

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**TECHNOLOGIE HLOUBKOVÉHO
BROUŠENÍ**

Diplomová práce

Autor: Bc. Aleš Tichý

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

Praha 2017

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování:

Děkuji zejména vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc., za všechny cenné rady a za nasměrování na formální a technologickou cestu. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi a panu Ing. Janu Šimotovi, za jejich čas mi věnovaný při práci v laboratořích a další vysvětlení problematiky hloubkového broušení.

Anotace:

Tato práce pojednává o principu broušení a problematice hloubkového broušení. V práci je uvedena podstata technologie, principy, měření a vyhodnocení různých parametrů v průběhu samotného procesu broušení nebo parametrů výsledného obrobku. Dále byl proveden rozbor silového zatížení při broušení hranolů z materiálu Inconel 713 LC různými brusnými kotouči. Kotouče byly porovnány z hlediska silové zátěže a tvarové stálosti a byla navržena vhodná varianta pro tvarové hloubkové broušení.

Annotation:

This thesis is focused on the principle of grinding and specifically creep-feed grinding. There is stated the principle of the aforementioned technology, principles, measuring and evaluation of different parameters of the grinding proces or parameters of final machined parts. Furthermore was done an analysis of force stress when creep-feed grinding prisms made of Inconel 713 LC with different grinding wheels. Wheels were compared in terms of force stress and the ability to maintain initial shape and then new suitable option was suggested for creep-feed shape grinding.

Obsah

1	Podstata broušení	9
1.1	Tvoření třísky.....	9
1.2	Broušící kotouče	10
1.2.1	Brusivo	12
1.2.2	Zrnitost	12
1.2.3	Struktura	13
1.2.4	Pojivo.....	14
1.3	Geometrie zrn	15
1.4	Tloušťka třísky při broušení	15
1.5	Vznik třísky	16
1.5.1	Oblast primární plastické deformace.....	16
1.6	Opotřebení kotouče.....	17
1.7	Řezné podmínky	18
1.8	Síly.....	19
2	Experimentální měření při broušení	21
2.1	Měření teplot.....	21
2.2	Měření opotřebení nástroje	22
2.2.1	Měření opotřebení	22
2.3	Měření složek síly řezání	23
2.3.1	Nepřímé měření složek síly	23
2.3.2	Přímé měření složek síly	24
2.3.3	Rozdělení dynamometrů	24
3	Hodnocení kvality broušených povrchů	28
3.1	Integrita povrchu.....	28
3.2	Drsnost povrchu.....	28
3.2.1	Hodnocení drsnosti povrchu	28
3.2.2	Parametry profilu drsnosti povrchu	30
3.2.3	Měření drsnosti povrchu.....	32
3.3	Geometrická přesnost povrchu	32
3.4	Tvrdost povrchové vrstvy	32
3.5	Tepelné změny – opaly, náběhové barvy	33
3.6	Zbytková pnutí.....	33

3.6.1	Destruktivní metody měření	34
4	Procesní kapaliny při broušení	36
4.1	Volba procesní kapaliny	37
4.2	Trysky	38
4.3	Jiná konstrukce nástroje	38
5	Hloubkové broušení	40
5.1	Porovnání technologií	40
5.2	Procesní kapalina	41
5.2.1	Délka geometrického kontaktu	41
5.3	Využití technologie	42
5.3.1	První brněnská strojírna Velká Bíteš	43
6	Příprava před experimentálním broušením	45
6.1	Frézování	45
6.1.1	Stroj	45
6.1.2	Technologické podmínky	46
6.1.3	1. varianta s VBD pro nerezovou ocel	47
6.1.4	2. varianta s VBD pro konstrukční ocel	48
6.1.5	3. varianta s VBD pro žáruvzdorné slitiny	48
6.1.6	4. varianta s monolitní frézou pro žáruvzdorné materiály	49
6.1.7	Zhodnocení	50
6.2	Rovinné broušení	50
6.3	Orovnání brousícího kotouče	51
7	Experimentální broušení	54
7.1	Použité brusné kotouče	54
7.1.1	Tyrolit STRATO ULTRA	54
7.1.2	Norton ALTOS	54
7.1.3	Cubitron™ II 30%	55
7.1.4	Cubitron™ II 99%	55
7.1.5	Mikrostruktura kotoučů	56
7.2	Porovnání kotoučů při experimentálním měření	57
7.3	Naměřené a vyhodnocené silové parametry	58
7.4	Vliv orovnění kotouče na průběh sil při broušení	65
7.4.1	Naměřené hodnoty	66
7.5	Posouzení tvarové stability kotoučů	68

7.5.1	Opotřebení řezných hran kotouče	69
7.5.2	Úbytek na poloměru kotouče.....	72
7.6	Zhodnocení kotoučů	74
7.6.1	Z hlediska silových poměrů.....	74
7.6.2	Z hlediska tvarové stability.....	74
7.6.3	Výsledek vyhodnocení kotoučů	74
7.7	Další měření s kotoučem Tyrolit	75
8	Závěr	78
9	Bibliografie	80
10	Seznam tabulek.....	82
11	Seznam grafů	83
12	Seznam obrázků	84

1 Podstata broušení

Broušení je dokončovací operace obrábění, kdy jsou odebírány drobné částičky třísky mnohobřítým nástrojem, který se otáčí velkou obvodovou rychlostí. Broušení slouží k dosažení přesných rozměrů, požadovaných tvarů (rovinnost, válcovitost) a drsnosti povrchu Ra 1,6 až 0,2 μm . Způsob broušení závisí na tvaru a velikosti broušené plochy. Je možné brousit tvrdé kalené a cementované součásti, slinuté karbidy i jiné tvrdé kovové a nekovové materiály. Broušením lze také obnovovat ostří nástrojů, tím se zvýší jejich řezivost. Tuto činnost nazýváme ostřením. [1]

Jedná se o rychlostní mikrořezání (odírání) povrchových vrstev těles velmi jemnými zrny brusiva, stmeleny pojivem v nástroj. Proces probíhá při značných rychlostech, nejčastěji do 50 m/s, a ve zvláštních případech až do 100 m/s. Broušením se dosahuje velké přesnosti obrábění. Současně se broušení používá i při předběžném obrábění polotovarů – čištění odlitků, výkovků apod. Základním způsobem broušení je broušení vnějších válcových ploch s posuvem podél osy obrobku. V tomto případě je řeznou dráhou zrna šroubovitá hypocykloidní křivka a řeznou plochu tvoří soubor hypocykloidních šroubovic. [2]

Broušící kotouče mají na rozdíl od ostatních způsobů obrábění samo ostřicí schopnost. Tato vlastnost souvisí s pojivem, které drží broušící zrna pohromadě ve vazbě kotouče. Při opotřebení zrna se zvýší silová zátěž, otupené zrno je touto zvýšenou silou vylomeno a v řezu pokračují nová, neotupená zrna. [2]

Rozdělení broušení dle typu broušícího nástroje:

- S vázaným pevným brusivem (zrna brusiva stmelena pojivem do tvaru kotouče, broušícího tělesa, segmentu, broušícího kamene či nástroje jiného tvaru nebo broušícího pásu)
- Volným brusivem (zrna ve formě prášku pro broušení kapalinou, ultrazvukem, nebo podobným způsobem obrábění tvrdých materiálů) [2]

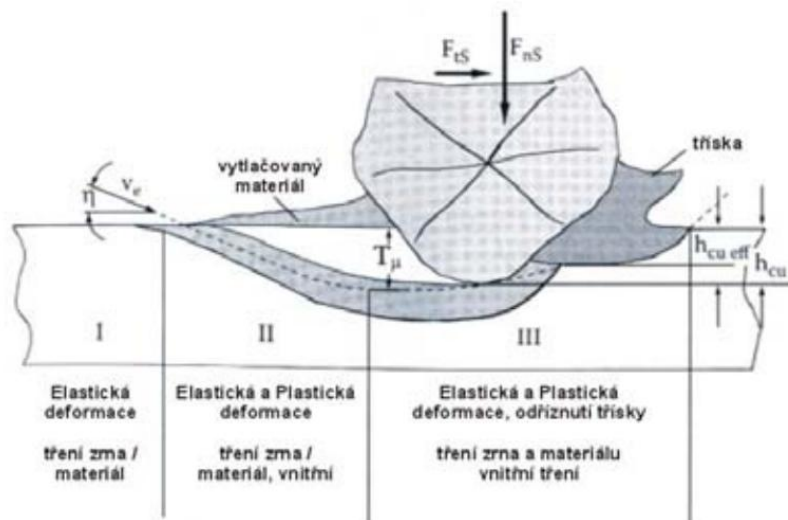
1.1 Tvoření třísky

Jako tloušťku třísky určujeme tloušťku materiálu odebíraného jedním brusným zrnem. Jedná se o vzdálenost mezi plochami řezu vytvářenými dvěma následujícími záběry břitů za sebou jdoucích zrn. Na tloušťce třísky odebírané jedním zrnem brusiva

závisí: otupení zrn, řezná síla připadající na jedno zrno, R_a , okamžitá teplota v místě řezu apod. [2]

Tvar a rozměry třísek závisí na použitém brusném kotouči a zvolených řezných podmínkách. Nepravidelná struktura brusiva a nepravidelný tvar zrn mají za následek nepravidelné utváření třísek. [2]

Při broušení se nejčastěji vyskytují tři tvary třísek: páskovité, zavnuté a segmentové. Nejčastější je páskovitá tříška. [2]



Obrázek 1 Mechanismus tvoření třísky[3]

1.2 Broušící kotouče

Brusnými nástroji se brusného účinku dosahuje ostrými hranami zrn velmi tvrdých brusných materiálů. Tyto materiály jsou drženy pojivem:

- Neorganickým – keramickým
- Organickým – pryží, šelakem, bakelitem

Brusná zrna jsou krystalické úlomky:

- korundu (oxid hlinitý Al_2O_3)
- karbidu křemíku (SiC)
- karbokorundu
- diamantu
- a jiné[4]

Zrna se vylamují ve smykových plochách a mají poté různě zaostřené hrany s kladným nebo záporným úhlem čela. Diamantová zrna se vyznačují nejvyšší tvrdostí a brusivostí. Brusivost je schopnost odebrat množství materiálu za jinak stejných podmínek za určitý čas. [4]

Korund má řezivost zhruba šestkrát menší, karbid křemíku dosahuje čtvrtiny řezivosti diamantu. Broušení probíhá za velkých rychlostí, kde třením vzniká velké množství tepla. Vylamované částice se žhaví a taví. Ostré hrany se otupují a do prostoru mezi zrny se dostávají třísky (viz obr. *Obrázek 38* str. 56). [4]

Otupená zrna zvyšují silovou zátěž při řezání, tlak na ně vzrůstá a zrno se následně vylomí ze struktury, čímž se neotupená zrna dostávají do řezu. Tato samoostřicí schopnost brusných kotoučů je důležitá pro udržení řezivosti kotoučů. [4]

Tvrdostí kotoučů označujeme jejich schopnost udržet zrna ve vazbě, ne tvrdost zrn jako takových. Tvrdost brusných nástrojů se označuje velkými písmeny G až Z. [4]

„Jakost brusných nástrojů se označuje v tomto pořadí:

1. Druh brusiva, např. A99
2. Zrnitost — 46
3. Tvrdost — M
4. Struktura — 8
5. Pojivo — V

Za udáním jakosti (A99, 46 M, 8 V) následují údaje o rozměrech, popř. o tvaru kotouče.“ [4]

1.2.1 Brusivo

- a) Přírodní
- b) Umělé

Tabulka 1 Druhy brusiva [4]

Druh brusiva		Původ	Označení ČSN
Pazourek		Přírodní	P
Granát			G
Smirek			S
Umělý korund	Bílý	Umělé	A99
Al ₂ O ₃	Růžový		A98
	Hnědý		A96
	Černý		A85
Karbid křemíku	Zelený		C49
SiC	Šedý		C48
	Černý		C47
Karbid Bóru			B
Diamant		Přírodní nebo umělý	D

Brusivo se drtí na brusná zrna, která se třídí dle měrné šířky. Velikost zrna je očíslována a udává se v mikrometrech. [4]

1.2.2 Zrnitost

Zrnitost určuje velikost brusného zrna. Značí se číslem, které odpovídá desetinně měrného rozměru zrna v jednotce mikrometr (μm). [5]

Tabulka 2 Zrnitost [4]

Druh	Číslo zrna	Měrný rozměr zrna [μm]		Použití
		od	do	
Brusná zrna hrubá	4	5000	4000	Ve zvláštních případech
	6	4000	3150	
	8	3150	2500	
	10	2500	2000	
	12	2000	1600	
	14	1600	1250	
	Hrubování	16	1250	1000
		20	1000	800
		24	800	630
		30	630	500
36		500	400	
Brusná zrna střední	46	400	315	Strojní součásti, ostření nástrojů
	60	315	250	
	70	250	200	
	80	200	160	
	100	160	125	
	120	125	100	
Brusná zrna jemná	150	100	80	Předhlazení
	200	80	63	
	240	63	50	
	280	50	40	
	320	40	32	
Mikrozrna	M32	32	32	Dohlazení, konečné lapování
	M22	22	15	
	M15	15	10	
	M10	10	7	
	Ve zvláštních případech	M7	7	5
		M5	5	3
		M3	3	-

1.2.3 Struktura

Struktura brusných nástrojů je označována pořadovými čísly. Strukturou se rozumí pórovitost, procentuální objem pórů z celkového objemu brusného nástroje. Pórovité kotouče se nezanášejí, mají lepší nasákavost procesní kapaliny, kterou v pórech odnáší do místa řezu. [4] [6]

1.2.4 Pojivo

Účelem pojiva je držet zrna brusiva v brusném nástroji. Pojivo zrna stmeluje, aby nástroj získal požadovaný tvar, rozměr a mechanickou pevnost. Při dobře voleném pojivu se zrna po otupení začnou samočinně vytrhávat z brusného kotouče a tím se odkryjí ostrá, hlouběji položená zrna. Další funkcí pojiva je odolávat vlivům teploty, chladicích kapalin apod. [4] [6]

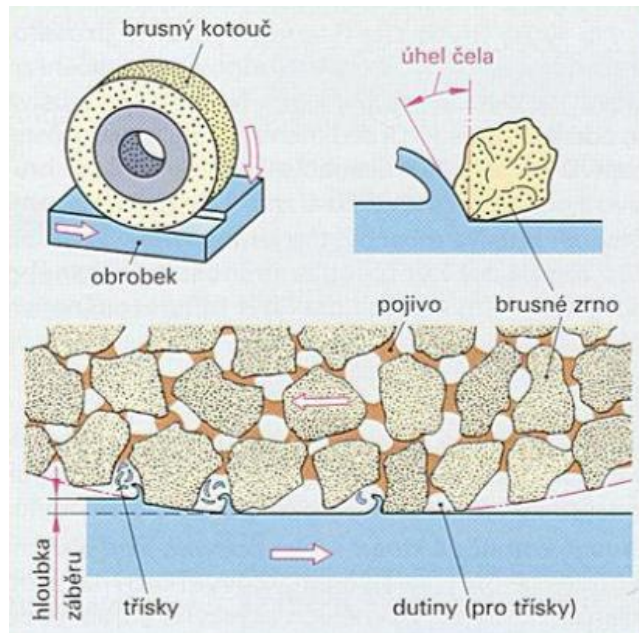
- Keramické pojivo (V) – univerzální pojivo. Maximální obvodová rychlost se volí 35 až 50 m/s. Jeho nevýhodou je křehkost
- Silikátové pojivo (S) – pružnější, ale vykazuje menší pevnost než pojivo keramické
- Magnezitové pojivo (O) – špatně snáší vlhkost, používá se pouze při broušení za sucha [4] [6]

Tabulka 3 Pojivo [4]

Druh pojiva	Označení ČSN 22 4010	Složení	Použití
Keramické	V	Směsi různých křemičitanů	Základní pojivo normálních kotoučků s výjimkou prořezávacích
Silikátové	S	Alkalické křemičitany	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
Umělé pryskyřice	B	Bakelit	Po keramickém nejdůležitější pojivo. Vhodné pro broušení závitů a pro nárazové broušení
Kovové	-	Slitiny mědi, lehké kovy, aj.	Pro diamantové kotouče

1.3 Geometrie zrn

Geometrie brusného zrna je udávána pomocí úhlu čela - γ . Brusná zrna musí být tvrdá, houževnatá a teplotně odolná. [7]



Obrázek 2 Geometrie zrna[7]

1.4 Tloušťka třísky při broušení

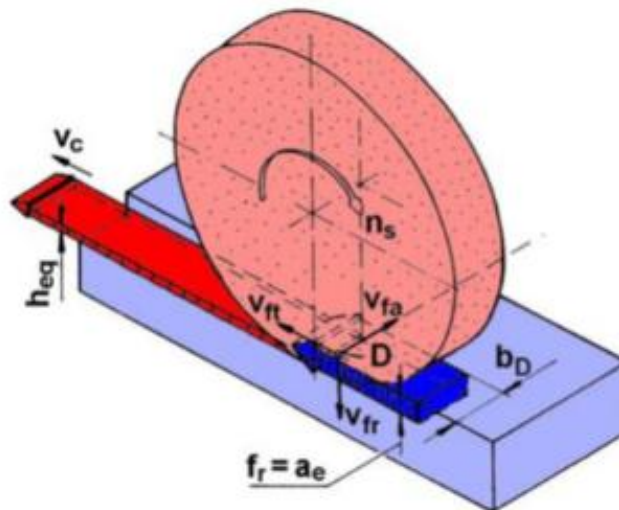
Tloušťka třísky se při broušení vypočítává velmi složitě, protože je odebírána jednotlivými zuby brusného kotouče. Z tohoto důvodu se při broušení počítá teoretická hodnota ekvivalentní tloušťky broušení h_{eq} . U hloubkového broušení se jedná o vztah pro ekvivalentní tloušťku broušení u rovinného tangenciálního broušení s přímočarým pohybem (viz obrázek č. Obrázek 3). [4]

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

Kde: a_e – pracovní záběr [mm]

v_c – řezná rychlost [m/s]

v_{ft} – tangenciální rychlost posuvu stolu brusky [m/min]



Obrázek 3 Rovinné obvodové tangenciální broušení[8]

1.5 Vznik třísky

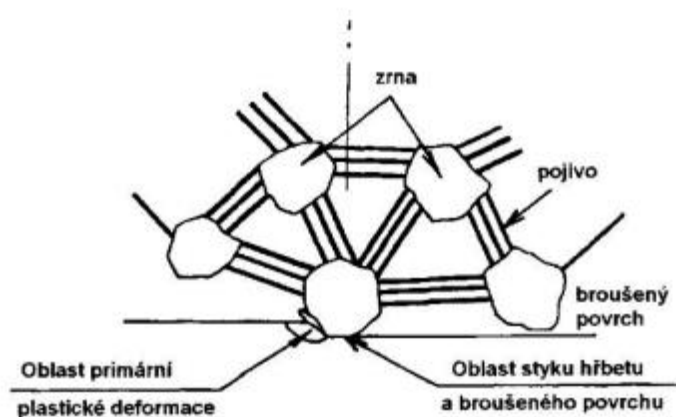
Při broušení dochází ke vzniku třísky po překročení pevnosti ve smyku obráběného materiálu. Vyskytuje se oblast primární plastické deformace, oblast sekundární plastické deformace a oblast styku hřbetu zrna a broušeného povrchu.[2][9]

1.5.1 Oblast primární plastické deformace

Velikost oblasti primární plastické deformace je značně proměnlivá. Závisí na fyzikálních vlastnostech materiálu, geometrii zrna, řezných podmínkách a prostředí. Na obrázku č. Obrázek 4 je struktura brousícího nástroje s vyznačenou oblastí primární plastické deformace. Vlastnosti povrchu jsou dány objemem tepla, které vzniká při tvoření třísky. [9][10]

Plastická deformace v procesu řezání má za následek:

- Oddělení třísky od obrobku
- Mechanické zatížení nástroje řezným odporem
- Tepelné zatížení
- Opotřebení nástroje
- Změna struktury materiálu v povrchové vrstvě obrobku
- Vznik zbytkových napětí (odvíjí se také od teploty řezání)
- Pěchování třísky – reálný tvar neodpovídá teoretickému tvaru [11]



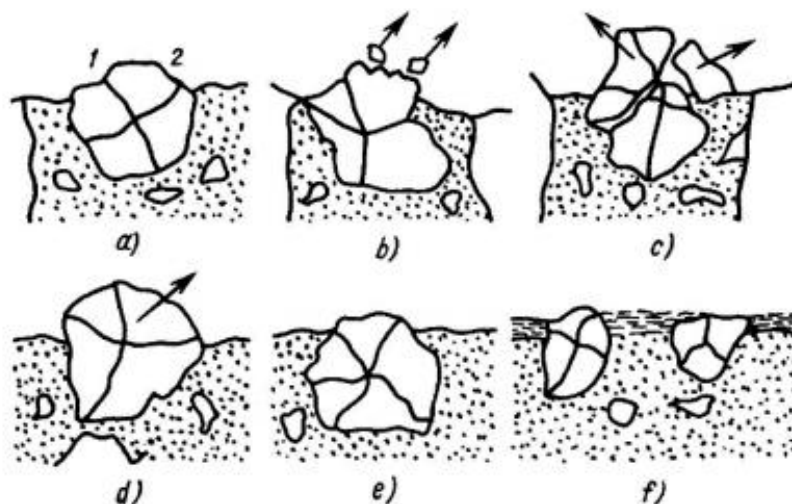
Obrázek 4 Struktura broušícího kotouče[9]

