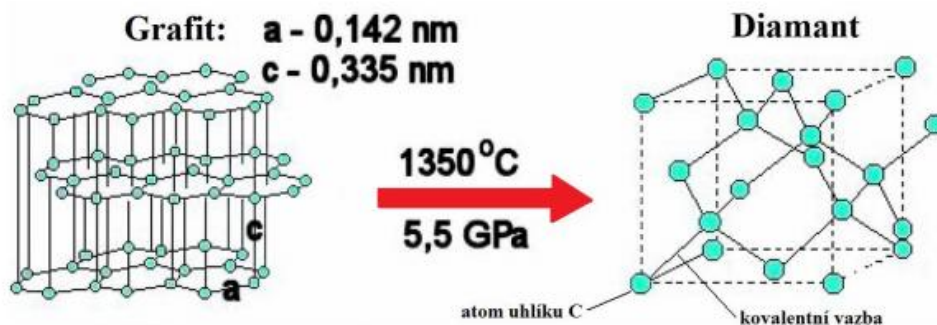
| Druh pojiva | ČSN 22 4010 | Složení | Použití |
|-----------------------|-------------|--------------------------------------|---|
| Keramické | V | Směsi různých křemičitanů | Základní pojivo normálních kotoučů s výjimkou prořezávacích |
| Silikátové | S | Alkalické křemičitaný | Omezené použití, např. pro měkké tvarové kotouče nebo drobné nástroje |
| Magnezitové | O | Cementové pojivo z magnezitu | Omezené použití pro méně přesné broušení |
| Přírodní šelak | E | Organická látka | Menší pevnost než bakelit. Nástroje na ozubení apod. |
| Pryž | R | Vulkanizovaná s přídavkem síry | Pro velké rychlosti, hladký povrch obráběný |
| Syntetické pryskyřice | B | Například bakelit | Po keramickém nejdůležitější pojivo. Vhodné pro broušení závitů a pro nárazové broušení |
| Kovové | - | Slitiny mědi, lehké kovy, litina aj. | Pro diamantové kotouče |

3 DIAMANT

Diamant je forma uhlíku krystalizující v kubické modifikaci o specifické hmotnosti $3,2 \text{ g.m}^{-3}$. Vyskytuje se v přírodní formě a rovněž se připravuje syntézou za vysokých tlaků a teplot. Je to nejtvrděší známý materiál a v Mohsově stupnici zaujímá 10. místo.

3.1 Výroba

Diamanty se vyskytují převážně v granátických peridotitech (olivínovcích) uzavřených v trubkovitých tělesech tzv. kimberlitů a jiných vulkanických hornin, jež jsou vlastně přírodními kanály, jimiž byly útržky peridotitů s diamanty vyneseny blíže k zemskému povrchu z hloubek větších než 150 km. Větráním těchto hornin se diamanty dostávají do náplavů. Těženy jsou jak přímo z matečných hornin, tak z náplavů. Asi 80 % vytěžených diamantů nemá drahokamovou kvalitu a jsou využity v průmyslu. Pro technické účely se ovšem diamanty především vyrábějí uměle – asi 80 % průmyslových diamantů je syntetických; vyrábějí se z nich brusné a lešticí materiály, řezné dráty, vrtné nástroje, průvlaky na tažení drátů, ložiska v přesných přístrojích atd. [11]



Obr. 16. Přeměna krystalické mřížky diamantu. [11]

3.1.1 Přírodní diamant

Ve volné přírodě se nejčastěji vyskytují ve vyvřelé hornině kimberlitu. Místem původního výskytu diamantů jsou ložiska magnetického původu, tzv. primární ložiska, kde jsou diamanty rozšířeny v tmavých horninách. Přírodní diamanty mají mimořádně velkou tvrdost oproti korundu.

Vzrůstající spotřeba technických diamantů vedla k prvním pokusům výroby diamantu, které vyústily v první úspěšnou syntézou diamantu. Diamantové prášky získané syntézou plně vyhovovaly požadavkům mnoha průmyslových odvětví.

Technické diamanty se rozdělují:

- **Karbonado** – nazývají se často jako černé diamanty vůči své černé barvě. V porovnání s ostatními skupinami technických diamantů mají vysokou tvrdost a jsou vzácně vyskytované.
- **Ballasy** – vytváří drobné kulovité krystalky, které jsou charakteristické svou vysokou tvrdostí a pevností v porovnání s ostatními druhy technických diamantů. Vyskytují se zřídka.
- **Bort** – v průmyslu se využívá na výrobu nástrojů, jako jsou průvlaky, hroty na měřidla nebo brusné kotouče. Patří sem barevné, čiré, průsvitné i neprůsvitné krystaly. Mají tvar pravidelných mnohostěnů, ale i nedokonalé tvary s různými plochami a oblými stěnami.
- **Krashing bort** – tvoří krystalky nepravidelných kulovitých tvarů, které jsou neprůhledné a obsahují až 20% nečistot. Používají se nejvíce pro výrobu diamantového prachu, který se používá při leštění a broušení. [12]

3.1.2 Syntetický diamant

Po řadě úspěchů či neúspěchů se skutečný úspěch dostavil až v roce 1954, kdy Tracy Hall ze společnosti General Electric postavil zařízení napodobující podmínky při vzniku přírodních diamantů.

Většina diamantů používaných dnes na celém světě v průmyslu je syntetických. Uvádí se, že každý rok je v průmyslu spotřebováno 200 tun drobných diamantů, případně diamantového písku.

Syntetické diamanty se dnes nejčastěji vyrábějí jednou ze dvou metod:

- **HPHT** (high pressure high temperature) diamanty se pečou za vysokých teplot a tlaků. Tato metoda byla vyvinuta společností General Electric v polovině 20. století)
- **CVD** (Chemical vapor deposition) je podstatně něžnější metoda kondenzace par na vhodném podkladu, kterým je zde přímo diamant. Směs vodíku s metanem je při této metodě atakována nabitými částicemi nebo přímo plazmou. To vyvolá složitou chemickou reakci a následně dešť uhlíku dopadající na podklad, kde ztvrdne ve formě diamantu. [13]

3.2 Vlastnosti

Diamant je čistý přírodní uhlík vykrytalizovaný v horninách ve velkých hloubkách za velmi vysokých tlaků. Oproti grafitu, který je rovněž přírodní formou uhlíku, se liší uspořádáním atomů v krystalové struktuře. Ty jsou uspořádány takovým způsobem, že diamant je vůbec nejtvrdějším existujícím přírodním materiálem. Tato jeho vlastnost je využívána v mnoha technologiích. Diamant je sice velmi tvrdý, zato ovšem velmi křehký. To znamená, že diamant lze dobře rýpat do jiných materiálů, lze s ním řezat a diamantovým práškem brousit a leštit, na druhou stranu, pokud do zrna respektive krystalu diamantu udeříme kladivem, velmi snadno se rozštípně. Je dokonale štěpný podle ploch osmistěnu. Další jeho vynikající vlastností je jeho dobrá tepelná vodivost a tepelná odolnost. Diamant při teplotě kolem 1000 °C hoří a spaluje se na oxid uhličitý. Za normální teploty je odolný vůči všem chemickým vlivům. Z důvodu afinity k železu za vysokých teplot není vhodný pro zpracování oceli. Při broušení totiž dochází na styčných plochách diamantového zrna a oceli k značnému vývinu tepla a tím k chemické reakci. To má vliv na změnu struktury jak diamantu, tak povrchu obrobku. [11]

Tab. 5. Základní vlastnosti diamantu. [11]

| Vlastnosti | Hodnota |
|---|----------------------|
| Krystalická mřížka | Kubická |
| Mřížková konstanta | b=0,356 |
| Hustota[g/m ³] | 3,5 |
| Tvrдость podle Vickerse | 10 000HV |
| Tepelná vodivost[W.m ⁻¹ .K ⁻¹] | 560 |
| Délková roztažnost[K ⁻¹] | 0,8*10 ⁻⁶ |

3.3 Využití

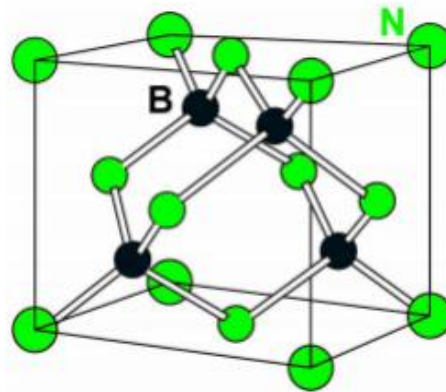
Průmyslové diamanty jsou většinou ceněny pro jejich tvrdost a tepelnou vodivost, ne pro jejich jasnost a barvu, to je v průmyslu většinou vedlejší. Toto pomůže vysvětlit to, proč 80 % těžných diamantů je nevhodných pro použití na drahé kameny, ale je předurčena k průmyslovému využití. Kromě těžných diamantů, syntetické diamanty našly průmyslové využití téměř okamžitě po jejich vynálezu v padesátých letech. Syntetické diamanty jsou produkovány každoročně v čtyřikrát větším množství než přirozené diamanty těžné přes stejné období.

Dominantní průmyslové použití diamantu je ve vrtání, ostření a leštění, a to díky jeho tvrdosti. Většina diamantů v těchto technologiích nevyžaduje velké diamanty. Ve skutečnosti většina diamantů, které jsou kvalitní, ale mají malou velikost, mohou najít průmyslové použití. Diamanty jsou většinou zasazené na ostří. Specializované aplikace zahrnují použití diamantů v laboratořích jako omezení pro experimenty vysokého tlaku, vysokovýkonných strojů a omezené použití mají také ve specializovaných oknech.

