

Frézování kompozitů s polymerní matricí

Petr Kužela

Bakalářská práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Petr Kužela**
Osobní číslo: **T17192**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Frézování kompozitů s polymerní maticí**

Zásady pro vypracování

*teoretická studie na dané téma

*příprava experimentu, programu a podmínek pro frézování reaktoplastických kompozitů

*hodnocení kvality řezné plochy, stanovení obrábitelnosti, trendu chování, diskuze

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

Seznam doporučené literatury:

MALLICK, P. K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 3rd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2007, 640 p. ISBN 9781420005981. Dostupné také z: <http://marc.crcnetbase.com/isbn/9781420005981>
SWIFT, K. G.; BOOKER, J. D. *Manufacturing process selection handbook*. Butterworth-Heinemann, 2013.
SHEIKH-AHMAD, Jamal Y. *Machining of polymer composites*. New York: Springer, 2009.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

Ve Zlíně dne 10. února 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta: Petr Kužela

.....
Podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá frézováním kompozitů s polymerní matricí. V teoretické části je provedena studie na téma frézování, kompozitní materiály a obrobitelnost kompozitů. V praktické části je popsán experiment, jeho příprava a podmínky pro frézování reaktoplastických kompozitů. Dále se práce zabývá hodnocením kvality řezné plochy, stanovením obrobitelnosti, trendu chování. Závěrem bakalářské práce je uvedena diskuze výsledků a závěr této studie.

Klíčová slova: frézování, kompozitní materiál, drsnost povrchu, obrobitelnost, řezné síly

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with milling of composites with polymer matrix. In the theoretical part there is a study of milling, composite materials and machinability of composites. The practical part describes the experiment, its preparation and conditions for milling of reacto-plastic composites. Next, the work deals with the evaluation of the quality of the cutting surface, assessment of machinability, behavior trend. The conclusion of the thesis is a discussion of the results and the conclusion of this study.

Keywords: milling, composite material, surface roughness, machinability, cutting forces

Poděkování:

Na úvod bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a čas, který mi po dobu této práce věnoval. Dále chci poděkovat mé rodině a všem lidem, kteří mě ve studiu podporovali.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 FRÉZOVÁNÍ	11
1.1 SOUSLEDNÉ FRÉZOVÁNÍ	11
1.2 NESOUSLEDNÉ FRÉZOVÁNÍ.....	12
1.3 ŘEZNÉ PODMÍNKY	13
1.4 ŘEZNÉ SÍLY	13
1.5 FRÉZOVACÍ NÁSTROJ	14
1.5.1 Frézy na kompozitní materiály	15
1.6 CNC OBRÁBĚCÍ CENTRA	16
2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	18
2.1 VYZTUŽOVACÍ VLÁKNA	19
2.1.1 Skleněná vlákna	19
2.1.2 Aramidová vlákna.....	21
2.1.3 Uhlíková vlákna	21
2.2 MATRICE	22
2.3 KLASIFIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	23
2.3.1 Podle disperzní fáze	23
2.3.2 Podle typu matrice	23
2.3.3 Podle tvaru disperze.....	23
3 OBROBITELNOST KOMPOZITŮ	25
3.1 MIKROGEOMETRICKÁ OBROBITELNOST.....	25
3.1.1 Drsnost povrchu	26
3.1.2 Normy popisující drsnost povrchu.....	27
3.1.3 Parametry profilu povrchu	27
3.1.3.1 Výškové parametry profilu	28
3.1.3.2 Délkové (šířkové) parametry	29
3.1.3.3 Tvarové (hybridní) parametry.....	30
3.1.4 Měření drsnosti povrchu- zařízení a přístroje	30
3.1.4.1 Dotykové (kontaktní) přístroje.....	30
3.1.4.2 Bezdotykové přístroje	31
3.2 KINEMATICKÁ OBROBITELNOST	32
3.3 DYNAMICKÁ OBROBITELNOST.....	34
3.3.1 Piezoelektrický dynamometr	34
4 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	37
5 EXPERIMENT	38

5.1	VOLBA NÁSTROJE.....	38
5.2	PROGRAMOVÁNÍ EXPERIMENTŮ	39
5.2.1	Experiment 1 – Vliv hloubky řezu.....	39
5.2.2	Experiment 2 – Vliv posuvu	40
5.2.3	Experiment 3 – Vliv řezné rychlosti	41
5.3	PROVEDENÍ EXPERIMENTŮ	42
6	KVALITA ŘEZNÉ PLOCHY	46
6.1	KONTROLA NAMĚŘENÝCH DAT	46
6.2	HODNOCENÍ KVALITY ŘEZNÉ PLOCHY	48
6.2.1	Vliv hloubky řezu	48
6.2.2	Vliv posuvu.....	52
6.2.3	Vliv řezné rychlosti.....	55
7	PRŮBĚH SLOŽEK ŘEZNÝCH SIL PŘI OBRÁBĚNÍ	59
7.1	STANOVENÍ OBROBITELNOSTI ZE SLOŽEK ŘEZNÝCH SIL.....	60
7.1.1	Vliv hloubky řezu	60
7.1.2	Vliv posuvu.....	62
7.1.3	Vliv řezné rychlosti.....	64
8	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	66
	ZÁVĚR	68
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	70
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	73
	SEZNAM OBRÁZKŮ	74
	SEZNAM TABULEK.....	76
	SEZNAM PŘÍLOH.....	77

ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá tématem frézování kompozitů s polymerní matricí.