1.6 Opotřebení kotouče

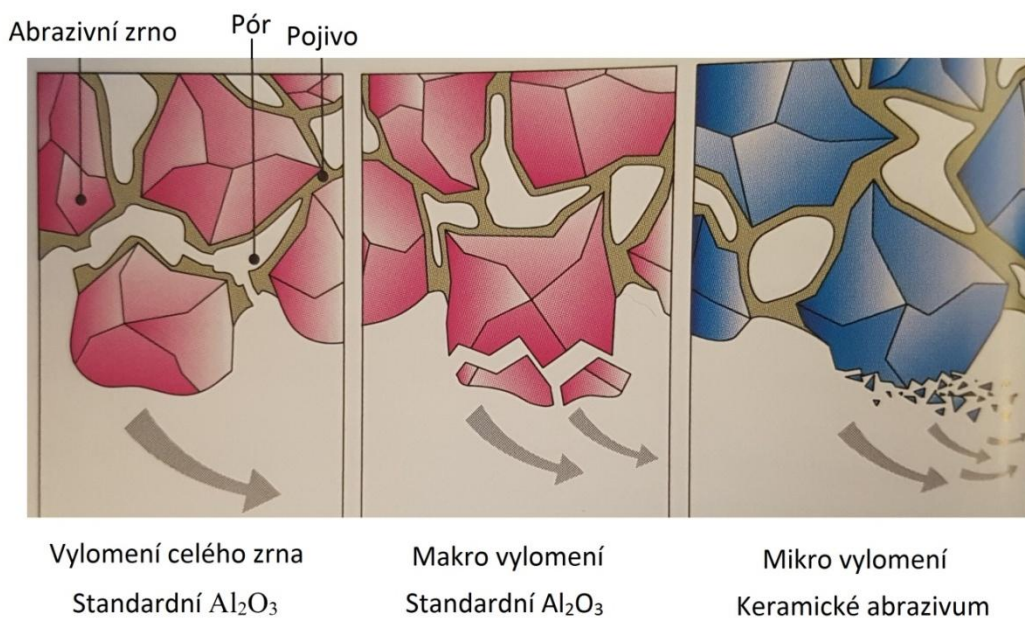
Na vrcholech zrn dojde k vytvoření plošky, otupená zrna zvyšují silovou zátěž při řezání, tlak na ně vzrůstá a zrno se následně vylomí ze struktury, čímž se neotupená zrna dostávají do řezu. Tato samoostřící schopnost brusných kotoučů je důležitá pro udržení řezivosti kotoučů. Opotřebení kotouče, tedy vylamování jeho zrn ze struktury, je vyšší při náročných řezných podmínkách a vysokých teplotách.[4]

Základní druhy opotřebení (viz obrázek Obrázek 5) :

- a) Otěr řezných částí zrn brusiva se vznikem úlomků
- b) Štěpení zrn
- c) Porušování celých zrn
- d) Úplné vylamování zrn z pojiva
- e) Porušení působením chemických vlivů ve styčném pásu zrn a broušeného materiálu
- f) Difúzní a adhezní opotřebení za vysokých teplot [2]



Obrázek 5 Základní druhy opotřebení zrn[9]



Obrázek 6 Druhy vylamování zrn, korund a keramické abrazivum [12]

1.7 Řezné podmínky

Prvotní určení řezných podmínek se volí dle tabulek. Řezná rychlost by měla být co největší, ovšem se zřetelem na pevnost kotouče a materiálové podmínky.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot 1000} [m \cdot s^{-1}]$$

Nejčastěji se řezná rychlost volí:

- 25-35 m/s pro ocel
- 20-25 m/s pro litinu

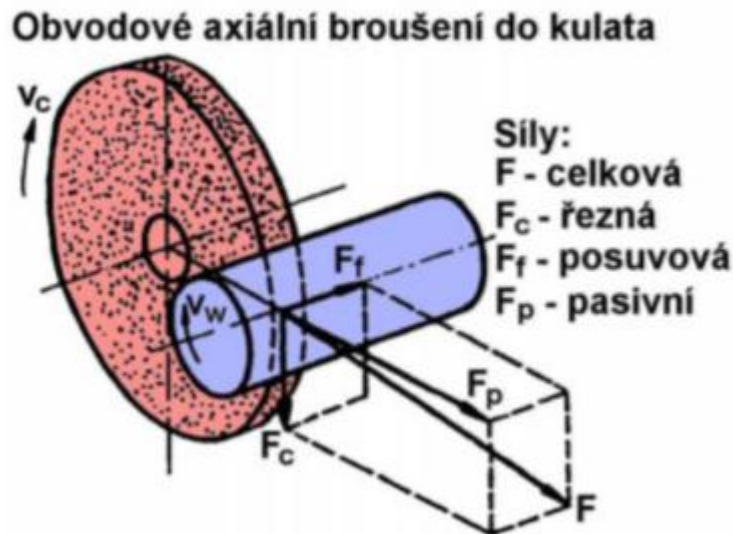
Největší přípustné řezné rychlosti bývají označeny na broušicím kotouči.

Posuv kotouče v podélném směru vzhledem k obrobku se volí podle šířky kotouče B . Při broušení do kulata - hrubování se volí $0,3-0,7 B$, při operaci na čisto se volí $0,2-0,3 B$ na jednu otáčku obrobku. [6]

Produktivitu broušení válcových ploch můžeme zvýšit hloubkovým broušením. [6]

1.8 Síly

Při procesu broušení vznikají dynamické jevy, které se stále mění v čase. V ploše styku brusných zrn kotouče s obrobkem se silové složky rozkládají do třech vzájemně kolmých směrů. [6][8]



Obrázek 7 Rozložení sil při obvodovém broušení do kulata[8]

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

- F_c – hlavní síla - ve směru řezné rychlosti
- F_p – pasivní síla - kolmá k broušené ploše
- F_f – působí ve směru podélného posuvu (kolmo na rovinu otáčení kotouče)“[8]

Při procesu broušení má vliv na velikost silových složek především obráběný materiál, způsob broušení, řezné podmínky, zrnitost brusiva, druh a tvrdost pojiva a struktura brusného kotouče. Při otupení zrn kotouče dojde k nárůstu sil. [6][8]

2 Experimentální měření při broušení

Pro obráběcí proces je důležité měřit teploty, opotřebení nástrojů a složky sil při řezání. Tyto metody jde rozdělit do různých skupin popsaných v podkapitolách.

2.1 Měření teplot

Pro měření teplot lze využít nespočet fyzikálních a chemických jevů. Je zde však důležité uvažovat nad užitím daného měření a vybrat takové, které bude vypovídající pro danou metodu. Při experimentálním měření a při praktickém měření se využívá hlavně jevů: [11]

- a) Termoelektrický jev (termočlánky)
- b) Změna elektrického odporu (termistory)
- c) Tepelné záření (pyrometry, termovize, fotometrie)
- d) Změna struktury (teploměrné křídly a barvy) [11]

Obecné složení zařízení pro měření teplot začíná snímačem teploty, navazují převodové a přenosové členy a končí indikátorem měřené veličiny. Při měření teploty v procesu řezání se snímače umisťují přímo do soustavy stroj – nástroj – obrobek a podle druhu, provedení a umístění použitého snímače jsou převážně označovány jednotlivé měřicí metody. Teploty je možné měřit na obrobku, řezném klíně a třísce s použitím následujících postupů: [11]

- Měřením termočlánkem
- Obrazovým záznamem teplotního pole prostřednictvím pyrometrů, infračervené fotografie nebo termovizní kamery
- Kalorimetrické měření jsou vhodné pro měření tepla a teploty podle ohřátí kapaliny, které nastane vložením ohřátého předmětu
- Fázové změny vyvolané teplotou v třísce nebo v řezném klíně
- Měření teplotního pole teplotními indikátory
- Fotografie měření teplotního pole
- Měření teploty termistory [11]

Teplotním polem se rozumí rozložení teplot v obrobku, nástroji a třísce při procesu obrábění. Obvykle se určuje teplota na povrchu těchto těles, důvodem je obtížnost určení teploty v jednotlivých bodech. Při experimentálním měření se omezujeme pouze na stanovení střední teploty oblasti řezu. Tato teplota se v teorii obrábění také nazývá teplotou

řezání a lze s její pomocí do určité míry charakterizovat teplotní namáhání břitu nebo obrobiteľnost obráběného materiálu. [11]

2.2 Měření opotřebení nástroje

Proces opotřebení nástroje je složitý děj závislý na mnoha již zmíněných faktorech. Při obráběcích procesech dochází k mnoha fyzikálním a chemickým jevům. K základním mechanismům opotřebení patří: [11]

- „abraze – brusný otěr vlivem tvrdých mikročástic z obráběného materiálu a z nástroje
- adheze – vznik a okamžité následné porušování mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky, v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů
- difúze – migrace atomů z obráběného nástrojového materiálu a naopak, nežádoucí chemické sloučeniny ve struktuře nástroje
- oxidace – vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí
- plastická deformace – důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, kumulovaného v čase
- křehký lom – důsledek vysokého mechanického zatížení, např. přerušovaný řez, nehomogenity a vměstky v obráběném materiálu atd.“[11]

Abraze a adheze se řadí mezi fyzikální mechanismy opotřebení, difúze a oxidace mezi chemické mechanismy opotřebení. Všechny čtyři jevy působí v průběhu času plynule a časový začátek jejich působení nemusí být vždy shodný. [11]

Hřbet nástroje je opotřebováván především abrazivně a oxidačně, čelo v důsledku adheze, difúze, abraze a oxidace. Další faktory mají vliv, zdali se nástroj bude více opotřebovávat na hřbetě nebo na čele, jako je např. geometrie nástroje, druh operace (hrubování, dokončování) a také řezné podmínky (řezná rychlost, posuv, hloubka řezu a chlazení). [11]

2.2.1 Měření opotřebení

Metody pro stanovení opotřebení řezného nástroje mohou být přímé a nepřímé. [11]

Přímou metodou v případě stanovení opotřebení brusného kotouče je úbytek na kotouči. Měřícím zařízením lze změřit změnu rozměru po broušící operaci. Dále se úbytek může stanovit pomocí orovnáání. Sleduje se, v jaké části orovnávacího cyklu dojde ke kontaktu kotouče s hrotem orovnávače, tím získáme pomocí souřadnic stroje nový opotřebený rozměr kotouče. Úbytek se poté vypočítá z předchozího cyklu orovnáání, kdy měl kotouč přesně stanovený rozměr.

K nepřímým metodám měření patří:

- Měření a vyhodnocování jednotlivých složek řezné síly
- Měření a vyhodnocování elektrického příkonu obráběcího stroje
- Měření parametrů kmitání: amplitudy kmitů, zrychlení apod.
- Měření teploty
- Měření struktury povrchu obrobené plochy: parametry drsnosti Ra, Rz, apod.
- Sledování druhotných projevů opotřebení:
 - Lesklé proužky na obrobené ploše
 - Charakteristický zvuk
 - Změna tvaru a barvy třísky [11]

V praxi jsou pro měření opotřebení nástroje nejčastěji používány metody přímého měření. [11]

2.3 Měření složek síly řezání

Přesné určení silových poměrů v průběhu řezu zajistí přehled o mechanickém namáhání soustavy. Z těchto výsledků lze vyhodnotit požadavek pevnosti, tuhosti a stability řezného procesu. Dále lze zjistit požadavky na příkon stroje, trvanlivost nástroje, vibrace, přesnost výroby.

2.3.1 Nepřímé měření složek síly

Metoda stanovení řezné (tangenciální) složky síly z výkonu stroje Měření výkonu obráběcího stroje se obecně provádí wattmetrem. Změří se výkon při chodu naprázdno P_0 [W], následně se změří celkový výkon stroje při obrábění P_c [W]. Po odečtení těchto dvou údajů dostaneme užitečný výkon stroje $P_{už}$ [W], ze kterého se spočítá řezná síla. [11]

$$F_c = \frac{P_{už}}{v_c} [N]$$

Tato metoda je poměrně jednoduchá a může být použita u všech způsobů obrábění. Nevýhodou této metody ale je omezená přesnost měření, jelikož účinnost stroje při obrábění a při chodu naprázdno není stejná. Také se nebere v úvahu vliv ostatních parametrů v rámci dynamického obráběcího procesu. [11]

2.3.2 Přímé měření složek síly

Přímé měření složek síly probíhá s pomocí dynamometrů.

Princip dynamometru je založen na měření deformace vyvolané řeznou silou v soustavě stroj-nástroj-obrobek. Dynamometr musí měřit sledovanou veličinu ve zvoleném rozsahu s maximální přesností. Z tohoto plynou základní charakteristiky, kterým dynamometry musí vyhovovat. [11]

- Tuhost dynamometru - musí být dostatečně velká tak, aby deformace dynamometru neovlivňovala řezný proces
- Citlivost dynamometru - úzce souvisí s tuhostí dynamometru a s citlivostí použitého snímače
- Stálost údajů
- Reprodukovatelnost údajů
- Setrvačnost – při dynamice obráběcího procesu je nutné sledovat změny hodnot závislé v čase, proto by měla být setrvačnost co nejmenší
- Konstrukce – měřené silové složky se nesmí vzájemně ovlivňovat [11]

2.3.3 Rozdělení dynamometrů

a) Mechanické

Zpravidla se používají pro cejchování dalších druhů dynamometrů. Lze u nich většinou vyloučit nežádoucí rušivé vlivy. [11]

b) Pneumatické

Podstatou je senzor deformace pneumatickým systémem klapka-tryska, který k měření využívá dynamických vlastností vzduchu procházejícího štěrbinou. Tyto dynamometry měří pomocí tlakové změny vzduchu v závislosti na změně mezery mezi klapkou a tryskou v senzoru. Tyto dynamometry se používají ve výbušném prostředí. [11]

Snadná obsluha, údržba, citlivost, vysoká spolehlivost a nízké náklady na provozování a pořízení oproti elektrickým dynamometrům jsou přednostmi pneumatických dynamometrů. [11]

c) Hydraulické

Podstatou je přenos síly nebo momentu, který je přenášen na píst nebo membránu hydraulického obvodu a tím způsobující změnu tlaku v kapalině svým pohybem. Tato změna pak se snímá pomocí nanometrů nebo jiných přístrojů. Výhodou je jednoduchá konstrukce a schopnost měření více složek současně. Nevýhodou je nízká citlivost, dokonale těsnící systém a velká setrvačnost. V současné době se používají jenom výjimečně. Tyto dynamometry se používají ve výbušném prostředí. [11]

d) Elektrické

Jsou nejvíce používaným a rozšířeným typem dynamometrů v technické praxi. Principem parametrických systémů je změna jednoho z parametrů el. obvodu – indukčnosti, kapacity nebo odporu. U generátorových systémů se jedná o vznik napětí nebo proudu při deformaci elementu. Přednostmi elektrických dynamometrů jsou:

- snadný přenos signálu s řadou možných úprav
- zachycení signálů různých průběhů a frekvencí
- snímání signálu u rotujících a pohybujících se součástí
- využití velmi malých měřicích elementů
- jednoduchá dostupnost zdrojů napájení a čistota provozu [11]

e) Elektrické indukční dynamometry

Snímače registrují změny šířky vzduchové mezery, která se mění v závislosti na působení zátěžové síly. Změnou šířky dojde ke změně impedance magnetického obvodu a indukčnosti cívky. Závislost impedance na velikosti vzduchové mezery má hyperbolický průběh. [11]

f) Elektrické kapacitní dynamometry

Pro měření velikosti deformace se využívá změny kapacity snímačů. Snímačem je deskový kondenzátor. Kapacitní snímače se vyznačují malou hmotností a velkou citlivostí.

Z toho důvodu je měření velmi citlivé na vnější jevy a náročné na měřicí techniku. Používá se pouze zřídka. [11]

g) Elektrické odporové dynamometry

Pro měření velikosti deformace se využívá změny elektrického odporu snímače. Nejvíce používaným snímačem jsou odporové tenzometry. Tenzometry mohou být vyrobeny z vodivých nebo polovodivých materiálů. [11]

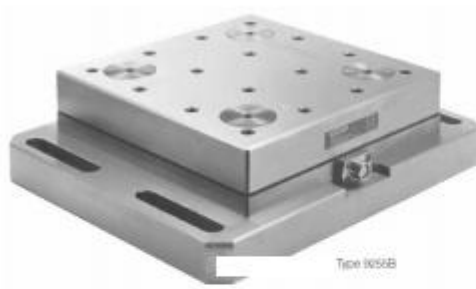
Tenzometry z vodivých materiálů mohou být drátkové, fóliové a napařované. U drátkových je měřicí mřížka tvořena z tenkých odporových drátů o $\varnothing 0,01-0,05$ mm. Ty jsou nalepeny na nosnou izolační podložku z papíru nebo pryskyřice. Drátkové tenzometry mají velmi malý rozptyl teplotních součinitelů, deformační citlivosti a hodnoty odporu. Z toho důvodu dochází k vyrušení vedlejších vlivů a drátkové tenzometry jsou při dynamickém měření sil nejrozšířenější. [11]

Polovodičové tenzometry využívají piezorezistentní vlastnosti určitých polovodičových materiálů, dotovaných dalšími příměsemi. Odporovým elementem snímače je tenká destička z monokrystalu polovodiče, která při deformaci mění svůj měrný elektrický odpor. Jejich výroba je náročná a nákladná. [11]

h) Piezoelektrické dynamometry

Pro měření deformace využívají piezoelektrického jevu. Ten je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení. Mezi piezoelektrické materiály patří křemen, materiály na bázi titaničitanu barnatého, Seignettovy soli a podobně. [11]

Velikost náboje je při zatížení přímo úměrná velikosti působící síly a síla se s poklesem zatížení lineárně snižuje. Moderní piezoelektrické dynamometry Kistler jsou speciálně konstruované pro případy obrábění a jsou schopny pracovat v prostředí s procesní kapalinou. [11][13]



Type 9056B

a) pro frézování



Type 9059B + 9441B

b) pro soustružení



c) pro vrtání



Type 9257B

d) pro broušení

Obrázek 8 Dynamometry Kistler[11]

3 Hodnocení kvality broušených povrchů

Hodnocením kvality povrchu můžeme vyhodnotit, zda můžeme použít zvolenou technologii, zadané řezné podmínky a řezné prostředí. Broušení je velmi rozmanitý proces, tato technologie nemá definovanou nástrojovou geometrii. Při broušení vzniká nový povrch – obrobená plocha, která svými vlastnosti musí splňovat kvalitativní i užité vlastnosti.

Komplexní hodnocení vlastností povrchu se nazývá hodnocení integrity povrchu.

3.1 Integrita povrchu

Integrita povrchu se skládá z několika složek, které můžeme hodnotit a každá z nich ovlivňuje celkový výsledek hodnocení a možnost praktického využití obrobku.

Základními složkami integrity povrchu jsou:

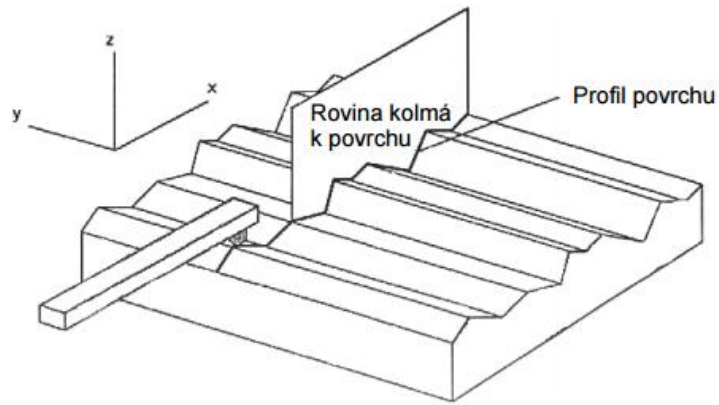
- „Drsnost povrchu
- Geometrická přesnost povrchu
- Změny tvrdosti povrchové vrstvy
- Změny struktury materiálu v povrchové vrstvě
- Tepelné změny – opaly, náběhové barvy
- Trhliny
- Zbytková napětí“[3]

3.2 Drsnost povrchu

Měření drsnosti je definováno normou ČSN EN ISO 4287, ve které je definována metodika měření a různé parametry vyhodnocení. Mezi nejdůležitější parametry hodnocení drsnosti patří R_a a R_z . [3]

3.2.1 Hodnocení drsnosti povrchu

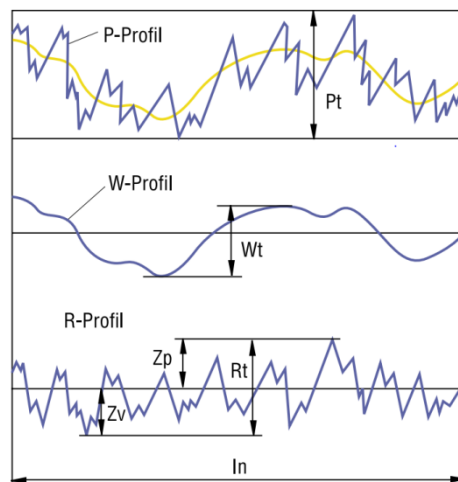
Posuzování drsnosti povrchu je řešeno redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu.