Nyní je možné použití diamantu jak polovodiče vhodné pro stavbu mikročipů nebo použití diamantu jako chladič v elektronice. [14]

4 KUBICKÝ NITRID BORU

Kubický nitrid boru (CBN) je syntetický materiál, který se v přírodě nevyskytuje. Vyrábí se syntézou z hexagonálního nitridu boru za vysokých teplot a tlaků. Na rozdíl od diamantu má vyšší tepelnou stálost a tepelnou odolnost do 1200°C. Specifická hmotnost je 3,48 g.cm⁻³ a v Mohosově stupnici tvrdosti je mezi 9-10 místem. Z tohoto důvodu se používá hlavně k broušení zušlechťených kalených nástrojových ocelí.



Obr. 17. Krystalická mřížka kubického nitridu bóru.

4.1 Výroba

Kubický nitrid boru se vyrábí podobnými metodami jako syntetický diamant. Proto můžeme najít podobnosti mezi diamantem a kubickým nitridem boru. Například tvrdost je o několik tisíc Vickersův nižší než u diamantu, ale i přesto je nejtvrdším nitridem. Výroba kubického nitridu boru se vyvinula o několik let později než syntetický diamant a vznikla ve stejné laboratoři ve firmě General Electric v Americe.

Kubický nitrid boru se vyrábí dvěma metodami:

- První metodou výroby je pomocí syntézy hexagonálního nitridu boru a přítomnosti katalyzátoru. V této metodě jsou zapotřebí speciální kádě a hydraulický lis, který pracuje při vysokých teplotách a tlacích. Tvrdost kubického nitridu boru dosáhneme přeměnou z hexagonální mřížky na kubickou mřížku [9]
- Druhá metoda výroby kubického nitridu boru je nazývána přímou přeměnou, kdy je přeměna hexagonální mřížky na kubickou modifikaci při použití vysokých teplot, které musí být vyšší než 1 500 °C a tlaky 12 GPa. Důležitou podmínkou je, že se

provádí bez rozpouštědel a katalyzátorů. Při nedodržení teploty je kubický nitrid boru degradován na Wurtzitickou modifikaci. [10]

4.2 Vlastnosti

Tvrдость kubického nitridu boru je definována pomocí vzdáleností atomů boru a dusíku. Z důvodu, že je čtvrtina vazeb iontová nedosahuje kubický nitrid boru tvrdosti diamantu. V oblasti nástrojů se řadí na druhé místo v tvrdosti za diamant a je nejtvrdějším nitridem kovu. Kubický nitrid boru je 2x více tepelně odolnější než diamant. Používá se při teplotách kolem 1300 – 1400 °C. Při dosažení vyšších teplot kubického nitridu boru se CBN začne v přítomnosti s uhlíkem rozkládat na oxid boru a dusíku. Další výhodou je, že se nerozpouští v roztavených kovech ani v rozpouštědlech za vyšších teplot. [10]

Tab. 6. Základní vlastnosti CBN.

| Vlastnosti | Kubický nitrid boru | |
|--|---------------------|-----------------|
| | Monokrystalický | Polykrystalický |
| Měrná hmotnost [g.m^{-3}] | 3,43 - 4,50 | 3,42 - 4,40 |
| Délka strany kubické mřížky [nm] | 0,3615 | - |
| Tvrдость [HV] | 4 000 - 7 500 | 2 700 - 3 500 |
| Modul pružnosti v tahu [GPa] | 650 - 850 | 587 - 800 |
| Modul pružnosti ve smyku [GPa] | | 280 |
| Součinitel délkové roztažnosti [$10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$] | 3,5 - 5,8 | 4,6 - 4,9 |
| Měrná tepelná vodivost [$\text{W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] | 13 - 200 | 44 - 200 |
| Teplotní stálost [°C] | 1200 - 1400 | |

4.3 Využití

Kubický nitrid boru (CBN) se díky své vysoké tvrdosti používá jako řezný materiál a může být i použitý v elektronice jako elektrický izolační materiál, který velmi dobře odvádí teplo.

Kubický nitrid boru byl v podstatě vyvinut pro obrábění materiálů, kde diamant je nedostačující. Není tak příliš určen jen na nekovové materiály. CBN se používá na stejné technologické operace jako diamant. Převážně se využívá pro obrábění litin a taky

k obrábění kalených ocelí. Mezi obráběním litiny mají velké využití při obrábění šedých litin a to za použití vysokých rychlostí.

Polykrystalický kubický nitrid boru je materiál tvořený kubickým nitridem boru, který je spojen do kompaktního celku při použití pojiva. Pojiva výrazně ovlivňují mechanické a fyzikální vlastnosti výsledné polykrystalické kompozice. Množství pojiva se řídí mechanickými a fyzikálními vlastnostmi a mohou dosáhnout až 50% celkového objemu. Jako pojiva se nejčastěji používají kovy, karbidy, keramika a další látky. Z kovů se nejčastěji používá titan nebo nitrid titanu. Méně se používá nikl a jeho kombinace s titanem. Kovy významně ovlivňují mechanické vlastnosti, kterými jsou tepelná vodivost a houževnatost. Karbidy jsou nejčastěji zastoupeny karbidem wolframu a karbidem titanu. Keramické materiály zastupuje celá řada materiálů oxidických i neoxidických. [10]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem této bakalářské práce bylo určit opotřebení progresivních brousících kotoučů za různých technologických podmínek. Brousil se materiál ve tvaru kostky z oceli 14 109.4 třemi různými brousícími kotouči a to brousícími kotouči z diamantu, kubického nitridu boru a bílého korundu. Dále bylo zapotřebí vyhodnocení řezných sil orovnaných brousících kotoučů a jejich opotřebení.

Teoretická část bakalářské práce je věnována teorii broušení, doprovodných jevů při broušení, řezným silám, brousících kotoučů a drsnosti povrchu. Dále teoretická část obsahuje vlastnosti, výrobu a použití diamantu a kubického nitridu boru.

Praktická část bakalářské práce je věnována výzkumu závislosti změn technologických podmínek při broušení na velikosti řezných sil a opotřebení třech brousících kotoučů.

V praktické části byla provedena následující měření:

- a) Měření řezných sil při broušení pro různé technologické podmínky
- b) Měření opotřebení brousících kotoučů

Pro broušení a následný výzkum brousících kotoučů byl použit materiál z oceli 14 109.4. Materiál z oceli 14 109.4 se používá na valivá ložiska. Ocel je dobře tvárná za tepla a obrobitelná. Vhodná pro výrobu ložiskových kuliček do průměru 25 mm, válečků a kuželíků do průměru 18 mm a kroužků valivých ložisek do tloušťky stěny 16 mm.

Celkem byly zkoumány tři brousící kotouče. Zrna brousících kotoučů byla z diamantu, kubického nitridu boru a bílého korundu, za použití různých technologických podmínek:

Konstantní hloubka úběru $a_p = 0,01 \text{ mm}$ se změnou velikosti posuvové rychlosti:

- 1) $v_p = 2,5 \text{ m/min}$
- 2) $v_p = 7 \text{ m/min}$
- 3) $v_p = 12,5 \text{ m/min}$
- 4) $v_p = 20 \text{ m/min}$
- 5) $v_p = 23 \text{ m/min}$

Konstantní posuvová rychlost $v_p = 16,5 \text{ m/min}$ se změnou hloubky úběru:

- 1) $a_p = 0,005 \text{ mm}$
- 2) $a_p = 0,01 \text{ mm}$
- 3) $a_p = 0,02 \text{ mm}$
- 4) $a_p = 0,03 \text{ mm}$
- 5) $a_p = 0,04 \text{ mm}$

6 POUŽITÉ STROJE A PŘÍSTROJE

Broušení materiálů probíhalo na rovinné brusce BRH 20.03 F s horizontálním vřetenem a pravoúhlým stolem. K upnutí materiálu nám sloužil tenzometrický dynamometr, na kterém jsme měřili velikosti řezných sil F_p a F_c za použití různých technologických podmínek. K vyhodnocení velikosti řezných sil nám sloužil spider8. Drsnost povrchu jsme naměřili pomocí přístroje 3D drsnoměru Mitutoyo SJ-301.

6.1 Bruska BRH 20.03 F

Bruska BRH 20.03 F je rovinná s horizontálním vřetenem a pravoúhlým stolem, která je určena pro broušení rovinných a tvarových ploch součástek z oceli, litiny a ostatních kovových i nekovových materiálů, u které se vyžaduje dosažení vysoké přesnosti a kvality opracování. Převážně se brousí obvodem broušícího kotouče. Broušené součástky dle svých rozměrů, tvaru a materiálu jsou upínané přímo na elektromagnetickou desku nebo prostřednictvím vhodných upínačů.

Bruska pracuje v uzavřeném automatickém pracovním cyklu. K řízení automatického cyklu je bruska vybavena číslicovou indikací NV 300E fy FAGOR, která slouží k odměřování dráhy svislého a příčného posuvu při práci v ručním režimu a k řízení posuvu automatickém pracovním cyklu. Z hlediska koncepce se bruska vyznačuje tím, že stůl vykonává podélný pohyb po vedení vyhotoveném na předním loži a příčný posuv vykonává brusný vřeteník spolu se stojanem, ve kterém je vedení pro jeho svislý posuv. Hydraulický agregát a skříň elektriky tvoří samostatné celky umístěné mimo stroj. Bruska může také pracovat s ruční obsluhou v uzavřeném nebo neuzavřeném automatickém cyklu.

[16]



Obr. 18. Bruska BRH 20.03 F.