S kompozitními materiály se setkáváme při každodenním životě. Definovat je můžeme jako materiály, které jsou složeny ze dvou nebo více oddělených fází, které jsou nehomogenní, avšak materiál jako celek se považuje za homogenní. Jednotlivé fáze mají rozdílné vlastnosti, které spolu dohromady vytváří celek s vlastnostmi novými, kterými nedisponuje žádná jednotlivá fáze. Své uplatnění kompozity nacházejí v různých odvětvích průmyslu jako je stavebnický (železobeton), dřevozpracující (dřevotřísky, překližky), strojírenský (slinuté karbidy), letecký (konstrukční díly) a v mnoha dalších. Upřednostňujícími vlastnostmi takového materiálu jsou vysoká pevnost a malá hmotnost, a proto lze kompozity považovat v současné době za jednu z nejvíce používaných materiálů.

Ve strojírenství dochází k modernizaci a vyvíjení obráběcích metod. Soustředěna je pozornost na výrobní procesy, které je snahou zkrátit a dosáhnout tak lepšího ekonomického výsledku. Vysoký důraz je také kladen v moderním strojírenství i na jakost povrchů obráběných dílů, která bude sledována v bakalářské práci.

V teoretické části bakalářské práce je rozebrán rozdíl mezi sousledným a nesousledným frézováním, řezné síly vznikající při frézování a také řezné podmínky, které ovlivňují výslednou kvalitu řezné plochy. Dále je charakterizován kompozitní materiál, ze kterého byly vyrobeny obrobky použité v praktické části, jeho klasifikace. V závěru teoretické části je věnována pozornost kinematické a dynamické obrobitelnosti kompozitů, parametrům profilu povrchu, dále drsnosti povrchu a v neposlední řadě také snímání drsnosti povrchu.

V praktické části je uveden experiment, jeho příprava, příprava programu a podmínek pro frézování reaktoplastických kompozitů čelní frézou. Dále je provedeno hodnocení kvality řezné plochy, stanovení obrobitelnosti a chování trendů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 FRÉZOVÁNÍ

Frézování je obráběcí proces, kdy je materiál obrobku odebírán pomocí břitů rotujícího nástroje. Vedlejší pohyb při čelním frézování koná obrobek, který je orientován kolmo k ose nástroje. Hlavní pohyb vykonává vícebřítý nástroj-fréza. Posuvné pohyby obrobku jsou na moderních CNC frézovacích strojů plynule měnitelné a lze je měnit ve všech směrech. Každý zub frézy odřezává krátkou třísku proměnné tloušťky, řezný proces je přerušovaný, kolísá řezná síla i teplota břitů. [1][2]

Podle použitého nástroje se rozděluje frézování na frézování válcové (frézování obvodem) a na frézování čelní (frézování čelem).

Válcové frézování se využívá při práci s tvarovými a válcovými frézami. V tomto případě jsou zuby frézy pouze po obvodu nástroje, kolmo na osu frézy se nastavuje hloubka odebíraného materiálu. Plocha, která je obrobená frézou, je rovnoběžná s osou otáčení frézy.

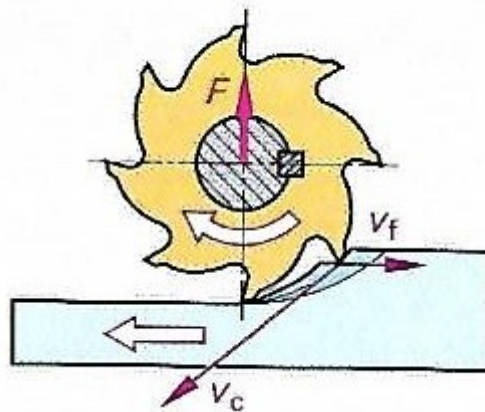
Při práci s čelními frézami se využívá čelní frézování. Břity nástroje jsou umístěny po obvodu i čele nástroje.

Podle obráběcích podmínek rozlišujeme frézování sousledné a nesousledné. [1]

1.1 Sousledné frézování

Při sousledném frézování je směr posuvu obrobku a smysl rotace frézy stejný. Největší tloušťka třísky je odebírána vnikáním zubu frézy do materiálu. Jakmile zub vychází ze záběru, vzniká obrobená plocha. Řezné síly působí směrem dolů. Tento typ frézování se může provádět pouze na přizpůsobeném obráběcím stroji při vymezené vůli a předpětí mezi maticí stolu frézky a posuvovým šroubem. Pokud tomu tak není, vůle způsobuje nestejný posuv. To může mít za následek poškození nástroje, či stroje.