Obrázek 9 Profil povrchu [14]

V této rovině tak získáme reálný profil obrobenej plochy, který je složen z profilu vlnitosti a profilu drsnosti. Jednotlivé profily od sebe lze oddělit pomocí filtrace s filtry o různých vlnových délkách. [14][15]

Po vyhodnocení dostaneme tři typy profilů (viz obrázek č. Obrázek 10).



Obrázek 10 Profily drsnosti povrchu [16]

Prvním profilem je základní profil (P-profil). Tento profil obsahuje složky drsnosti profilu jak s dlouhou, tak s krátkou vlnovou délkou. Druhým typem je profil vlnitosti (W – profil), který vznikne filtracej naměřených dat krátkovlnným filtrem, takže výsledná data popisují vlnitost obrobenej plochy. Posledním typem profilu je profil drsnosti (R-profil) který získáme odfiltrováním dlouhých vlnových délek, proto tento profil specifikuje drsnost. [14] [15] [16]

Pro správné vyhodnocení drsnosti je potřeba provádět měření na správné délce. Tato délka musí být dostatečná, aby měřené parametry byly statisticky významné, nesmí být ale moc dlouhá, aby nezahrnovala vlivy vlnitosti či úchylek tvaru. [14][15]

Správnou měřenou délku volíme dle λ_c filtru, který definuje rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti. Testovaná délka by tedy správně měla obsahovat rozběhovou délku, vyhodnocovanou délku a doběhovou délku (viz obrázek č. Obrázek 11). [14][15]

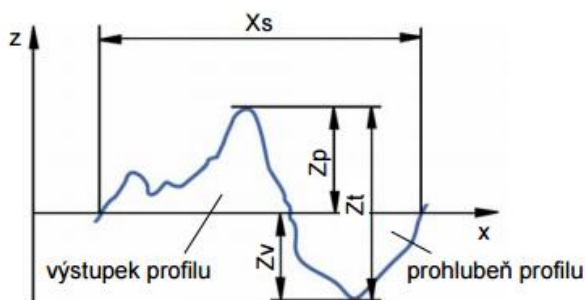


Obrázek 11 Základní délka měření [16]

3.2.2 Parametry profilu drsnosti povrchu

Nejmenší částí profilu je jeden prvek profilu, který je tvořen výstupkem profilu a přilehlou prohlubní. U prvku profilu vyhodnocujeme tyto parametry:

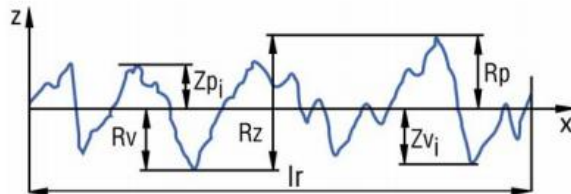
- Výška výstupku profilu Z_p
- Hloubka prohlubně profilu Z_v
- Výška prvku profilu Z_t
- Šířka prvku profilu X_s [14] [15]



Obrázek 12 Prvek profilu [14]

Po vyhodnocení prvků profilu na celé délce můžeme určit parametry profilu drsnosti povrchu:

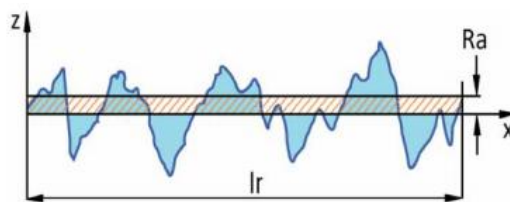
- Největší výška výstupku profilu R_p
- Největší hloubka prohlubně profilu R_v
- Největší výška profilu R_z [14][15]



Obrázek 13 Parametry profilu drsnosti povrchu [16]

Nejdůležitějším parametrem pro hodnocení drsnosti povrchu je ale průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a . Tento parametr je získán jako aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic $Z(x)$ od střední čáry v rozsahu základní délky. [14] [15]

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



Obrázek 14 Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a [14]

Pro hodnocení drsnosti povrchu se využívají ještě další parametry:

- Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu R_q
- Šikmost posuzovaného profilu R_{sk}
- Špičatost posuzovaného profilu R_{ku}
- Průměrná šířka prvků profilu R_{Sm} [14][15]

3.2.3 Měření drsnosti povrchu

Základní rozdělení měření drsnosti povrchu je hodnocení kvalitativní a kvantitativní.

Kvalitativní metody jsou založeny na porovnávání hodnoceného povrchu s vzorovým povrchem zrakem či dotykem. Dnes už se v praxi nepoužívají. [17]

Metody kvantitativní vyjadřují drsnost povrchu matematickým popisem. Jednotlivá zařízení (profilometry) můžeme rozdělit do tří základních skupin:

- Dotykové měřicí přístroje
- Bezdotykové měřicí přístroje (optické)
- Ostatní měřicí přístroje [17]

Dotykové měřicí přístroje jsou nejrozšířenější ve strojírenské praxi. Tyto metody provádějí přímé měření drsnosti povrchu, principem tohoto měření je rovnoměrné posouvání snímacího hrotu po kontrolovaném povrchu. Zaznamenává se změna výšky snímacího hrotu. Výhodou kontaktních přístrojů je větší tolerance oproti znečištění měřeného profilu. Snímací hrot dokáže odsunout malé nečistoty a nevádí mu olejová vrstva. Změny výšky měřícího hrotu, které jsou způsobeny nerovnostmi, jsou zaznamenávány v mnohonásobném zvětšení. [17]

3.3 Geometrická přesnost povrchu

Broušení je dokončovací operace a jejím hlavním cílem je zaručení geometrické přesnosti. V důsledku geometrické nepřesnosti může být obrobena součást nevyužita, v případě použití může dojít k dynamickému namáhání součásti, což může vést k rychlejšímu degradačním dějům a poškození okolní soustavy.

Geometrická přesnost povrchu je ovlivněna soustavou stroj – nástroj – obrobek – přídavek tzn., že na výslednou geometrickou přesnost má vliv opotřebení nástroje, řezné prostředí, řezné podmínky a další vlivy.

3.4 Tvrdost povrchové vrstvy

V důsledku broušení vzniká ve stykovém bodě kotouče a obrobku velkého množství tepla, které ovlivňuje tvrdost povrchové vrstvy. Vznik tohoto tepla je možné ovlivnit volbou vhodného řezného prostředí – technologické podmínky a procesní kapalina.

V případě broušení bez řezných kapalin dojde k druhotnému zakalení povrchu součásti, pod touto vrstvou leží popuštěná vrstva a dále je již tvrdost materiálu stejná jako tvrdost jádra. Zakalená povrchová vrstva může v důsledku nižší odolnosti proti cyklickému namáhání snížit celkovou životnost součásti. [3]

3.5 Tepelné změny – opaly, náběhové barvy

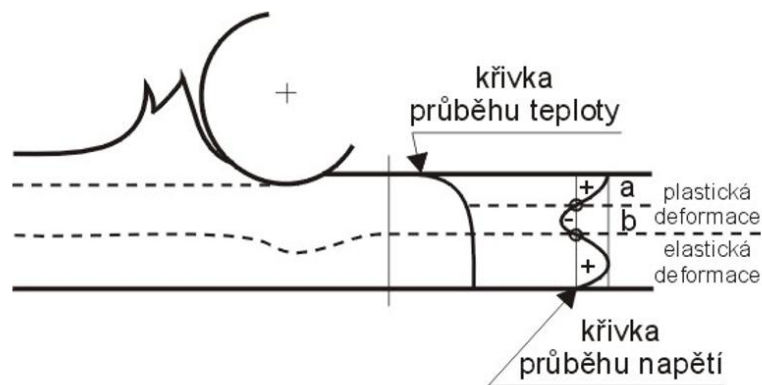
Jak již bylo výše zmíněno, v důsledku broušení vzniká velké množství tepla v důsledku tření a mechanického namáhání. V důsledku vzniku tepla může dojít k ovlivnění struktury materiálu a tím i ke vzniku opalů v místě koncentrace teploty.

Pro vyhodnocení opalů je nutné vytvořit metalografický výbrus s následným odleptáním. Opaly jsou oxidy různého zbarvení, které ve struktuře vznikly vlivem působení tepla při broušicím procesu a můžeme je rozdělovat na nízkoteplotní a vysokoteplotní. Nízkoteplotní opaly jsou po naleptání povrchové vrstvy žluté až žlutomodré a vysokoteplotní opaly jsou modré. Opaly se mohou v broušeném povrchu vyskytnout plošně nebo lokálně, závisí na chlazení a odvodu tepla. [3]

Náběhové barvy jsou submikronové tepelně ovlivněné vrstvy. Při tomto procesu dojde pouze k ovlivnění struktury na povrchu, nejsou ovlivněny vlastnosti obráběného materiálu. Náběhové barvy lze odstranit smirkovým papírem, jedná se pouze o pohledovou změnu.

3.6 Zbytková pnutí

Zbytková pnutí v broušené vrstvě můžeme rozdělit dle vzniku na tepelná, deformační a transformační. Tepelná pnutí vznikají v důsledku vzniku tepla při obráběcím procesu, deformační vznikají mechanickým namáháním povrchu broušené plochy a transformační vznikají tepelným cyklem procesu. Na obrázku č. Obrázek 15 je vidět průběh tepelných a mechanických napětí v povrchové vrstvě obrobeného povrchu. [3]



Obrázek 15 Průběh zbytkového napětí [3]

Mechanickým zatížením a vlivem teploty dojde k rozdělení oblasti plastické deformace na část *a* a část *b*. V části *a* dochází k velkému smrštění a zkrácení vláken. V části *b* jsou vlákna trvale protažena. Vlákna v oblasti elastické deformace se snaží vrátit do původního stavu a tím se na povrchu vytvoří tahová napětí. [3]

Čím více vzniklo tepla při obrábění materiálu, tím bude rozdíl mezi oblastmi *a* a *b* větší a povede k nárůstu napětí v povrchové vrstvě.

Výsledná zbytková pnutí mohou být mít tahová nebo tlaková. Tlaková pnutí pomáhají zamezovat šíření únavové trhliny a zvyšují odolnost povrchu proti opotřebení. Tahová naopak podporují růst a iniciaci strukturních trhin a jsou proto nežádoucí.

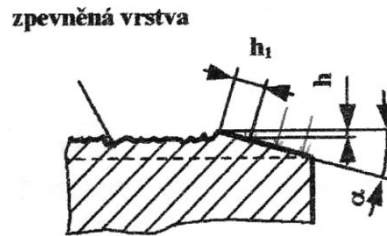
Jsou 3 skupiny zjišťování zbytkových pnutí:

- Destruktivní – dochází ke zničení součásti
- Polodestruktivní – měření je prováděno na záměrně přidané části povrchu, kterou je pak možné odstranit
- Nedestruktivní – nedochází ke zničení součásti, většina fyzikálních metod (např. pomocí magnetického pole) [11]

3.6.1 Destruktivní metody měření

Při destruktivních zkouškách dochází ke zničení testovaného vzorku. Při procesu broušení dochází k ovlivnění struktury povrchové vrstvy a je nutné zjistit, do jaké hloubky ovlivněná vrstva sahá. Zmíním se o dvou těchto metodách.

K hodnotám zpevnění a velikosti ovlivněné vrstvy lze dojít např. měřením mikrotvrdosti. Vzhledem k hloubce ovlivněných vrstev se používají metody postupného odleptávání povrchových vrstev, metody kolmých řezů a metody šikmých řezů.



Obrázek 16 Metoda šikmých řezů [11]

Na obrázku č. Obrázek 16 je znázorněna metoda šikmých řezů. Z testovaného vzorku je odříznuta vrstva pod určitým nízkým úhlem (většinou 1-2 °), aby vznikla dostatečně velká plocha pro zkoušení mikrotvrdosti. Dále se provedou vpichy indentorem a lze stanovit hodnotu mikrotvrdosti v různých hloubkách ovlivněné vrstvy. [18]

V případě zjištění vnitřních pnutí lze zjistit hodnotu napětí pomocí elektrochemického odleptávání. Testovaný vzorek se připevní na přesné měřidlo a postupně je zkoumaná plocha odleptávána. Při odleptání vrstev dochází k vymizení napětí uložených v té určité vrstvě a vzorek se zkrátí/protáhne. Tento údaj je zaznamenán na měřidle a vyhodnotí se tlakové/tahové napětí v určitých hloubkách povrchu. [18]

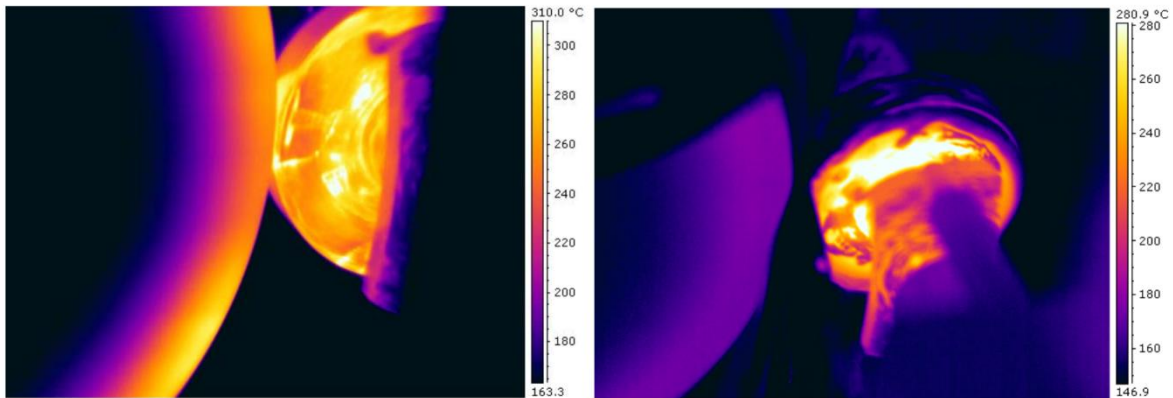
4 Procesní kapaliny při broušení

Klasické broušení může probíhat i bez procesních kapalin, záleží ovšem na volbě rezného procesu a obráběného materiálu. Procesní kapaliny zlepšují drsnost obrobku, snižují opotřebení nástroje, snižují teplotu v místě řezu (a teplotně ovlivněnou oblast obrobku).

Hlavní funkce procesní kapaliny můžeme rozdělit na:

- Odvod tepla z místa plastické deformace a vzniku třísky
- Snižování množství tepla mezi brousicím zrnem a broušeným povrchem vlivem tření
- Odvod třísky z místa řezu
- Podpora tvorby třísky
- Zamezení koroze [19]

Na obrázku č. Obrázek 17 je vidět vliv procesní kapaliny na teplotní pole při broušení. Broušena je ložisková ocel brusným kotoučem se zrnem CBN, $v_c = 37$ m/s, $v_p = 0,26$ mm/min. Na obrázku vlevo je proces bez kapaliny, vpravo s procesní kapalinou Diol.



Obrázek 17 Ukázka vlivu procesní kapaliny [20]

Dle účinku na rezný proces se kapaliny dělí na kapaliny s převážným chladícím účinkem a kapaliny s převážným mazacím účinkem.

Procesní kapaliny se dělí na několik druhů:

- Oleje – především mazací účinek ke snížení tření v místě řezu, pro nízké rezné rychlosti

- Emulze – částečně mazací a chladící účinek, voda + olej + emulgátor (zabraňuje shlukování kapek oleje)
- Vodní roztoky chemických látek – voda +1-2 % chem. látek
- Syntetické a polysyntetické kapaliny – vyznačují se velkou provozní stálostí [19] [21]

Oleje se nepoužívají při vysokých řezných rychlostech z důvodu vysokých teplot a špatného přívodu oleje do místa řezu. Olej má především mazací účinek a proto je nutné ho přivádět přímo do místa řezu, kde může působit svým mazacím účinkem. Při vysokých teplotách dojde v místě řezu k „tečení“ materiálu, vznikne velká kontaktní plocha a olej nemá přístup k místu řezu.

Emulzní kapaliny spojují chladící účinky vody a mazací vlastnosti olejů. V závislosti koncentrace olejů ve vodě se zvyšují nebo snižují mazací a chladící účinky. Čím více oleje, tím lepší mazací schopnost, ale horší chladící účinek. [20]

Vodní roztoky obsahují přísady k ochraně povrchu proti korozi a zlepšení smáčivosti. [21]

Syntetické kapaliny neobsahují minerální oleje, polosyntetické oleje velmi malé množství. Hlavní složkou jsou glykoly. [20]

4.1 Volba procesní kapaliny

Při výběru procesní kapaliny musíme brát v potaz několik poznatků obráběcího procesu:

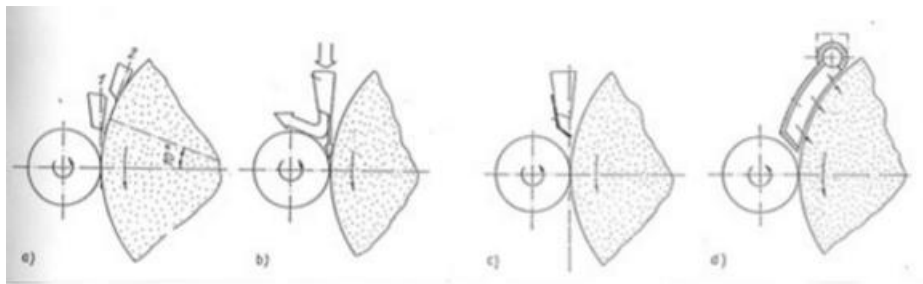
- Mechanismus tvorby třísky
- Vlastnosti obráběného materiálu
- Vlastnosti nástrojového materiálu
- Požadavky na jakost

Při vyhrazení těchto faktorů můžeme pak s ohledem na procesní kapalinu určit:

- Potřebu mazacího nebo chladícího účinku
- Způsob přívodu kapaliny do místa řezu
- Koncentraci kapaliny
- Způsob její likvidace [21]

4.2 Trysky

Volba trysky a přívodu kapaliny u technologie hloubkového broušení má nemalý vliv. Vzhledem k teplotám a rezným rychlostem je nutný velký tlak kapaliny, aby došlo k dostatečnému chlazení a odvodu třísky z rezného procesu. Procesní kapalina by se při optimálním procesu měla dostat přímo do místa řezu. Vzhledem k vysokým otáčkám kotouče může dojít ke vzniku vzduchového válce, který zhoršuje optimální přívod kapaliny. Kapalina pak může dopadat na kotouč či rotační součást, kde je odstředivou silou odnášena z místa řezu.

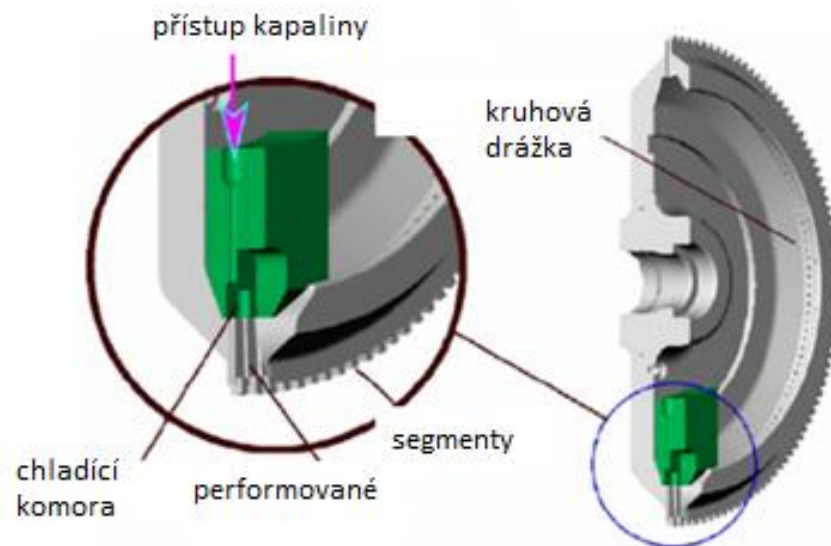


Obrázek 18 Způsob přívodu kapaliny do místa řezu [19]

4.3 Jiná konstrukce nástroje

Procesní kapaliny zatěžují živnostní prostředí a je snaha je redukovat či úplně odstranit, pokud to typ obráběcího procesu dovolí.