Tab. 7. Technické parametry brusky BRH 20.03 F.

| Vlastnosti | Jednotky | Hodnota |
|--------------------------------------|----------------------|----------------|
| Výška | mm | 2240 |
| Hmotnost | kg | 1860 |
| Brousící kotouč | mm | 250x20 - 50x76 |
| Rychlost stolu plynule regulovatelná | m.min ⁻¹ | 1-30 |
| Pracovní plocha stolu | mm | 200x630 |
| Otáčky brousícího vřetene | ot.min ⁻¹ | 2550 |

6.2 Použité brousící kotouče

Intenzifikaci výrobních procesů a stále rozsáhlejší využívání progresivních konstrukčních materiálů přináší nové požadavky na nástrojové materiály. Jejich splnění, zejména u dokončovacích metod, které musí zaručit dosažení vysoké přesnosti a jakosti obrobených povrchů, mohou zajistit supertvrdé řezné materiály.

K broušení materiálu oceli 14 109.4 se použily tři brousící kotouče se zrní diamantu, kubického nitridu boru a bílého korundu, které mají nadcházející označení:

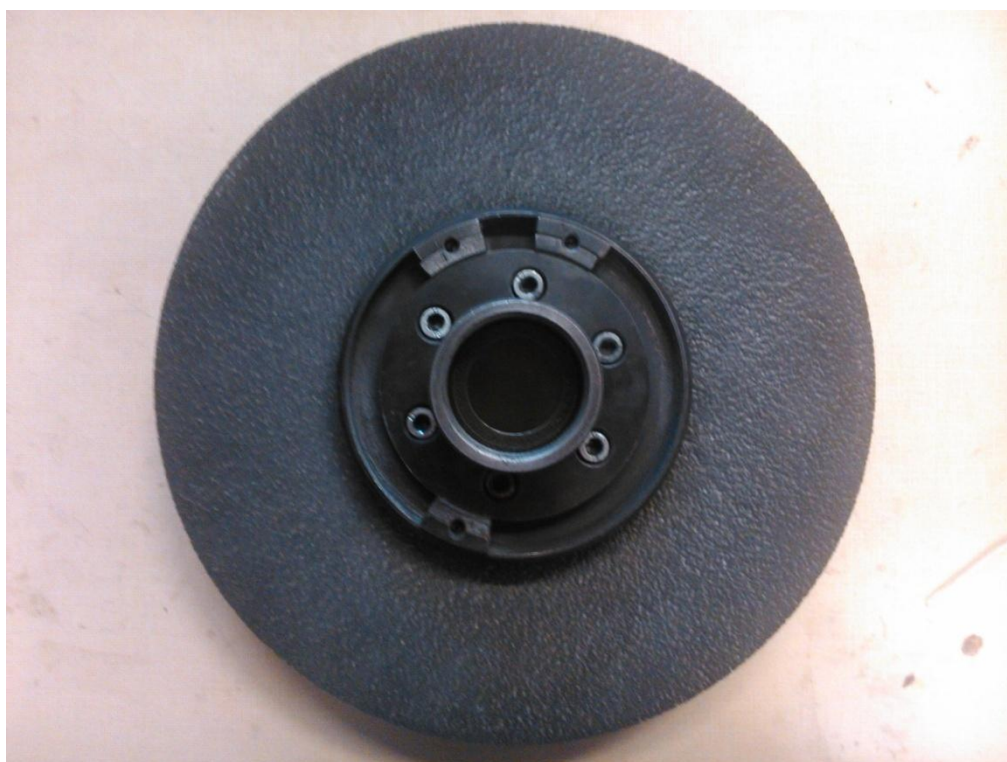
- 1) **A 99B 80 Is(K) 9 V**
- 2) **B107 K100 B-III**
- 3) **D100 K100 B-VI**

Tab. 8. Charakteristika brousících kotoučů.

| Označení kotouče | typ zrna | zrnitost | Tvrдост | Pojivo |
|--------------------|---------------------|----------|---------|-----------------|
| A 99B 80 Is(K) 9 V | bílý korund | jemná | měkký | V - keramické |
| B107 K100 B-III | kubický nitrid boru | jemná | měkký | B - pryskyřičné |
| D100 K100 B-VI | diamant | jemná | tvrdý | B - pryskyřičné |

6.2.1 Brousící kotouč z bílého korundu

Brousící kotouč se řadí mezi měkké s korundovým brousícím zrnem a keramickým pojivem. Kotouč se v místě řezu tolik nezahřívá, takže neovlivňuje tolik povrchovou vrstvu teplem.



Obr. 19. Brousící kotouč se zrna bílého korundu.

6.2.2 Brousící kotouč z kubického nitridu boru

Kubický nitrid boru (CNB) je v současnosti druhým nejtvrdějším materiálem. Podobně jako diamant je i kubický nitrid boru vyráběn syntézou, a to hexagonálního nitridu boru. CNB

se vyrábí v různých kvalitách, velikostech zrna a povlakuje se niklem. Nejvíce se používá pro broušení HSS a kalených ocelí. Výborné vlastnosti pro broušení ocelí jsou dány tím, že na rozdíl od diamantu nedochází u kubického nitridu boru k žádným chemickým reakcím mezi brusivem a elementy obsaženými v oceli. Brousící kotouče z kubického nitridu boru jsou spíše vhodné pro broušení HSS, vysokolegovaných nástrojových ocelí, práškových povlaků na bázi železa, tvrzené litiny, měkkých ocelí za speciálních podmínek.



Obr. 20. Brousící kotouč se zrny kubického nitridu boru.

6.2.3 Diamantový brousící kotouč

Brusné diamanty se vyrábějí v různých kvalitách a velikostech zrna. Přírodní diamanty se na základě svých specifických vlastností používají přednostně pro orovnávací rolny, orovnávací destičky, speciální kotouče s kovovým pojivem a nástroje pro optický průmysl. Diamantové kotouče se používají pro broušení tvrdokovu, cermetu, kombinace tvrdokovu a oceli pro nástroje s letovanými tvrdokovovými břity, křemene, keramických materiálů, ferotitanitu, práškových povlaků na bázi karbidů, grafitu, polykrystalických diamantových a CBN destiček, keramických magnetů, wolframkarbidu, skla a uhlíkových materiálů.



Obr. 21. Broušící kotouč se zrna diamantu.

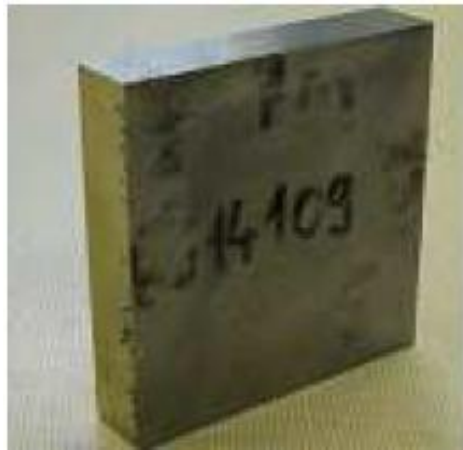
6.3 Materiál 14 109.4

Oceli třídy 14 jsou legované chromem, popř. chromem a manganem nebo křemíkem a hliníkem. Jsou to nejvíce používané slitinové oceli, které umožňují dosáhnout velmi dobrých vlastností bez použití nedostatkových prvků. Obvykle se cementují, zušlechťují a některé jsou určeny k nitridování. Chromové oceli jsou nejvhodnějším materiálem na součásti kuličkových a válečkových ložisek. Na tyto oceli třídy 14 109.4 je kladen velký požadavek. Ocele 14 109.4 obsahují 1 % C a 1,5 % Cr. Jejich tvárnost za tepla a obrobiteľnosť je dobrá a také i odolnosť proti korozi. Ocel je vhodná pro výrobu ložiskových kuliček do průměru 25 mm, válečků na kuželíků do průměru 18 mm a kroužků valivých ložisek do tloušťky stěny 16 mm. Při kalení do vody se teplota pohybuje v rozmezí 790 až 820 °C, při kalení do oleje 820 až 840 °C, popouštění probíhá za teplot 120 až 170 °C a žihání na měkko za teplot 720 až 780 °C. [16]

Značky ocelí dle ČSN nejsou vždy shodným – přesným ekvivalentem uvedené zahraniční značky. To mimo jiné znamená, že při porovnání chemického složení a mechanických vlastností oceli mohou nastat nepatrné – zanedbatelné rozdíly.

Tab. 9. Značení materiálu 14 109.4.

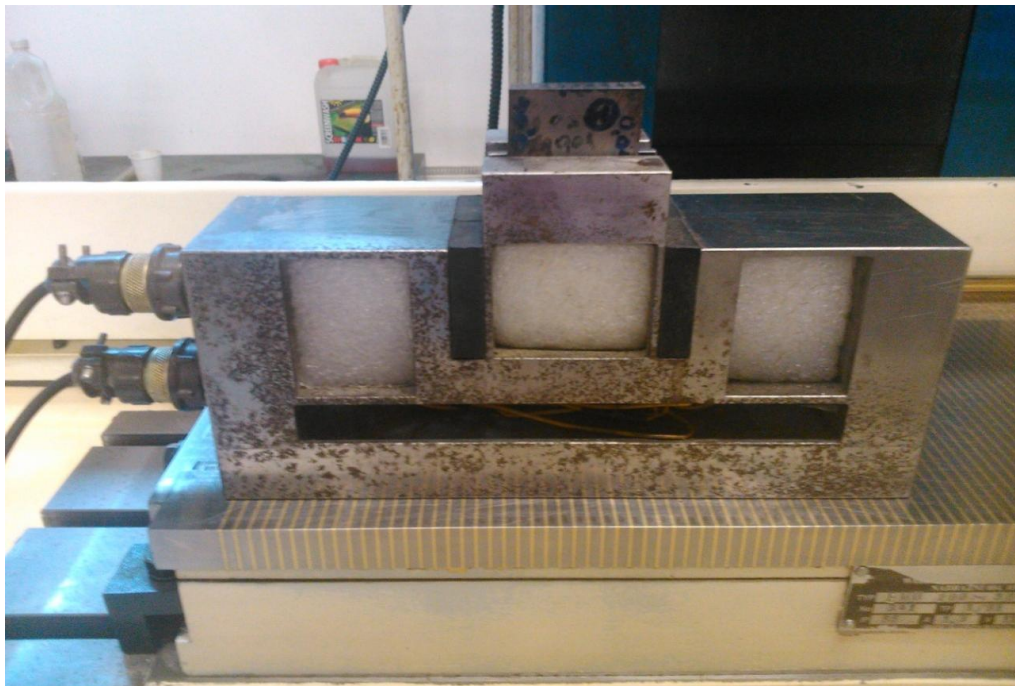
| Označení W.Nr. | Označení DIN | Označení EN 10027-1 | Označení ČSN |
|-------------------|-----------------|------------------------|-----------------|
| 1.3505 | 100 Cr 6 | 100Cr6 | 14 109 |



Obr. 22. Materiál oceli 14 109.4.