Sousledným frézováním docílíme vyšší trvanlivosti břitů, čímž můžeme použít vyšší řezné posuvy a rychlosti. Řezná síla způsobuje přítlak obrobku ke stolu, lze tedy použít jednodušší upínací přípravky. Řezný výkon je menší, menší sklon ke chvění obrobku. Souslednost má za následek také lepší kvalitu obrobeného povrchu. [1]

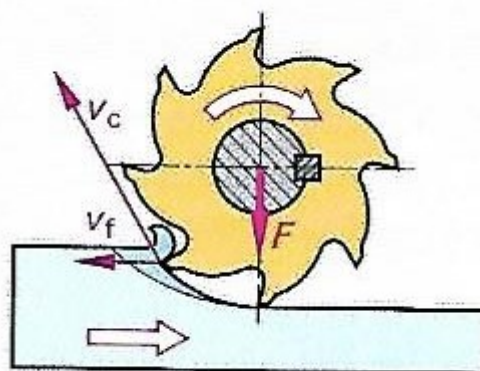


Obr. 1 Kinematika sousledného frézování [2]

1.2 Nesousledné frézování

Smysl rotace nástroje při nesousledném frézování je proti směru posuvu obrobku. Břit klouže po povrchu a opotřebovává se jeho hřbet před vniknutím do materiálu. Až při určitém tlaku, při určité hloubce řezu, se začne tříška tvořit. Teprve po vniknutí břitu do materiálu se zvětšuje postupně tloušťka třísky, narůstá řezná síla. Tato síla má za následek zvedání obrobku od stolu, přitom vznikají deformace, které zvyšují opotřebení břitu. [1][2]

K zamezení zvedání obrobku od stolu je vhodné použít složitější upínací přípravky. Vymezení vůle mezi posuvovým šroubem a maticí stolu stroje není nutné, dochází k menšímu opotřebení šroubu a matice. Při vřezávání do obrobku nezávisí záběr zubů frézy na hloubce řezu. [1]



Obr. 2 Kinematika nesousledného frézování [2]

1.3 Řezné podmínky

Řezná rychlost v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$] a posuv na zub f_z [mm] patří k základnímu popisu řezných podmínek pro daný frézovací nástroj a materiál, který bude obráběn. Řezné podmínky se stanoví na základě druhu prováděné práce, použitém druhu frézy a výsledné jakosti obrobeného povrchu. Respektují se však doporučení výrobce nástroje pro hrubování a dokončovací frézování. Např. při hrubování se nastavuje co největší posuv s ohledem na výkon na vřetenu frézky, tuhost obrobku a hloubku vrstvy, kterou odebíráme. [1]

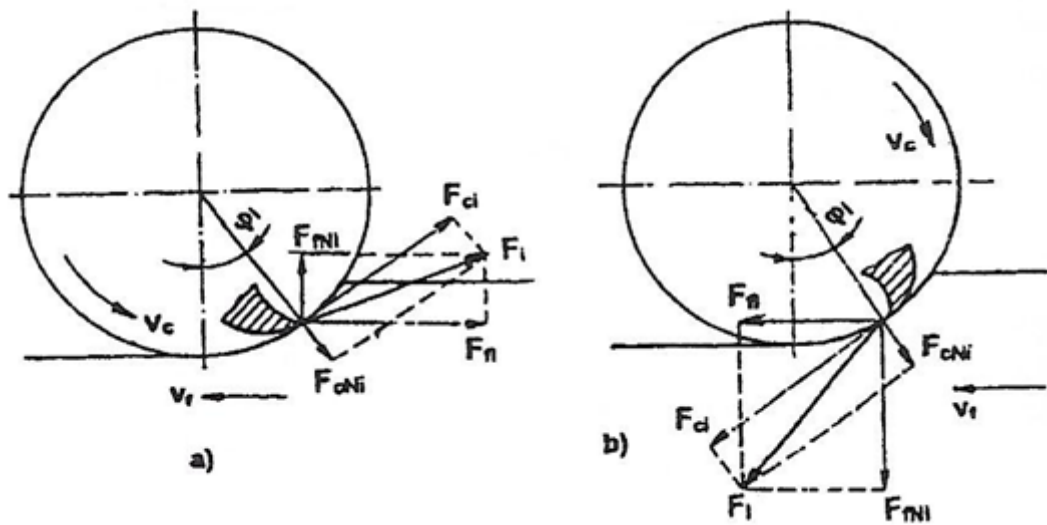
Volíme co největší řeznou rychlost, aby byla splněna hospodárnost využití strojů. Pokud se zvětšuje posuv na jeden břit (zub) v_f [mm/min], dochází k nárůstu tloušťky třísky, narůstá řezná síla a tím i opotřebení zubů frézy. [2]

Při válcovém frézování se tloušťka třísky vytváří od větší tloušťky k nule, zatímco při čelním frézování má tříska stále stejnou tloušťku. [2]

Šířka řezu a_e , též šířka frézování, určuje šířku odebíraného materiálu ve smyslu kolmém k ose posuvu frézy. Hloubka řezu a_p udává při frézování drážek nebo ploch hloubku záběru (řezu) a je orientovaná ve směru osy nástroje. Hloubka řezu ovlivňuje objemový výkon odběru třísky. [2]

