

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 874

ISSN 1213-4198

thesis
?
IS

Ing. Vendula Sámelová

**Efektivní obrábění
nových keramických materiálů**



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

**EFEKTIVNÍ OBRÁBĚNÍ NOVÝCH
KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ**

ON THE EFFECTIVE MACHINING OF NEW CERAMIC MATERIALS

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

OBOR	Strojírenská technologie
AUTOR PRÁCE	Ing. Vendula Sámelová
ŠKOLITEL	doc. Ing. Anton Humár, CSc.
OPONENTI	doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc. doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
DATUM OBHAJOBY	15. ledna 2019

Brno 2019

Klíčová slova:

Pokročilá keramika, broušení, diamantový kotouč, vibrační analýza, drsnost povrchu

Keywords:

Advanced ceramics, grinding, diamond grinding wheel, analysis of vibrations, surface roughness

Místo uložení rukopisu disertační práce

Areálová knihovna, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně
Technická 2896/2, 616 69 Brno

© Vendula Sámelová, 2019

ISBN 978-80-214-5737-9

ISSN 1213-4198

OBSAH

ÚVOD.....	5
1 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	6
2 TEORETICKÁ VÝCHODISKA	7
2.1 Řezná síla při broušení.....	7
2.2 Teorie zpracování signálu a analýza vibrací.....	8
2.3 Hodnocení struktury povrchu.....	9
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	9
3.1 Průběh experimentu	9
3.2 Výsledky experimentů	10
3.2.1 <i>Analýza silového zatížení</i>	10
3.2.2 <i>Vibrační analýza</i>	13
3.2.3 <i>Analýza struktury povrchu</i>	16
3.3 Opakovaný experiment	19
3.4 Diskuse výsledků a perspektiva dalších prací.....	23
ZÁVĚR.....	25
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	28
CURRICULUM VITAE.....	29
ABSTRACT	31

ÚVOD

Keramika, je v jedné ze svých mnoha definic, označena jako uměle připravená, anorganická, nekovová látka převážně krystalického charakteru, která je zpracována do požadovaného tvaru pomocí vysokoteplotního procesu [1; 2]. Toto vymezení zahrnuje obě hlavní skupiny keramických materiálů, a to keramické materiály *tradiční* a *pokročilé*. Suroviny pro výrobu tradičních keramických materiálů pocházejí z přírody a obsahují značný podíl nečistot, které následně ovlivňují vlastnosti výrobků. Vzhledem k prudkému rozvoji keramických materiálů a technologií jejich výroby jsou v současné době připravovány keramiky, které se vyznačují jedinečnými vlastnostmi. Tato keramika je připravena z chemicky čistých práškových surovin (syntetických) a označujeme ji jako pokročilou (z angličtiny *advanced ceramics*). Chemické složení a struktura takového materiálu jsou cíleně ovlivňovány za účelem dosažení vyšších užitných vlastností, které jsou podřízeny zamýšlenému použití daného keramického materiálu.

Charakteristické vlastnosti pokročilých keramických materiálů (vysoká tvrdost, nízká měrná hmotnost, vysoká pevnost za horka, odolnost vůči otěru, chemická odolnost, biokompatibilita atd.) předurčují oblasti jejich použití – otěruvzdorné součásti, ložiska, elektrochemická zařízení, tepelné stroje, biokeramika, vojenské a kosmické aplikace. V technologii obrábění je keramika využívána ve formě vysoce tvrdých abraziv a řezných nástrojů. Keramické materiály se stále častěji prosazují v oblasti tzv. špičkových technologií, kde by i vysoce kvalitní kovové materiály byly na hranici svých možností. V technické praxi jsou keramické materiály často využívány pro tribologické a otěruvzdorné aplikace. Toto použití vyžaduje produkovat součásti s vysokou jakostí funkčních ploch. Kromě součástí využívaných v průmyslu je také kladen důraz na kvalitu povrchu umělých kloubů a zubních implantátů. Proto je důležité soustředit pozornost na výrobní procesy a jejich vliv na kvalitu funkčních povrchů. Zejména u keramických materiálů mají trhliny a jiná poškození povrchu přímý vliv na pevnost materiálu. Zde hrozí nebezpečí porušení součásti na základě nekontrolovatelného šíření trhliny u keramických dílů, které často pracují v extrémních podmínkách zatěžování s dlouhými servisními intervaly. Aby bylo použití keramických materiálů ve špičkových aplikacích účelné, je třeba z nich vyrábět přesné součásti s malou drsností a s minimálním poškozením povrchu a toho lze dosáhnout obráběním. Hlavním problémem průmyslového využití keramiky jsou obtíže, které při obrábění vznikají. Důvodem je vysoká tvrdost a nízká lomová houževnatost keramiky. Tradiční metody obrábění nemohou být pro keramické materiály zcela využity

Kritickým činitelem jsou také náklady na obrábění keramických materiálů, které tvoří 30-60 % z celkových nákladů na výrobu součásti a v některých případech to může být až 90 %. Náklady spojené s obráběním (a také samotnou výrobou) jsou hlavním důvodem, proč jsou stále v některých inženýrských aplikacích (letecký, automobilový průmysl) používány obráběné díly kovové a nikoliv keramické. Trend využití keramických materiálů v průmyslu je rostoucí, proto má smysl neustále vyvíjet a zlepšovat procesy výroby keramických součástí.

1 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Jedním z nejčastěji skloňovaných problémů jsou vysoké náklady na design, výrobu a opracování keramických dílů (vysoké výrobní náklady/nízká reprodukovatelnost při sériové výrobě). Hlavním smyslem rozvoje technik zpracování keramiky (včetně obrábění) je tedy **cenově přijatelná, velkoobjemová výroba**.

Disertační práce je z hlediska obráběného materiálu zaměřena na karbid křemíku SiC. Jedná se o materiál, který díky svým vynikajícím vlastnostem, nachází uplatnění při konstrukci strojních součástí. Vzhledem k široké škále použití v různých segmentech průmyslu má smysl zlepšovat procesy výroby součástí z SiC. Pro opracování slinutých keramických součástí se nejvíce uplatňuje broušení diamantovými kotouči. Závěry mnoha dřívějších výzkumů potvrzují, že broušení je jednou z nejúčinnějších metod výkonného obrábění pokročilých keramik.

Na základě výše uvedených skutečností, vyplývajících z provedeného rozboru stavu poznání v této oblasti, je zaměření disertační práce zúženo právě na problematiku broušení diamantovými kotouči.

Hluboká znalost tohoto procesu je důležitá proto, že se jedná o jednu z dokončovacích metod obrábění a má tedy přímý vliv na kvalitu a pevnost dílů vyrobených z SiC. Stěžejní je zde otázka celkové kvality povrchu součástí po broušení diamantovým kotoučem a znalost faktorů, které mají na kvalitu povrchu vliv. Hlavním smyslem práce je vytvoření systému konkrétních vědecko-technických informací, které umožní aplikovat optimální technologické postupy při zpracování keramických součástí.

Cílem teoretické části disertační práce je zejména kritické zhodnocení stavu poznání v oblasti tématu disertační práce. Konkrétně to zahrnuje tyto okruhy:

- úvod do problematiky obrábění keramiky zaměřený na strukturu a vlastnosti keramických materiálů a vliv vlastností na obrobitelnost keramiky,
- rozbor současného stavu poznání v oblasti obrábění keramických materiálů včetně posouzení vhodnosti použití různých metod obrábění a návrhu směřování budoucího vývoje,
- podrobný rozbor technologie broušení keramických materiálů,
- popis měřicích metod na hodnocení kvality procesu broušení a parametrů kvality povrchu.

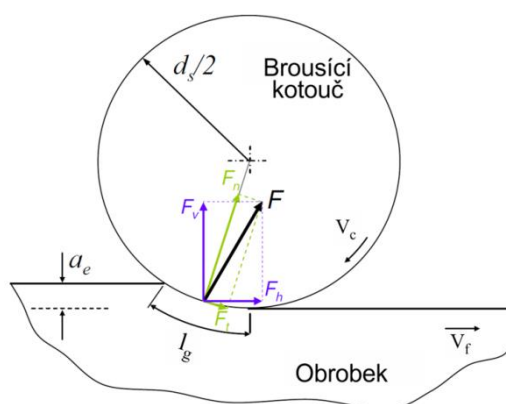
Experimentální část práce zahrnuje realizaci experimentů zaměřených na broušení karbidu křemíku diamantovým kotoučem. Hlavními cíli experimentální části je:

- sledování vlivu změny rezných podmínek na kvalitu povrchu,
- sledování procesu broušení prostřednictvím parametrů vibrací a silového zatížení a jejich vliv na kvalitu povrchu,
- hodnocení vhodnosti použitých výrobních prostředků pro opracování keramiky.

2 TEORETICKÁ VÝCHODISKA

2.1 ŘEZNÁ SÍLA PŘI BROUŠENÍ

Řezná síla se z praktických důvodů rozkládá do několika směrů. Rozklad řezné síly na jednotlivé složky při obvodovém rovinném broušení je uveden na *Obr. 2.1*. Řezná síla při broušení se rozkládá na normálovou složku (radiální) a tangenciální složku, nebo také na složky horizontální a vertikální. Tangenciální složka působí tangenciálně v místě kontaktu kotouče a obrobku, to znamená ve směru řezné rychlosti. Normálová složka působí kolmo k povrchu kontaktu kotouče a obrobku. Vzhledem k tomu, že průměr broušícího kotouče d_s je významně větší, než hloubka řezu a_e , lze předpokládat, že tangenciální a normálová složka řezné síly je totožná s horizontální a vertikální složkou. Tuto aproximaci není možné využít při metodách s velkou hloubkou záběru (typicky při hloubkovém broušení) [3; 4].



Obr. 2.1 Rozklad řezné síly na jednotlivé složky [3]

Tangenciální složku řezné síly F_t [N] je možné vypočítat ze vztahu [5]:

$$F_t = \frac{P}{v_c} = \frac{e_c \cdot Q' \cdot b_w}{v_c} \quad (2.1)$$

kde P je výkon broušení, v_c je řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], e_c je měrná energie broušení [$\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$], Q' je měrná rychlost úběru [$\text{mm}^3/\text{mm/s}$] a b_w je šířka broušení [mm].

Normálová složka řezné síly F_n [N] je vztažena k tangenciální složce F_t pomocí koeficientu broušení μ . Jedná se o **poměr složek řezné síly** a je definován podobným způsobem jako koeficient tření [5].

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} = \frac{F_t'}{F_n'} \quad (2.2)$$

Hodnota μ se pohybuje v nízkých hodnotách kolem 0,2 pro obrábění s nízkým úběrem, pro kalené oceli a keramiku, až po hodnoty kolem 0,8 pro broušení s vysokým úběrem a broušení měkkých ocelí nebo šedé litiny. Na hodnotu má vliv také chlazení v důsledku hydrodynamického tlaku, který je způsoben vysokými otáčkami. Vzhledem k tomu, že tangenciální složku je možné vypočítat z výkonu a nikoliv z normálové složky, znalost μ je užitečná pro stanovení požadované tuhosti

systemu a požadavků na upínání nástroje i obrobku [5]. Ve vztahu (2.2) jsou složky řezné síly F_n' a F_t' [$N \cdot mm^{-1}$] redukovány na jednotku šířky broušení b a jsou označovány jako **měrné složky řezné síly**. Typicky jsou tyto hodnoty vztaženy na 1 mm šířky broušení.

2.2 TEORIE ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU A ANALÝZA VIBRACÍ

Vibrační diagnostika bývá velmi často využívána k ladění řezných podmínek a odstranění některých nežádoucích jevů, mezi které můžeme zařadit *zhoršenou kvalitu povrchu v důsledku přítomnosti vibrací v technologickém systému*. Nápravy lze dosáhnout diagnostikou vibrací a vhodným zásahem na straně výrobního stroje a technologie výroby. Zdroje vibrací se projeví ve vibračním spektru nebo v časovém záznamu vibrací jiným způsobem. Proto je vibrační diagnostika výrazným pomocníkem při **řešení problematického povrchu obrobku** [6].