6.4 Dvousložkový tenzometrický dynamometr

Měření řezných sil F_p , F_c bylo provedeno na dvousložkovém tenzometrickém dynamometru. Tenzometrický dynamometr byl upnut na elektromagnetický stůl brusky BRH 20.03 F.



Obr. 23. Tenzometrický dynamometr.

Do dynamometru byl upnut broušený materiál ve tvaru kostky a pomocí kabelů byl připojen k měřicímu přístroji Spider 8. Toto zařízení bylo připojeno k počítači s příslušným ovládacím programem Comnes Spider, který umožňuje konfiguraci měření, zobrazení řezných sil (F_p , F_c) ve formě grafu, ukládání těchto grafu v podobě textového souboru s číselnými hodnotami řezných sil v jednotlivých časech a analýzu naměřených dat.



Obr. 24. Měřicí přístroj Spider 8.

6.5 3D drsnoměr Talysurf Cli 500

Měřicí přístroje typu CLI jsou vysoce účinnými měřicími prostředky k provádění rychlého prostorového měření a hodnocení povrchu s vysokým rozlišením. Systém CLI nabízí možnosti měření a analýzy povrchu ve třech osách, s využitím dotykové nebo bezdotykové techniky. Tento přístroj umí provádět analýzu dat při hodnocení struktury povrchu z jednoho profilu řezu (2D) i profilu plochy povrchu (3D). Přístroj automaticky provádí měřicí operace, takže operátor může dělat jinou práci. Přístroj kalibrujeme pouze na začátku měření.

Základem programového vybavení přístroje Talysurf CLI je program Talymap, který zabezpečuje veškeré řídicí, kontrolní, vyhodnocovací i informační služby. Výkonný program pro analýzu dat zahrnuje standardní funkce vyhodnocení struktury povrchu 2D a 3D, včetně vyjmutí profilu 2D z povrchu 3D, měření ploch a objemů, výšky a vzdálenosti stupňů, analýzy výstupků, nosného podílu, velikosti a hustoty zrn, atd. [16]



Obr. 25. Měřicí přístroj Talysurf CLI 500.

Tab. 10. Technické specifikace přístroje.

| Funkce, velikost a hmotnost | CLI 500 |
|---------------------------------------|----------------------------|
| Prostor měření D x H x V | 50 x 50 x 50mm |
| Délka posuvu na osách X - Y - Z | 50mm |
| Osové rozlišení (datová rozteč X - Y) | 5 μ m |
| Rozměry D x H x V | 500 x 310 x 450mm |
| Nosnost | 10 kg |
| Hmotnost | 55 kg |
| rychlost měření | 30; 15; 10; 5; 1; 0,5 mm/s |
| rychlost polohování (osy X - Y) | 30 mm/s maximum |

6.6 Mikroskop

Dílenský mikroskop slouží na kontrolu tvarově složitějších součástí například závity, ozubená kola, šablony a jiné. U těchto mikroskopů může být objekt zvětšen 10x až 50x. V obrazovém poli může být umístěná čárová měřicí destička s nitkovým křížem. Přesný měřicí stůl má rozměry 25x25 mm a rozlišovací schopnost 0,01 až 0,001 mm. Na dílenském mikroskopu CarlZeiss Jena se můžou pořizovat i mikroskopické snímky.

Na dílenském mikroskopu CarZeiss Jena se pořídil mikroskopický snímek obroušené ocelové planžety nejvyššího opotřebovaného brousícího kotouče.



Obr. 26. Dílenský mikroskop CarlZeiss Jena.

7 VYHODNOCENÍ ŘEZNÝCH SIL

Broušení materiálu z oceli 14 109.4 probíhalo na brusce BRH 20.03 F. Materiál byl postupně broušený brousícími kotouči z diamantu, kubického nitridu boru a bílého korundu. Pro broušení byly použity různé technologické podmínky:

Konstantní hloubka úběru $a_p = 0,01 \text{ mm}$ se změnou velikosti posuvové rychlost:

- 1) $v_p = 2,5 \text{ m/min}$
- 2) $v_p = 7 \text{ m/min}$
- 3) $v_p = 12,5 \text{ m/min}$
- 4) $v_p = 20 \text{ m/min}$
- 5) $v_p = 23 \text{ m/min}$

Konstantní posuvová rychlost $v_p = 16,5 \text{ m/min}$ se změnou hloubky úběru:

- 1) $a_p = 0,005 \text{ mm}$
- 2) $a_p = 0,01 \text{ mm}$
- 3) $a_p = 0,02 \text{ mm}$
- 4) $a_p = 0,03 \text{ mm}$
- 5) $a_p = 0,04 \text{ mm}$

Při všech technologických podmínkách byl materiál ve tvaru kostky (50x50x10mm) broušený za sucha, bez použití procesní kapaliny a bez vyjiskřování všemi brousícími kotouči. Za pomoci dynamometru, přístroje spider 8 a ovládacím programem Comnes Spider byly zaznamenávány složky řezných sil F_p (radiální složka řezné síly) a F_c (tangenciální složka řezné síly). Pro následné statistické vyhodnocení řezných sil byly hodnoty řezných sil při všech technologických podmínkách minimálně pětkrát měřeny.

Hodnoty řezných sil byly poté statisticky vyhodnoceny za pomoci:

a) Odhadu aritmetického průměru:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (9)$$

kde: \bar{X} - odhad aritmetického průměru F_c , F_p

X_i – jednotlivá hodnota F_c , F_p z celkového počtu hodnot i

n – počet hodnot výběru

b) Odhadu směrodatné odchylky:

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i - \bar{X}}{n-1} \quad (10)$$

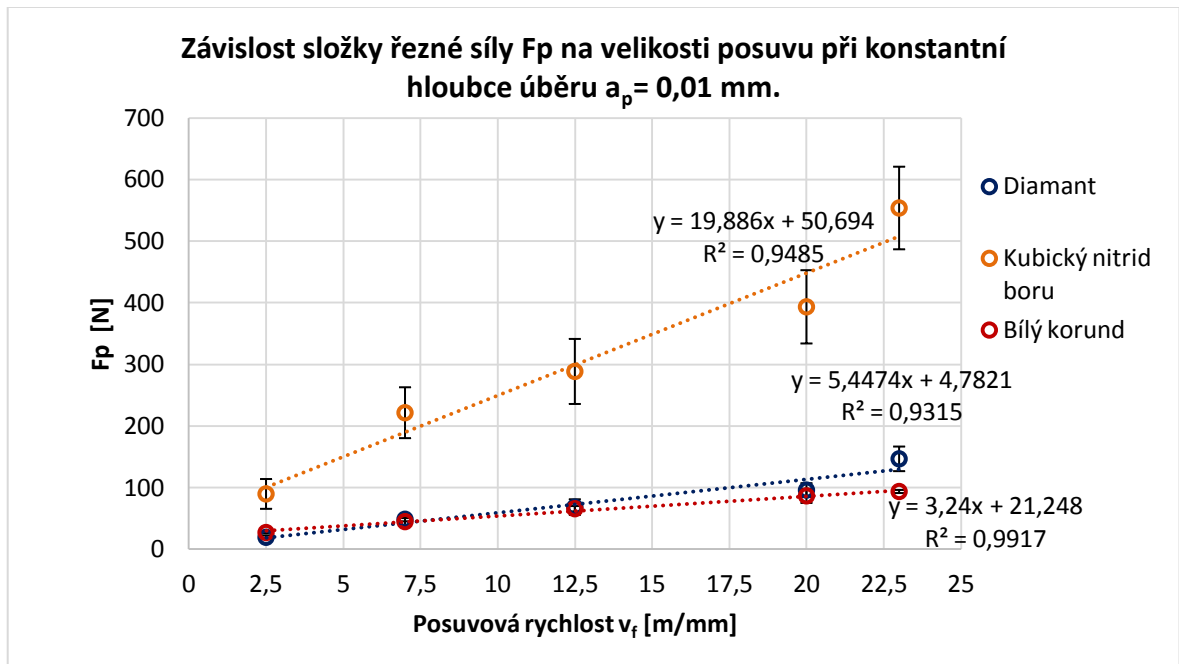
kde: \bar{S} - odhad směrodatné odchylky

c) Odhadu standardní nejistoty typu A:

$$\bar{u}_A = \frac{\bar{S}}{\sqrt{n}} \quad (11)$$

kde: \bar{u}_A - odhad standardní nejistoty typu A

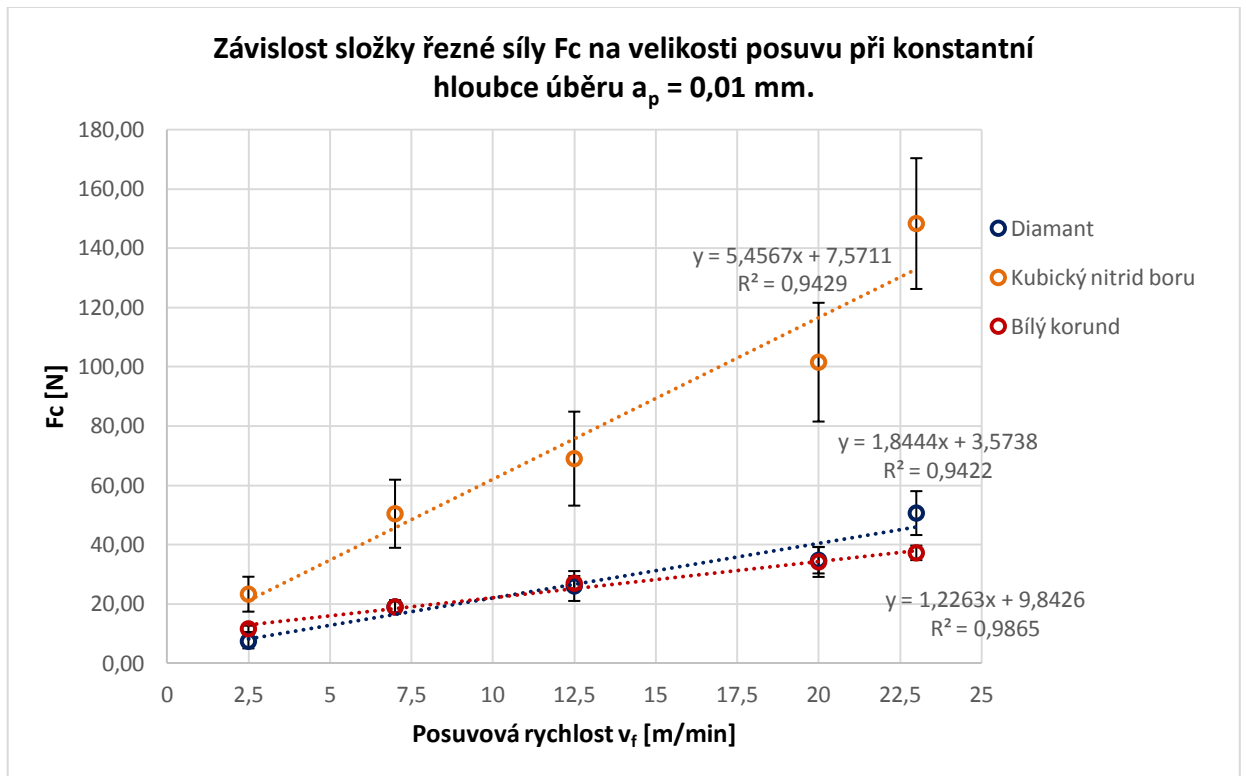
7.1 Vyhodnocení řezné síly F_p při změně posuvové rychlosti



Obr. 27. Porovnání velikosti řezných sil F_p při konstantní hloubce úběru a_p .

Z obr. 27 vyplývá, že se zvyšující posuvovou rychlostí při konstantní hloubce úběru $a_p = 0,01$ mm se složkou řezné síly F_p výrazně zvyšuje u brousícího kotouče z kubického nitridu boru než u brousícího kotouče z bílého korundu a diamantu, kde složky řezných sil se zvyšují při konstantní hloubce úběru, ale ne tak výrazně, jak u brousícího kotouče se zrní kubického nitridu boru. Složky řezných sil jsou velmi podobné při použití prvních technologických podmínek. U všech posuvových rychlostech lze vidět, že nejvyšší hodnoty dosahují u brousícího kotouče se zrní kubického nitridu boru. Při broušení brousícím kotoučem kubického nitridu boru dochází k rychlému ohřevu broušených ploch, což není příznivé pro materiál oceli 14 109.4. Tyto vysoké teploty mohou způsobit zvýšení tahových pnutí a může docházet ke vzniku trhlinek v povrchové vrstvě, proto je výhodnější použít brousící kotouče s jemnějšími zrní, aby k tomuto jevu nedocházelo. V našem případě je výhodnější pro materiál 14 109.4 brousit brousícím kotoučem se zrní bílého korundu.

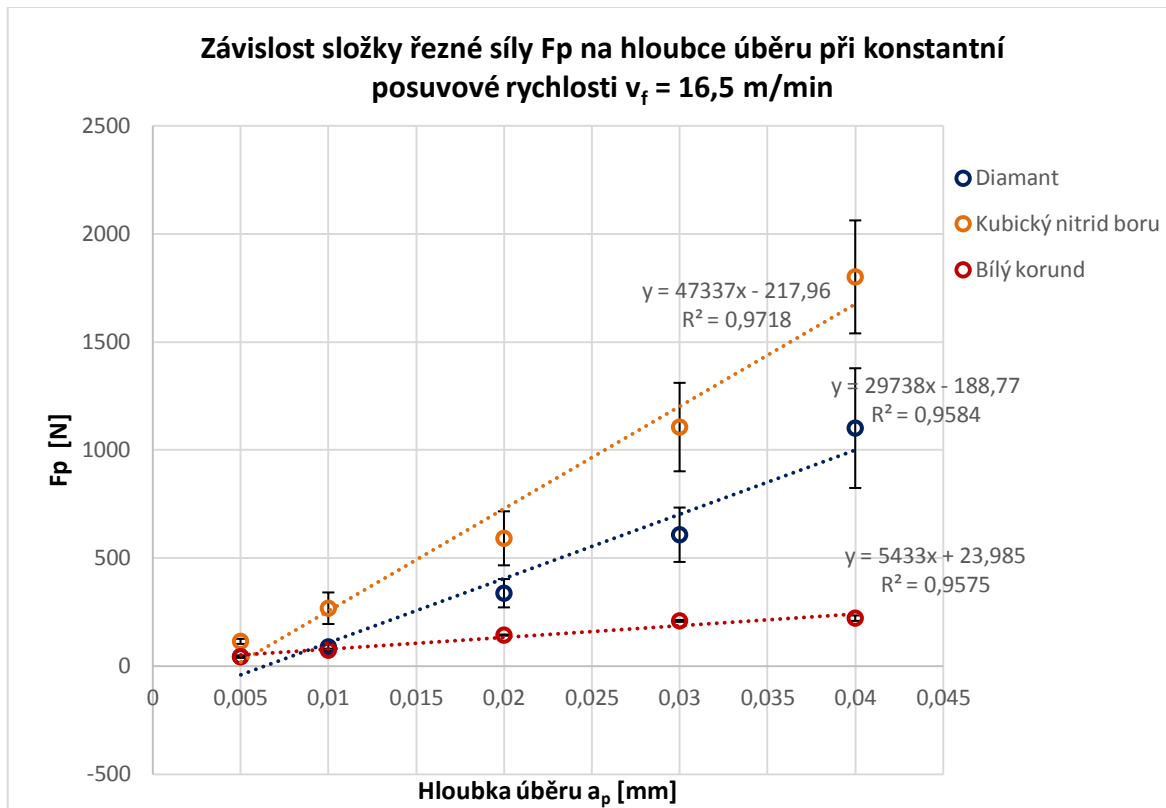
7.2 Vyhodnocení řezné síly F_c při změně posuvové rychlosti



Obr. 28. Porovnání velikosti řezných sil F_c při konstantní hloubce úběru a_p .

Tangenciální složka řezných sil F_c má podobný průběh jako radiální složka řezných sil F_p . Z obr. 28 lze vidět, že s rostoucí posuvovou rychlostí roste každá řezná síla F_c za použitých technologických podmínek. Složky řezných sil jsou velmi podobné při použití prvních technologických podmínek. V porovnání tangenciální složky F_c s radiální složkou F_p je velikost tangenciální složky takřka o třetinu menší než velikost radiální složky. Nejvyšší řezné síly byly naměřeny u brousícího kotouče se zrní kubického nitridu boru a to u všech posuvových rychlostech. Brousící kotouče se zrní diamantu a bílého korundu dosahují velikosti řezných sil takřka o třetinu menší a nemají tak výrazný nárůst řezných sil, jak brousící kotouč z kubického nitridu boru. Pro materiál oceli 14 109.4, který je kalený i tvrdý, by bylo výhodnější použít hutnější brousící kotouče, aby se docílilo co nejlepší drsnosti povrchu broušeného materiálu.