1.4 Řezné síly

Mezi nástrojem a obrobkem vznikají složité silové soustavy, jejichž vznik má za následek uskutečňovaný řezný proces. Tyto silové soustavy umožní optimalizaci řezných podmínek, přičemž bereme ohled na stabilitu břitu nástroje a na celkový průběh obrábění. Působením řezné části nástroje na obrobek vzniká celková řezná síla, označená symbolem F_i . Pro znázornění řezných sil při frézování se vychází ze silových poměrů jednoho břitu nacházejícího se v poloze určené úhlem φ_i . Např. při válcovém frézování s nástrojem s přímými zuby se celková řezná síla působící na břitu F_i rozloží na složky F_{ci} a F_{cNi} . [1]



Obr. 3 Řezné síly na zubu válcové frézy v pracovní rovině P_{fe} : a) nesousledné frézování; b) sousledné frézování; F_i - celková řezná síla; F_{ci} - řezná síla; F_{cNi} - kolmá řezná síla; F_{fi} - posuvová síla; F_{fNi} - kolmá posuvová síla [1]

Pro válcové frézování se řezná síla F_{ci} vyjádří:

$$F_{ci} = p_i \cdot A_{Di} = p_i \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i [1],$$

kde p_i - měrná řezná síla při válcovém frézování, a_p - šířka záběru ostří, f_z - posuv na zub.

Obdobně se vyjádří řezná síla F_{ci} pro čelní frézování:

$$F_{ci} = k_i \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i [1],$$

kde k_{ci} vyjadřuje měrnou řeznou sílu pro čelní frézování.

Při frézování je však několik zubů v záběru současně. Výsledné síly tedy závisí na počtu zubů v záběru a také na okamžité poloze zubů frézy vzhledem k obrobku. [1]

1.5 Frézovací nástroj

Frézovací nástroje pojmenováváme frézy. Jsou to vícebřité nástroje buď celistvé, nebo s vyměnitelnými destičkami, jež se upínají pomocí šroubů k tělesu nástroje. Při frézování vícebřítými nástroji dochází ke spolupráci různých břitů nástroje. Dochází k přerušovanému procesu, kdy se břit nástroje periodickým způsobem vřezává do materiálu. Během procesu frézování je záběr břitu maximálně v 50 % otáčky frézy. [2][4]

Frézy lze dělit podle druhu upnutí (stopkové a nástrčné), podle tvaru a uspořádání břitů popř. břitových destiček (dokončovací nebo hrubovací) a z hlediska obráběných ploch (čelní, rohové, drážkové). [2]

Z hlediska technologického uplatnění lze frézy dělit do skupin podle následujících hledisek:

- Podle umístění zubů na těle nástroje lze rozeznat frézy válcové, čelní nebo válcové čelní.
- Podle nástrojového materiálu zubů se rozlišují frézy ze slinutých karbidů, z rychlořezné oceli, řezné keramiky, cermetů, z kubického nitridu boru.
- Podle provedení zubů se rozlišují frézy se zuby podsoustruženými nebo frézovanými.
- Podle směru zubů vzhledem k ose rotace nástroje lze rozlišit frézy se zuby přímými nebo ve šroubovici (pravé nebo levé). Šroubovice má za následek postupné vnikání zubů do záběru, což způsobuje klidnější a plynulejší řezný proces.
- Rozlišit lze frézy podle počtu zubů vzhledem k průměru frézy na jemnozubé, polohrubozubé a hrubozubé. Pro zajištění klidného chodu frézy by měly současně řezat minimálně 2 zuby frézy.
- Z hlediska konstrukčního uspořádání se rozlišují frézy celistvé, s vloženými noži nebo s vyměnitelnými břitovými destičkami, které jsou připevněny mechanicky k tělesu nástroje.
- Podle geometrického tvaru funkčních částí se uplatňují frézy válcové, kotoučové, úhlové, drážkovací, kopírovací nebo rádiusové.
- Způsobem upnutí lze dělit frézy na nástrčné (upínají se na centrální otvor) a stopkové (upínají se za kuželovou nebo válcovou stopku)
- Podle směru otáčení lze rozeznat frézy pravořezné a levořezné. [3]

1.5.1 Frézy na kompozitní materiály

Z hlediska materiálu fréz pro kompozitní materiály se používají rychlořezné oceli, polykrystalický diamant nebo slinuté karbidy. Rychlořezné oceli jsou charakteristické nižší hodnotou trvanlivosti, s čímž je spojená následná výměna či přestřžení nástroje z důvodu špatného odvodu tepla nástrojem a malé schopnosti odolávat abrazivnímu působení vyztužujících vláken. [17]

Daleko lepších výsledků dosahují nástroje ze slinutých karbidů. Mechanické vlastnosti nástroje závisí na obsahu pojiva a velikosti zrna karbidické fáze. Z hlediska velikosti zrn jsou vhodnější jemnozrnné slinuté karbidy, které se vyznačují vyšší hodnotou tvrdosti a lépe tak odolávají opotřebení. Navíc jsou nástroje povlakovány různými druhy povlaků na bázi karbidů, nitridů, oxidů, diamantu, které rovněž zvyšují trvanlivost. [17]

Nejlepších výsledků dosahují nástroje z polykrystalického diamantu, jejichž vynikající tepelná vodivost a vysoká tvrdost zaručují vysokou trvanlivost nástroje. [17]

Mezi používané povlaky patří:

- TiAlN - Univerzální povlak pro obrábění celé škály materiálů středních a vyšších pevností středními a vyššími řeznými rychlostmi. Díky své multivrstvé struktuře má výborný poměr tvrdosti a houževnatosti. Výhodou je i vyšší tvrdost a oxidační odolnost a tudíž nevyžaduje dokonalé chlazení.
- AlTiN - Vyznačuje se velmi vysokou oxidační odolností. Vhodný je především pro frézování vysokými řeznými rychlostmi, popř. frézování bez chlazení. Povlak je rovněž vhodný pro tvárné litiny nebo oceli vysokých pevností.
- AlCrN - Tento povlak je vhodný pro aplikaci při vysokých teplotách, vyznačuje se vysokou abrazivní odolností, stabilitou a tvrdostí.
- TiN - Výhodou tohoto povlaku je dobrá elasticita a adheze.
- Diamant - Vyznačuje se nejlepším obráběcím výkonem pro neželezné materiály.

Dále se využívají povlaky na bázi karbidů a oxidů. [17][23]

1.6 CNC obráběcí centra

CNC obráběcí stroje jsou stroje, které jsou ovládány pomocí číslicových signálů. V těchto signálech jsou pomocí číslic zakódované příkazy a souřadnice o poloze nástrojové hlavy stroje. První číslicově řízené stroje byly řízeny číslicovými signály, jež byly snímány z děrné pásky nebo z děrných štítků. Příkazy načtené počítačem však v počítači nebylo možné měnit. V současné době je možné měnit programy v CNC systémech prostřednictvím počítače. [2]

Výsledné pohyby NC stroje řídí koordinovaně ve všech osách CNC programy. Tyto pohyby mohou být generované pomocí obslužného programu postupným programováním jednotlivých úkonů přímo na stroji nebo mohou být vytvořeny mimo stroj a je tedy nutné je do programu přenést pomocí datového nosiče nebo data poslat po síti. Obslužný panel dis-

ponuje několika částmi. Na obrazovce je možné zobrazit zdrojový program, číslíkový kód programu, informace o aktuální poloze nástroje nebo model obráběného dílu. Alfanaumerická klávesnice umístěná na obslužném panelu umožňuje programování přímo na stroji. Pomocí klávesnice lze zadávat souřadnice, psát komentáře, zadávat příkazy pohybů a to přímo ovládacími tlačítky na řídicím (obslužném) panelu stroje. Pro splnění maximální bezpečnosti bývají výrobní CNC stroje celé opatřeny krytem. [2]

Informace nutné pro řízení NC stroje je možné rozdělit do tří skupin: informace o geometrii obrábění (udávají rozměry obrobku a určují trajektorii pohybu), informace o technologii obrábění (otáčky vřetena, velikost posuvu, začátek a konec procesu chlazení) a informace nutné k organizaci programu (start a stop programu, číslo bloku, začátek a konec bloku). [2]

Programování jednotlivých operací lze provést třemi způsoby:

- Manuální - umožňuje ruční sestavení G kódu.
 - Dialogové (dílenské) - program se tvoří přímo na CNC stroji pomocí řídicího panelu.
 - Pomocí CAM (Computer Aided Manufacturing = konstrukce s podporou počítače) systémy založené na konstrukčních programech, které vygenerují CNC program.
- [2]

2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiál vzniká kombinací dvou nebo více materiálů (spojovací matrice, výplně, vyztužovací elementy), které se liší v makroměřítku svým tvarem nebo složením. Tyto fáze se také od sebe výrazně liší svými fyzikálními, mechanickými a chemickými vlastnostmi. Materiálové složky si zachovávají svou identitu (vzájemně se neslučují ani nerozpouštějí), přesto že na své okolí působí v součinnosti. Každou materiálovou složku lze fyzikálně identifikovat a vytváří se rozhraní mezi ní a dalšími složkami. Tím se liší např. od slitin, které jsou heterogenní. Kompozitní materiály charakterizuje tzv. synergismus, který je vysvětlen vyššími vlastnostmi kompozitu, než kdyby se poměrně sečetly vlastnosti jednotlivých složek (fází) kompozitu. [5]

U klasických materiálů jsou některé požadavky jen těžko splnitelné, vytváří se proto nové kompozitní materiály, u kterých se cílí těchto požadavků:

- Zvýšení pevnosti.
- Zvýšení tuhosti.
- Zvýšení rozměrové stability.
- Zmenšení teplotní roztažnosti.
- Zvýšení chemické nebo korozní odolnosti.
- Redukce hmotnosti.
- Zvýšení mechanického tlumení (antihlukové a antivibrační materiály).
- Modifikace elektrických vlastností.
- Zvýšení houževnatosti (odstranění křehkosti).
- Snížení negativního dopadu na životní prostředí.
- Snížení nasákavosti.
- Snížení propustnosti pro kapaliny a plyny.
- Snížení ceny. [5]

Vlákna, kterými jsou vyztužené plasty, jsou buď konečná, nebo nekonečná. Jsou 3,5 - 24 μm silná a jsou ze skla, uhlíku nebo aramidů. Matrice se volí z termoplastu nebo z termosetu. Jednotlivé složky jsou voleny individuálně. V mnoha případech se u vyztužených plastů požaduje vyztužení vláknou ve směru namáhání, což způsobuje anizotropní materiál (vykazuje rozdílné vlastnosti v různých směrech) na rozdíl od nevyztužených plastů nebo kovů. [6]