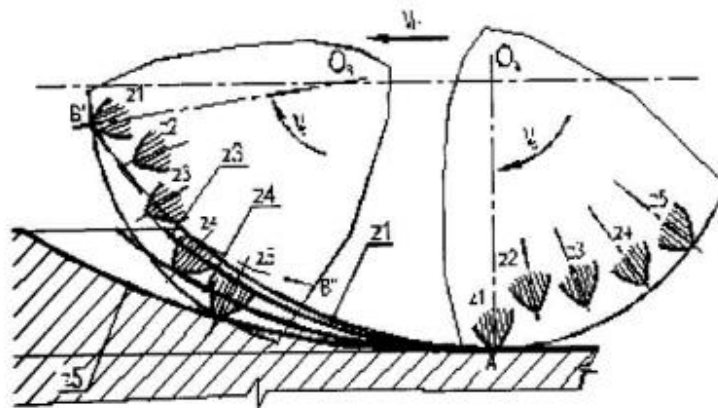
Z tohoto důvodu byly vyvinuty segmentované brousící kotouče se zářezy, kde je umístěn zářez pro přívod chladicí kapaliny přímo do místa řezu (viz obrázek č. obrázek 19). Dojde tak ke snížení spotřeby chladicí kapaliny a ušetření energetické náročnosti. Při broušení tímto kotoučem se dosáhlo 30% spotřeby chladicí kapaliny v porovnání s konvenčním kotoučem. [22]



Obrázek 19 Příčný řez segmentovaného kotouče [22]

5 Hlubkové broušení

Při hlubkovém broušení dochází k úběru velkého množství materiálu při jednom záběru broušícího kotouče – hloubka řezu může být až několik mm. Na obrázku č. Obrázek 20 je znázorněno schéma hlubkového broušení. Oproti klasickému broušení je zde dlouhý stykový oblouk, velká obvodová část kotouče je v záběru. Proces může být dále charakterizován vysokou řeznou rychlostí a vysokým posuvem. Obecně ale platí vysoká hloubka řezu a malý posuv oproti klasickým metodám broušení. Zpravidla se řezná rychlost pohybuje okolo 35 m/s. Korundové brusné kotouče pro hlubkové broušení mají limit 40 m/s. V některých případech rychlosti překračují 125 m/s, ale to už hovoříme o vysokorychlostním broušení. Kvůli takové rychlosti je nutné používat kovové pojivo včetně slinutého kovu a povlakovaného zrna, pro řezné rychlosti pod 125 m/s se používá keramické a pryskyřičné pojivo. Broušící kotouč je potřeba po každé operaci orovnat orovnávacím kotoučem. Proces hlubkového broušení musí vždy doprovázet procesní kapalina. Vzniklá kvalita plochy odpovídá broušenému povrchu. Hlavním problémem hlubkového broušení tvoří stroje, které musí mít vysokou tuhost a velký příkon elektromotoru. [9][22] [23]



Obrázek 20 Schéma broušení [9]

5.1 Porovnání technologií

V tabulce č. Tabulka 4 je vidět přibližné srovnání technologie broušení s technologií hlubkového broušení.

Tabulka 4 Porovnání technologií broušení

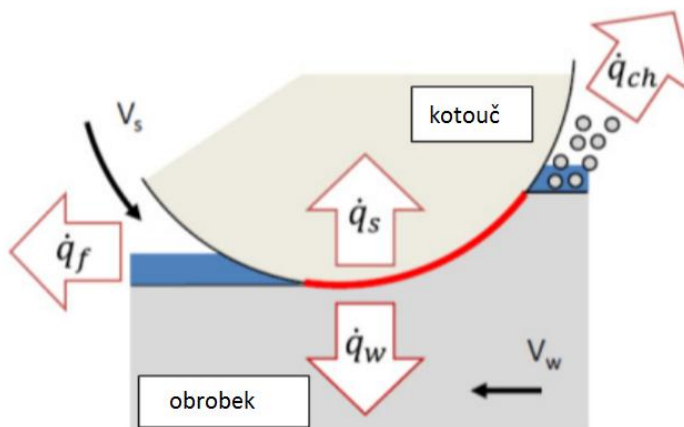
	Klasické broušení	Hlubkové broušení
Řezná rychlost [m/s]	do 50 (i 100)	až 125, běžně 35-40
Hloubka řezu [mm]	0.01	několik mm
Počet pracovních záběrů	několik	jeden
Dosahovaná drsnost Ra [μm]	1,6-0,2	1,6-0,2
Procesní kapalina	Při vyšší v_c	vždy
Nutnost orovnávání kotouče	Ne	Ano
Výkon elektromotoru P_e	2kW	20kW

5.2 Procesní kapalina

Procesní kapaliny jsou při hlubkovém broušení nezbytným doprovodným prvkem. Při hlubkovém broušení dochází k tak vysokým teplotám, že bez použití procesních kapalin by broušení nebylo možné uskutečnit.

5.2.1 Délka geometrického kontaktu

Důvodem, proč je procesní kapalina u hlubkového broušení tak klíčovým prvkem, je několikanásobně větší délka geometrického kontaktu oproti klasickému broušení. Geometrická délka kontaktu znamená stykový oblouk brousicího kotouče a obrobku. [24]



Obrázek 21 Distribuce tepla při broušení [23]

Z obrázku č. Obrázek 20 a č. Obrázek 21 je patrné, že čím větší hloubka řezu, tím delší bude stykový oblouk. Teplo vzniká třením brousicího kotouče s povrchem obrobku, při delším stykovém oblouku vzniká větší množství tepla. Velké množství tohoto tepla odchází do obrobku vzhledem k minimální velikosti třísek. Ty u ostatních obráběcích

procesů kromě broušení odvádějí z řezu velké množství tepla. Část tepla také odchází do kotouče. Při zvýšeném množství tepla může dojít ke zvýšenému napětí v povrchové vrstvě, vzniku opalů na obrobku, nevyhovující drsnosti obrobené plochy, velkému opotřebení kotouče atd.

Geometrická délka styku pro broušení na plocho je dána vztahem:

$$l_g = \sqrt{r \cdot a_p} [\text{mm}]$$

Kde: a_p – hloubka řezu [mm]

r – poloměr broušícího kotouče [mm]

Při klasickém broušení s hloubkou řezu $a_p = 0,02$ mm a kotoučem o $\varnothing 240$ mm dosahuje délka geometrického kontaktu $l_g = 2,19$ mm. V případě hloubkového broušení $a_p = 1,5$ dosahuje parametr $l_g = 18,97$ mm. Jedná se tedy o skoro devítinásobný stykový oblouk a třecí plochu.

Procesní kapalina je unášena po obvodu kotouče a po něm putuje do místa řezu. Vzhledem k vysokým otáčkám může docházet k vytvoření tzv. vzduchové válce kolem kotouče, který kapalinu strhává mimo místo řezu.

Vzhledem k vysoké hloubce záběru, z toho se odvíjejícímu velkému stykovému oblouku, je velmi náročné do řezu dostat dostatečné množství procesní kapaliny. Kapalina se velmi obtížně přivádí do celé délky řezu. Při hloubkovém broušení se používá speciálních tvarů trysek, velkého množství kapaliny a vysokých tlaků.

Tabulka 5 Množství a tlak procesní kapaliny [12]

Řezná rychlost [m/s]	množství procesní kapaliny [l/min/mm]	tlak [kPa]
35	0,5-1	100 - 200
50	2	200 - 400
60	3	400 - 600
80	15	800 - 1 000

5.3 Využití technologie

Technologií hloubkového broušení se obrábí například šroubovice ve vrtácích a frézách vyrobených ze slinutých karbidů. Touto technologií jsou efektivně dosaženy technologické požadavky na obrobky.

Hloubkové broušení je efektivní při obrábění materiálů, kde by vzniklé teplo vedlo k rychlému opotřebení nástroje, jako např. slitiny titanu a slitiny Inconel. Je možné obrábět přesné tvary s velkým úběrem materiálu, které by klasickými metodami byly velmi obtížné. [25]

5.3.1 První brněnská strojírna Velká Bíteš

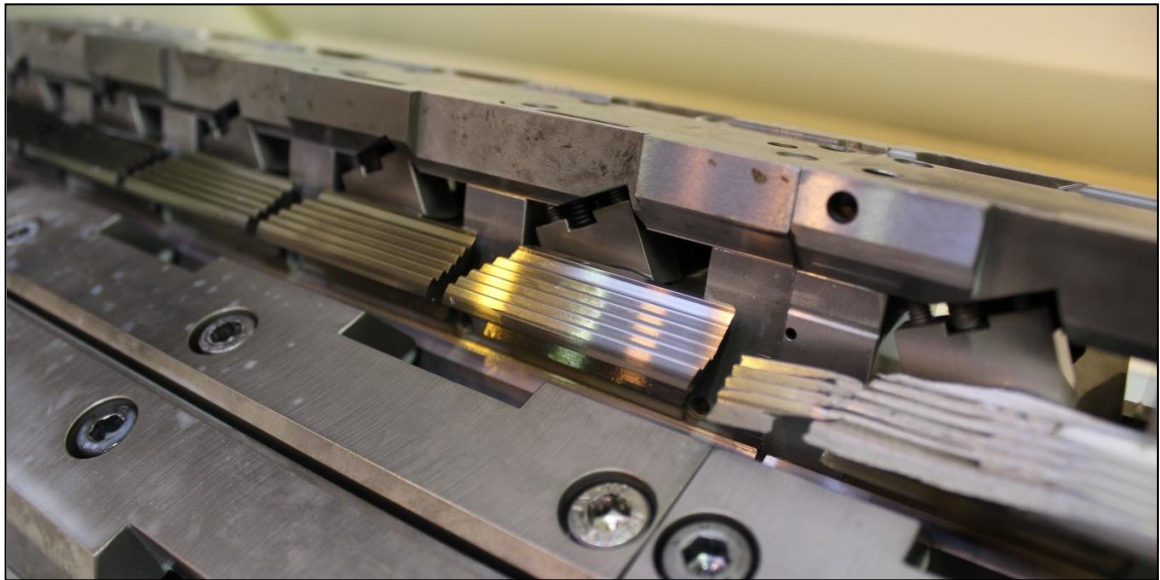
V první brněnské strojírně Velká Bíteš probíhá touto metodou broušení zámek lopatek do nezávislých jednotek turbínových motorů. Lopatky jsou z materiálu Inconel 713 LC, který se vyznačuje pevností $1\,200\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Jedná se o niklovou žáruvzdornou slitinu, odolnou proti opálení, při 680 °C dosahuje 90% svých mechanických vlastností.

Slitina je velmi špatně obrobitelná, při obrábění dochází vlivem tepla ke zpevňování, vzniká velké množství tepla, které má za následek vysoké opotřebení nástroje. Z těchto důvodů a z důvodu požadované přesnosti a drsnosti finálního obrobku jsou zámky lopatek hloubkově broušeny. Proces broušení má 3 operace hrubovací a 2 operace načisto.

Při broušení dochází k potrhání první lopatky v řadě, dále ke vzniku opalů a mikrotrhlin na ostatních lopatkách. Důvodem může být právě nedostatečný přívod procesní kapaliny do místa řezu. V tomto případě se používá emulzní kapalina s převážně chladícím účinkem.



Obrázek 22 Hloubkově broušené zámky lopatek



Obrázek 23 Lopatky v přípravku na broušení

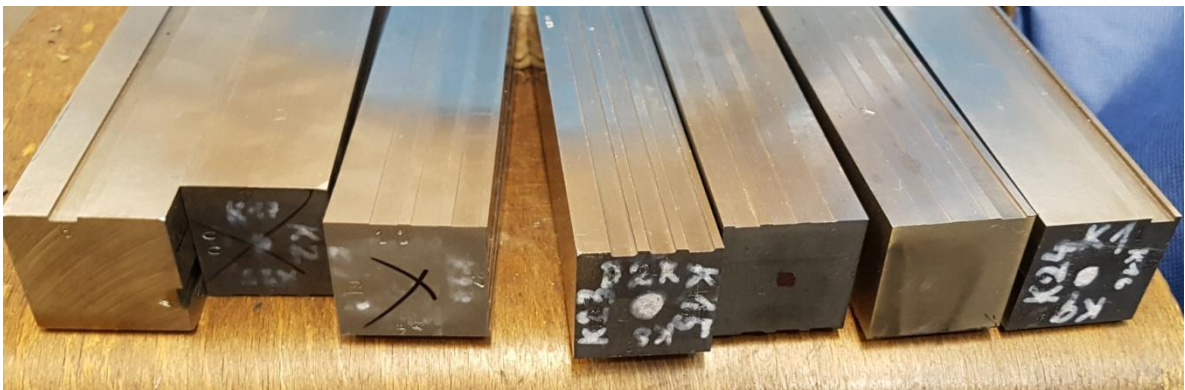
6 Příprava před experimentálním broušením

Předtím, než začalo samotné hloubkové broušení, bylo třeba připravit vzorky, které se budou brousit. Tyto vzorky byly v podobě hranolů slitiny Inconel 713 LC o délce 195 mm, šířka hranolů byla v rozmezí 38-45 mm. Hranoly byly ve formě odlitků. Všechny plochy hranolů bylo zapotřebí brousit naplocho, aby byla zaručená jejich drsnost a rovinnost. Po hloubkovém broušení drážek bude měřena hloubka těchto drážek, z toho vyplývající úbytek na kotouči za určitou dráhu a jeho schopnost držet tvar.

6.1 Frézování

Na některých plochách hranolů již proběhlo zkušební hloubkové broušení drážek o šířce 7 mm. Před dalším měřením bylo zapotřebí plochy zarovnat tak, aby byla frézováním odebrána vrstva o velikosti maximální hloubky drážky na dané ploše. Na konečné rovinné broušení tak zůstala malá vrstva materiálu na odebrání.

Materiál se vyznačuje vysokou pevností až $1200 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, má tendenci se při obrábění vlivem teploty zpevňovat a je nutné jej obrábět s přívodem chladicí kapaliny. Při obrábění je tedy nutná dostatečná hloubka řezu a hodnota posuvu na zub, aby byl nástroj v záběru za zpevněnou vrstvou.



Obrázek 24 Hranoly před frézováním

6.1.1 Stroj

Frézování proběhlo ve společnosti Tichý Kovoobrábění s.r.o. Frézovalo se na vertikálním obráběcím centru KIRA s řídicím systémem FANUC. Hranoly byly upnuty ve svěráku na broušených podložkách, aby byla zaručena rovnoběžnost frézované plochy a plochy dosedací.



Obrázek 25 Vertikální obráběcí centrum

6.1.2 Technologické podmínky

Frézování probíhalo nástrčnou frézou o průměru 40 mm osazenou čtyřmi vyměnitelnými břitovými destičkami (dále jen VBD) ze slinutého karbidu. Šířka hranolů byla 42 až 46 mm, tedy větší než šířka nástroje, a nebylo možné obrobit plochu na jeden průchod nástroje. Byla zvolena šířka záběru a_e jako $2/3$ průměru nástroje.

Dále probíhalo frézování monolitní válcovou frézou ze slinutého karbidu o průměru 20 mm. Touto frézou se obrábělo v celé šíři nástroje, $a_e = 20\text{mm}$. Řezné podmínky byly proměnlivé pro nalezení nejlepší varianty.



Obrázek 26 Upnutý hranol

6.1.3 1. varianta s VBD pro nerezovou ocel

Destičky nesly označení LDFT 150416SR-33 DPX2240. Katalogové označení 51 042 416.

Tabulka 6 Řezné podmínky varianty č. 1

v_c [m/min]	a_p [mm]	a_e [mm]	f_z [mm/z]	z [-]
40	1	26	0,1	4
35	1	26	0,1	4
45	1	26	0,08	4

Žádné z těchto řezných podmínek se nejevily jako optimální. Došlo k výraznému opotřebení hrotů již po jednom průchodu (viz obrázek č. Obrázek 27).



Obrázek 27 Nástrčná fréza s VBD (vlevo) a VBD po jednom průchodu (vpravo)

6.1.4 2. varianta s VBD pro konstrukční ocel

Destičky nesly označení LDFT 1504PDSR-29 DPX1235. Katalogové označení 51 079 120.

Tabulka 7 Řezné podmínky varianty č. 2

v_c [m/min]	a_p [mm]	a_e [mm]	f_z [mm/z]	z [-]
40	1	26	0,1	4
45	1	26	0,08	4

Žádné z těchto řezných podmínek se nejevily jako optimální. Břit měl větší opotřebení než u varianty č. 1.

6.1.5 3. varianta s VBD pro žáruvzdorné slitiny

Destičky nesly označení LDFT 150408ER HCF 5240. Katalogové označení 50 409 501.

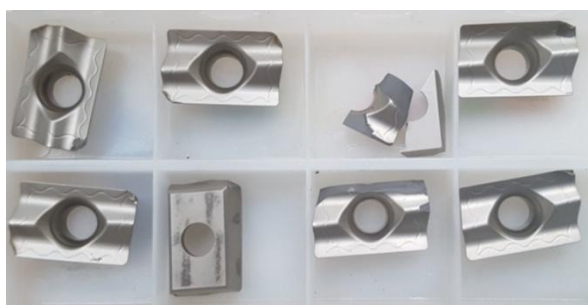
Tyto VBD byly uvedeny v katalogu WNT jako přímo určené pro obrábění žáruvzdorných slitin, do kterých spadá obráběná slitina Inconel. Pro Inconel 713 byly zvoleny řezné parametry dle doporučených hodnot z katalogu WNT. Tyto destičky se vyznačovaly netradičním utvářečem třísek (viz obrázek č. Obrázek 28).

Tabulka 8 Řezné podmínky varianty č. 3

v_c [m/min]	a_p [mm]	a_e [mm]	f_z [mm/z]	z [-]
40	1	26	0,12	4
40	1	26	0,1	4
45	2	26	0,1	4

Žádné z těchto řezných podmínek se nejevily jako optimální. Došlo k výraznému opotřebení hrotů již po jednom průchodu. Opotřebení břitů bylo paradoxně největší ze všech testovaných VBD.

Při poslední variantě řezných podmínek, s hloubkou záběru $a_p = 2$ mm, došlo po cca 60mm k zastavení vřetene a vylomení VBD. Při takto nízké řezné rychlosti a jmenovitých otáčkách 360 ot/min má stroj nízký výkon vřetene. U moderních CNC strojů se dosahuje 100% hodnoty výkonu zhruba od 1000 ot/min.



Obrázek 28 VBD určené pro obrábění žáruvzdorných slitin

6.1.6 4. varianta s monolitní frézou pro žáruvzdorné materiály

Fréza nesla katalogové označení 50 633 200 o průměru 20mm.

Tyto frézy byly v podniku používány na kalené materiály, jsou ale vhodné i pro obrábění žáruvzdorných slitin. Pro Inconel 713 byly zvoleny řezné parametry dle doporučených hodnot z katalogu WNT.

Tabulka 9 Řezné podmínky varianty č. 4

v_c [m/min]	a_p [mm]	a_e [mm]	f_z [mm/z]	z [-]
40	1	20	0,08	6
45	1	15	0,08	6
45	1	15	0,08	6

Při prvním kontaktu s materiálem došlo k vylomení hrotů břitů. Dále obráběla fréza pouze zbytkem řezných hran. K dalšímu vylamování již nedošlo a frézou bylo možné obrábět na několik průchodů. Vzhledem k vylomení břitů se zmenšil průměr záběru frézy a bylo nutné zvýšit otáčky pro zachování řezné rychlosti.



Obrázek 29 Použité monolitní frézy (pro porovnání nová fréza vpravo)

6.1.7 Zhodnocení

Jako nejlepší se jevíly VBD určené pro obrábění nerezových ocelí. Pro nalezení optimálních řezných podmínek by muselo dojít k dalším experimentům.

VBD určené pro Inconel slitiny by bylo nutné otestovat na stroji s dostatečným výkonem, aby nedošlo k zastavení vřeteně při dané hloubce záběru. Vhodně by se jevila konvenční frézka s uzavřeným pracovním prostorem, aby bylo možné při obrábění používat procesní kapalinu.

6.2 Rovinné broušení

Plochy ofrézovaných hranolů bylo po obrobení nutné brousit, aby byla zaručena jejich rovinnost. Byl to důležitý krok, aby bylo po vybroušení drážek možné zjistit úbytek na průměru kotouče, o kolik se změnila hloubka drážky na konci hranolu oproti začátku. V případě, že by hranoly nebyly zaručeně rovné, by výsledky měření nebyly exaktní.



Obrázek 30 Bruska Mikronex BRH 20 CNC osazená dynamometrem a externím odlučovačem



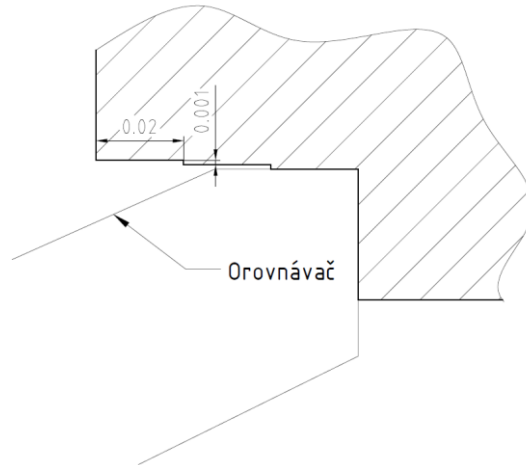
Obrázek 31 Upnutý hranol pro broušení horní plochy

6.3 Orovnání broušícího kotouče

Laboratorní bruska, na které probíhaly experimenty, má nízký výkon 2,2 kW, nedostačující pro hloubkové broušení v celé šíři kotouče, která činila 20 mm. Z tohoto důvodu byl kotouč orovnan z obou stran na šířku zhruba 7 mm. U každého testovaného kotouče se šířka lišila v řádu desetin milimetru. Cílem tohoto orovnaní bylo snížení potřebného výkonu a snížení sil při obrábění v laboratorních podmínkách. Určujícím faktorem pro přenos do reálného broušícího prostředí byla pak ekvivalentní hloubka třísky h_{eqv} [mm]. Tato hodnota vyjadřuje parametr sestavený z řezné rychlosti, tangenciálního posuvu a hloubky záběru.