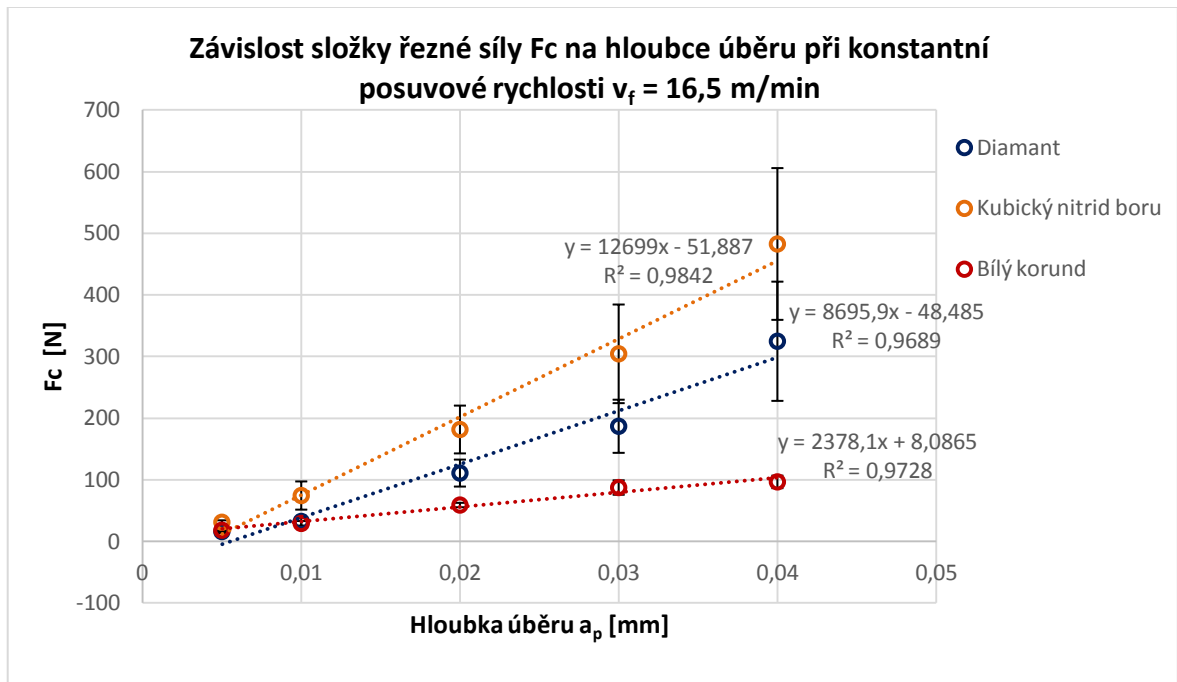
7.3 Vyhodnocení řezné síly F_p , při změně hloubky úběru



Obr. 29. Porovnání velikosti řezných sil F_p při konstantní posuvové rychlosti v_f .

Na obr. 29 lze vidět, že s rostoucí hloubkou úběru roste i velikost radiální složky řezných sil F_p u všech brousících kotoučů. Při malé hloubce úběru je velikost řezných sil F_p u všech brousících kotoučů podobná. Se zvyšující hloubkou úběru dochází k většímu nárůstu řezných sil u brousících kotoučů s tvrdšími zrnny diamantu a kubického nitridu boru než u brousícího kotouče z bílého korundu. Proto je u větších hloubek úběru výhodnější použít brousící kotouč se zrnny bílého korundu. Při větších hloubkách úběru docházelo k velkému kmitání brousících kotoučů složených z tvrdých materiálů, což mohlo způsobovat velkou hloubku úběru při takto zvolených technologických podmínkách. Dále se broušený materiál v místě řezu velice zahříval a poté projevoval spálená místa na povrchu broušeného materiálu. Aby se dosáhlo nižší teploty v místě řezu broušeného materiálu oceli 14 109.4, je vhodnější použít brousící kotouč se zrnny bílého korundu, protože má jemnější zrna.

7.4 Vyhodnocení řezné síly F_c , při změně hloubky úběru



Obr. 30. Porovnání velikosti řezných sil F_p při konstantní posuvové rychlosti v_f .

Tangenciální složka řezné síly F_c má podobný průběh, jako radiální složka řezné síly F_p . Na obr. 30 vidíme narůstání všech tangenciálních složek F_c při změně hloubky úběru a konstantní posuvové rychlosti $v_f = 16,5$ m/min. Složky řezných sil sou velmi podobné při použití prvních technologických podmínek. V porovnání tangenciální složky F_c s radiální složkou F_p je velikost tangenciální složky řezných sil F_c takřka o třetinu menší než velikost radiální složky řezných sil F_p . Větší změny nastávají až při zvětšující se hloubce úběru, kde dochází k narůstání řezných sil F_c u brousících kotoučů s tvrdšími zrnny diamantu a kubického nitridu boru. Brousící kotouč s měkkými zrnny bílého korundu má velikost řezných sil o několik newtonů menší než diamantový brousící kotouč. Proto je výhodnější při větším úběru hloubky použít brousící kotouč s měkkými zrnny bílého korundu.

Z důvodu afinity k železu za vysokých teplot není diamant vhodný pro broušení ocelí. Při broušení vzniká v místě řezu velké množství tepla, které vyvolává chemickou reakci a ta ovlivní změnu struktury diamantu i broušeného povrchu.

8 VYHODNOCENÍ OPOTŘEBENÍ BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ

Opotřebení pracovní plochy brousícího kotouče je složitý fyzikálně chemický proces, jehož průběh závisí na všech podmínkách broušení, kterými jsou vlastnosti obráběného materiálu, charakteristika kotouče, řezné podmínky apod.

Podle vlastnosti brousících kotoučů (tvrdosti, druhu pojiva, brusiva atd.) a podle řezných podmínek probíhá při broušení otupení kotouče nebo se uplatňuje samoostření.

Otupení kotouče nastává v důsledku vylamování nevhodně položených zrn brusiva a jejich postupném štěpením a zaoblováním, tak to zrna ztrácejí řezivost.

Samoostření brousícího kotouče probíhá v důsledku postupujícího otupování zrn brusiva, která jsou vzrůstajícím řezným odporem vylamována z pojiva celá nebo jen jejich část. Pro vydrolení pojiva pak nastávají nová zrna, takže se pracovní plocha kotouče neustále obnovuje. Tato schopnost obnovování řezné plochy je značnou specifickou vlastností brousících kotoučů.

Na počátku činnosti kotouče se na vrcholech zrn vytvářejí opotřebené plošky, které se postupně zvětšují a podporují účinky všech činitelů broušení a růst řezných sil, jejich působením se zrno i pojivo rozrušují. Jsou-li zrna s pojivem dostatečně pevně spojena, mohou být plošky opotřebení dosti velké, které jsou v našem případě znázorněny na obr. 31. [1]



Obr. 31. Opotřebené plošky brousícího kotouče.

V našem případě se zkoumalo opotřebení progresivních brousících kotoučů po obroušení materiálu ocelové kostky třídy 14 109.4, která měla velikost 50x50x10 mm. Jednalo se o brousící kotouče z diamantu, kubického nitridu boru a bílého korundu.

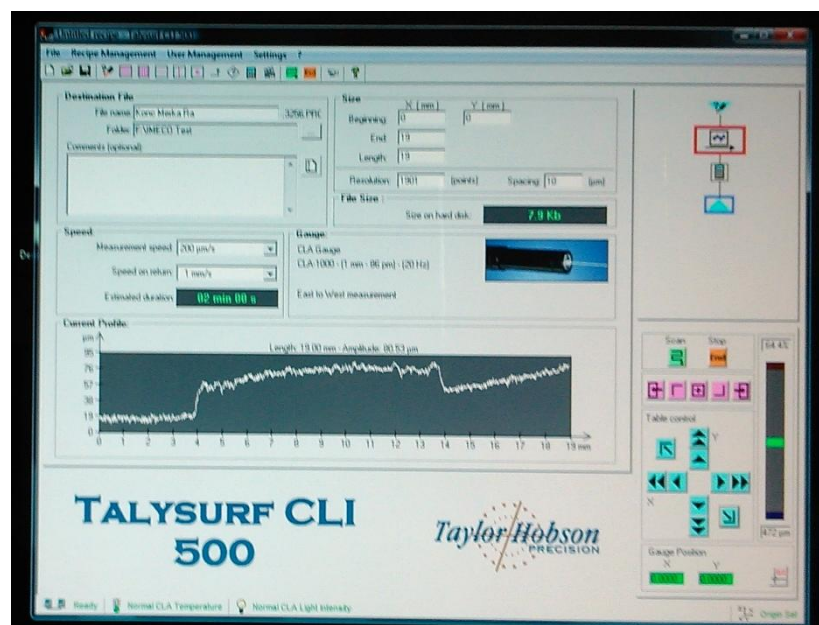
Pro zjištění opotřebení progresivních brousících kotoučů se použily ocelové planžety. Celkem se měřily tři ocelové planžety a každá z nich měla sedm brousících zářezů, jak lze vidět na obr. 32.



Obr. 32. Ocelová planžeta.

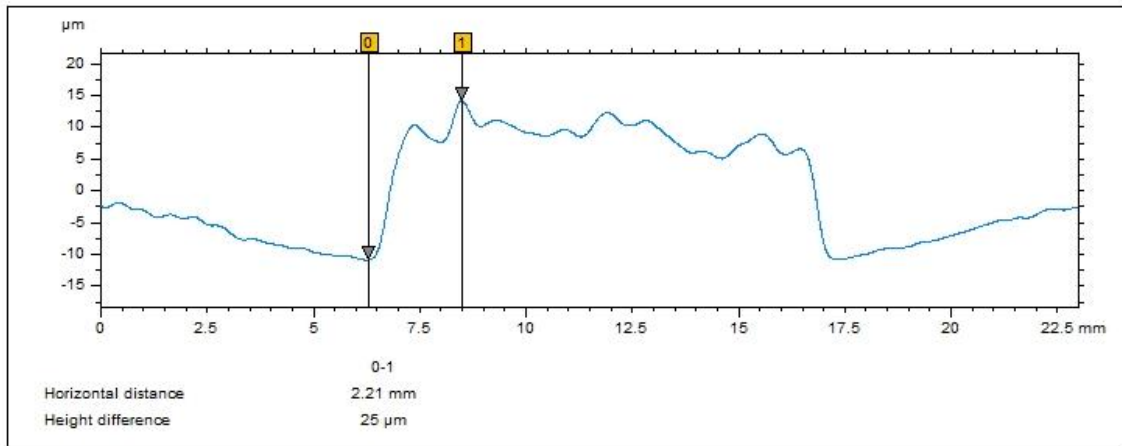
Pro každý brousící kotouč, byla použita jedna ocelová planžeta, která byla upnuta do svěráku a s ním na elektromagnetický stůl brusky BRH 20.03 F. Po obroušení ocelové kostky se brousícím kotoučem brousily zářezy (10x10x100mm) do ocelové planžety. Z každého brousícího zářezu bylo odbroušeno 10 cm³. Na každou ocelovou planžetu bylo zhotoveno sedm brousících zářezů, které pak byly zkoumány na přístroji Talysurf CLI 500.