Signály vibrací lze analyzovat v časové a ve frekvenční oblasti. *Průběh signálu se obvykle znázorňuje v čase, jinak řečeno v časové oblasti*. Posuzování časového průběhu signálu vhodně doplňují i jeho vlastnosti prezentované rozkladem na soubor elementárních funkcí. Nejpřirozenější pro technické aplikace, nejen v oboru vibrací mechanických systémů, je *rozklad na soubor harmonických funkcí*. Jestliže se u souboru harmonických signálů znázorní *závislost amplitudy a počáteční fáze na frekvenci*, pak je signál znázorněn ve frekvenční oblasti. **Signál vibrací** v časové oblasti je charakterizován třemi základními veličinami popisujícími vibrace, a to *dráha, rychlost a zrychlení* [7; 8].

Rozklad periodické funkce se spojitým časem na kombinaci harmonických signálů se nazývá Fourierova (nekonečná) řada. Pro obecné neperiodické funkce se používá **Fourierova transformace** [8].

Diskrétní Fourierova transformace

Definiční vztahy Fourierovy transformace vyžadují znalost matematického vyjádření signálu či spektra. Pokud však zpracováváme naměřené hodnoty, tj. známe vzorky signálu či spektra z konečného intervalu, stojíme před problémem, jak určit spektrum ze vzorků signálu či signál ze vzorků spektra. K tomu účelu je využíváno numerické metody, která je známa jako Diskrétní Fourierova transformace (DFT). DFT je definována vztahy:

$$F_k = \sum_{i=0}^{N-1} x_i \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} k i\right), \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.3)$$

V roce 1965 J. W. Cooley a J. W. Tukey popsali velmi efektivní algoritmus výpočtu DFT, tzv. **rychlou Fourierovu transformaci (FFT – Fast Fourier Transform)**, který vyžaduje zpravidla pouze hodnoty N , které jsou rovny mocnině čísla 2, tj. 256, 512, atd. Tato podmínka neplatí obecně pro diskrétní Fourierovu transformaci, ale je to cena, kterou je nutné zaplatit za rychlost algoritmu FFT, která je, při frekvenční analýze, ve většině případů, mnohem důležitější [7; 9; 8; 10].

2.3 HODNOCENÍ STRUKTURY POVRCHU

Cílem uvedeného výzkumu nebylo komplexní hodnocení integrity broušeného povrchu. Z široké škály kritérií kvality povrchu byly vybrány 2D parametry struktury povrchu. Struktura povrchu je definována jako odchylka od ideálního funkčního povrchu, přičemž nezahrnuje náhodné vady na povrchu. Pro potřeby vyhodnocení byly využity nejběžnější charakteristiky, a to Ra - průměrná aritmetická úchylna posuzovaného povrchu a Rz – největší výška profilu.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 PRŮBĚH EXPERIMENTU

Na kryt vřetena brusky byl magneticky upnut trojosý akcelerometr CCLD akcelerometr typu Brüel&Kjaer 4525B za účelem zaznamenání průběhu vibrací. Mezi svěrák a magnetický lineární pojezd brusky byl uchycen trojosý piezoelektrický dynamometr KISTLER 9257B s nábojovým zesilovačem 5070A na zaznamenání průběhu silového zatížení. Osy obou měřicích systémů byly zorientovány souhlasně. Broušení bylo provedeno na vzorku vyrobeného ze slinutého karbidu křemíku SSiC (ROCAR[®] S1), na jeho čelní ploše o rozměrech 50 x 8,5 mm². Výrobní prostředky byly následující: broušící kotouč 6-2-2-175-20/2 B-XV D107 K100, výrobní stroj JUNKER BPH 320A, procesní kapalina ECOCOOL S-10 BAF-L s koncentrací 5 %. V prvním kroku byla vždy každá testovaná plocha přebroušena tak, aby byla zajištěna rovinnost vzorku vůči nástroji. První záběr byl proveden nesousledně, vyjiskřovací záběr potom sousledně. Vzhledem k tomu, že broušení bylo realizováno bez příčného posuvu stolu, byl po testování každý vzorek přebroušen celou plochou kotouče tak, aby se na funkční ploše nevytvořil zápich. V průběhu experimentu byly nastavovány všechny kombinace řezných podmínek tak, jak jsou uvedeny v

Tab. 3.1. Primárním cílem experimentu bylo zjistit míru vlivu řezných podmínek na výslednou kvalitu povrchu obrobku.

Tab. 3.1 Řezné podmínky při experimentu

Řezná rychlost vypočtená v_c [$m \cdot s^{-1}$]	Posuvová rychlost vypočtená v_f [$m \cdot min^{-1}$]	Pracovní (radiální) záběr a_e [mm]
$v_{c1} = 23,1$	$v_{f1} = 6,25$	$a_{e1} = 0,01$
$v_{c2} = 30,4$	$v_{f2} = 11,39$	$a_{e2} = 0,03$
	$v_{f3} = 16,84$	$a_{e3} = 0,05$
		$a_{e4} = 0,07$

Samotnému experimentu předcházelo testovací broušení. Jeho cílem bylo ověřit správné a funkční zapojení měřicích systémů a jejich nastavení, stejně jako kontrolu stroje a dalších součástí. Z důvodu křehkého charakteru obráběného materiálu došlo při upnutí testovacího vzorku do svěráku k jeho prasknutí. Proto byly pro upnutí použity tvrdé gumové podložky, které kompenzovaly nerovnoměrný tlak svěráku a umožnily tak pevné upnutí vzorků. Testovací broušení potvrdilo korektní zapojení

měřicí aparatury, každý z měřicích kanálů stahoval hodnoty podle nastavených parametrů. **Po testovacím broušení zůstaly na povrchu vzorku okem viditelné pravidelné čáry, které naznačovaly nestabilitu v procesu.** Jako první bylo pomocí číselníkového úchylkoměru ověřeno radiální házení broušícího kotouče. Měření prokázalo správné a dostatečně centrické osazení broušícího kotouče, stejně jako jeho dostatečnou ovalitu a vyloučilo broušící kotouč, nebo jeho uložení, jako primární zdroj chyby. Na základě výše uvedeného bylo zřejmé, že na přesné určení příčiny výskytu pravidelných čar je třeba realizovat větší množství pozorování a následně analyzovat získaná data. Tím byl rozšířen záměr experimentu nad rámec původního cíle. Celkem bylo testováno 24 kombinací rezných podmínek.

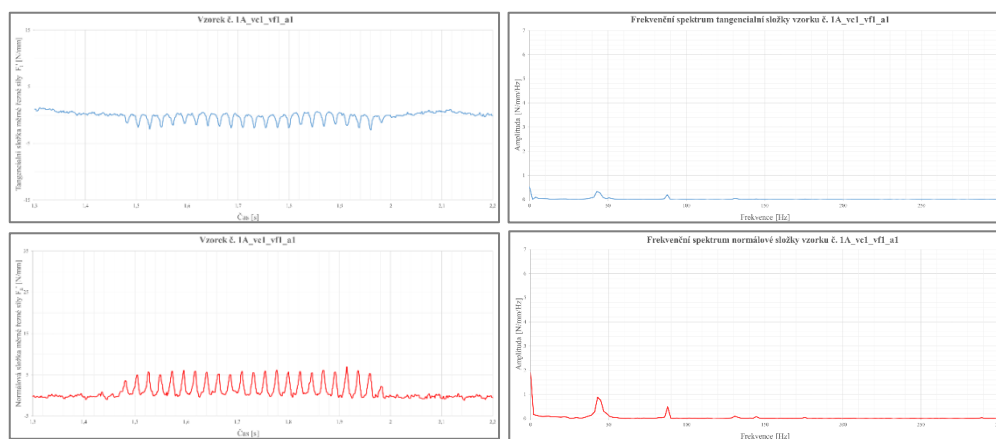
3.2 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

3.2.1 Analýza silového zatížení

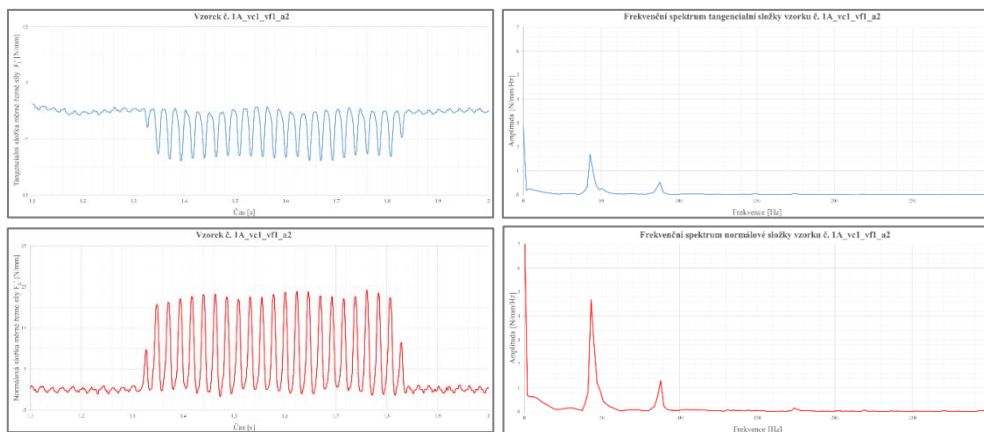
Pomocí tříosého dynamometru bylo pozorováno působení složek řezné síly - tangenciální, axiální a normálové. Výsledky byly zpracovány pomocí programu MS Excel do podoby grafické závislosti síly na čase. Následně byly z grafů odečteny číselné hodnoty popisující silové působení v procesu broušení. Na vyjádření silového zatížení byla použita **měrná řezná síla**, která je vztažená na 1mm šířky broušení.

Vliv hloubky záběru na silové zatížení

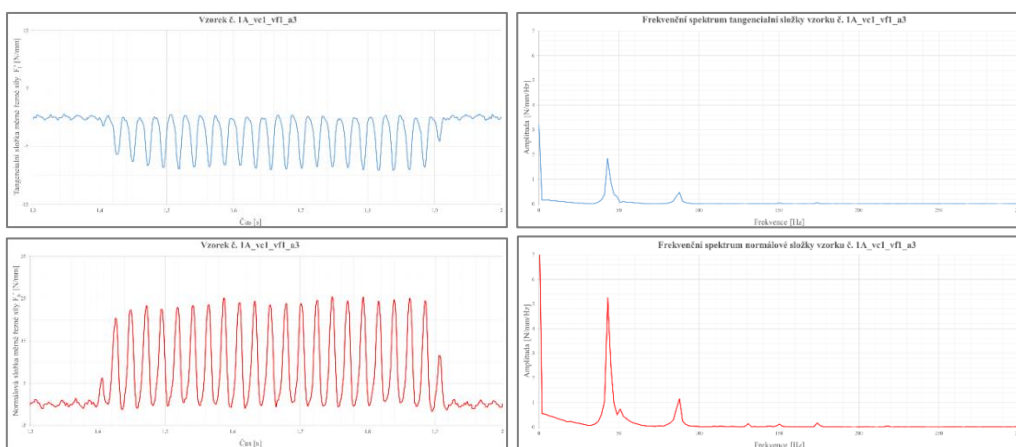
Na obrázcích *Obr. 3.1* až *Obr. 3.4* je zobrazen průběh jednotlivých složek řezné síly při změně hloubky pracovního záběru a_{e1} až a_{e4} na vzorku **1A_vc1_vf1** ($v_{c1} = 23,1$ m/s, $v_{f1} = 6,25$ m/min).