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

Kotouče byly orovnány po kroku 0,02mm v axiálním směru a 0,001mm v radiálním směru Y-. Důvodem pro posuv v radiálním směru bylo zamezení kontaktu horní části orovnávacího hrotu s kotoučem.



Obrázek 32 Schéma bočního orovnění kotouče



Obrázek 33 Kotouč při orovnávaní boků



Obrázek 34 Orovnaný kotouč na šířku 7mm

U takto orovnaného kotouče je zároveň zaručena ostrá hrana. Kotouč nemusel být upnutý naprosto přesně a mohl mít výchylku v radiálním směru, která byla orovnaním pro dané upnutí odstraněna. V průběhu řezu dojde k opotřebení, na konci řezu změříme rádius vzniklý na hraně kotouče a z toho vyplývající opotřebení a schopnost držet tvar při tvarovém broušení.

7 Experimentální broušení

7.1 Použité brusné kotouče

Cílem těchto experimentů bylo nalezení vhodného broušícího kotouče pro technologii hloubkového broušení a najítí nejvhodnějších řezných podmínek z hlediska poměru sil a opotřebení kotouče. Nejpriznivější poměr sil je takový, kde je nejvyšší síla řezná (tangenciální směr) a nejmenší síla pasivní (radiální směr). Nejdříve byly testovány a porovnány kotouče Tyrolit a Norton, později doplňkově kotouče Cubitron™ II.

V rámci měření byly vyzkoušeny 4 druhy brusných kotoučů. Testovaly se dle vybraných řezných podmínek, porovnávaly se poměry a velikosti silových složek za daných řezných podmínek a jejich opotřebení, tedy schopnost držet tvar v průběhu řezu.

7.1.1 Tyrolit STRATO ULTRA

Kotouč Tyrolit Strato ultra je brusný kotouč s keramickým pojivem na rovinné oscilační i hloubkové broušení. Použitím tohoto kotouče lze, speciálně v oblasti výroby turbínových lopatek, nahradit brusné nástroje s drahým mikrokrystalickým korundem bez nutnosti snížit výkon. Mikrokrystalický korund se chová velmi abrazivně a způsobuje tím zvýšené opotřebení diamantů. Společnost TYROLIT nabízí svým zákazníkům profilované brusné nástroje. Jednoduché profily okraje i předprofilace na míru zákazníkům dokážou v závislosti na hloubce profilu výrazně snížit seřizovací časy (časy na orovnění profilu) a s tím spojené opotřebení orovnávacího nástroje.

7.1.2 Norton ALTOS

Struktura kotouče Norton Altos obsahuje keramická zrna ve tvaru dlouhých válců s poměrem stran (délka k průměru) 8:1, má za následek nízkou hustotu kotouče a možnost vytvoření radiálně orientované struktury. Kotouč Norton má velmi otevřenou strukturu (stupeň 13) s vysokou pórovitostí a vynikající propustnost pro chladivo. Způsob výroby umožňuje vytvářet řízenou strukturu, což má za následek dlouhou životnost. Uživatel by měl při vnějších projevech pozorovat nižší řezné síly a energii potřebnou k odbroušení jednotkového objemu materiálu.



*Obrázek 35 Tyrolit STRATO-ULTRA 240x15x51 33A 702GG11V B1/40 (vlevo)
a NORTON ALTOS 01 225x15x50,8 TGX80D13VCF5 (vpravo)*

7.1.3 Cubitron™ II 30%

Cubitron™ je nejvíce používaný kotouč od společnosti 3M™. Tento kotouč se vyznačuje definovanou geometrií zrna, kde zrna mají trojúhelníkový tvar. U klasických zrn dojde při kontaktu k deformaci materiálu, zrno pak tlačí nahromaděný materiál před sebou a v poslední fázi dojde k vylomení a odchází tříška. Je zapotřebí velká řezná síla, která vede k tepelnému namáhání povrchové vrstvy. U trojúhelníkových zrn společnosti 3M dochází k řezu a tvoření třísky od prvního najetí do materiálu. Velká část vzniklého tepla je ihned odváděna třískou, dochází tedy k menšímu tepelnému namáhání. Průměrná velikost zrna u tohoto kotouče je 0,18 mm. [12]

7.1.4 Cubitron™ II 99%

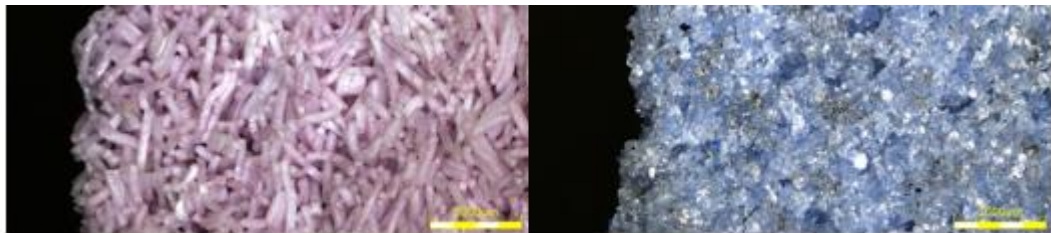
Kotouč s větším poměrem zrn vůči pojivu. Zrna jsou větší (průměrná velikost zrna 0,3 mm), měkčí a kotouč má menší pórovitost než v případě předchozího kotouče. Tento kotouč je nasazován pouze v případech, kde se předchozí kotouč jeví jako nedostačující. [12]



Obrázek 36 Cubitron™ II 99% 240x15x50,8 99DA54/80 F15VPLF901W (vlevo)
a Cubitron™ II 30% 240x15x50,8 93DA80/80 H15VPMF601W (vpravo)

7.1.5 Mikrostruktura kotoučů

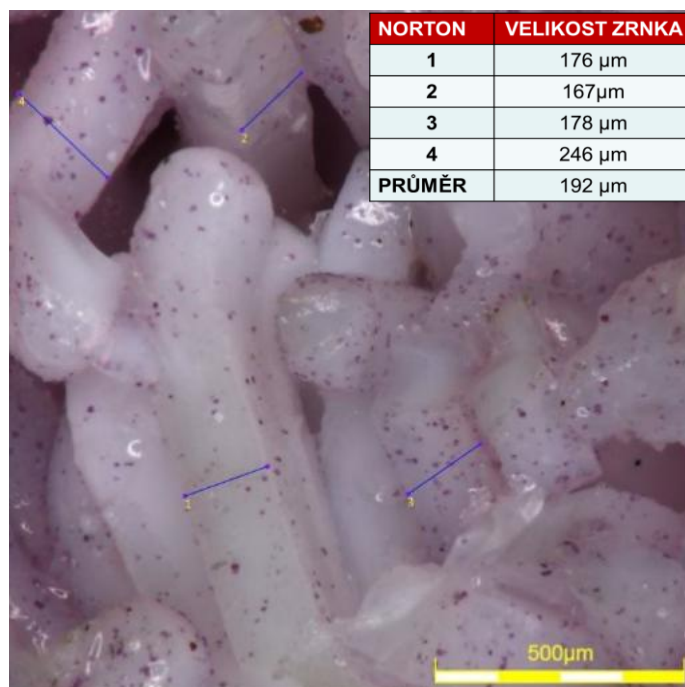
Porovnáním kotoučů pod mikroskopem lze vidět jejich rozdílnou strukturu.



Obrázek 37 Mikrostruktura Norton (vlevo) a Tyrolit (vpravo)



Obrázek 38 Detailní pohled na kotouč Tyrolit – označeny třísky (kaly)



Obrázek 39 Detailní pohled na kotouč Tyrolit – průměrná velikost tyčinek cca 190 µm



Obrázek 40 Trojúhelníková zrna kotouče Cubitron™ II [12]

7.2 Porovnání kotoučů při experimentálním měření

V rámci experimentu bylo vytipováno 5 kombinací řezných podmínek ($v_c= 16-35$ m/s, $a_p= 0,3-1,5$ mm, $f= 100-400$ mm/min), pro které bylo provedení měření řezných sil pro všechny čtyři kotouče. Experiment byl proveden tak, aby kotouč byl jedinou proměnnou, tedy za stejných podmínek chlazení, stejného NC kódu a stejném nastavení měřicí techniky.

Dále byly vybroušené drážky změřeny na konturografu Mahr, kde byla vyhodnocena hloubka drážky na začátku a na konci řezu a zaoblení hrany na začátku a na konci řezu.

Na všechna měření bylo pohlíženo jako na hrubovací operace. Při hrubování dochází k největším úbytkům na kotouči, opotřebení tvaru a největším silovým zátěžím. Cílem experimentů je tedy najít nejvhodnější podmínky a kotouč pro hrubovací operace. Zlepšením hrubovacích parametrů dojde i k zpřesnění a zrychlení operací načisto.

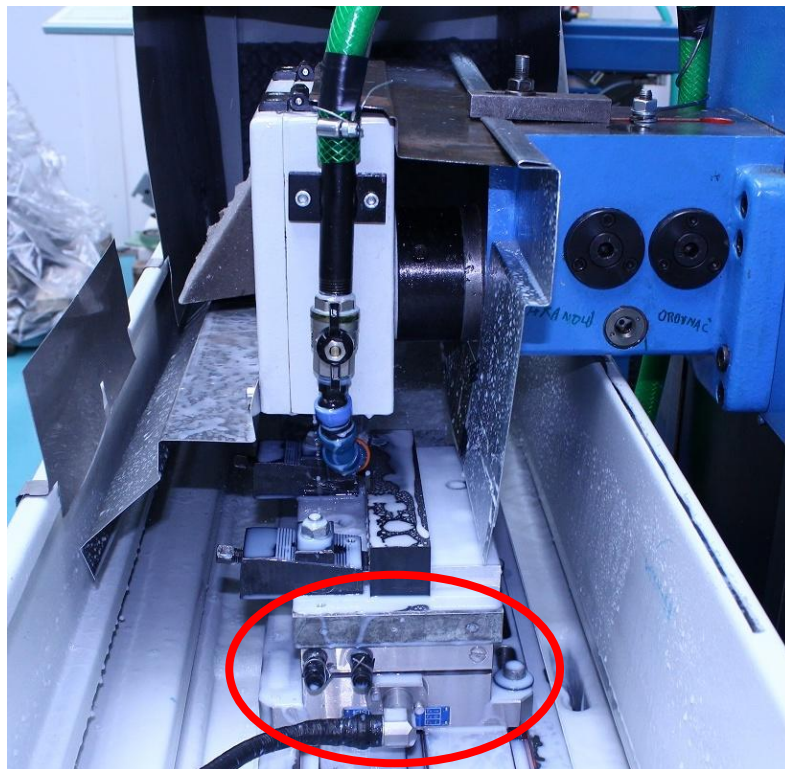
Na základě předchozích experimentů na ústavu bylo měření prováděno pouze nesousledně. Při sousledném broušení docházelo k přetížení elektromotoru.

7.3 Naměřené a vyhodnocené silové parametry

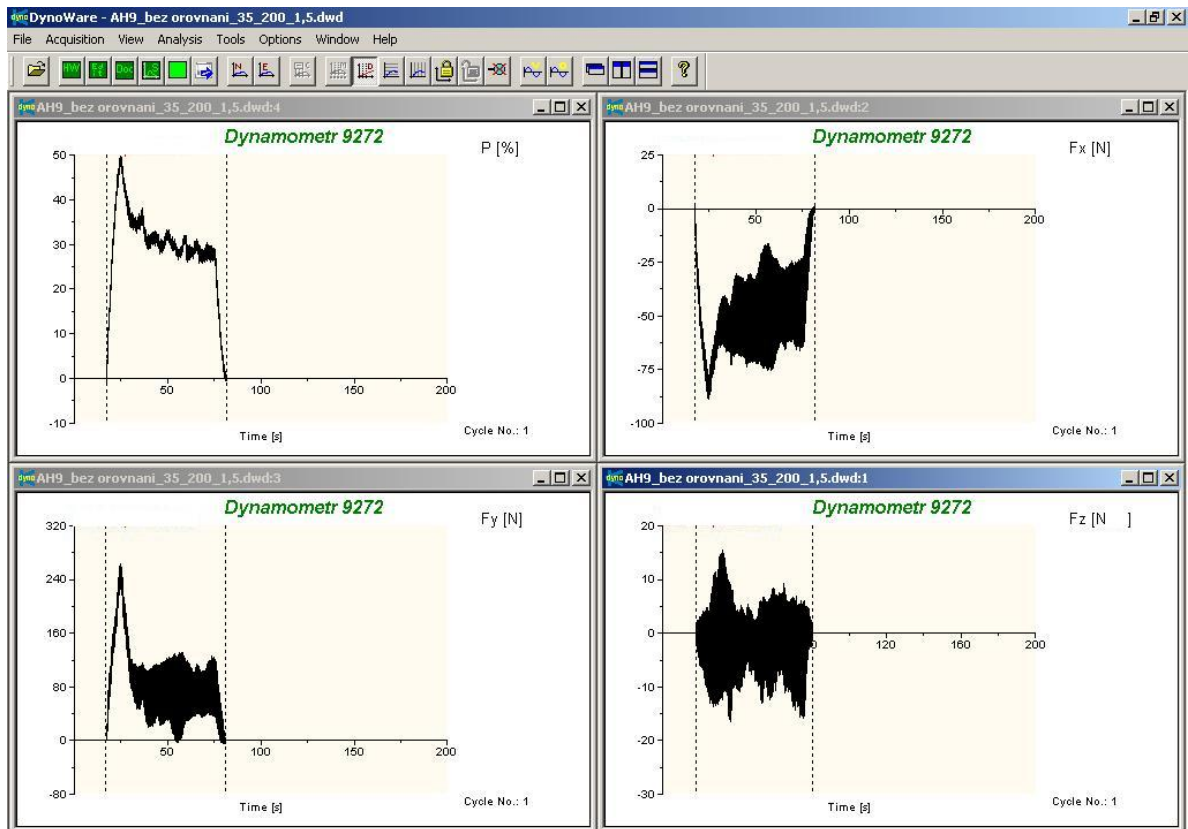
Vzhledem k rozdílné šířce všech orvnaných kotoučů a z toho vyplývající různé šířce řezu, budou síly přepočteny a vztaženy na milimetr šířky kotouče. Tyto síly budou mít označení F_c' , F_p' , jednotku N/mm. Stejným způsobem byl přepočten výkon na měrný výkon P_e' s jednotkou W/mm.

Šířky orvnaných kotoučů:

- Cubitron™ 30% - 6,96 mm
- Cubitron™ 99% - 7,14 mm
- Tyrolit - 6,86 mm
- Norton - 6,8 mm



Obrázek 41 Instalovaný 3osý dynamometr Kistler s upnutým hranolem



Obrázek 42 Průběh sil a výkonu na dynamometru

Software DynoWare zobrazil křivky silových průběhů a z těchto grafů bylo pak nutné hodnoty odečíst. Hodnoty byly odečteny tři vteřiny po najetí do řezu, uprostřed dráhy řezu a tři vteřiny před vyjetím z řezu. Pro vyhodnocení byly použity hodnoty v polovině řezu, v průběhu ustálených hodnot.



Obrázek 43 Dynamometr Kistler pro měření složek řezné síly [13]

Tabulka 10 Ukázka odečtených hodnot z dynamometru Kistler

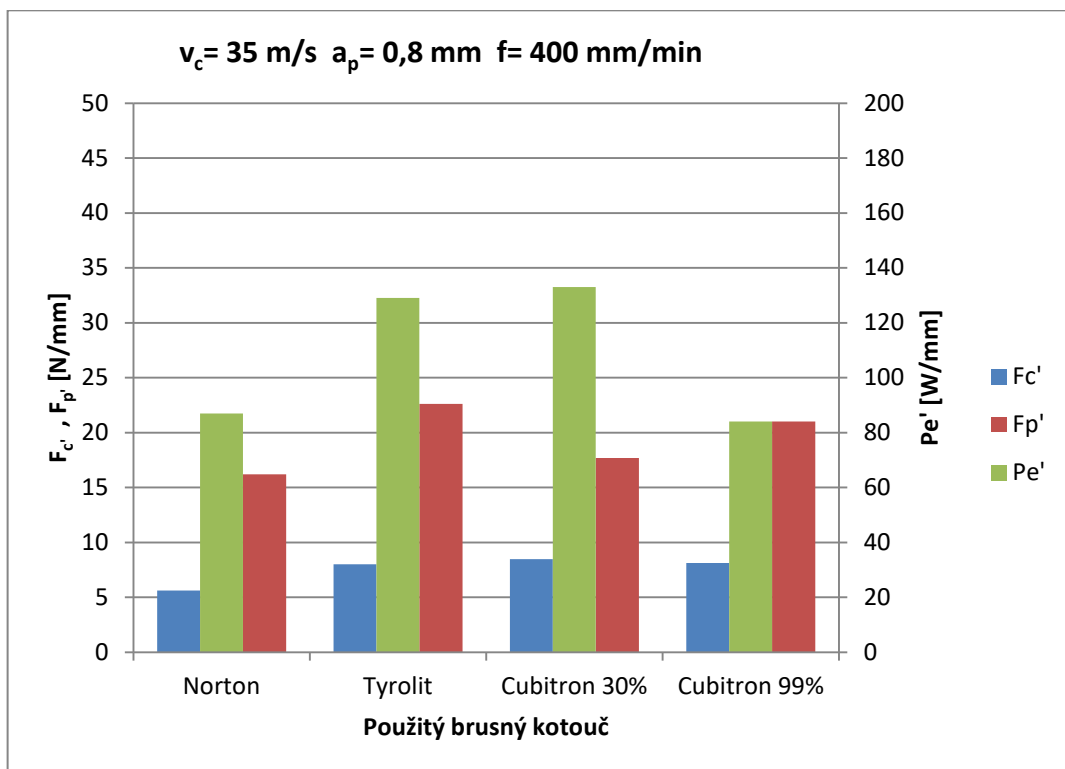
	F_x [N]			F_y [N]			P_e [%]		
	F_{x1}	F_{x2}	F_{x3}	F_{y1}	F_{y2}	F_{y3}	P_1	P_2	P_3
AH1	18	23	20	100	21	35	12,5	13	10,9
AH2	50	46	44	130	96,5	87	32	29	27
AH3	38	26,5	28	116	47,5	59	22	16	15,5
AH4	95	58	42	360	150	106	46,2	27,2	28,3
AH5	100	58,5	47	310	86	92	43	27	31
AH6	121	55	54	440	93	113	55,5	27,5	26,5

Z tabulky č. 5 je zřejmé, že síly a zátěž elektromotoru mají vysokou hodnotu na počátku řezu. Následně prudce klesnou, v prostřední a koncové části jsou obdobné. Důvodem může být nedostatečný přívod chladicí kapaliny do místa řezu, kde na počátku se proud láme o přední hranu hranolu. Dalším důvodem může být nevhodné orovnění kotouče, kdy má při najetí do řezu nedostatečnou řezivost.