Po umístění měřené planžety na měřicí přístroj se spustil příslušný software Talymap Gold, pomocí kterého se přístroj ovládá. Provedla se kalibrace a nastavily se parametry měření.



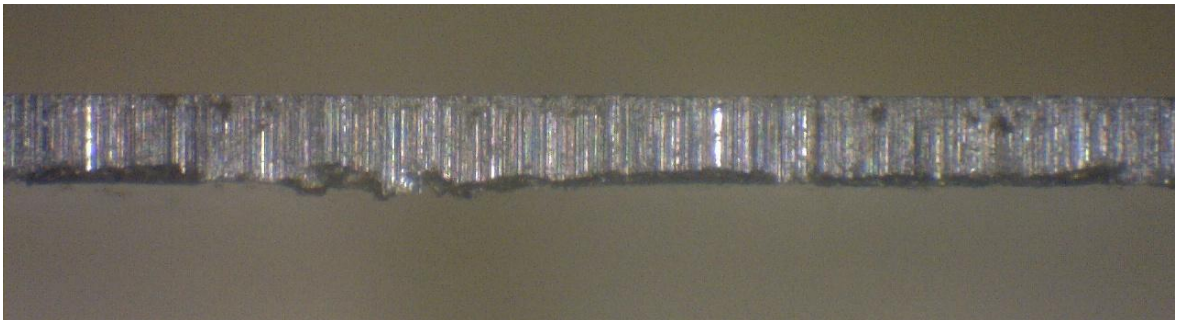
Obr. 33. Software Talymap Gold.

V softwaru Talymap Gold bylo provedeno vyrovnání naměřeného povrchu ocelové planžety, odstranění vlnitosti a drsnosti. Za pomoci malé a velké prohlubně se znázornila minimální a maximální hloubka profilu, tak jak můžeme vidět na obr. 34.



Obr. 34. Profil plochy povrchu ocelové planžety.

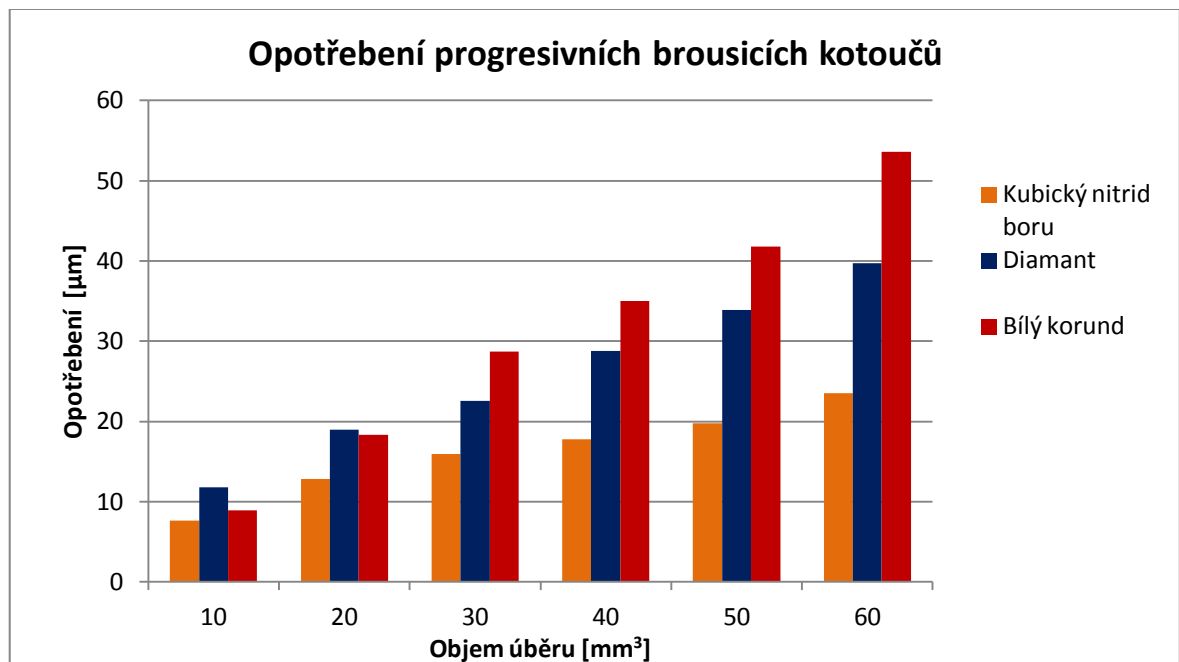
Pomocí dílenského mikroskopu CarlZeiss Jena jsme pořídily mikroskopické snímky, na kterých můžeme vidět opotřebení progresivních brousících kotoučů. Na obr. 35 je zhotoven mikroskopický snímek opotřebovaného brousícího kotouče se zrna bílého korundu. Zde vidíme značné opotřebení brousícího kotouče po celé ploše broušeného materiálu oceli 14 109.



Obr. 35. Opotřebení brousícího kotouče se zrna bílého korundu.

Z důvodu vysokého kmitání či rázů technologické soustavy, vzniklé neúplným úběrem celé hloubky třísky, při velmi progresivních technologických podmínkách, byly zvoleny méně progresivní technologické podmínky $v_f=16,5$ m/min, $a_p=0,005$ mm. Při broušení se hloubka úběru přidávala na každé straně, proto broušení probíhalo bez vyjiskřování.

8.1 Vyhodnocení opotřebení progresivních brousících kotoučů



Obr. 36. Opotřebení progresivních brousících kotoučů.

Za pomoci softwaru Talymap Gold se zaznamenaly hodnoty výškových rozdílů naměřeného profilu s kterými se nadále pracovalo. Pro každý brousící kotouč bylo zaznamenáno sedm hodnot výškových rozdílů, s nichž první hodnota se počítala jako nulová hodnota, od které se odečítaly nadcházející naměřené hodnoty, z kterých poté bylo vyhodnoceno opotřebení progresivního brousícího kotouče. Z toho plyne, že k dispozici bylo šest objemových hodnot opotřebení progresivního brousícího kotouče, které se graficky znázornily. Stejným způsobem se pokračovalo pro každý brousící kotouč.

V prvním objemovém úběru mají všechny brousící kotouče podobný průběh opotřebení, které je okolo 10 µm. V druhém objemovém úběru mají větší opotřebení brousící kotouče z diamantu a bílého korundu než brousící kotouč z kubického nitridu boru. U dalších objemových úběrů se jednotlivě zvětšují opotřebení všech brousících kotoučů. V posledním objemovém úběru má výrazné opotřebení brousící kotouč se zrny bílého korundu takřka o třetinu větší než diamantový brousící kotouč. Nejmenší opotřebení má brousící kotouč se zrny kubického nitridu boru a to až o polovinu menší než brousící kotouč se zrny bílého korundu. Z hlediska opotřebení nástroje by při broušení výrobků ve velkosériové výrobě bylo vhodnější použít brousící kotouče z kubického nitridu boru a diamantu, které měly menší zřetelně menší opotřebení při takto zvolených technologických podmínkách. Velikosti řezných sil jsou pro všechny kotouče velmi podobné a proto

dochází u všech kotoučů k tepelnému ovlivnění, jak lze vidět z předchozích výsledků. Z předešlých výzkumů bylo zjištěno, že při těchto technologických podmínkách se příliš neliší drsnost. Z důvodu afinity k železu za vysokých teplot není diamant vhodný pro broušení ocelí. Při broušení vzniká v místě řezu velké množství tepla, které vyvolává chemickou reakci a ta ovlivní změnu struktury diamantu i broušeného povrchu.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo určit opotřebení progresivních brousících kotoučů za různých technologických podmínek. Brousil se materiál ve tvaru kostky (50x50x10mm) z oceli 14 109.4 třemi různými brousícími kotouči a to brousícími kotouči z diamantu, kubického nitridu boru a bílého korundu. Dále bylo zapotřebí vyhodnocení řezných sil ořvnaných brousících kotoučů a jejich opotřebení.

Materiál oceli 14 109.4, byl postupně broušený různými technologickými podmínkami brousícími kotouči se zrny bílého korundu, kubického nitridu boru a diamantu. Vliv různých technologických podmínek byl poté vyhodnocen pro řezné síly a opotřebení kotoučů. Byly navrženy dva druhy technologických podmínek. První druh zkoumal vliv změny posuvové rychlosti (v_f) a druhém technologické podmínky zkoumaly vliv změny hloubky úběru (a_p).

Z naměřených dat můžeme vidět, že jak s rostoucí hloubkou úběru, tak i s rostoucí posuvovou rychlostí se hodnota složek řezných sil F_p i F_c u všech brousících kotoučů zvyšovala. Při vyšších posuvových rychlostech a větších hloubkách úběru docházelo u brousících kotoučů z CNB a diamantu k velkému nárůstu řezných sil, které mají přímou závislost na velikost tepla vzniklého na povrchu broušeného materiálu. Tyto vysoké teploty mohou způsobit zvýšení tahových pnutí a může docházet ke vzniku trhlinek v povrchové vrstvě, proto je výhodnější použít brousící kotouče s jemnějšími zrny, aby k tomuto jevu nedocházelo.