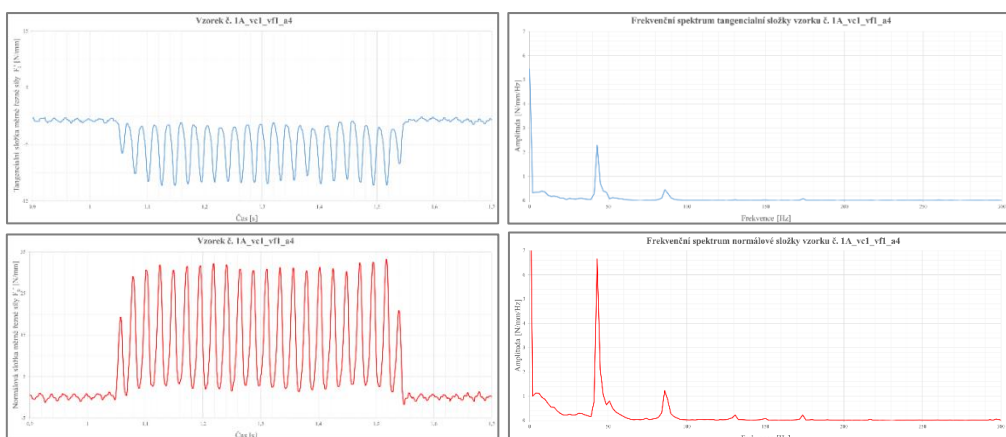
Obr. 3.1 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e1}=0,01$ mm - vzorek 1A_vc1_vf1



Obr. 3.2 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e2}=0,03$ mm - vzorek 1A_vc1_vf1



Obr. 3.3 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e3}=0,05$ mm - vzorek 1A_vc1_vf1

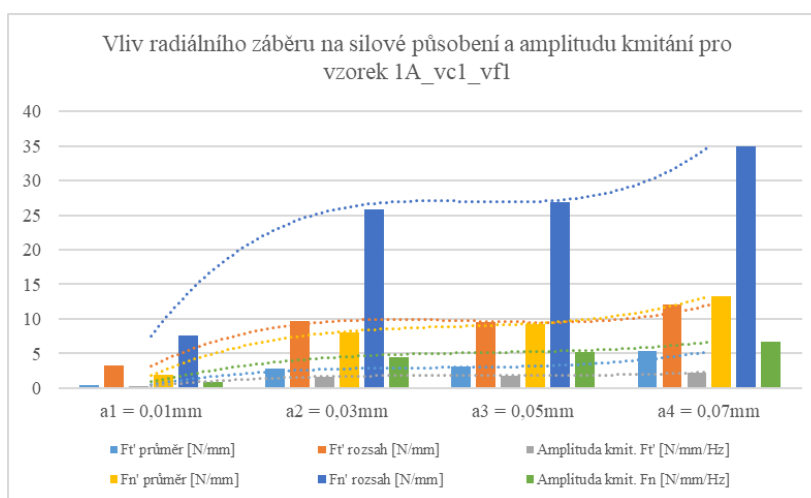


Obr. 3.4 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e3}=0,07$ mm - vzorek 1A_vc1_vf1

Číselné vyjádření velikosti působící složky řezné síly, frekvence zaznamenaného kmitání a její příslušující amplitudy je v Tab. 3.2. Odpovídající graf je na Obr. 3.5.

Tab. 3.2 Hodnoty řezné síly, frekvence a amplitudy frekvence při změně záběru-
vzorek 1A

	a1 = 0,01mm	a2 = 0,03mm	a3 = 0,05mm	a4 = 0,07mm
$F_{t'}$ průměr [N/mm]	0,5	2,78	3,14	5,32
$F_{t'}$ rozsah [N/mm]	3,22	9,69	9,55	12,05
Amplituda kmit. $F_{t'}$ [N/mm/Hz]	0,34	1,7	1,84	2,3
$F_{n'}$ průměr [N/mm]	1,86	8,09	9,26	13,34
$F_{n'}$ rozsah [N/mm]	7,59	25,9	26,93	34,93
Amplituda kmit. $F_{n'}$ [N/mm/Hz]	0,886	4,48	5,25	6,65
Frekvence kmitání $F_{t'}$ [Hz]	42,97	42,97	42,97	42,97
Frekvence kmitání $F_{n'}$ [Hz]	42,97	42,97	42,97	42,97



Obr. 3.5 Vliv radiálního záběru na silové působení a amplitudu kmitání
vzorek 1A_vc1_vf1

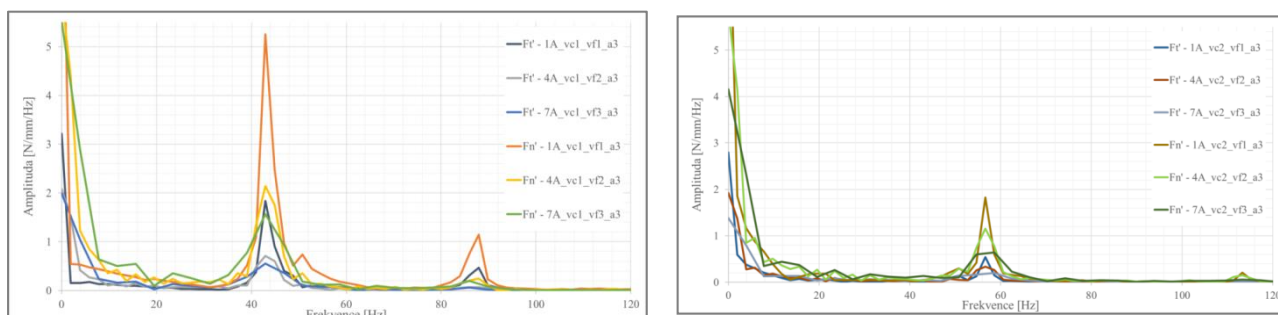
Vliv řezné a posuvové rychlosti na silové zatížení

Vliv posuvové rychlosti a řezné rychlosti na frekvenci a amplitudě předmětného kmitání zachycuje sumární graf na Obr. 3.6 zobrazující frekvenční spektrum řezných sil a z něj odvozený graf na Obr. 3.7. Ve všech případech byl radiální záběr neměnný, nastavený na hodnotu $a_{e3} = 0,05$ mm.

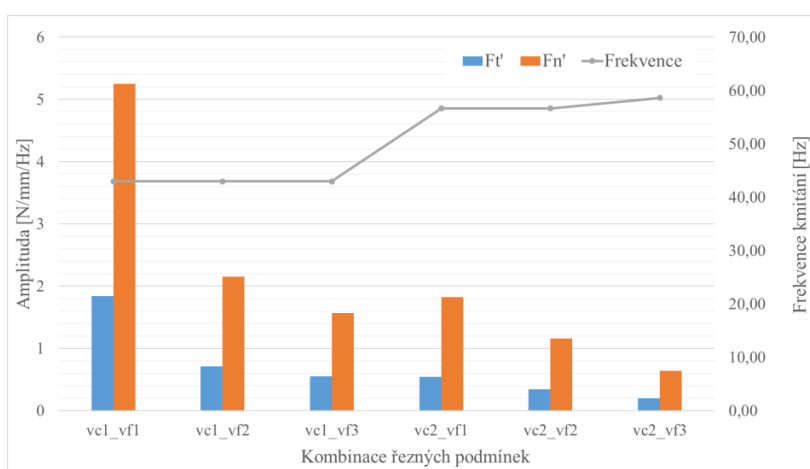
Z obrázku Obr. 3.6 je vidět, že existují dvě základní frekvence kmitání, přímo závislé na otáčkové frekvenci nástroje. Z výpočtů vyšlo, že pro první řeznou rychlost $v_{c1} = 23,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je frekvence kmitání při všech vzorcích rovná 42,97 Hz, pro druhou řeznou rychlost $v_{c2} = 30,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je frekvence kmitání při dvou vzorcích rovná 56,64 Hz a při jednom vzorku 58,59 Hz (viz také Obr. 3.7). Rozdíl zaznamenané frekvence lze připsat malému rozlišení DFT při analýze vzorku 7A_vc2_vf3_a3, která z důvodu krátkého trvání broušení obsahovala pouze 256 bodů a tomu příslušné rozlišení na úrovni 3,91 Hz. Při lepším rozlišení lze očekávat hodnotu frekvence kmitání identickou s ostatními vzorky, tedy 56,64 Hz. Získanou frekvenci kmitání můžeme označit jako nosnou nebo 1. harmonickou.

Z úhrnného průběhu spektra řezných sil (Obr. 3.6) je dobře viditelný i vliv kmitů na dvojnásobku nosné frekvence, tedy 2. harmonické. Pro řeznou rychlost v_{c1} je to

zaznamenaná hodnota 87,89 Hz, pro řeznou rychlost v_{c2} je to hodnota 113,28 Hz. Odchyly ve frekvencích ($2 \times 42,97 \neq 87,89$) jsou opět způsobeny nedostatečným rozlišením DFT a kumulativní chybou zaokrouhlování. Vliv vyšších harmonických je ale v tuto chvíli minoritní, představuje maximálně 22% úrovně nosné frekvence.



Obr. 3.6 Frekvenční spektra složek řezných sil pro v_{c1} a v_{c2}



Obr. 3.7 Vliv posuvové a řezné rychlosti na silové působení a amplitudu kmitání

3.2.2 Vibrační analýza

Grafické průběhy a jejich interpretace

V grafu na Obr. 3.8 jsou zachyceny průběhy pro vybraný testovaný vzorek 1A_vc1_vf1_a3.

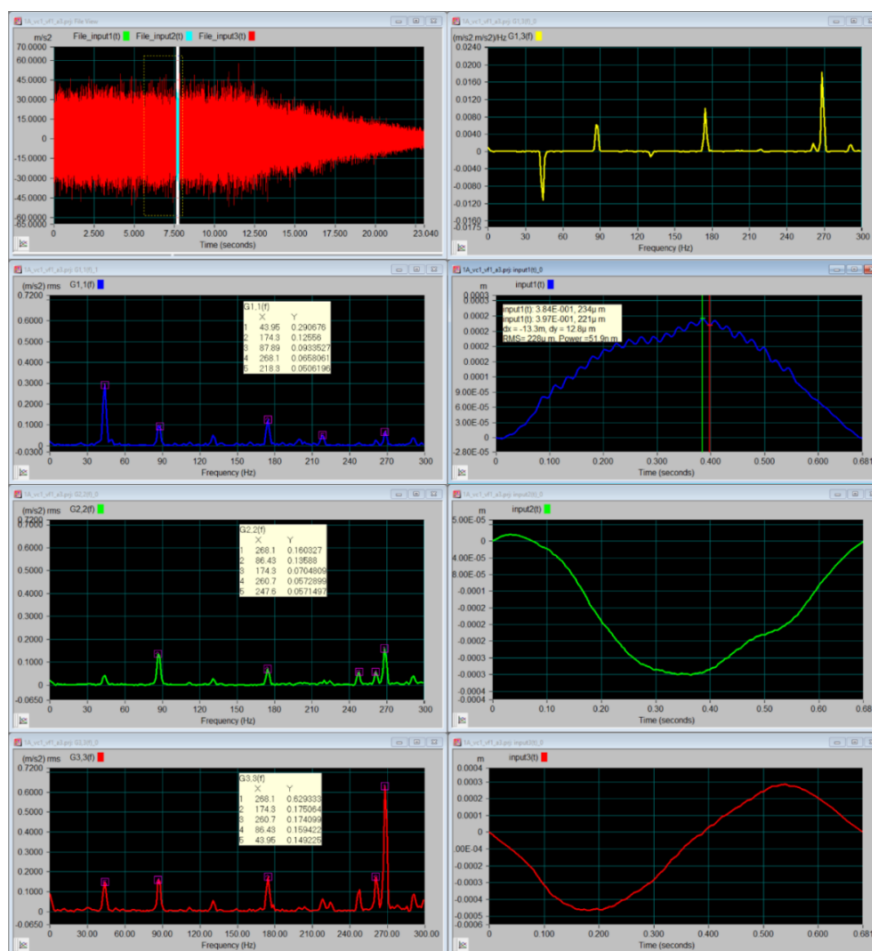
Ze vstupního signálu zobrazeného v časové oblasti byla vypočítána výkonová spektra ve frekvenční oblasti výhradně pro moment záběru. Záběr je lokalizován svíslou bílou plochou na grafu vstupního signálu (vlevo nahoře, červený průběh, označený jako *File View*). Na grafu G1,3(f) je žlutou barvou zobrazeno křížové spektrum výkonu mezi kanály 1 a 3, tedy mezi osou X a Z. Jde o jeden z hlavních indikátorů momentu záběru. Jelikož z fyzikální podstaty dojde v momentě záběru k mechanickému "propojení" vřetena stroje a lineárního pojezdu stolu, tak musí i síly a vibrace mezi těmito osami interagovat a navzájem na sebe působit. Z grafu je vidět velikost působení, jeho směr a frekvenci.