Tabulka 11 Naměřená a dopočtená data z dynamometru Kistler

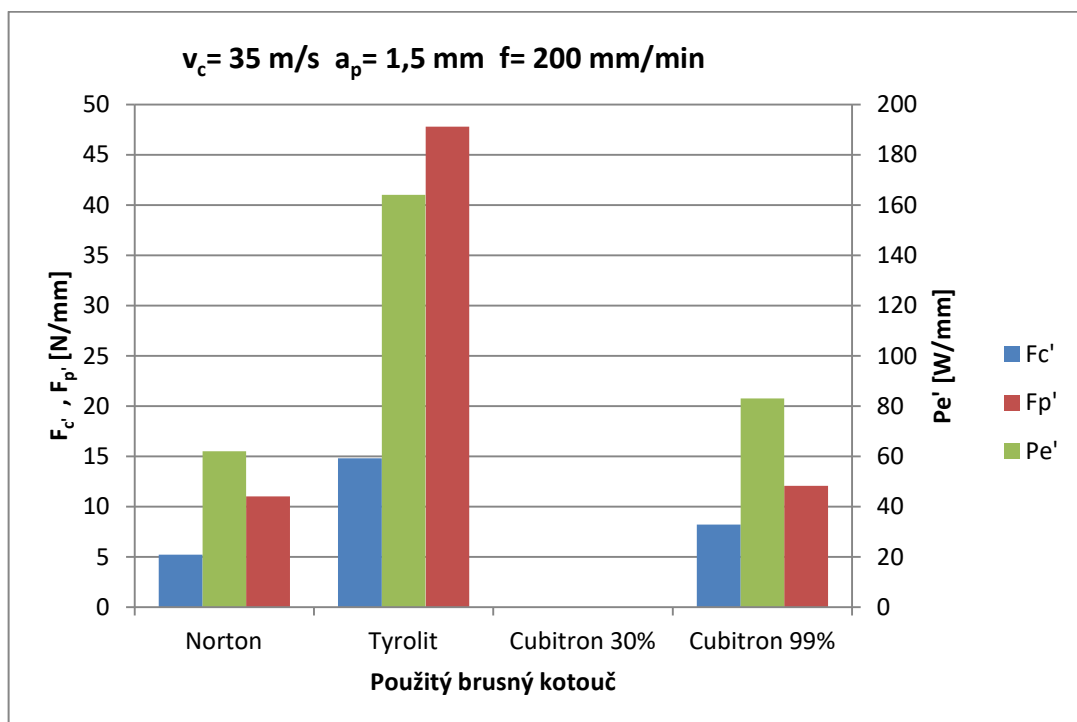
Číslo drážky	v_c [m/s]	a_p [mm]	f [mm/min]	Kotouč	F_c [N]	F_p [N]	P_e [%]	$P_{e'}$ [W/mm]	F_c' [N/mm]	F_p' [N/mm]
H28	35	0,8	400	Norton	38,3	110	27	87	5,6	16,2
H09				Tyrolit	54,3	154	40	129	8	22,6
AH13				Cubitron™ 30%	59	123	42	133	8,48	17,67
AH04				Cubitron™ 99%	58	150	27,2	84	8,12	21,01
H20	22	0,3	300	Norton	27,5	61,9	20,9	68	4	9,1
H19				Tyrolit	37,1	72,6	27,1	88	5,5	10,7
AH14				Cubitron™ 30%	33	64,5	25	79	4,74	9,27
AH03				Cubitron™ 99%	26,5	47,5	16	49	3,71	6,65
H22; H23	35	1,5	200	Norton	35,6	74,8	19,1	62	5,2	11
H06; H26				Tyrolit	100,5	325	50,7	164	14,8	47,8
AH12				Cubitron™ 30%	x	x	x	x	x	x
AH05				Cubitron™ 99%	58,5	86	27	83	8,19	12,04
H30	16	0,3	100	Norton	22,7	28,7	17	55	3,3	4,2
H12				Tyrolit	37,7	55,3	32,7	106	5,5	8,1
AH15				Cubitron™ 30%	32,5	37	22	70	4,67	5,32
AH01				Cubitron™ 99%	23	21	13	40	3,22	2,94
H29	16	0,3	400	Norton	42,3	93,7	30,3	98	6,2	13,8
H15				Tyrolit	35,7	75	28	91	5,2	11
AH16				Cubitron™ 30%	80,5	161	61	193	11,57	23,13
AH02				Cubitron™ 99%	46	96,5	29	89	6,44	13,52

Z naměřených dat vychází při použití většiny kombinací rezných podmínek výrazně lépe kotouč Norton. Kotouč Tyrolit vykazuje lepší vlastnosti pouze u jedné kombinace, a to malé rezné rychlosti s vysokým posuvem. Při těchto parametrech vykazuje ze všech měření nejhorší vlastnosti Cubitron™ 30%. V případě podmínek $v_c=35$ m/s, $a_p=1,5$ mm, $f=200$ mm/min došlo u kotouče Cubitron™ II 30% k přetížení motoru a zastavení vřetene. Pro hloubkové broušení se tedy jeví jako nevhodný.



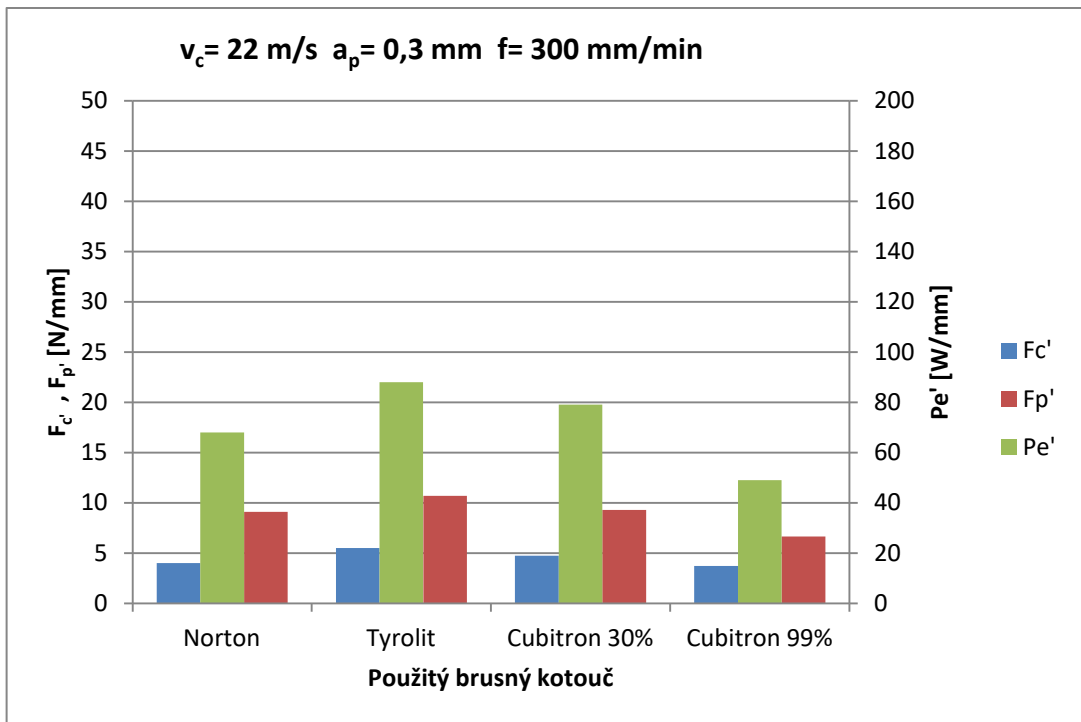
Graf 1 Porovnání kotoučů při $v_c = 35 \text{ m/s}$, $a_p = 0,8 \text{ mm}$, $f = 400 \text{ mm/min}$

Při těchto podmínkách dosahoval nejlepších výsledků kotouč Norton. Kotouče Tyrolit a Cubitron™ II 30% dosahovaly obdobných výsledků a v tomto měření se jeví jako nejhorší.



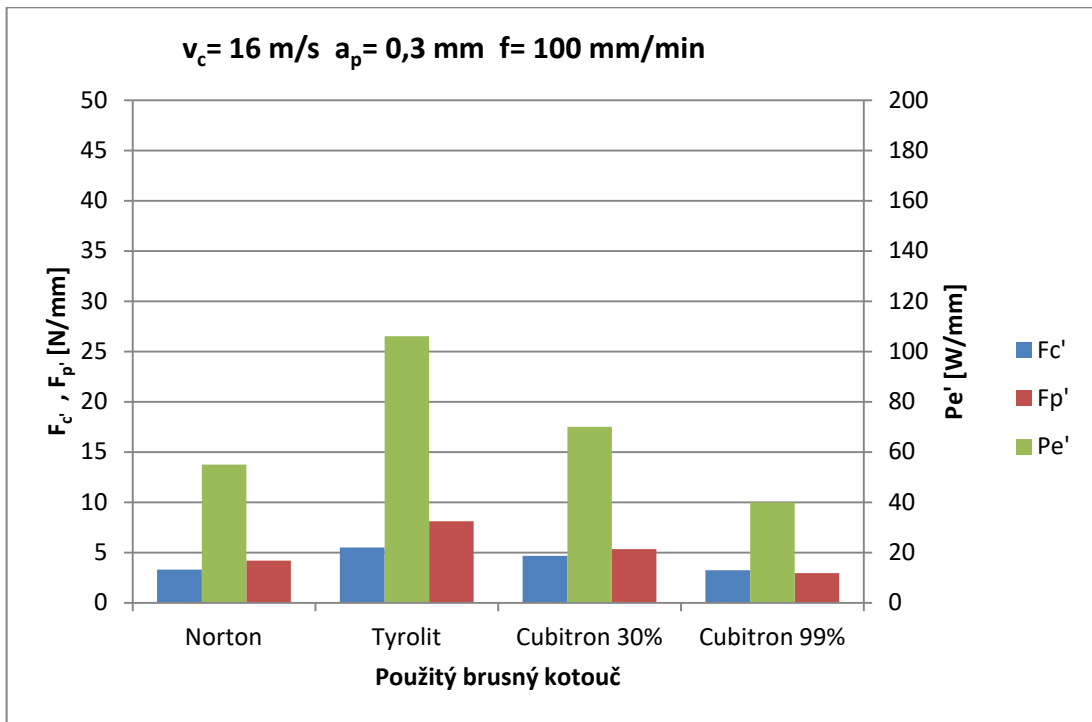
Graf 2 Porovnání kotoučů při $v_c = 35 \text{ m/s}$, $a_p = 1,5 \text{ mm}$, $f = 200 \text{ mm/min}$

Při těchto podmínkách došlo k zastavení vřetene při použití kotouče Cubitron™ II 30%, nejsou tedy žádná data k vyhodnocení. Jako nejlepší se opět jeví kotouč Norton, jako nejhorší s nejvyššími naměřenými hodnotami kotouč Tyrolit.



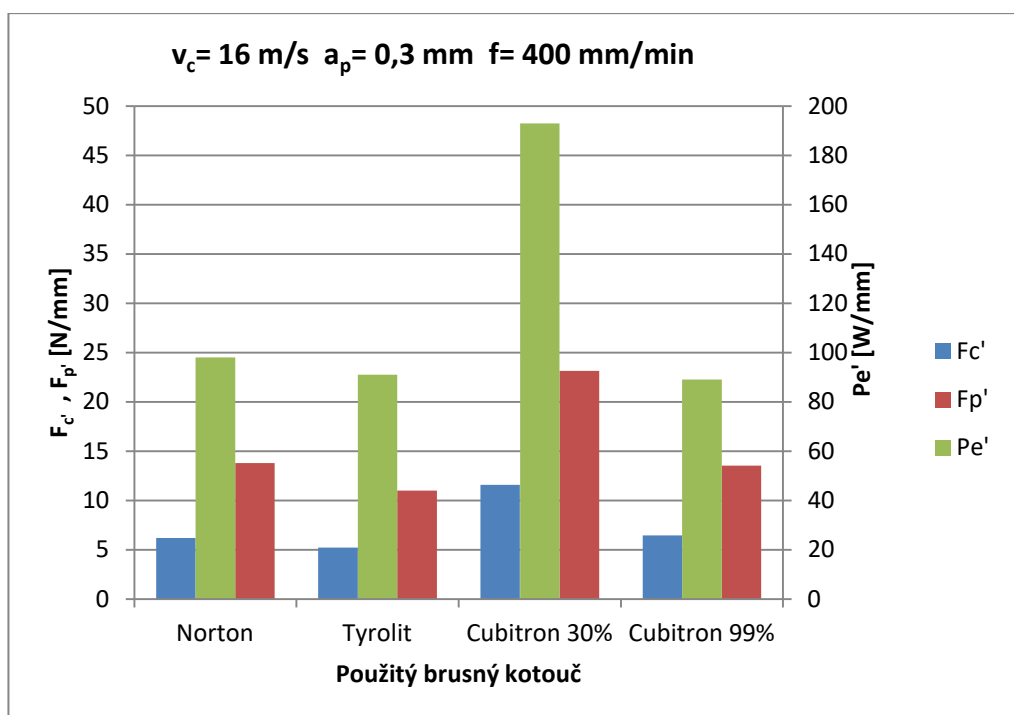
Graf 3 Porovnání kotoučů při $v_c = 22 \text{ m/s}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$, $f = 300 \text{ mm/min}$

Za zde zvolených podmínek byly silové poměry relativně nízké. Všechny kotouče vykazovaly obdobné hodnoty. Jako nejlepší se jeví kotouč Cubitron™ II 99%.



Graf 4 Graf 6 Porovnání kotoučů při $v_c = 16 \text{ m/s}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$, $f = 100 \text{ mm/min}$

Při těchto zvolených podmínkách byly naměřené nízké síly, ale vysoké zatížení elektromotoru. Se snižující se řeznou rychlostí se zvyšuje odpor při broušení. Tato varianta se jeví jako nevhodná pro hloubkové broušení. Jako nejlepší byl vyhodnocen kotouč Cubitron™ II 99%.



Graf 5 Porovnání kotoučů při $v_c = 16 \text{ m/s}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$, $f = 400 \text{ mm/min}$

Z grafického znázornění je zřejmé, že jako nejlepší se jeví kotouče Norton a Cubitron™ II 99%. Další v pořadí je kotouč Tyrolit, poslední Cubitron™ II 30%, jelikož nebyl schopen brousit drážku o hloubce 1,5 mm. Toto pořadí ovšem není rozhodující, musí se zohlednit i schopnost držet tvar, opotřebení kotouče a pořizovací cena. Při nízké řezné rychlosti docházelo k největšímu zatížení vřetene.



Obrázek 44 Hranoly s drážkami po hloubkovém broušení



Obrázek 45 Hranoly s drážkami AH7-AH9, AH12-AH14

7.4 Vliv orovnění kotouče na průběh sil při broušení

V rámci experimentu byl vyzkoušen vliv způsobu orovnění kotouče na následný proces obrábění. Při orovnění může dojít k obrobení zrn místo jejich vytrhání z pojiva, zrna jsou tímto otupená. Důsledkem by mohly být zvýšené síly při začátku broušení, než dojde k opětovnému vytrhání zrn a kotouč získá zpět svou řezivost. Tato teorie by odpovídala průběhu naměřených sil, kdy při najetí kotouče do řezu měly prudký náběh na vysokou hodnotu. Po několika vteřinách síly klesly na hodnotu, kterou si relativně udržely po zbytek procesu (viz obrázek č. *Obrázek 42*).

Při průběhu všech naměřených hodnot byl kotouč orovnáván vícekrystalovým diamantovým orovnávačem rychlostí posuvu 2000 mm/min.



Obrázek 46 Vícekrystalový orovnávač

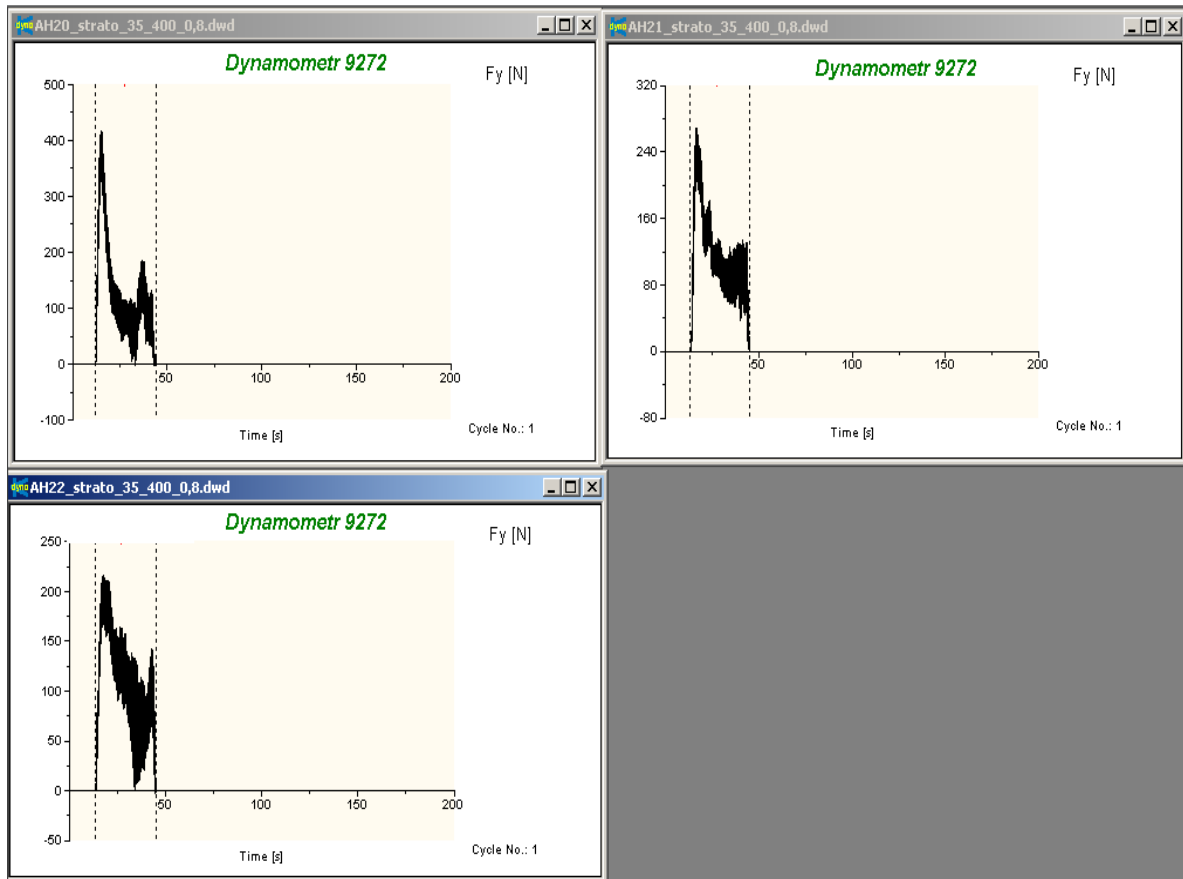
V rámci zjištění vlivu orovnávače byl vyzkoušen monokrystalový orovnávač, jiná rychlost posuvu při orovnáání a broušení bez předchozího orovnáání.



Obrázek 47 Nasazený monokrystalový hrot orovnávače

7.4.1 Naměřené hodnoty

Měření proběhlo s kotoučem Tyrolit za řezných podmínek $v_c = 35\text{m/s}$, $a_p = 0,8\text{ mm}$, $f = 400\text{ mm/min}$. Jedinou proměnnou byl způsob orovnáání kotouče. Pro vyhodnocení těchto měření se odečítaly hodnoty sil a zatížení elektromotoru tři vteřiny po najetí do řezu.

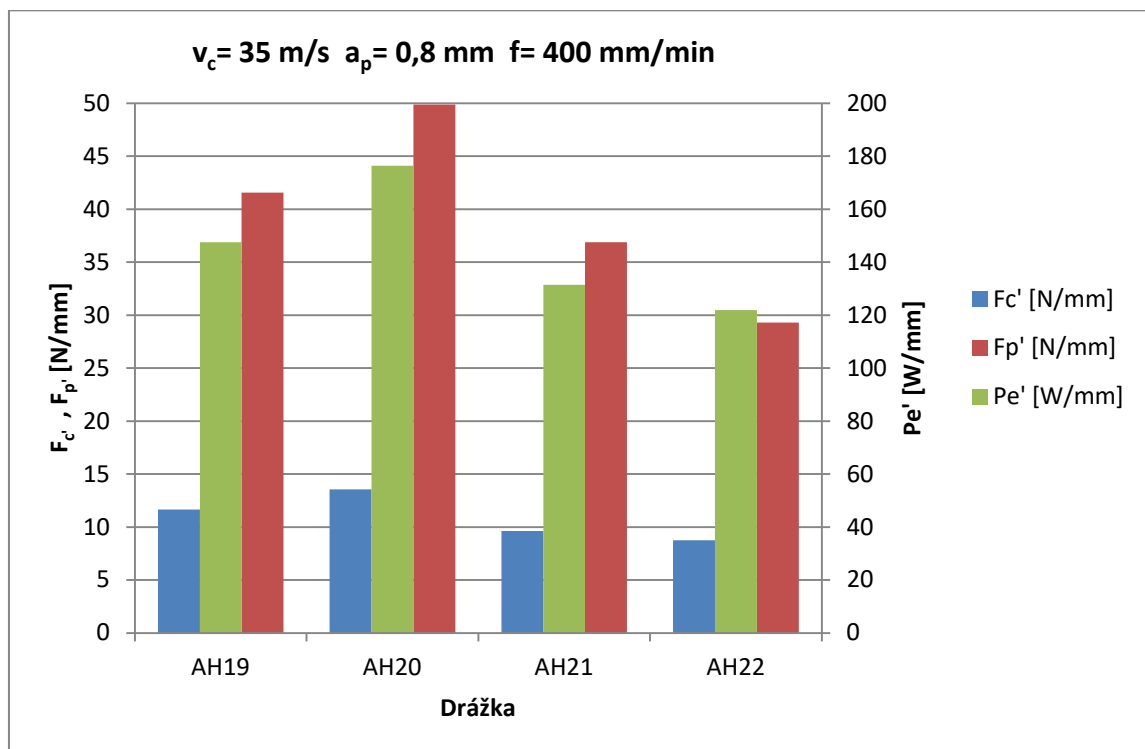


Obrázek 48 Záznam vlivu orovnění na pasivní sílu z dynamometru Kistler u tří hranolů

Z grafů je patrný již dříve zmiňovaný vysoký náběh sil při najetí do řezu a následný prudký pokles.

Tabulka 12 Vliv způsobu orovnění na silové poměry

Číslo drážky	F_c [N]	F_p [N]	P_e [%]	F_c' [N/mm]	F_p' [N/mm]	P_e' [W/mm]	Způsob orovnění	Rychlost orovnění [mm/min]
AH19	80	285	46	11,7	41,5	147,5	vícekrystalový orovnávač	2000
AH20	93	342	55	13,6	49,9	176,4	jednokrystalový orovnávač	2000
AH21	66	253	41	9,6	36,9	131,5	jednokrystalový orovnávač	5000
AH22	60	201	38	8,7	29,3	121,9	bez orovnění	x



Graf 6 Vliv orovnění na silové poměry

Z naměřených hodnot a grafického znázornění je patrné, že způsob orovnění kotouče má významný vliv na silové poměry při obráběcím procesu. Vyšší rychlost orovnění měla za následek výrazné snížení zátěže, při orovnění došlo k vytržení zrn ze struktury kotouče.