2.1 Vyztužovací vlákna

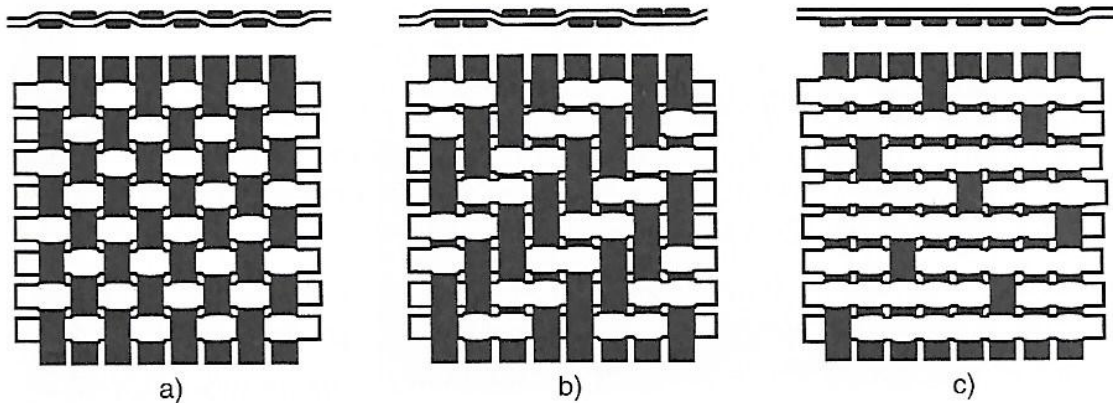
Při výrobě kompozitů se zpravidla používají vlákna skleněná, méně často pak vlákna uhlíková nebo kevlarová. Tato vlákna velmi silně potlačují viskoelastické chování při namáhání tahem ve směru vláken. Viskoelastické namáhání však není potlačeno pro příčné namáhání a pro smyk ve směru vláken. Toto chování je rovněž potlačeno částečně pro tlakové namáhání ve směru vláken. Vlákna rovněž silně zvyšují tuhost kompozitu, přemostují případné trhliny a tím dochází ke zvýšení únavových vlastností a ke zvýšení houževnatosti výsledného materiálu.[5]

2.1.1 Skleněná vlákna

Jedná se o textilní skleněná vlákna s pravidelným kruhovým průřezem, která jsou vyrobena tažením z roztavené skloviny. Plná kovalentní vazba mezi křemíkem a kyslíkem způsobuje vysoké hodnoty pevnosti a E-modulu. Na základě své amorfní struktury jsou skleněná vlákna izotropní (mají ve všech směrech stejné vlastnosti) na rozdíl od vláken aramidových či uhlíkových. Skleněná vlákna jsou dodávána formou příze, pramence, rohože, sekané příze, sekaného pramence nebo krátkého vlákna. [6][22]

Vyztužující tkaniny mohou mít různé druhy vazeb:

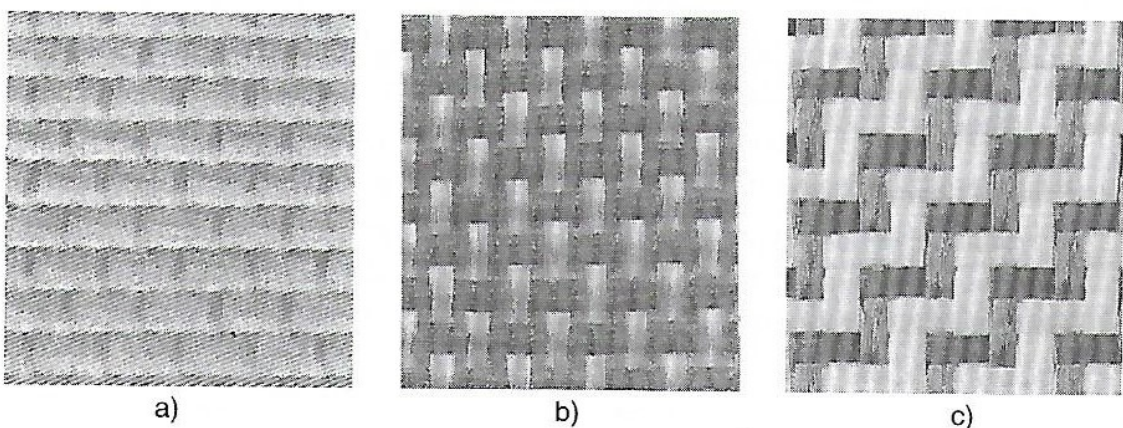
- Keprová vazba - vyznačuje se vyšší tuhostí a pevností laminátu, kterou způsobuje zvlnění vláken. Díky lepší ohebnosti je keprová tkanina vhodnější pro složitější tvarové prvky než tkanina s plátňovou vazbou.
- Plátňová vazba - vzhledem k malému otřepu při řezání a k dobré rozměrové stálosti je zpracování tkaniny s plátňovou vazbou jednoduché.
- Atlasová/saténová vazba - v porovnání s keprovou vazbou má menší vychýlení vláken, umožní velmi hladký výsledný povrch. Vyznačuje se velmi dobrou řasitelností, tudíž je vhodnější pro prvky prostorově složitější. [6]