Průběh G1,1(f) je výkonovým spektrem prvního kanálu, tedy osy X, která představuje směr lineárního pojezdu stolu (graf vlevo). Dvojitou integrací zrychlení v čase byl získán graf dráhy input1(t) (vpravo). Ten reprezentuje mechanickou

výchylku lineárního pojezdu v čase. **Průběhy související s osou X jsou zobrazeny modrou barvou.** Stejným způsobem byly získány **průběhy pro osu Y (zelená)**, která představuje směr kolmý na rovinu otáčení nástroje a **osa Z (červená)**, která je orientována ve směru gravitace.

Pomocí automatických kurzorů, bylo ve výkonovém spektru signálu lokalizováno 5 frekvencí s největší energií. Z průběhů je zřejmé, že **největší energii v okolí otáčkové frekvence vykazuje osa X.** Pro analyzovaný vzorek 1A_vc1_vf1_a3 byla nominální otáčková frekvence $f_{s1} = 42,03$ Hz. Naměřená frekvence byla 43,95 Hz. Tuto nosnou frekvenci vykazovaly všechny vzorky příslušející řezné rychlosti v_{c1} . Rozdíl na úrovni 4,5% lze připisovat nedostatečnému rozlišení FFT analýzy a/nebo reálně rychlejším otáčkám vřetena. Nominální otáčky nástroje byly určeny z tabulky parametrů stroje, nebyly však přímo měřeny nebo jinak ověřeny. Z výsledků předchozí podkapitoly o působení řezných sil byla vypočtena frekvence 42,97 Hz. Výslednou nejistotu na úrovni $\pm 2\%$ hodnoty můžeme považovat za akceptovatelnou.

Průběhy zobrazující **spektrum osy Y** nevykazují žádné anomálie. Od této osy nepronikají do systému žádné podstatné vibrace, naopak přenášejí se do ní vibrace z ostatních směrů. Její dalšímu analyzování proto není věnován prostor.



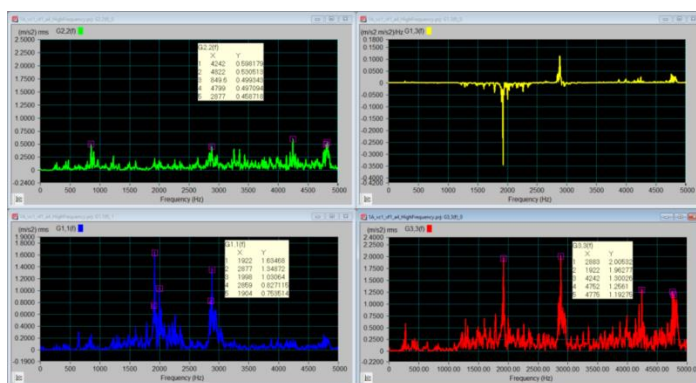
Obr. 3.8 Frekvenční spektra a průběhy dráhy v osách X, Y a Z pro vzorek 1A_vc1_vf1_a3

Akcelerometr, jako snímací prvek, je primárně vhodný k zachycování rychlých dějů, vibrací. Jeho použití jako snímače dráhy, tedy děje relativně pomalého, není optimální. K tomuto účelu je dostupné množství vhodnějších snímačů, které měří přímo údaj dráhy. V případě akcelerometru mají, kvůli integrálnímu charakteru výpočtu dráhy, výsledky takto získané tendenci divergence od skutečné hodnoty vzdálenosti. Pokud je ale analyzován časový úsek dostatečně krátký a je postačující relativní vyhodnocení dráhy, je možné získat údaj dostatečně přesný. Díky tomu **byl z grafu na Obr. 3.8 lokalizován hlavní zdroj vibrací a problému, který způsoboval vznik periodických čar na povrchu vzorků**. Z průběhu dráhy osy X je vidět kmitání na úrovni blízké otáčkové frekvenci. Toto kmitání představuje podélný pohyb vzorku. Pravděpodobným důvodem byl pružný charakter gumových podložek, které byly použity při upnutí křehkého vzorku do svěráku. To způsobovalo nerovnoměrný pohyb obráběného vzorku pod brusným kotoučem. Některá místa proto byla přebroušena více (když vzorek "couval") a některá méně (když byl vzorek akcelerován "dopředu"). To muselo nutně způsobovat nárůst a pokles řezných sil, které byly pozorovány pomocí dynamometru. Amplituda kmitání vzorku byla odečtena pomocí kurzorů a dosáhla hodnotu **12,8 μm** . Obdobné amplitudy jsou vidět i při ostatních vzorcích odpovídajících řezné rychlosti v_{c1} . Pro rychlost v_{c2} jsou zaznamenány kmity násobně menší a dosahují úroveň **2 - 4 μm** . To opět koresponduje s výsledky z analýzy silového působení, kdy bylo prokázáno, že při vyšších řezných rychlostech jsou řezné síly v systému menší.

Po zvýšení otáčkové rychlosti na hodnotu v_{c2} byly působící síly i vibrace menší a zároveň časy broušení kratší, což se negativně projevilo na kvalitě vibrační analýzy. Tendence chování systému ale zůstaly zachovány a viditelné. Nosná frekvence kmitů byla ve všech případech **55,66 Hz**.

Z uvedeného obrázku *Obr. 3.8* je viditelný **dominantní vliv frekvence v rozsahu 266 až 270 Hz**. Její energie je násobně vyšší než energie 1. harmonické složky otáčkové frekvence i všech vyšších harmonických. Její frekvence je navíc nezávislá na otáčkové frekvenci vřetena brusky. Z toho můžeme usuzovat, že jejím zdrojem je místo před převodovkou vřetena. Může indikovat opotřebenou část stroje (ložisko nebo ozubení) nebo nevyváhu rotující části stroje. Přesná lokalizace zdroje je nad rámec této práce. Její přítomnost ale třeba brát při posuzování dopadu v úvahu.

Jako poslední byla realizována širokofrekvenční analýza vibrací stroje. Ta zachycuje typický hluk obráběcího stroje v provozu a její výkonové a křížové frekvenční spektrum je zobrazeno na *Obr. 3.9*. Mezi chodem naprázdno a momentem záběru není zásadní rozdíl. Převládající jsou pokaždé vysoké frekvence na úrovni přibližně 1920 Hz, 2880 Hz a 4750 Hz. Takto vysoké frekvence nemají s výskytem čar na povrchu vzorků přímý vztah, proto se jejich analýzou není nutné dále zabývat. Kvalitativní posouzení stavu brusky pomocí vibrodiagnostiky představuje samostatnou výzvu, již by měla být věnována zvláštní pozornost.



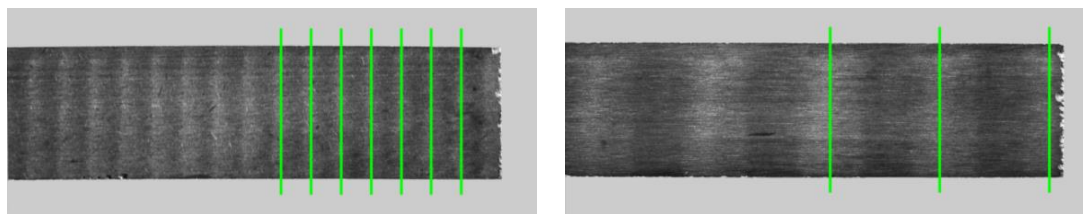
Obr. 3.9 Širokofrekvenční analýza vibrací stroje

3.2.3 Analýza struktury povrchu

Jedním z primárních cílů řešení disertační práce bylo odhalit vztah a porozumět vazbám mezi řeznými podmínkami a kvalitou povrchu keramických součástí, v tomto případě vzorků z karbidu křemíku.

Optické hodnocení kvality povrchu

Pomocí sestavy strojového vidění (fotoaparát - objektiv - osvětlení - snímaný objekt) a softwaru Halcon byly vyhodnoceny rozestupy periodických čar na jednotlivých vzorcích. Ze snímku vzorku je zřejmá přímá úměra mezi řeznými podmínkami a hustotou čar (reprezentativní snímky jsou uvedeny na Obr. 3.10). Do výběru byly zařazeny vzorky broušené bez změny hloubky záběru a_e , která nemá na frekvenci čar vliv. Hodnota hloubky záběru byla $a_e = 0,05 \text{ mm}$.



Vzorek 1A_vc2_vf1_a3

Vzorek 7A_vc1_vf1_a3

Obr. 3.10 Vlnitost povrchu v závislosti na změně řezných podmínek

Softwarem pro zpracování obrazu byly získány průměrné vzdálenosti periodických čar. Ze známých řezných podmínek a frekvence kmitání zjištěných při vibrační analýze byly vypočítány očekávané průměrné vzdálenosti čar. Jejich číselná reprezentace a vzájemné srovnání jsou v Tab. 3.3. Platí, že vzdálenost čar přímo úměrně roste s posuvovou rychlostí a přímo úměrně klesá s řeznou rychlostí.

Tab. 3.3 Číselná reprezentace vzdálenosti čar a jejich vzájemné srovnání

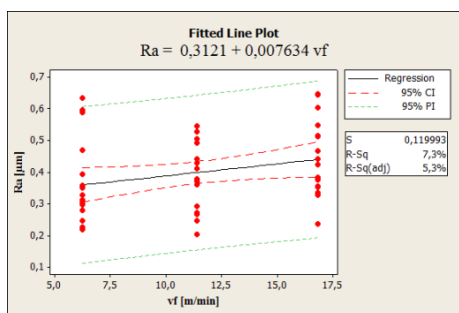
Vzorek	Vzdálenost	Vzdálenost	Odchylka
1 vc1 vf1	2,45	2,37	-3,4%
4 vc1 vf2	4,53	4,32	-4,9%
7 vc1 vf3	6,55	6,39	-2,5%
1 vc2 vf1	1,93	1,87	-3,2%
4 vc2 vf2	3,5	3,41	-2,6%
7 vc2 vf3	5,28	5,04	-4,8%

Hodnocení vlivu řezných podmínek na parametry drsnosti povrchu

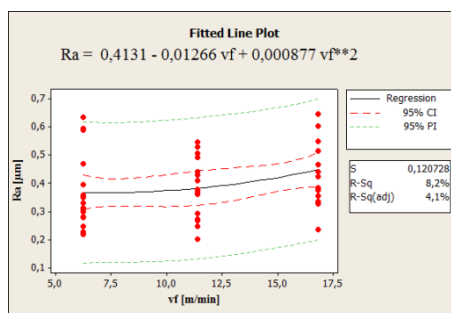
Měření parametrů drsnosti v axiálním směru bylo realizováno kontaktním profiloměrem Form Talysurf Intra. Pomocí softwaru Minitab 15 byly určeny závislosti mezi vstupními řeznými podmínkami a naměřenými hodnotami vybraných parametrů drsnosti povrchu vzorků. V prvním kroku vstupují do modelu všechny nezávisle proměnné.