Nejmenší hodnoty vykazoval proces bez předchozího orovnění kotouče, to ale z důvodů zachování tvarové přesnosti není možné aplikovat.

Z tohoto experimentu vyplývá, že vlivem orovnění dojde k otupení zrn, „uzavření“ struktury kotouče a zátěž při najetí do řezu je vyšší než v dalším průběhu řezu, kdy dojde k vylomení zrn a kotouč znovu získá svou řezivost.

7.5 Posouzení tvarové stability kotoučů

Jeden z důležitých parametrů u tvarového broušení je schopnost kotouče držet tento tvar během celého broušícího cyklu až do doby, než dojde k opětovnému orovnění. Míra opotřebení tvaru je zároveň klíčová pro volbu hodnoty přísuvu orovnávacího elementu. Schopnost držet svůj tvar je vedle řezivosti kotouče neméně důležitá vlastnost, protože se ztrátou tvaru dochází k menšímu úběru materiálu a tím i k nedodržení požadovaného rozměru.

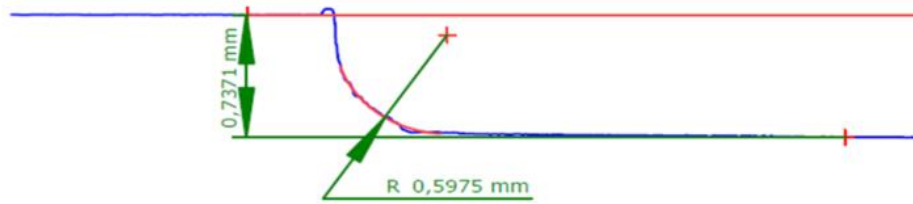
U hrubovacích operací se s určitou mírou opotřebení počítá, protože se schválně volí náročnější podmínky, které jsou vykompenzovány rychlostí a celkově i ekonomičností procesu. Tyto podmínky ale bohužel více zatěžují kotouč, který je rychleji opotřebováván a postupně ztrácí své vlastnosti, dokud není orovnáním požadovaný tvar obnoven. Pokud je ale opotřebení nástroje příliš velké, může se stát, že následující dokončovací operace budou mít podstatně horší výsledky kvůli větší zbytkové vrstvě materiálu, která byla neobrobena. To má za následek ve většině případů nedodržení požadovaných geometrických specifikací, a proto je snaha těmto nepříznivým jevům předcházet vhodnou volbou kombinace řezných podmínek a brusného kotouče.

7.5.1 Opotřebení řezných hran kotouče

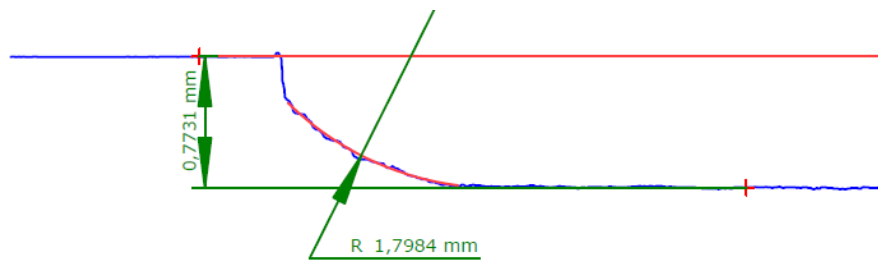
V tabulce 13 jsou porovnány schopnosti kotoučů Tyrolit a Norton držet svůj tvar za různých podmínek. Výsledné hodnoty byly získány přeměřením vzorků na konturografu Mahr, pomocí kterého lze kromě zaoblení hrany hodnotit i dosažená broušená hloubka, díky které lze odečíst reálný úbytek kotouče. Broušená délka na vzorcích byla vždy 195 mm a měření bylo provedeno 1 cm od obou krajů hranolu.

Tabulka 13 Vliv řezných podmínek na opotřebení kotoučů

Číslo drážky	Podmínky			Kotouč	Radius [mm]	
	v_c [m/s]	a_p [mm]	f [mm/min]		1	2
H06	35	1,5	200	Tyrolit	0,2456	0,5572
H24				Norton	0,8905	1,3916
H09	35	0,8	400	Tyrolit	0,2764	0,7776
H28				Norton	0,5975	1,7984
H12	16	0,3	100	Tyrolit	1,0758	1,0516
H30				Norton	0,6101	0,7519
H15	16	0,3	400	Tyrolit	0,3598	0,8670
H29				Norton	0,3609	2,0090

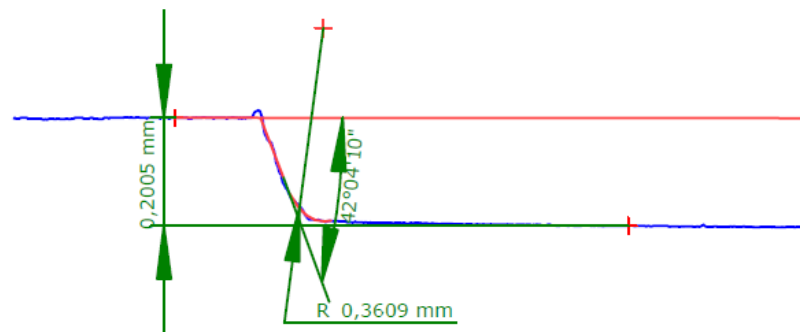


Obrázek 49 Kontura drážky H28 v nájezdu do řezu (Norton, $v_c=35$ m/s, $a_p=0,8$ mm, $f=400$ mm/min)

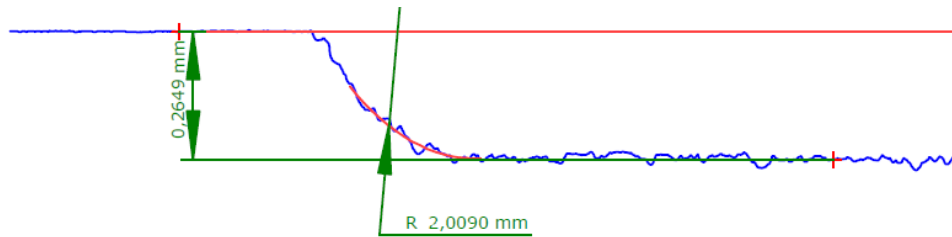


Obrázek 50 Kontura drážky H28 ve výběhu z řezu (Norton, $v_c=35$ m/s, $a_p=0,8$ mm, $f=400$ mm/min)

Ze záznamů je názorně vidět, jak kotouč Norton není schopný v průběhu řezu udržet svůj tvar a k jak výraznému opotřebení došlo.



Obrázek 51 Kontura drážky H29 v nájezdu do řezu (Norton, $v_c=16$ m/s, $a_p=0,3$ mm, $f=400$ mm/min)

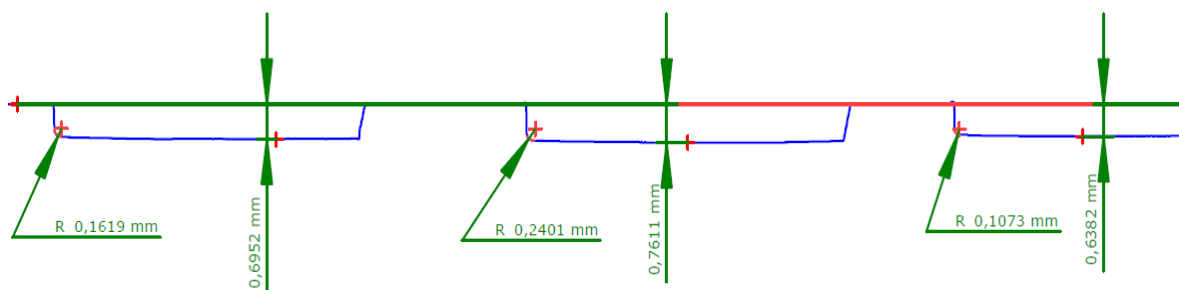


Obrázek 52 Kontura drážky H29 ve výběhu z řezu (Norton, $v_c = 16 \text{ m/s}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$, $f = 400 \text{ mm/min}$)

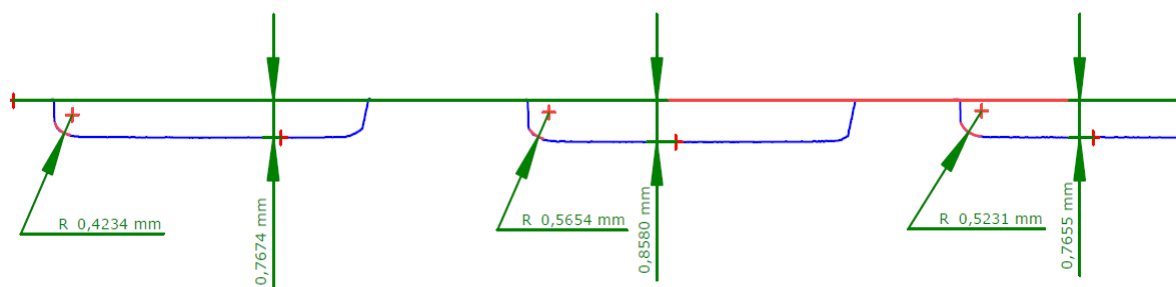
Kotouč Norton bohužel nedokáže udržet svůj tvar po celou dobu jednoho cyklu broušení. Ztráta ostré hrany je opravdu markantní a tak je bohužel tento kotouč nevhodný pro použití tvarového broušení. Poloměr zaoblení hrany během jednoho průchodu (195 mm) zvětší i o více než 1,5 mm (obr. Obrázek 51 a obr. Obrázek 52). Proti tomu kotouč Tyrolit vykazuje podstatně větší stálost své hrany, která se mění v rozsahu maximálně 0,5 mm.

Ze všech zkoušených kombinací podmínek byla jen jedna ($v_c = 16 \text{ m/s}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$, $f = 100 \text{ mm/min}$), během které dokázal kotouč Norton udržet změnu zaoblení hrany v přijatelných mezích. Kombinace malé řezné rychlosti a vyššího posuvu naopak vůbec nesevěčila kotouči Tyrolit, který nedokázal udržet hranu ostrou už od náběhu do řezu.

Následně byly orovnány kotouče Tyrolit, Cubitron™ 30% a Cubitron™ 99% o 1 mm na poloměru pro zaručené odstranění zaoblení hran po provedených zkouškách. Byly vybroušeny 3 drážky na jednom hranolu, každá jiným kotoučem, pro lepší přehlednost. S kotouči Cubitron™ neproběhlo žádné další měření jejich tvarové stability.



Obrázek 53 Kontura drážek (zleva) AH17 – Cubitron™ 30%, AH18 – Cubitron™ 99%, AH19 – Tyrolit v nájezdu do řezu ($v_c = 35 \text{ m/s}$, $a_p = 0,8 \text{ mm}$, $f = 400 \text{ mm/min}$)



Obrázek 54 Kontura drážek (zleva) AH17 – Cubitron™ 30%, AH18 – Cubitron™ 99%, AH19 – Tyrolit ve výjezdu z řezu ($v_c = 35 \text{ m/s}$, $a_p = 0,8 \text{ mm}$, $f = 400 \text{ mm/min}$)

Ze zaznamenaných grafů vyplývá, že u všech kotoučů došlo k opotřebení a zaoblení jejich řezných hran. Kotouče si za těchto řezných podmínek dokázaly udržet svůj tvar ve stejné míře. Žádný kotouč nemá jednoznačně lepší tvarovou stálost v průběhu broušicího procesu.

7.5.2 Úbytek na poloměru kotouče

Po každém broušení drážky byl kotouč orován a byl zaznamenán úbytek na poloměru kotouče (viz tabulka č. Tabulka 14). Úbytek na poloměru, stejně jako opotřebení hrany kotouče, je důležitý údaj pro určení broušicích parametrů. V případě velkého opotřebení kotouče by nemuselo dojít k dostatečnému orování kotouče, další broušicí operace by nedosahovala požadovaných přesností nebo bude nutná častější výměna kotoučů.

Tabulka 14 Úbytek na poloměr kotouče při jednom brousicím cyklu

Číslo drážky	v_c [m/s]	a_p [mm]	f [mm/min]	Kotouč	úbytek na poloměru kotouče [mm]
H28	35	0,8	400	Norton	0,06
H09				Tyrolit	0,05
AH13				Cubitron™ 30%	0,07
AH04				Cubitron™ 99%	0,01
H20	22	0,3	300	Norton	0,04
H19				Tyrolit	0,04
AH14				Cubitron™ 30%	0,04
AH03				Cubitron™ 99%	0,01
H22; H23	35	1,5	200	Norton	0,12
H06; H26				Tyrolit	0,12
AH12				Cubitron™ 30%	
AH05				Cubitron™ 99%	0,05
H30	16	0,3	100	Norton	0,04
H12				Tyrolit	0,03
AH15				Cubitron™ 30%	0,04
AH01				Cubitron™ 99%	0,01
H29	16	0,3	400	Norton	0,04
H15				Tyrolit	0,07
AH16				Cubitron™ 30%	0,03
AH02				Cubitron™ 99%	0,01

Z tabulky je zřejmé, že opotřebení na poloměru kotouče je pro kotouče Norton, Tyrolit a Cubitron™ II 30% přibližně stejné. Nejmenší opotřebení vykazuje kotouč Cubitron™ II 99%, kde k výraznému opotřebení 0,05 mm došlo pouze při vysoké řezné rychlosti a vysoké hloubce řezu. Při všech dalších podmínkách došlo k v podstatě zanedbatelnému úbytku.

7.6 Zhodnocení kotoučů

7.6.1 Z hlediska silových poměrů

S ohledem na vznik co nejmenšího zatížení během broušení se z výsledků měření sil jeví lépe kotouč Cubitron™ 99%, který vykazoval ve všech ohledech nižších hodnot zatížení, kromě kombinace podmínek s řeznou rychlostí $v_c=35$ m/s, kde dosahoval nejnižších hodnot kotouč Norton.

V kombinaci podmínek $v_c=35$ m/s, $a_p=1,5$ mm, $f=200$ mm/min dosahoval Norton a Cubitron™ II 99% téměř třetinových hodnot kotouče Tyrolit.

Po kotouči Cubitron™ 99% se jako druhý nejlepší jevil kotouč Norton.

7.6.2 Z hlediska tvarové stability

Při potřebě broušení určitého tvaru (např. zámku turbínových lopatek) se hledí i na schopnost kotouče tento potřebný funkční tvar udržet. Pokusy byly zjednodušeny na broušení jedné drážky a na hodnocení „ostrosti“ jejího dna. Každý brusný kotouč se vlivem opotřebení dříve či později zaoblí, ale důležité je, aby tato ztráta ostré hrany kotouče byla pokud možno co nejmenší s narůstající broušenou délkou.

Během tohoto pokusu se bohužel ukázalo, že kotouč Norton nedokáže udržet svůj tvar a dramaticky se jeho hrana zaobljuje ve většině zkoušených kombinací řezných podmínek. Během jednoho průchodu (195 mm) se tak poloměr hrany kotouče Norton zvětší i o více než 1,5 mm. Proti tomu kotouč Tyrolit i Cubitron™ II vykazuje podstatně větší stálost své hrany, která se mění v rozsahu maximálně 0,5 mm.

7.6.3 Výsledek vyhodnocení kotoučů

Silové poměry umožňují ukázat směr, kterým se vydat při minimalizaci nákladů s ohledem na opotřebení kotouče, případně s ohledem na potřebný broušený čas. V neposlední řadě je důležitá i schopnost kotouče držet tvar během brusného cyklu. Pokud to kotouč nedokáže, nesvede brousit požadovaný rozměr a následná operace bude mít větší přídavek na ploše. Nastavené řezné podmínky nebudou optimální, protože očekávaná hloubka řezu bude větší. S větší hloubkou řezu a špatným nastavením podmínek jde i ruku v ruce větší opotřebení kotouče a horší povrch po broušení, což může mít za následek nedodržení předepsaných geometrických specifikací.

Po vyhodnocení všech měření se jako nejlepší volba jeví kotouč Cubitron™ II 99%. Dosahuje nižších hodnot zatížení než ostatní kotouče. Jeho schopnost držet tvar je stejná jako pro zbytek kotoučů, s výjimkou kotouče Norton. Kotouč Cubitron™ II 99% dosahuje nejmenšího úbytku na průměru kotouče, ale přísuv při orovnění bude stejný jako u ostatních kotoučů z důvodu odstranění zaoblení řezných hran.

Nezbytným hlediskem, které je zapotřebí brát v potaz, je hledisko ekonomičnosti procesu. Kotouč Tyrolit vykazoval větší silovou zátěž než Cubitron™ II 99%, ale jsou schopny brousit za totožných podmínek. Pořizovací cena kotouče Cubitron™ II 99% je ovšem několikanásobně vyšší než cena kotouče Norton a Tyrolit.

Po posouzení všech hledisek by se jevil jako nejlepší kotouč Norton, ale bohužel není schopen držet adekvátně svůj tvar při větších odebíraných hloubkách.

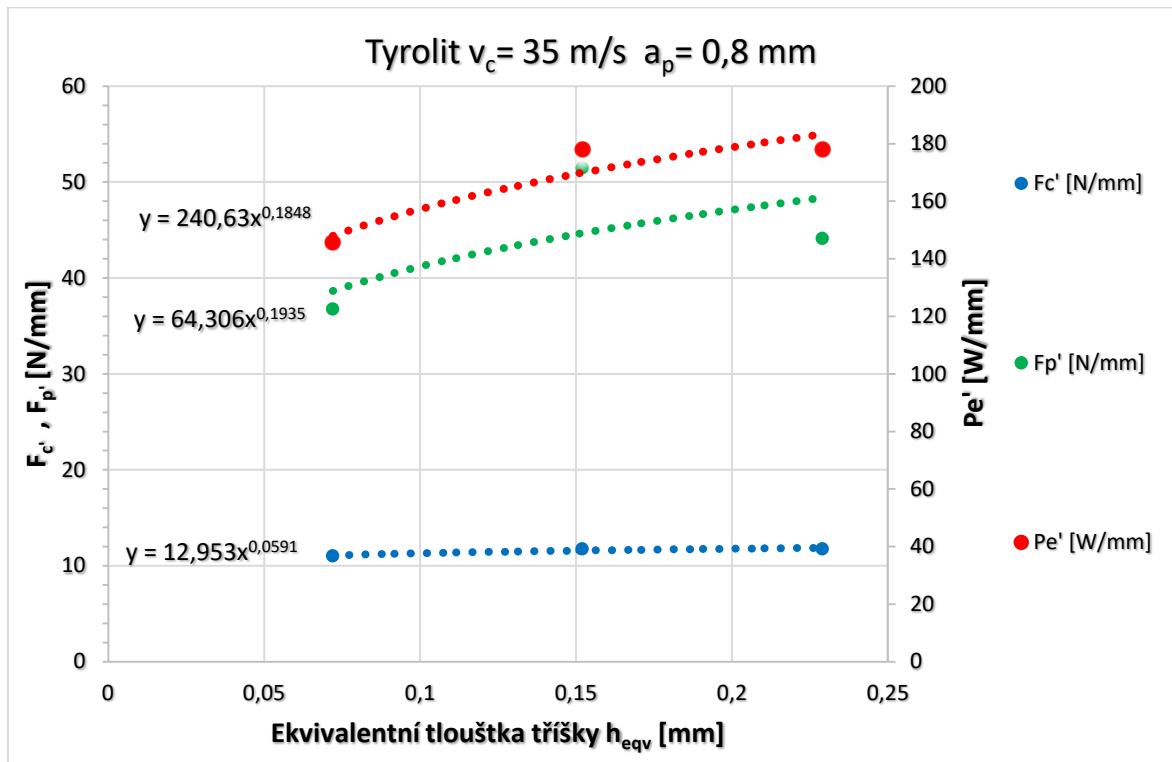
Jako nejlepší kotouč, vhodný pro tvarové hloubkové broušení v závislosti na všech provedených experimentech, jejich vyhodnoceních a dalších zmíněných aspektech se jeví kotouč Tyrolit. Pouze v nevyhovujících případech, kdy bude docházet k vysoké silové zátěži, která nepůjde odstranit změnou řezných podmínek nebo bude změna řezných podmínek neekonomická či nedostačující z hlediska kvality, nasadit kotouč Cubitron™ 99%.

7.7 Další měření s kotoučem Tyrolit

Kotouč Tyrolit se jeví jako nejlepší řešení ze všech zkoušených kotoučů. S tímto kotoučem tedy proběhla další měření pro zjištění vlivu řezných parametrů na poměr sil a výkonu. Vzhledem k proměnlivým parametrům při procesu broušení byl pro názornost a jednotnost použit parametr ekvivalentní hloubky řezu.