Obr. 4 Druhy vazeb vztužujících tkanin - a) keprová, b) plátňová, c) atlasová (saténová vazba) [6]

Rozlišují se také tkaniny s různou skladbou vláken v osnově a útku:

- Jednosměrná tkanina - k fixaci vláken v osnově slouží tenká vlákna v útku. Tyto vlákna v útku zajišťují vysokou tuhost a pevnost při jednosměrném namáhání.
 - Směsná tkanina - různé druhy vláken jsou použity v osnově a útku. Jako útek může být použita např. skleněná příze, jestliže není vyžadována vysoká tuhost v příčném směru.
 - Hybridní tkanina - v této tkanině jsou využity různé kombinace vláken ve tkanině.
- [6]



Obr. 5 Tkaniny s různou skladbou vláken v osnově a útku - a) jednosměrná, b) směsná, c) hybridní tkanina [6]

Skleněná vlákna mají modul pružnosti v tahu přibližně stejně velký jako modul pružnosti v tahu hliníku a asi jednu třetinu hodnoty modulu pružnosti v tahu oceli. Nižší hustota skla přispívá zvláště vysoké hodnotě měrné pevnosti vláken. Tepelné vlastnosti jiných materiálů nepřekonávají tepelné vlastnosti skleněných vláken. Tepelná vodivost je vyšší oproti ostatním materiálům, avšak v porovnání s kovy podstatně nižší. Vlákna jsou rovněž ohnivzdorná. Součinitel teplotní délkové roztažnosti je nižší v porovnání s většinou konstrukčních materiálů.

Konečné vlastnosti kompozitu jsou ovlivněny obsahem, druhem, orientací skleněných vláken při široké nabídce výztuží. [6]

2.1.2 Aramidová vlákna

Aramidové vlákno je nejlehčí vyztužující vlákno, to způsobuje vysokou měrnou pevnost v tahu. Vlákno se vyznačuje anizotropními vlastnostmi - vlastnosti měřené v příčném směru se liší od vlastností měřených ve směru vláken. Mez pevnosti v tahu je vyšší než mez pevnosti v tlaku ve směru vláken. Aramidová vlákna jsou hydrofilní - absorbují vlhkost, což negativně ovlivňuje pevnost spoje vlákna a matrice, dokonce pevnost vlákna vlastního. Vyznačují se také nepříliš velkou odolností vůči vysokým teplotám.

Aplikace aramidových vláken je vhodná pro lehké konstrukce, které jsou namáhány tahem, nejsou však vhodná pro konstrukce namáhané ohybem nebo tlakem. [6][22]

2.1.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se vyznačují progresivním deformačním chováním – hodnota E-modulu stoupá se zvyšujícím se zatížením. Dále se vyznačují vysokou pevností a vysokými hodnotami E-modulu až do teploty 500°C. Vyznačují se dále nízkou hustotou, mimořádně vysokou korozní odolností, dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí. Ve srovnání se skleněnými vlákny jsou uhlíková vlákna silně anizotropní. Vlákna jsou velmi křehká, snadno se lámou při zpracování. Uhlíková vlákna disponují vysokou odolností proti dlouhodobému dynamickému namáhání. Stejně tak jsou dynamické vlastnosti lepší ve srovnání s vlastnostmi ostatních materiálů (např. oceli, hliníku). Velmi pomalá je také rychlost hoření kompozitu s uhlíkovými vlákny, ačkoliv jsou uhlíková vlákna hořlavá. [6]

2.2 Matrice

Jako matrici označujeme materiál, který prosytí systém vláken. Po zpracování tak vznikne tvarově stálý a celistvý výrobek. Surovina, která takto vzniká, se označuje jako kompozit. Matrice zajišťuje geometrický tvar, zavedení a přenos sil (přenos namáhání na vlákna, převedení namáhání z vlákna na vlákno), zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku nebo ochranu vláken před vlivy okolí.

Nezbytnou úlohou matrice je zajištění adheze na fázovém rozhraní mezi matricí a vláknem. Pro zajištění lepší fyzikální a chemické vazby se mezi matricí a vlákno nanese apretace, která je vhodná pro daný typ matrice. Matrice musí mít vhodné povrchové napětí a vhodnou viskozitu, aby vlákno bylo smočeno úplně a bez vzduchových bublin. [6][22]

Jako reaktoplastické matrice (pryskyřice) se nejběžněji používají:

- Polyesterové matrice - nejvíce používanou matricí je polyester, který dává kompozitu výsledné všeobecně dobré vlastnosti. Polyesterové pryskyřice mají dobré mechanické, chemické, ale i elektrické vlastnosti. Svým chemickým odoláváním jsou vhodné do slabě kyselého prostředí nebo do slabě alkalického prostředí. Polyvinylestery dobře odolávají vysokým teplotám a jsou také odolné vůči alkalickému a kyselému prostředí. Polyvinylesterové profily vyztužené skelným vláknem tepelně i elektricky izolují.
- Epoxidové matrice - vynikají svými mechanickými a elektrickými vlastnostmi. Běžně se používají s kvalitnější výztuhou, např. s uhlíkovými vlákny, ale i se skleněnými vlákny za předpokladu, že podíl výztuže bude velmi vysoký. Odolnost vykazují také vůči roztokům kyselin a alkálií, některým rozpouštědlům, ale taktéž vůči vodě. V široké oblasti teplot je pro epoxidy typická elektroizolační vlastnost.
- Fenolické matrice - tyto pryskyřice se aplikují, pokud je vyžadována vysoká odolnost vůči ohni, odolnost proti vysoké teplotě nebo např. omezování plamene při hoření. [5]