Z výsledků lineární regrese plyne, že pouze 10,2 % hodnot lze uvedenou regrese funkcí popsat.

Grafický náhled výsledků regrese analýzy pro přímku a parabolu na Obr. 3.11 je uveden pro závislost posuvové rychlosti na střední aritmetické úchylice povrchu Ra. Korelační diagramy na Obr. 3.12 až Obr. 3.14 graficky ilustrují vzájemné vztahy mezi řeznými podmínkami a parametry drsnosti povrchu Ra a Rz.

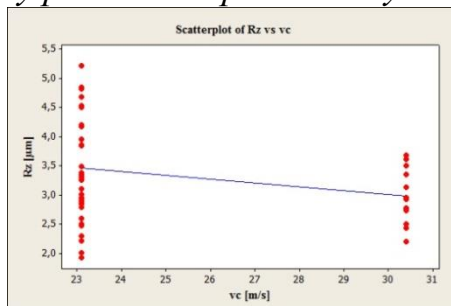
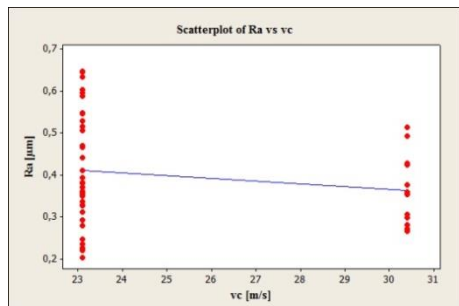


a) Výsledek lineární regrese analýzy.

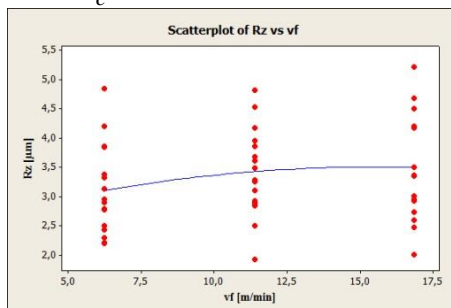
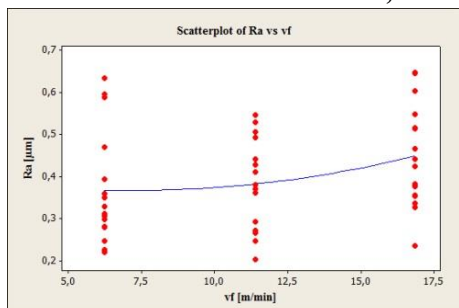


b) Výsledek kvadratické regrese analýzy.

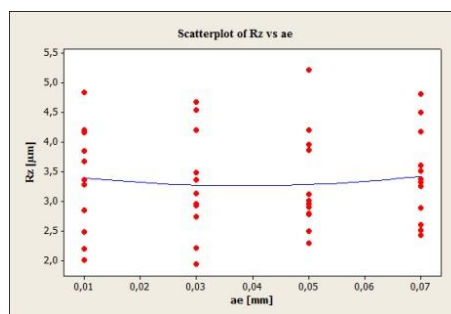
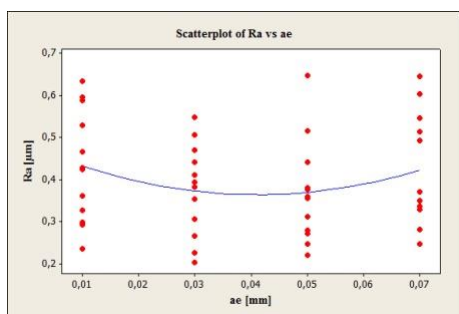
Obr. 3.11 Závislost střední aritmetické úchylice povrchu na posuvové rychlosti.



Obr. 3.12 Korelační diagram vzájemného vztahu mezi parametry drsnosti povrchu Ra, Rz a řeznou rychlostí v_c .



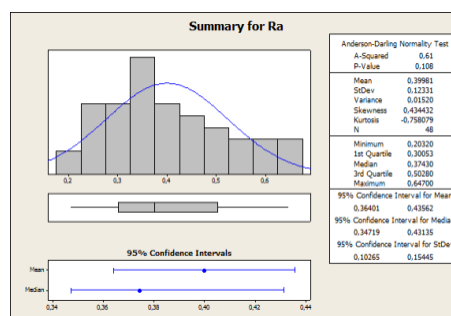
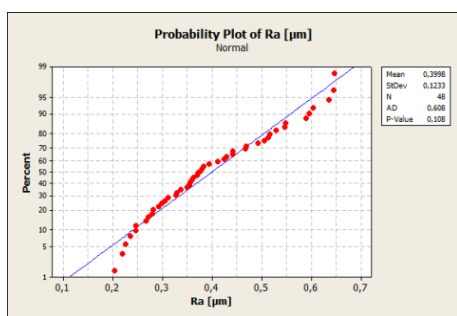
Obr. 3.13 Korelační diagram vzájemného vztahu mezi parametry drsnosti povrchu Ra, Rz a řeznou rychlostí v_f .



Obr. 3.14 Korelační diagram vzájemného vztahu mezi parametry drsnosti povrchu R_a , R_z a hloubkou záběru a_e .

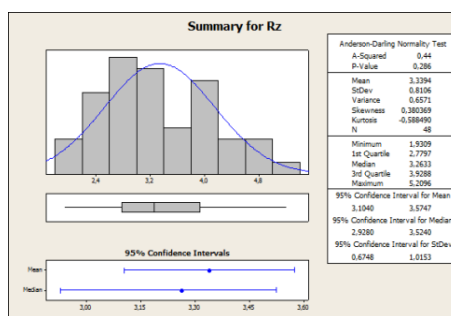
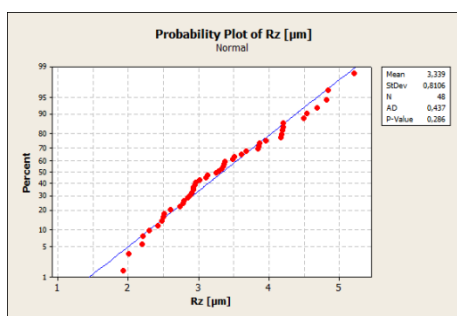
Pro řadu statistických metod je nutné, aby příslušná náhodná veličina, jejíž naměřené hodnoty máme v datovém souboru, měla normální rozdělení. V tomto případě se jedná o datové soubory naměřených hodnot R_a a R_z .

Normalita veličin R_a a R_z byla otestována tzv. „grafickou metodou“. Výstupy testů jsou znázorněny na Obr. 3.15 pro statistický soubor hodnot R_a a na obrázku Obr. 3.16 pro statistický soubor hodnot R_z .



Obr. 3.15 Test normality pro statistický soubor naměřených hodnot R_a .

Protože $p=0,108 > 0,05$, hypotézu o výběru z normálního rozdělení nezamítáme na hladině významnosti 0,05.



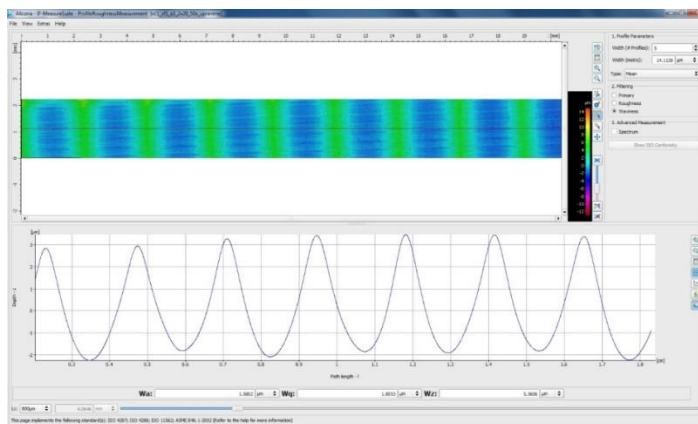
Obr. 3.16 Test normality pro statistický soubor naměřených hodnot R_z .

Protože $p = 0,286 > 0,05$, hypotézu o výběru z normálního rozdělení nezamítáme na hladině významnosti 0,05.

Přesto, že byly broušením dosaženy očekávané hodnoty parametrů R_a a R_z , obrobený povrch vykazuje značnou vlnitost. Tuto lze zdokumentovat pomocí bezkontaktní metody měření parametrů povrchu přístrojem **Alicona IFM G4**. Primárně bylo měření využito na vizuální zobrazení plochy povrchu v podobě

barevné mapy výšky a z ní vypočítaná vlnitost. Výsledky parametrů drsnosti Ra a Rz naměřené v axiálním směru byly srovnatelné s kontaktní metodou, proto nepředstavují žádný zásadní přínos a nejsou publikovány.

Pro vybraný vzorky je kvantitativní vyhodnocení vlnitosti vyobrazené na *Obr. 3.17*. Rozsah hodnot se pohyboval v rozmezí 2 až 10 μm . Drsnost byla nerovnoměrně superponována na profil vlnitosti, což byl jeden z hlavních důvodů nízké míry závislosti kvality povrchu na řezných podmínkách.



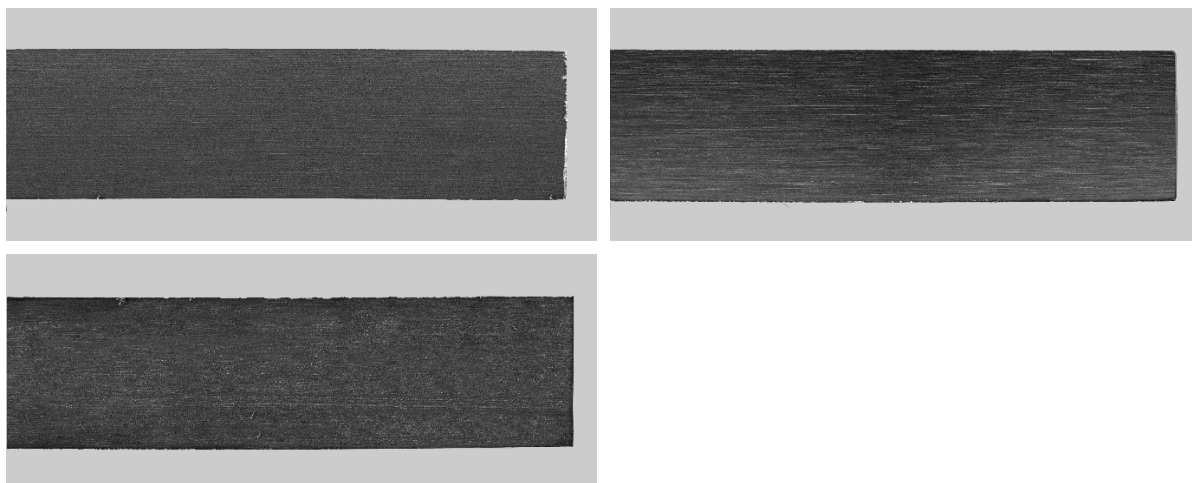
Obr. 3.17 Vyhodnocení vlnitosti povrchu vzorku 1A_vc1_vf1_a3

3.3 OPAKOVANÝ EXPERIMENT

Hlavním cílem opakovaného experimentu bylo validovat závěry vyvozené na základě jednotlivých analýz prvního experimentu a tím eliminovat výskyt periodických čar na povrchu vzorků, které měly negativní vliv na samotnou kvalitu povrchu i na možnost sledovat vliv vybraných řezných podmínek na výslednou drsnost povrchu. Opakovaný experiment byl realizován při zachování všech podmínek prvního experimentu (stav experimentální soustavy), kromě způsobu upnutí vzorků. Gumové podložky byly zaměněny za plastové čelisti, které se pomocí magnetu uchycují do čelistí svěráku. Ověření závěrů prvního experimentu bylo realizováno na 3 vzorcích. Cílem bylo s nejmenším možným počtem vzorků validovat různé kombinace řezných podmínek

Optické hodnocení kvality povrchu

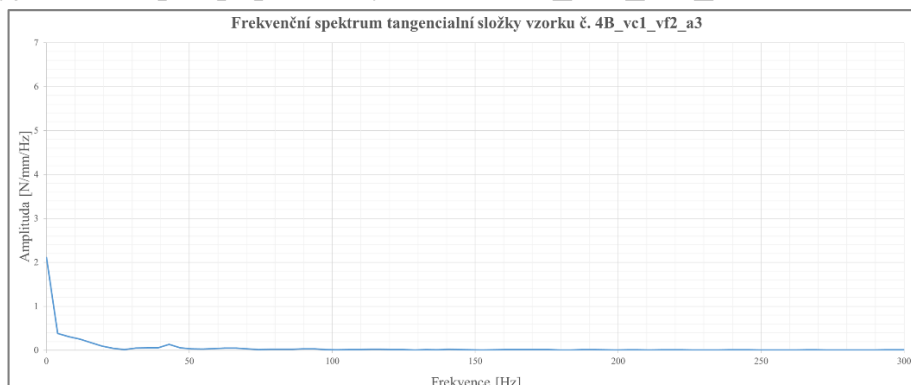
Subjektivně vnímaná kvalita povrchu byla bez viditelných čar při všech vzorcích (*Obr. 3.18*). Vlevo nahoře je zachycena vzorek 1B_vc1_vf1_a1, vlevo dole vzorek 4B_vc1_vf2_a3 a vpravo nahoře je vzorek 7B_vc1_vf3_a4. Žádné zásadní ani systematické vady se na povrchu nevyskytovaly.