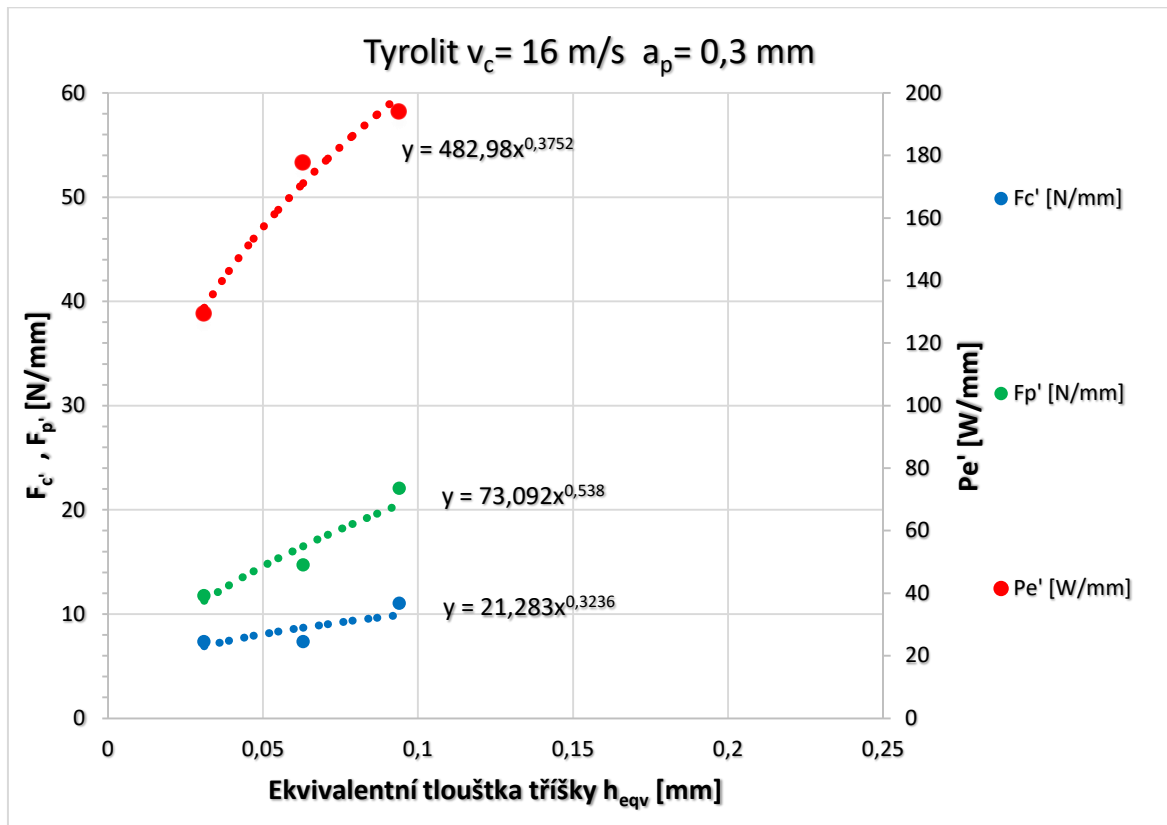
Tabulka 15 Řezné podmínky pro experimenty s kotoučem Tyrolit

Číslo drážky	v_c [m/s]	a_p [mm]	f [mm/min]	h_{eqv} [mm]	F_c [N]	F_p [N]	P_e [%]	$P_{e'}$ [W/mm]	F_c' [N/mm]	F_p' [N/mm]
H08	35	0,8	190	0,072	75	250	45	145,6	11,03	36,76
H09			400	0,152	80	350	55	177,9	11,76	51,47
H10			600	0,229	80	300	55	177,9	11,76	44,12
H12	16	0,3	100	0,031	50	80	40	129,4	7,35	11,76
H13			200	0,063	50	100	55	177,9	7,35	14,71
H14			300	0,094	75	150	60	194,1	11,03	22,06



Graf 7 Průběh sil a výkonu pro $v_c = 35 \text{ m/s}$ $a_p = 0,8 \text{ mm}$

Z grafu lze vyčíst, že změna posuvu až na trojnásobnou původní hodnotu nemá vliv na řeznou sílu. Síla pasivní a výkon mají pozvolný nárůst.



Graf 8 Průběh sil a výkonu pro $v_c = 16 \text{ m/s}$ $a_p = 0,3 \text{ mm}$

Při nízké řezné rychlosti nabývají měřené parametry nižších hodnot, ale křivky se vyznačují větším stoupáním, než v případě $v_c = 35 \text{ m/s}$.

Z grafů vyplývá, že při nízké řezné rychlosti dochází se zvyšujícím se posuvem broušícího kotouče k většímu nárůstu zatížení, než v případě vyšší řezné rychlosti a vyšší hloubky řezu. Pro broušené hranoly Inconel a testovaný kotouč Tyrolit jsou vhodnější vyšší řezné rychlosti s vysokým posuvem a hloubkou řezu, kde samotný posuv nemá významný vliv na průběh silových zatížení.

8 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala teorií a problematikou hloubkového broušení. Technologií hloubkového broušení jsou vyráběny například zámky turbínových lopatek, drážky vrtáků a fréz atd. Experimentálně proběhlo broušení drážek v hranolech Inconel 713 LC (Low Carbon) a byly měřeny silové průběhy a zatížení elektromotoru brusky Mikronex BRH 20 CNC s výkonem 2,2 kW.

Celkově bylo v průběhu experimentu broušeno 50 drážek a několik z nich bylo vybráno pro vyhodnocení broušicích procesů. Pro broušení byly použity 4 kotouče, Norton, Tyrolit Strato Ultra, Cubitron™ II 30% a Cubitron™ II 99%. Každý kotouč byl orovnan na šířku přibližně 7 mm z důvodu nedostatečného výkonu brusky pro broušení celou šířkou kotouče 15 mm.

V rámci experimentu bylo vytipováno 5 kombinací rezných podmínek ($v_c = 16-35$ m/s, $a_p = 0,3-1,5$ mm, $f = 100-400$ mm/min), pro které bylo provedení měření rezných sil pro všechny čtyři kotouče. Experiment byl proveden tak, aby kotouč byl jedinou proměnnou, tedy za stejných podmínek chlazení, stejného NC kódu a stejném nastavení měřicí techniky.

Při hloubkovém broušení je dlouhý stykový oblouk, jinými slovy obvodová část kotouče, která je právě v záběru. V některých podmínkách experimentu tento stykový oblouk dosahoval délky až 19 mm. Dochází k nedostatečnému chlazení v celé délce řezu a možnému vzniku opalů či potrhání obrobku. Důležitým aspektem je tedy také dostatečný přívod chladicí kapaliny, tvar trysek, tlak a její množství. V rámci aplikace na reálné podmínky by bylo vhodné provést další experimentální měření právě na vliv kapaliny a snažit se najít nejvhodnější kombinaci tvaru trysek, tlaku a způsobu přívodu chladicí kapaliny do místa řezu pro optimální průběh procesu s co nejmenším tepelným zatížením.

Jako naprosto nevhodnými podmínkami se jevíly experimenty s reznou rychlostí $v_c = 16$ m/s. Docházelo k vysokému zatížení elektromotoru. Jako produktivní se jevíly varianty s reznou rychlostí $v_c = 35$ m/s.

Kotouč Norton se jevil jako nejlepší varianta s nejnižším silovým zatížením a zatížením elektromotoru. Tento kotouč bohužel neobstál ve vyhodnocení tvarové stability. V průběhu řezu došlo k opotřebení hrany a na konci drážky vznikl rádius až 2 mm. Pro tvarové broušení je tedy nevhodný.

Jako druhý nejlepší byl kotouč Cubitron™ II 99%, byl schopný udržet si svůj tvar v rámci povolené odchylky po celou dobu broušícího cyklu a vykazoval nejmenší úbytek na průměru kotouče. Vzhledem k opotřebení a výslednému zaoblení řezné hrany je kotouč Cubitron™ II 99% nutno orovnávat o stejnou hodnotu přísuvu jako ostatní kotouče. Několikanásobně vyšší pořizovací cena než u kotoučů Norton a Tyrolit měla za následek pokračování v dalších měřeních s kotoučem Tyrolit.

Další testy s kotoučem Tyrolit odhalily, že zvyšování posuvu nemá tak razantní vliv na zvýšení silového zatížení jako zvýšení hloubky řezu. Při hloubce řezu $a_p=1,5$ mm dosahoval dvojnásobného zatížení elektromotoru a čtyřnásobné hodnoty pasivní síly než ostatní kotouče. Tyto hodnoty jsou sice pořád v normě tuhosti a výkonu stroje, ale pro budoucí nasazení v provozu by byla vhodná menší hloubka řezu, ale vyšší posuv.

Experimenty také odhalily velký vliv způsobu orovnění kotouče. Síly a zátěž elektromotoru mají vysokou hodnotu na počátku řezu. Následně prudce klesnou, v prostřední a koncové části jsou obdobné. Byly vyzkoušeny různé rychlosti orovnění kotouče. Z tohoto experimentu vyplývá, že vlivem orovnění dojde k otupení zrn, „uzavření“ struktury kotouče a zátěž při najetí do řezu je vyšší než v dalším průběhu řezu, kdy dojde k vylomení zrn a kotouč znovu získá svou řezivost. Čím vyšší byla rychlost orovnění, tím menší byla silová zátěž při najetí do řezu.

Vhodné řezné podmínky závisí na použitém kotouči. V rámci vyhodnocení měření by bylo nutné provést kontrolní broušení při provozních podmínkách tvarového broušení a ověřit si správnost výsledku školních experimentů.

9 Bibliografie

- [1] Podstata broušení. *ELUC* [online]. b.r. [cit. 2017-2-12]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1241>
- [2] MASLOV, J.N. *Teorie broušení kovů*. Praha: SNTL, 1979, 246 s.
- [3] HOLEŠOVSKÝ, František a Martin NOVÁK. Studium integrity broušeného povrchu. In: *Fakulta výrobných technologií* [online]. b.r. [cit. 2017-01-14]. Dostupné z: <http://www.fvt.tuke.sk/journal/pdf08/2-str-11-13.pdf>
- [4] Základní rozdělení brusných kotoučů. *TumliKOVO* [online]. b.r. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/zakladni-rozdeleni-brusnych-kotoucu-k-ostreni-nastroju/>
- [5] Technologie broušení: Investice do rozvoje vzdělávání. *E-Learning VOŠ* [online]. b.r. [cit. 2017-07-14]. Dostupné z: http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U01_Technologie_brouseni.pdf
- [6] Řezné podmínky při broušení: Investice do rozvoje vzdělávání. *Centrum odborné přípravy technické Kroměříž* [online]. b.r., s. 5 [cit. 2017-03-14]. CZ.1.07/1.5.00/34.0304.
- [7] MARTINÁK, Josef. Broušení - geometrie brusného zrna. In: *Investice do rozvoje vzdělávání* [online]. b.r., s. 12 [cit. 2017-07-14].
- [8] Řezná síla. *ELUC* [online]. b.r. [cit. 2017-07-1]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1279>
- [9] LIŠKA, Jan. *Hodnocení průběhu opotřebení progresivních brousících kotoučů*. 2014, 74 s. Dostupné také z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/28505/li%C5%A1ka_2014_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Jiří Čop.
- [10] HUMÁR, Anton. *Technologie obrábění - 1. část*. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ - FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ - ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE, 2003. Dostupné také z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [11] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012. ISBN 978-80-248-2533-5.
- [12] *Handbook surface grinding*. 3M Abrasive Systems Division, 2015.
- [13] 3-Component Dynamometer. *Sensor-IC* [online]. Kistler Group, b.r. [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: <http://web.sensor-ic.com:8000/ZLXIAZAI/KISTLER/000-152e-12.09.pdf>
- [14] PECHÁČEK, Martin. *Hodnocení kvality povrchu při řezání u technologie AWJ a WJM*. Brno,

2010. Dostupné také z:
https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/17138/2010_DP_Martin%20Pechacek_53726.pdf?sequence=7&isAllowed=y. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Slaný.
- [15] ČSN EN ISO 4287:1997. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999, 24 s.
- [16] Plakát - drsnost povrchu. *Hommel - Etamic* [online]. b.r. [cit. 2017-07-15]. Dostupné z: https://www.hommel-etamic.cz/files/094_14-hommel-plakat-drsnost-1000x700mm.pdf
- [17] Měření drsnosti. *M&B Calibr, spol. s.r.o.* [online]. b.r. [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: <http://www.mbcaltibr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [18] MÁDL, Jan. *Teorie a metodika obrábění: Přednáška*. Praha: ČVUT fakulta strojní, 2015.
- [19] Redukce procesní kapaliny. *Slideplayer.cz* [online]. b.r. [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2004245/>
- [20] HOLEŠOVSKÝ, František a Martin NOVÁK. VLIV PROCESNÍ KAPALINY PŘI BROUŠENÍ. In: *Digitální knihovna Západočeské univerzity v Plzni* [online]. 2009 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/16422/1/Holesovsky.pdf>
- [21] PETŘÍK, Václav. *Využití různých systémů chlazení pro obrábění materiálů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, 107 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/18283>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Bílek, Ondřej.
- [22] HOLEŠOVSKÝ, František. Abrazivní metody dokončování povrchů. In: *Centrum pro studium vysokého školství* [online]. 2015 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: http://www.csvs.cz/projekty/2014_veda_pro_zivot/data/12_KA3_Frantisek_Holesovsky_Abrazivni_metody_dokoncovani_povrchu_metodicka_prirucka.pdf
- [23] ORTEGA, N., H. BRAVO, I. POMBO, J.A. SÁNCHEZ a G. VIDAL. Thermal Analysis of Creep Feed Grinding. *Procedia Engineering* [online]. 2015, **132**, 1061-1068 [cit. 2017-07-15]. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.596. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705815045087>
- [24] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. část*. Vysoké učení technické v Brně - Fakulta strojního inženýrství - Ústav strojírenské technologie, 2005.
- [25] Creep-Feed Grinding Is A Milling Process. *MMS Online* [online]. b.r. [cit. 2017-07-2]. Dostupné z: <http://www.mmsonline.com/articles/creep-feed-grinding-is-a-milling-process>

10 Seznam tabulek

Tabulka 1 Druhy brusiva [4]	12
Tabulka 2 Zrnitost [4].....	13
Tabulka 3 Pojivo [4]	14
Tabulka 4 Porovnání technologií broušení	41
Tabulka 5 Množství a tlak procesní kapaliny [12]	42
Tabulka 6 Řezné podmínky varianty č. 1	47
Tabulka 7 Řezné podmínky varianty č. 2	48
Tabulka 8 Řezné podmínky varianty č. 3	49
Tabulka 9 Řezné podmínky varianty č. 4	50
Tabulka 10 Ukázka odečtených hodnot z dynamometru Kistler.....	60
Tabulka 11 Naměřená a dopočtená data z dynamometru Kistler	61
Tabulka 12 Vliv způsobu orovnění na silové poměry	67
Tabulka 13 Vliv řezných podmínek na opotřebení kotoučů.....	69
Tabulka 14 Úbytek na poloměr kotouče při jednom broušicím cyklu	73
Tabulka 15 Řezné podmínky pro experimenty s kotoučem Tyrolit	75

11 Seznam grafů

<i>Graf 1 Porovnání kotoučů při $v_c = 35$ m/s, $a_p = 0,8$ mm, $f = 400$ mm/min.....</i>	<i>62</i>
<i>Graf 2 Porovnání kotoučů při $v_c = 35$ m/s, $a_p = 1,5$ mm, $f = 200$ mm/min.....</i>	<i>62</i>
<i>Graf 3 Porovnání kotoučů při $v_c = 22$ m/s, $a_p = 0,3$ mm, $f = 300$ mm/min.....</i>	<i>63</i>
<i>Graf 4 Graf 6 Porovnání kotoučů při $v_c = 16$ m/s, $a_p = 0,3$ mm, $f = 100$ mm/min</i>	<i>64</i>
<i>Graf 5 Porovnání kotoučů při $v_c = 16$ m/s, $a_p = 0,3$ mm, $f = 400$ mm/min.....</i>	<i>64</i>
<i>Graf 6 Vliv orovnění na silové poměry.....</i>	<i>68</i>
<i>Graf 7 Průběh sil a výkonu pro $v_c = 35$ m/s $a_p = 0,8$ mm</i>	<i>76</i>
<i>Graf 8 Průběh sil a výkonu pro $v_c = 16$ m/s $a_p = 0,3$ mm</i>	<i>77</i>

12 Seznam obrázků

Obrázek 1 Mechanismus tvoření třísky[3]	10
Obrázek 2 Geometrie zrna[7]	15
Obrázek 3 Rovinné obvodové tangenciální broušení[8]	16
Obrázek 4 Struktura broušícího kotouče[9].....	17
Obrázek 5 Základní druhy opotřebení zrn[9]	18
Obrázek 6 Druhy vylamování zrn, korund a keramické abrazivum [12]	18
Obrázek 7 Rozložení sil při obvodovém broušení do kulata[8]	19
Obrázek 8 Dynamometry Kistler[11]	27
Obrázek 9 Profil povrchu [14].....	29
Obrázek 10 Profily drsnosti povrchu [16]	29
Obrázek 11 Základní délka měření [16]	30
Obrázek 12 Prvek profilu [14].....	30
Obrázek 13 Parametry profilu drsnosti povrchu [16]	31
Obrázek 14 Průměrná aritmetická úchylna posuzovaného profilu R_a [14].....	31
Obrázek 15 Průběh zbytkového napětí [3]	34
Obrázek 16 Metoda šikmých řezů [11]	35
Obrázek 17 Ukázka vlivu procesní kapaliny [20]	36
Obrázek 18 Způsob přívodu kapaliny do místa řezu [19]	38
Obrázek 19 Příčný řez segmentovaného kotouče [22]	39
Obrázek 20 Schéma broušení[9].....	40
Obrázek 21 Distribuce tepla při broušení [23]	41
Obrázek 22 Hloubkově broušené zámky lopatek	43
Obrázek 23 Lopatky v přípravku na broušení	44
Obrázek 24 Hranoly před frézováním	45
Obrázek 25 Vertikální obráběcí centrum.....	46
Obrázek 26 Upnutý hranol.....	47
Obrázek 27 Nástrčná fréza s VBD (vlevo) a VBD po jednom průchodu (vpravo).....	48
Obrázek 28 VBD určené pro obrábění žáruvzdorných slitin.....	49
Obrázek 29 Použité monolitní frézy (pro porovnání nová fréza vpravo).....	50
Obrázek 30 Bruska Mikronex BRH 20 CNC osazená dynamometrem a externím odlučovačem	51
Obrázek 31 Upnutý hranol pro broušení horní plochy	51
Obrázek 32 Schéma bočního orovnění kotouče	52

Obrázek 33 Kotouč při orovnávaní boků.....	52
Obrázek 34 Orovnaný kotouč na šířku 7mm.....	53
Obrázek 35 Tyrolit STRATO-ULTRA 240x15x51 33A 702GG11V B1/40 (vlevo) a NORTON ALTOS 01 225x15x50,8 TGX80D13VCF5 (vpravo)	55
Obrázek 36 Cubitron™ II 99% 240x15x50,8 99DA54/80 F15VPLF901W (vlevo) a Cubitron™ II 30% 240x15x50,8 93DA80/80 H15VPMF601W (vpravo).....	56
Obrázek 37 Mikrostruktura Norton (vlevo) a Tyrolit (vpravo).....	56
Obrázek 38 Detailní pohled na kotouč Tyrolit – označeny třísky (kaly)	56
Obrázek 39 Detailní pohled na kotouč Tyrolit – průměrná velikost tyčinek cca 190 μm....	57
Obrázek 40 Trojúhelníková zrna kotouče Cubitron™ II[12]	57
Obrázek 41 Instalovaný 3osý dynamometr Kistler s upnutým hranolem.....	58
Obrázek 42 Průběh sil a výkonu na dynamometru.....	59
Obrázek 43 Dynamometr Kistler pro měření složek řezné síly [13]	59
Obrázek 44 Hranoly s drážkami po hloubkovém broušení	65
Obrázek 45 Hranoly s drážkami AH7-AH9, AH12-AH14	65
Obrázek 46 Vícekrytalový orovnávač.....	66
Obrázek 47 Nasazený monokrytalový hrot orovnávače	66
Obrázek 48 Záznam vlivu orovnávaní na pasivní sílu z dynamometru Kistler u tří hranolů....	67
Obrázek 49 Kontura drážky H28 v nájezdu do řezu (Norton, $v_c=35$ m/s, $a_p=0,8$ mm, $f=400$ mm/min).....	70
Obrázek 50 Kontura drážky H28 ve výběhu z řezu (Norton, $v_c=35$ m/s, $a_p=0,8$ mm, $f=400$ mm/min).....	70
Obrázek 51 Kontura drážky H29 v nájezdu do řezu (Norton, $v_c=16$ m/s, $a_p=0,3$ mm, $f=400$ mm/min).....	70
Obrázek 52 Kontura drážky H29 ve výběhu z řezu (Norton, $v_c=16$ m/s, $a_p=0,3$ mm, $f=400$ mm/min).....	71
Obrázek 53 Kontura drážek (zleva) AH17 – Cubitron™ 30%, AH18 – Cubitron™ 99%, AH19 – Tyrolit v nájezdu do řezu ($v_c=35$ m/s, $a_p=0,8$ mm, $f=400$ mm/min)	71
Obrázek 54 Kontura drážek (zleva) AH17 – Cubitron™ 30%, AH18 – Cubitron™ 99%, AH19 – Tyrolit ve výjezdu z řezu ($v_c=35$ m/s, $a_p=0,8$ mm, $f=400$ mm/min).....	72