Za všech použitých technologických podmínek měl brousící kotouč z kubického nitridu boru nejvýraznější řezné síly jak v tangenciální složce F_c , tak i v radiální složce F_p . Při vyšších hloubkách úběru docházelo k velkému kmitání brousícího kotouče. Dále se broušený materiál oceli 14 109.4 velice zahříval a na určitých místech povrchu projevoval spálené místa. Proto není vhodným brousícím kotoučem pro materiál oceli 14 109.4 při takto zvolených technologických podmínkách.

V našem případě je při progresivních technologických podmínkách (velká hloubka úběru a posuvová rychlost) výhodnější použít brousící kotouč se zrny bílého korundu. Kotouče se zrny moderních brousících materiálů CNB a diamantu se lépe jevíly při nízkých posuvových rychlostech a při menší hloubce úběru.

Z tohoto důvodu a rovněž z důvodu vysokého kmitání či rázů technologické soustavy, vzniklé neúplným úběrem celé hloubky třísky, při velmi progresivních technologických podmínkách, byly zvoleny méně progresivní technologické podmínky $v_f=16,5$ m/min, $a_p=0,005$ mm. Z vyhodnocení opotřebení broušicích kotoučů při těchto technologických podmínkách, lze vidět, že moderní broušicí kotouče dosahují podstatně menších opotřebení než konvenční materiál bílý korund. Rovněž velikosti řezných sil vychází pro tyto technologické podmínky velmi podobně a proto i tepelné ovlivnění povrchu součásti bude velmi podobné. Taktéž bylo z předchozích experimentů zjištěno, že drsnost povrchu po broušení těmito kotouči při těchto technologických podmínkách byla téměř shodná. Z tohoto důvodu je pro velkoseriovou výrobu značně lepší použít broušicí kotouče z CNB a diamantu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HOLEŠOVSKÝ, F.: *Broušení a jeho vliv na vlastnosti povrchu*. VŠB-TU Ostrava, 2007, ISBN 978-80-248-1644-9.
- [2] LUKOVICS, I.: *Progresivní metody dokončování funkčních ploch nástrojů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, ISBN 978-80-248-2033-0.
- [3] MASLOV, J. N.: *Teorie broušení kovů*. 1st ed. SNTL Praha, 1979.
- [4] VASILKO, K.; BOKUČAVA, G.: *Brúsenie kovových materiálov*. 1st ed. Bratislava: Alfa, 1988.
- [5] NESTUPA, Z.: *Supertvrdé materiály*. Ostrava: ČVTS, 1989.
- [6] KOCMAN, K.: *Technologické procesy obrábění*. Brno: CERM, 2011, ISBN 978-80-7204-722-2.
- [7] KOCMAN, K.: *Speciální technologie: obrábění*. 3., Brno: CERM, 2004, ISBN 80-214-2562-8.
- [8] GAŠPÁREK, J.: *Dokončovacie sposoby obrabania*. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1980.
- [9] HUMÁR, A.: *Materiály pro řezné nástroje*. 1. vyd. Praha: 2008, ISBN 978-80-254-2250-2.
- [10] KUPČÍK, F.: *Vývoj supertvrdých materiálů v ČSSR*. Ostrava: ČSVTS, 1985.
- [11] Velebil [online]. [cit 2014-1-17]. Dostupný z WWW:
<<http://www.velebil.net/minerality/diamant>>
- [12] ŠVARAL, Š.: *Obrábanie nástrojmi z diamantu a kubického nitridu bóru*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1977
- [13] Osud [online]. [cit 2014-1-17]. Dostupný z WWW:
<<http://www.osud.biz/synteticke-diamanty>>
- [14] Diamant – využití [online]. [cit 2014-1-17]. Dostupný z WWW:
<<http://www.diamant.hustej.net/vyuziti.html>>
- [15] MARŠÁLEK, J.: *Brusky a broušení*. Praha: SNTL, 1970.

[16] ČOP, J.: *Broušení materiálu s využitím kubického nitridu boru*. Zlín, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|-----------|--|
| Sz | Skutečný průřez odřezávaného kovu jedním zrnem |
| a_z | Střední hodnota hloubky odřezávané vrstvy |
| b | Šířka řezné části zrna |
| F_{1c} | Řezná síla na jedno zrno |
| k_b | Měrná řezná síla při broušení |
| Al_2O_3 | Oxid hlinitý |
| SiO_2 | Oxid křemičitý |
| SiC | Karbid křemíku |
| B_4C | Karbid boru |
| B_2O_3 | Oxid boritý |
| Cr | Chrom |
| Mn | Mangan |
| Si | Křemík |
| Al | Hliník |
| C | Uhlík |
| F_c | Tangenciální řezná síla |
| F_p | Radiální řezná síla |
| F_f | Axální řezná síla |
| Ra | Střední aritmetická úchylka profilu |
| Rz | Největší výška profilu drsnosti |
| Rt | Celková výška profilu |
| C_{Fc} | Konstantní řezná síla |
| v_s | Obvodová rychlost součástky |
| s | Podélný posuv |

t příčný posuv na jeden dvojzdih

a_p Hloubka úběru

v_f Posuvová rychlost

MPa Megapascal

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| <i>Obr. 1. Struktura brousicího nástroje [1].....</i> | 14 |
| <i>Obr. 2. Schéma broušení [2].....</i> | 14 |
| <i>Obr. 3. Rozložení řezných sil při obvodovém axiálním broušení do kulata. [1].....</i> | 15 |
| <i>Obr. 4. Zjednodušená plocha průřezu řezu při broušení. [1].....</i> | 16 |
| <i>Obr. 5. Základní způsoby opotřebení brousicích kotoučů. [3]</i> | 18 |
| <i>Obr. 6. Vyjádření hodnoty R_a.</i> | 23 |
| <i>Obr. 7. Vyjádření hodnoty R_m. [1].....</i> | 24 |
| <i>Obr. 8. Vyjádření hodnoty R_r. [1].....</i> | 24 |
| <i>Obr. 9. Vyjádření hodnoty R_z. [1].....</i> | 25 |
| <i>Obr. 10. Čelo válečku s opalem a povrchová tvrdost opalu s odpovídající teplotou [3]....</i> | 27 |
| <i>Obr. 11. Schéma vzájemného výskytu opalu a trhliny. [3]</i> | 28 |
| <i>Obr. 12. Tvary brousicích kotoučů. [3].....</i> | 30 |
| <i>Obr. 13. Tvar krystalů přírodního diamantu. [3].....</i> | 31 |
| <i>Obr. 14. Krystalografická mřížka grafitu a diamantu. [1].....</i> | 32 |
| <i>Obr. 15. Struktura brousicího nástroj [1].....</i> | 35 |
| <i>Obr. 16. Přeměna krystalické mřížky diamantu. [11]</i> | 36 |
| <i>Obr. 17. Krystalická mřížka kubického nitridu bóru.....</i> | 40 |
| <i>Obr. 18. Bruska BRH 20.03 F.....</i> | 46 |
| <i>Obr. 19. Brousicí kotouč se zrny bílého korundu.</i> | 47 |
| <i>Obr. 20. Brousicí kotouč se zrny kubického nitridu boru.....</i> | 48 |
| <i>Obr. 21. Brousicí kotouč se zrny diamantu.</i> | 49 |
| <i>Obr. 22. Materiál oceli 14 109.4.....</i> | 50 |
| <i>Obr. 23. Tenzometrický dynamometr.</i> | 50 |
| <i>Obr. 24. Měřicí přístroj Spider 8.</i> | 51 |
| <i>Obr. 25. Měřicí přístroj Talysurf CLI 500.....</i> | 52 |
| <i>Obr. 26. Dílenský mikroskop CarlZeiss Jena.</i> | 53 |
| <i>Obr. 27. Porovnání velikosti řezných sil F_p při konstantní hloubce úběru a_p.</i> | 56 |
| <i>Obr. 28. Porovnání velikosti řezných sil F_c při konstantní hloubce úběru a_p.</i> | 57 |
| <i>Obr. 29. Porovnání velikosti řezných sil F_p při konstantní posuvové rychlosti v_f.</i> | 58 |
| <i>Obr. 30. Porovnání velikosti řezných sil F_p při konstantní posuvové rychlosti v_f.</i> | 59 |
| <i>Obr. 31. Opotřebené plošky brousicího kotouče.....</i> | 60 |
| <i>Obr. 32. Ocelová planžeta.</i> | 61 |

| | |
|--|----|
| <i>Obr. 33. Software Talymap Gold.</i> | 61 |
| <i>Obr. 34. Profil plochy povrchu ocelové planžety.....</i> | 62 |
| <i>Obr. 35. Opotřebení brousícího kotouče se zrna bílého korundu.</i> | 62 |
| <i>Obr. 36. Opotřebení progresivních brousících kotoučů.....</i> | 63 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|-----------|
| <i>Tab. 1. Značení zrnitosti. [1].....</i> | <i>33</i> |
| <i>Tab. 2. Značení tvrdosti. [1]</i> | <i>34</i> |
| <i>Tab. 3. Rozdělení struktur brousicích zrn. [1]</i> | <i>34</i> |
| <i>Tab. 4. Druhy pojiv. [1].....</i> | <i>35</i> |
| <i>Tab. 5. Základní vlastnosti diamantu. [11].....</i> | <i>38</i> |
| <i>Tab. 6. Základní vlastnosti CBN.</i> | <i>41</i> |
| <i>Tab. 7. Technické parametry brusky BRH 20.03 F.....</i> | <i>46</i> |
| <i>Tab. 8. Charakteristika brousicích kotoučů.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Tab. 9. Značení materiálu 14 109.4.</i> | <i>50</i> |
| <i>Tab. 10. Technické specifikace přístroje.</i> | <i>52</i> |

SEZNAM PŘÍLOH

PI CD ROM