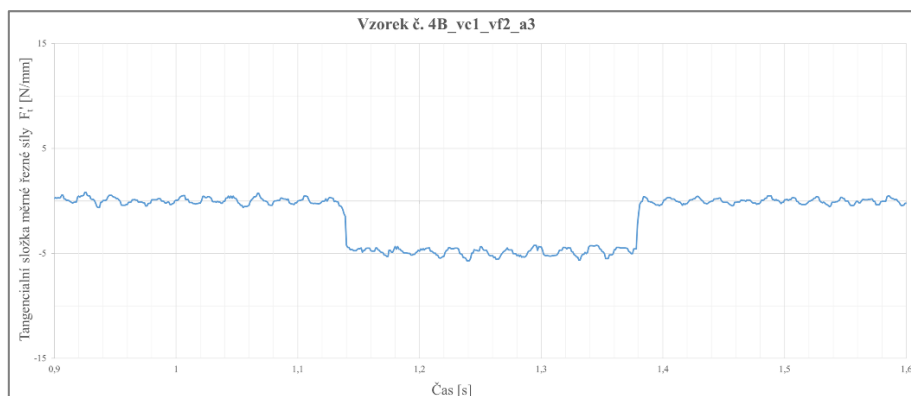
Obr. 3.18 Povrch tří vzorků po opakovaném testování

Hodnocení procesu broušení z pohledu silového zatížení

Frekvenční analýzou nasnímaných průběhů silového působení bylo zjištěno, že v systému brusky je stále přítomné kmitání na úrovni otáčkové frekvence nástroje. Toto kmitání je zaznamenáno i mimo moment záběru. Jeho střední hodnota je ale v čase ustálená a do spektra přispívá jen malou, i když měřitelnou energií. Jeho původ můžeme připisovat nedokonalému vyvážení rotačních hmot na konci vřetena. Na obrázku Obr. 3.19 a Obr. 3.20 je detailně zobrazen moment záběru i s číselným vyjádřením pro popisovaný vzorek 4B_vc1_vf2_a3.

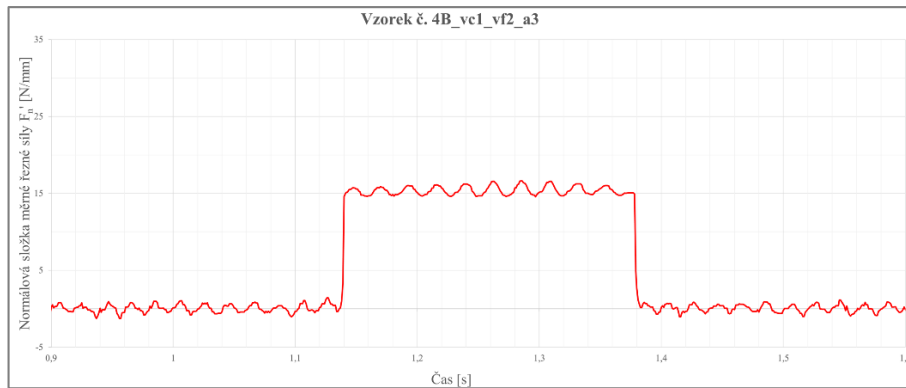


Frekvence kmit. [Hz]	42,97
Amplituda kmit. [N/mm/Hz]	0,13
Rozlišení DFT [Hz]	3,91

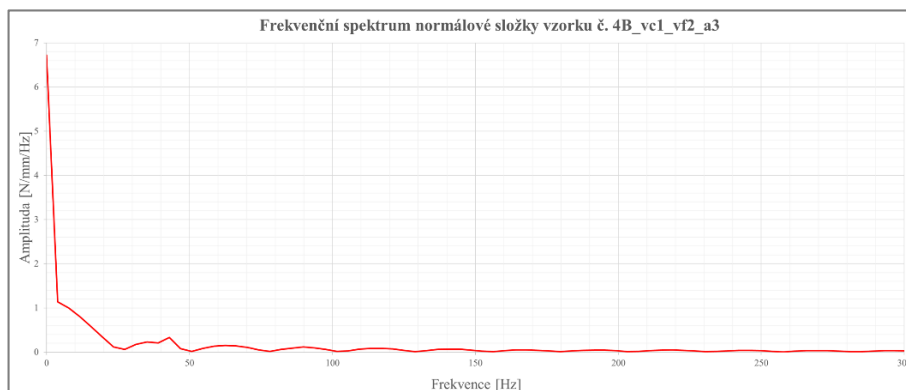


Průměrná F [N/mm]	4,91
Minimální F [N/mm]	-5,70
Maximální F [N/mm]	4,25
Rozsah F [N/mm]	1,45

Obr. 3.19 Tangenciální složka měrné řezné síly v časové a frekvenční oblasti



Průměrná F [N/mm]	15,33
Minimální F [N/mm]	14,60
Maximální F [N/mm]	15,33
Rozsah F [N/mm]	1,97



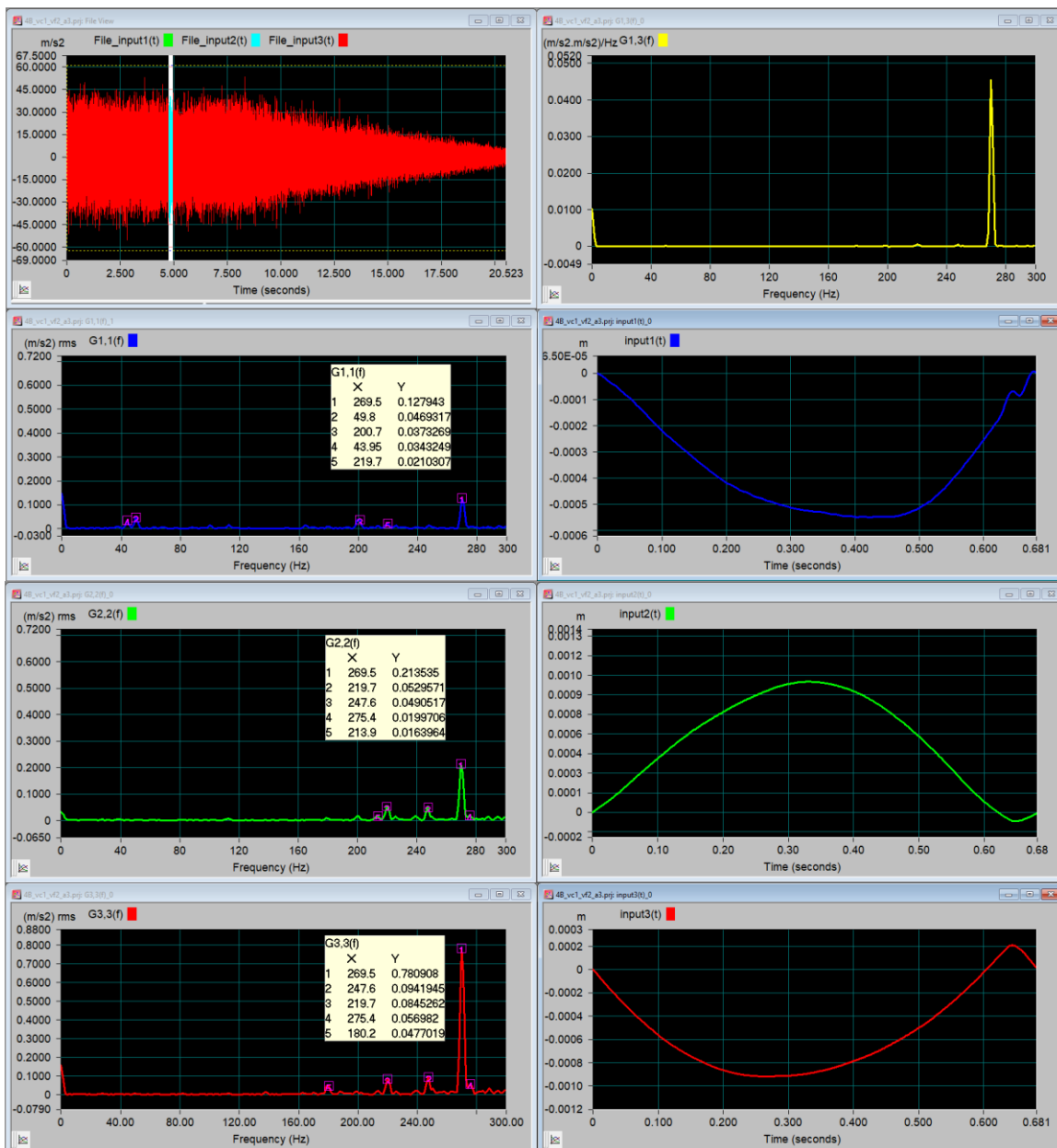
Frekvence kmit. [Hz]	42,97
Amplituda kmit. [N/mm/Hz]	0,33
Rozlišení DFT [Hz]	3,91

Obr. 3.20 Normálová složka měrné řezné síly v časové a frekvenční oblasti

Hodnocení procesu broušení z pohledu vibrací

Základní analýzou vibrací získaných pomocí akcelerometru bylo i při opakovaném měření prokázáno, že maximální hodnoty vibrací (frekvence s největší energií) se nacházejí v oblasti kolem 1900 Hz a 2900 Hz, které jsou vlastní chodu brusky. Změna upnutí vzorku nebyla při širokfrekvenční analýze zaznamenána.

Při detailním zkoumání oblasti 0 až 300 Hz byl, v souladu s daty z dynamometru, zaznamenán výrazný pokles výkonu otáčkové frekvence, její přítomnost je ale stále viditelná. Téměř na hranici měřitelnosti poklesly i vyšší harmonické otáčkové frekvence a také několik parazitních frekvencí, které se při prvním měření v nízkofrekvenčním pásmu objevovaly. Stále však platí, že v pásmu do 300 Hz má bez ohledu na řezné podmínky největší vliv frekvence na úrovni 266 - 270 Hz, působící ve směru osy Z, která násobně převyšuje ostatní složky a v momentě záběru se mechanicky přenáší i do zbývajících směrů. Z časového průběhu dráhy, získané dvojitou integrací zrychlení, bylo změnou upnutí odstraněno zvlnění, pozorované při prvním broušení. Průběhy popisující vibrace při obrábění vzorku **4B_vc1_vf2_a3** jsou na obrázku Obr. 3.21.



Obr. 3.21 Frekvenční spektra a průběhy dráhy v osách X, Y a Z pro vzorek 4B_vc1_vf2_a3

Kvalita povrchu z pohledu jeho drsnosti

Na vzorcích opakovaného experimentu byly změřeny hodnoty drsnosti povrchu Ra a Rz pomocí kontaktního profiloměru. Měření v rámci vzorku bylo realizováno na 5 místech, vždy v axiálním směru. Ze získaných náměrů, pro jejich malou četnost, není možné vyhodnotit přímý vliv řezných podmínek na sledované parametry kvality povrchu, ale výsledky naznačují dostatečnou stabilitu, bez zásadního vlivu vlnitosti povrchu nebo místa měření. Hodnoty dosahují očekávané úroveň. Pozorovatelný základní trend naplňuje očekávání, kdy se zvyšující se posuvovou rychlostí a hloubkou záběru hodnoty Ra a Rz rostou.

3.4 DISKUSE VÝSLEDKŮ A PERSPEKTIVA DALŠÍCH PRACÍ

Výsledky získané experimentálně potvrzují skutečnosti v souladu s [11]. Konvenční výrobní prostředky, použité pro uvedený experiment nejsou, v různých ohledech, optimální pro obrábění součástí z keramického materiálu. Jednotlivé součásti technologické soustavy by měly být přizpůsobeny tak, aby byl zmírněn (případně odstraněn) dopad nestability procesu na výsledný povrch součásti (zkušební vzorku).

Obecně lze konstatovat, že keramické díly je vhodné opracovávat na strojích, které jsou k tomuto účelu již konstrukčně uzpůsobeny. Rám stroje i všechny jeho součásti (vřeteno, pojezdy) musí mít výjimečně vysokou statickou i dynamickou tuhost. Testování prokázalo, že vliv vibrací různého charakteru má zásadní vliv na povrch součástí z keramiky, což je z hlediska materiálových vlastností keramiky kritické pro její celkovou pevnost, respektive pevnost keramických součástí. V souvislosti s tím, musí být technologická soustava osazena systémy pro monitorování celého procesu broušení, a to trvale. V průběhu experimentu byly za účelem monitorování procesu (vibrace, síly) využity externí senzory mobilního charakteru, vzhledem k tomu, že stroj BHP320A není standardně takovými systémy vybaven. Soustavné sledování a vyhodnocování procesu broušení umožní v každém okamžiku zasáhnout do procesu a předejít tak případnému poškození povrchu dílu. Jak bylo uvedeno v teoretické části, pro výkonné obrábění keramiky je vhodné hloubkové broušení (s velkou hloubkou záběru), často v kombinaci s vysokými reznými rychlostmi a také „rázové broušení“, při kterém se využívá vysoká rychlost posuvu. Stroje musí být schopny zvládnout tyto náročné podmínky úběru celého přídávku v jednom kroku a musí být schopny kontrolovat zrychlování a zpomalování vysokého posuvu bez nadměrných vibrací. Stroj BPH320A je konvenčního charakteru a není zcela možné na něm vytvořit podmínky odpovídající potřebám broušení keramických vzorků. Pro další testování je vhodné buď do možné úrovně adaptovat technologické podmínky broušení a měření, nebo přímo změnit místo testování.

Jak se ukázalo během experimentu, je zcela zásadní zvolit vhodný způsob upnutí keramických součástí. Během experimentu byl k dispozici strojní svěrák. První předpoklad, že čelisti svěráku jsou dostatečně rovné, nebyl potvrzen při testovacím broušení, proto byly do čelistí vloženy tvrdé gumové podložky. Tento krok se ukázal být fatální pro další testování, protože nedostatečná tuhost tohoto uložení způsobila kmitání v místě upnutí. Toto kmitání bylo detekováno jednak vizuálně (přítomností vlnitosti na povrchu vzorku) a pomocí aparatury na měření vibrací bylo následně určen a potvrzen tento zdroj. Vzhledem k tomu, že jiný typ upínače nemohl být využit, bylo upnutí adaptováno pro potřeby validace předpokládaného zdroje vlnitosti. Čelisti svěráku byly opatřeny plastovými podložkami, které snížili možnost poškození vzorku v důsledku lomu, ale zároveň zabezpečily dostatečně tuhé uložení. Opakované přeměření na třech vzorcích potvrdilo, že nová volba upnutí byla vhodná pro potřeby dalšího testování v laboratořích ÚST. Dalším studiem této problematiky bylo zjištěno, že právě tato metoda je jedním z vhodných

způsobů upnutí rovinných keramických obrobků. Obecné požadavky na upínání keramiky tedy jsou:

- vyhnout se lokálnímu namáhání dílů buď nedostatečnou rovnoběžností upínače, nebo přítomností vrcholků, které vyvolají lokální tlak na součást,
- zabezpečit vysoké upínací síly, v souladu s první podmínkou,
- dosáhnout vysoké přesnosti upnutí s cílem zabezpečit požadované tolerance dílů,
- snadné ovládání, případně automatizace,
- dostatečná flexibilita, zejména pro složité dílce.

Na rozdíl od kovů je keramika omezeně deformována pružně až do porušení lomem a většina keramických materiálů není magnetická. Proto není možné u keramiky počítat s magnetickým způsobem upínání (případně je nutné ho doplnit o další způsob fixování obrobku). Pro vnější a vnitřní broušení do kulata se nejčastěji užívají vícečelistová sklíčidla. Obrobky s rovnoběžnými stěnami se upínají do svěráku, jehož čelisti musí být povlakovány měkčím materiálem, jako například hliník nebo plast. Mezi vhodné způsoby upínání patří také vakuové upínání, nebo upínání přimražením.

Výsledky z jednotlivých měřicích zařízení použitých při testování jsou analyzovány v textu. Obecně potvrzují skutečnosti uvedené výše ke způsobu upnutí vzorků (nevhodné upnutí vzorků) a jsou ovlivněny kmitáním vzorku v průběhu broušení. Není tedy možné z nich vyvozovat další závěry týkající se vlivu řezných podmínek na proces a parametry struktury povrchu. Hodnoty parametrů Ra a Rz jsou na očekávatelné úrovni, ale byly ovlivněny nejen vstupními řeznými podmínkami, ale také místem měření na vzorku. První série testovaných vzorků tedy nemohla být využita k realizaci vytyčených cílů.

Opakované ověřovací testování již poskytlo výrazně lepší výsledky, které jsou v souladu s původní hypotézou, že se zvyšující se posuvovou rychlostí a hloubkou záběru hodnoty Ra a Rz rostou a klesají se zvýšením řezné rychlosti. Jednotlivé hodnoty parametrů jsou si ovšem velmi blízké a i tento výsledek potvrzuje, že drsnost povrchu není u SiC na změnu řezných podmínek tak citlivá jako u kovů. Tyto výsledky se již zdají být důvěryhodné a na jejich základě je možné vystavět další experimentální práce.

Vzhledem k tomu, že primární cíl práce nebyl zcela naplněn, je nutné, na základě aktuálních zjištění, opakovat experiment v plném rozsahu. Je třeba zvážit, do jaké míry je možné laboratorní podmínky adaptovat pro potřeby testování keramických materiálů. Prvním krokem a vhodným doporučením dalšího postupu by měla být vibrační diagnostika stroje BPH320A. Z výsledků vibrační analýzy vyplývá, že se ve spektru objevují frekvence, které je třeba lokalizovat a posoudit jejich vliv na proces broušení. Jedná se zejména o frekvenci 266 až 270 Hz v oblasti nízkých frekvencí., viz popis ve výsledcích a vysoké nosné frekvence na úrovni přibližně 1920 Hz, 2880 Hz a 4750 Hz. Z aktuálních dat není možné zdroje identifikovat, je na místě provést samostatné testování.

Výsledky testování dále naznačují, že mezi nominálními otáčkami stroje (které jsou dány dokumentací ke stroji BPH320A) a skutečnými změřenými otáčkami může být rozdíl. Pro analyzovaný vzorek *IA_vc1_vf1_a3* byla vypočtena nominální otáčková frekvence $f_{s1}=42,03$ Hz. Naměřená frekvence byla 43,95 Hz. Tuto nosnou frekvenci vykazovaly všechny vzorky příslušející řezné rychlosti v_{c1} . Rozdíl na úrovni 4,5% lze připisovat nedostatečnému rozlišení FFT analýzy a/nebo reálně rychlejšími otáčkám vřetena, které nebyly žádným způsobem ověřeny.

Problém týkající se upínání vzorků byl vyřešen použitím plastových čelisti a zdá se tedy vhodné, tento způsob upínání zachovat.

Dále je třeba zvážit fakt, že brousicí kotouč nebyl během testování orovnáván. Orovňávání, případně i vyvažování diamantových brousicích kotoučů není jednoduchou záležitostí. Brusky by měly být vybaveny vestavěným zařízením pro vyvažování během procesu a u diamantového kotouče by měla být možnost opravit tvar i provést ostření. Laboratoř není zatím vybavena vhodným zařízením, proto je nutné zvážit jak tvar kotouče zachovávat.

Monitoring procesu je možné dále provádět pomocí profesionálních přístrojů Kistler a Brüel & Kjær, které jsou na ÚST k dispozici a patří ke špičce ve svém oboru.

Vzhledem k technologickým možnostem stroje není možné příliš změnit testovací řezné podmínky. Je ovšem možné je, na základě původních výsledků, předem vhodně naplánovat, například pomocí nástroje *plánování experimentu DOE*. Je také nutné zvýšit četnost výsledků a provést opakování tak, aby bylo další statistické zpracování relevantní.

Cíle dalších prací je vhodné rozšířit o komplexní zhodnocení integrity povrchu zkoušených vzorků po broušení. Vzhledem k materiálovým vlastnostem keramiky a jejich náchylnosti k tvorbě trhlin je vhodné přítomnost, druh a počet trhlin po broušení vyhodnotit na rastrovacím elektronovém mikroskopu. Zhodnocení povrchových a podpovrchových trhlin v závislosti na kmitání vzorku, je vhodné realizovat i u původních vzorků.

ZÁVĚR

Teoretická část práce rozsáhle mapuje aktuální stav poznání v oblasti metod obrábění keramiky. Dále je podrobně popsána technologie broušení keramiky diamantovými brousicími kotouči. Stěžejní informace týkající se broušení keramiky byly nastudovány a vybrány z mnoha rozsáhlých, věrohodných zdrojů, pečlivě sestaveny a vyloženy. Vznikl tak soubor vědecko-technologických informací, které je možné široce využít. Použity byly zejména zahraniční publikace. V tuzemských podmínkách je možné jen velmi omezeně nalézt takto ucelený přehled týkající se uvedené problematiky. Vzhledem k dalším cílům práce byla zpracována též témata měření řezných sil, vibrací a parametrů struktury povrchu při broušení.

Experimentální část práce od svého začátku poukazovala na značné rozdíly v přístupu mezi obráběním keramických a klasických, převážně kovových, materiálů. Jelikož materiál SiC je nemagnetický, k upnutí do stroje byl použit standardní strojní

svěrák. Z důvodu křehkého charakteru obráběného materiálu ale došlo při upnutí testovacího vzorku do svěráku k jeho prasknutí, a to opakovaně. Pravděpodobnou příčinou byly nedokonalé upínací plochy svěráku, jejichž nedostatečná vzájemná rovnoběžnost a tím vznikající napětí způsobily destrukci křehkého keramického vzorku. Proto byly pro upnutí použity tvrdé gumové podložky, které kompenzovaly nerovnoměrný tlak svěráku a umožnily tak dostatečně pevné upnutí vzorků. Při broušení se na povrchu vzorků objevovaly kontrastní, okem viditelné, periodické čáry, které naznačovaly systematickou chybu v procesu a přítomnost značných vibrací. Speciální pozornost proto byla věnována kontrole tvaru a upnutí, resp. vyvážení broušícího kotouče. Měření vyloučilo nástroj jako zdroj chyby. Nad rámec předpokládaných cílů se s těžší částí experimentální práce stala problematika přítomnosti vibrací v procesu broušení. Při studiu souvisejících děl, řešení a analýze výsledků se ukázalo, že právě toto téma je pro broušení keramiky zásadní a není mu ve světovém měřítku věnováno příliš pozornosti.

Při analýze silového zatížení byl při všech dalších vzorcích pozorován periodický charakter působící řezné síly s velkou amplitudy vibrací. Bylo prokázáno, že působení axiální složky řezné síly je prakticky nulové, což korespondovalo s očekávaným charakterem procesu broušení. Působící řezná síla rostla s hloubkou radiálního záběru. Amplituda kmitání řezné síly rostla úměrně s hloubkou záběru jen po určité hodnotu, při které došlo k nasycení systému, a dále se amplituda kmitů nezvyšovala nebo rostla jen velmi pomalu. Z další analýzy silového působení byla určena frekvence kmitání. Bylo zjištěno, že frekvence kmitání je přímo úměrná řezné rychlosti a že amplituda kmitání je nepřímo úměrná posuvové rychlosti. Stejně nepřímo úměrný je i vztah mezi řeznou rychlostí a amplitudou kmitání. Z uvedeného plyne, že čím vyšší jsou pracovní rychlosti (otáčky nástroje a rychlost lineárního posunu stolu brusky), a čím menší je radiální záběr, tím je intenzita problematického kmitání menší. Z analýzy silového působení v procesu broušení ale nebylo možné jednoznačně identifikovat zdroj kmitání. Frekvence kmitání řezné síly byla při všech měřeních blízká otáčkové frekvenci nástroje.

Na základě zjištění z analýzy silového působení byla vibrační analýza zaměřena na nízkofrekvenční oblast, řádově do 300Hz. Byla potvrzena přítomnost výrazného kmitání blízkého otáčkové frekvenci nástroje a jeho vyšších harmonických složek. Transformací záznamu akcelerace vibraci na dráhu bylo možné určit, že zdrojem kmitání je upnutí vzorků přes přídavné gumové podložky. Ty umožňovaly malý, ale měřitelný pohyb vzorků v podélném směru, v důsledku čehož docházelo k periodické změně posuvové rychlosti a tím vzniku čar a vlnitosti na povrchu vzorků.

Výsledky regresní analýzy vykazovaly velmi nízký koeficient determinace a naznačovaly tak nezávislost pozorovaných parametrů drsnosti povrchu na řezných podmínkách. Hodnocení kvality povrchu však bylo zásadně ovlivněno přítomností vibrací v procesu broušení a malou objektivitou kontaktní metody měření drsnosti.

Opakovaný experiment potvrdil na menším počtu vzorků závěry hlavního experimentu. Gumové podložky byly zaměněny za plastové čelisti. Výskyt periodických čar na povrchu byl zcela potlačen. Ze získaných náměrů, pro jejich

malou četnost, nebylo možné vyhodnotit přímý vliv řezných podmínek na sledované parametry kvality povrchu, ale výsledky naznačují dostatečnou stabilitu, bez zásadního vlivu vlnitosti povrchu nebo místa měření. Pozorovatelný základní trend naplňuje očekávání, kdy se zvyšující se posuvovou rychlostí a hloubkou záběru hodnoty Ra a Rz rostou.

Komplexní pochopení procesu broušení keramických materiálů má jednoznačně interdisciplinární charakter a vyžaduje výzkum a poznání z oboru strojního obrábění, mechaniky, metrologie a zpracování signálu. Ukázalo se, že úskalí, které jsou při obrábění klasických materiálů téměř úplně zvládnuty, představují při obrábění keramiky nové výzvy. Dobrým příkladem je například i fakt, že v odborné literatuře zaměřené na efektivní obrábění keramických materiálů je zpravidla problematice upínání věnován jen marginální prostor. Přitom přítomnost vibrací v procesu broušení má zásadní vliv na kvalitu povrchu keramických dílů. Proto je nejdříve nutné uvést technologický systém do stabilního stavu a následně provádět testování, jehož výsledky relevantně popisují vliv technologických podmínek na integritu povrchu.

V závěrečné části práce byl relativně velký prostor věnován diskuzi výsledků, kde je zahrnutá rovněž perspektiva budoucích experimentálních prací a také z ní vyplývá význam výsledků vzhledem k realizaci v praxi a praktická doporučení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 8072042483.
- [2] MACA, K. *Slinování pokročilých keramických materiálů: Sintering of advanced ceramic materials : teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru Materiálové vědy a inženýrství*. Brno: VUTIU, 2010. ISBN 9788021440999.
- [3] MISHRA, V. K. a K. SALONITIS. Empirical Estimation of Grinding Specific Forces and Energy Based on a Modified Werner Grinding Model. *Procedia CIRP* [online]. 2013, 8, 287-292 [cit. 2018-07-20]. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.104. ISSN 22128271. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827113003818>
- [4] MALKIN, S. a Changsheng GUO. *Grinding technology: theory and application of machining with abrasives*. 2nd ed. New York: Industrial Press, 2008. ISBN 9780831132477.
- [5] MARINESCU, I. D. *Handbook of machining with grinding wheels*. Second edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an Informa business, 2016. ISBN 9781482206685.
- [6] CHVOJKA, P. Vibrační diagnostikou ke zlepšení kvality obrobeného povrchu. *Řízení a údržba průmyslového podniku* [online]. Český Těšín: Trade Media International, 2017 [cit. 2018-04-22]. ISSN 1803-4535. Dostupné z: [http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews\[tt_news\]=7373&cHash=1529820f33&type=98](http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=7373&cHash=1529820f33&type=98)
- [7] BORTLÍK, P. *Vibrodiagnostický systém*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Beneš, PhD.
- [8] TŮMA, J. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901936-1-7.
- [9] ŽIVOTSKÝ, P. *Chybové frekvence ložisek*. Brno, 2008. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Daniel Zuth.
- [10] Fourierova transformace. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2018-08-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Fourierova_transformace
- [11] MARINESCU, I., T. DOI a E. UHLMANN. *Handbook of ceramics grinding and polishing*. 2nd. Boston, MA: Elsevier, 2014. ISBN 9781455778584.

CURRICULUM VITAE

VENDULA SÁMELOVÁ

Konradova 9, 628 00 Brno

<https://cz.linkedin.com/in/vendulablazkova>

vendula.svecova@seznam.cz

+420 604 919 386

PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

NMS CZ s.r.o. // 05.2016 - 12.2016

PRODUKTOVÝ MANAŽER

- garant pro technické i obchodní aktivity firmy
- zodpovědnost za portfolio produktů Carl Zeiss Optotechnik a InnovMetric Software (software Polyworks)
- vedení obchodního týmu (SR, CZ, HU, SLO, PL)
- komplexní znalost trhu, tvorba obchodní strategie
- tvorba marketingové komunikační strategie
- koordinace klíčových projektů, komunikace s dodavateli

NMS CZ s.r.o. // 11.2012 - 04.2016

OBCHODNÍ ZÁSTUPCE pro oblast východních Čech a Moravy

- dva roky po sobě nejlepší prodejce společnosti
- vyhledávání a akvizice nových zákazníků v oblasti měřících technologií, kompletní HW a SW portfolio společnosti
- kompletní vedení projektu (od prvního kontaktu až po uzavření projektu)
- tvorba cenových nabídek a prezentací, demonstrace měřicí techniky u zákazníků
- obchodní a technická podpora existujících zákazníků
- vytváření obchodní databáze, práce s CRM, reporting

VUT V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ // 2009 - 2012

VĚDECKO-PEDAGOGICKÁ ČINNOST

- řešitel a spoluřešitel projektů
 - FRVŠ 2358/2012 G1 - Modernizace cvičení předmětu Technologie obrábění – hlavní řešitel
 - FSI-S-10-61 - Kongruentní technologie velmi přesného obrábění tvarových ploch – spoluřešitel
 - FSI-J-10-73 - Technologie výroby složitých částí se specifickými požadavky na tvarové a funkční vlastnosti – spoluřešitel,
 - FSI-S-11-28 - Výzkum pokročilých metod CNC obrábění pro perspektivní aplikace.
- Vedení cvičení
DTB Technologie obrábění,

- FAC Aplikace CAD/CAM v technologii obrábění,
- HC2 Aplikace CAD/CAM v technologii II,
- HC2-A Aplikace CAD/CAM v technologii II v angličtině,
- HNC-A Obrábění na CNC strojích v angličtině.

VZDĚLÁNÍ

VUT V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ // 2019
DOKTORSKÉ STUDIUM obor Strojírenská technologie

- kombinované studium
- téma práce Efektivní obrábění moderních keramických materiálů

VUT V BRNĚ, Institut Celoživotního Vzdělávání // 2009 - 2010
DOPLŇUJÍCÍ PEDAGOGICKÉ STUDIUM pro zaměstnance VUT

- téma práce Řešení konfliktů v pedagogickém prostředí

VUT V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ // 2009
MAGISTERSKÝ STUDIJNÍ PROGRAM Strojní inženýrství

- obor Strojírenská technologie
- téma práce Technologické parametry elektrojiskrového řezání
- drátovou elektrodou
- ukončeno s červeným diplomem

VUT V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ // 2007
BAKALÁŘSKÝ STUDIJNÍ PROGRAM Strojírenství

- obor Strojní inženýrství
- téma práce Nanotechnologie a její místo v moderní výrobě

STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA STROJNICKÁ BRNO // 2004
STUDIJNÍ OBOR Strojírenství

- zaměření Počítačová grafika

JAZYKOVÉ ZNALOSTI

Anglický jazyk // středně pokročilý slovem i písmem (B2)

- používaný denně při komunikaci s dodavateli i zákazníky

Český jazyk // rodilý mluvčí

OSTATNÍ DOVEDNOSTI A ZKUŠENOSTI

ŘIDIČSKÝ PRŮKAZ // skupina B

- aktivně od roku 2004
- najeto přes 200.000 km

CAD/CAM software

- principiální znalost různých 3D softwarů
- Polyworks, SolidWorks, AutoCAD, Inventor, PowerMill

ABSTRACT

Advanced ceramics have long held the front of the list of promising materials for high-tech applications. The most common problem is the high cost of design, production and machining of advanced ceramics parts. The main sense of advanced ceramics processing techniques development is affordable, high-volume production. The dissertation is focused on SiC silicon carbide grinding. SiC is used in the design of machine parts due to its excellent properties. The deep knowledge of the diamond wheel grinding process is important because it is one of the finishing methods and therefore has a direct impact on the quality and strength of the SiC parts. The key issue here is the overall surface quality of the parts after diamond wheel grinding and the knowledge of the factors that influence the surface quality. These include, in particular, grinding vibrations. The main purpose of the thesis is to create a system of specific scientific and technical information, which will allow applying optimal technological procedures in the processing of ceramic components. The theoretical part of the thesis contains an analysis of the current state of the art in the advanced ceramics machining area, detailed analysis of the ceramics grinding with diamond grinding wheels, signal analysis theory and analysis of surface quality assessment methods. The experimental part contains analysis and discussion of the results obtained during the monitoring of the silicon carbide grinding process with a diamond grinding wheel. Various diagnostic methods have confirmed the presence of vibrations at a frequency close to the speed frequency of the grinding wheel, which had a significant, negative effect on the samples surface quality. Vibration diagnostics has identified a specific source of vibration (inappropriate clamping of the workpiece) and it has been removed subsequently.