Termoplastickou matricí nejčastěji tvoří polyamid, polyetylen, polypropylen nebo např. polykarbonát. [5]

2.3 Klasifikace kompozitních materiálů

V praxi se vyskytuje sortiment různých kompozitních materiálů. Je tedy nutné použít určitá kritéria a uspořádání k jejich popisu. Následovné rozdělení kompozitů se může v praxi vzájemně kombinovat. Kompozit musí mít v zásadě jednu matici, která určuje tvar, rozměry kompozitu a je v celém rozsahu spojitá. Jako disperzi označujeme ostatní složky kompozitu, které jsou v matici zpravidla rozptýleny. [5]

Kompozity lze dělit třemi nejběžnějšími způsoby:

2.3.1 Podle disperzní fáze

- Kompozit prvního typu - disperze je z pevné fáze, v technice nejčastěji používané kompozity.
- Kompozit druhého typu - tvořen kapalnou disperzí, kompozit obsahuje pórovité struktury s póry vyplněnými např. mazacím olejem.
- Kompozit třetího typu - má plynnou disperzi, patří sem např. kovové pěny, různé vláknové struktury s vlákny spojenými nebo slinutými. [5]

2.3.2 Podle typu matrice

- Kompozitní materiály s plastovou maticí - jako matrice je použit určitý polymer (termoplast, reaktoplast).
- Kompozitní materiály s kovovou maticí - matici tvoří kov, takové materiály lze svařovat, odolné vůči radiaci, nasákavosti, opotřebení.
- Kompozitní materiály s keramickou maticí - keramická matrice zvyšuje houževnatost, otěruvzdornost, teplotní odolnost. [5]

2.3.3 Podle tvaru disperze

Na anizotropii vlastností a na způsobu interakce mezi disperzí a maticí se podstatně podílí tvar jednotlivých částí disperze. Vzhledem ke tvaru disperze lze kompozity rozdělit:

- Částicové - disperze je ve tvaru částic buď izometrických (kompozit vykazuje izotropní vlastnosti), nebo anizometrických (disperzi tvoří destičky nebo jehličky, které mohou být orientované nebo náhodně orientované).
- Vláknové - disperze je ve tvaru vláken.

Vlákna kompozitu mohou být:

- spojitá - vlákna nejsou přerušena uvnitř kompozitu (tkanina, pletenina),
 - dlouhá - snadno se přetrhnou při lomu (mohou být jednoose, dvojose nebo trojose upořádaná),
 - krátká - vytáhnou se při lomu, mohou mít také jednoosé, dvojosé nebo trojosé uspořádání.
- Deskové - disperze i matrice jsou složeny z desek, které se vzájemně střídají. Není tedy možné rozlišit, co je disperze a co je matrice. [5]

3 OBROBITELNOST KOMPOZITŮ

Volba vhodných obráběcích nástrojů a proces obrábění kompozitních materiálů vyžaduje selektivní postup a velkou pečlivost. Kombinací vyztužujících vláken a matrice lze docílit rozdílných mechanických vlastností, které je nutné brát v úvahu při volbě vhodného řezného nástroje. Pro materiály vyztužené uhlíkovými vlákny je vyžadován velmi odolný nástrojový materiál z důvodu veliké abrazivnosti uhlíkových vláken. Pro aramidové výztuže, které se vyznačují měkkostí a poddajností tlaku nástroje, se klade důraz na vhodnou geometrii bříty. Pro tyto materiály byly vyvinuty speciální nástroje, které nejprve vlákno předeprnou a poté čistě oddělí od zbytku materiálu. [16][17]

Mezi nejdůležitější faktory ovlivňující obrobiteľnost kompozitů patří: způsob výroby obráběného materiálu, metoda obrábění, chemické složení, mikrostruktura obráběného materiálu, řezné prostředí, geometrie nástroje, druh a vlastnosti nástrojového materiálu. [18]

Záleží také na zvolených řezných podmínkách - na zvolených otáčkách, posuvu a v neposlední řadě také na dokonalosti řezu. Dokonalostí řezu je míněno zamezení tření nástroje o povrch obrobku. Může docházet k delaminaci materiálu či k lomu vláken, pokud nástroj neřeže správně. Při obrábění kompozitů nedochází ke kluzu jako u kovů, když břit vytváří třísku. Materiál je tak roztrháván a mnohdy dochází k přerezávání matrice, zatímco dochází k lomu vláken během obráběcího procesu. [16][17]

Všeobecně je doporučeno použití ostrých břitů s dostatečně velkým úhlem hřbetu. Tyto parametry nástroje způsobí čistý řez a dále potlačí náchylnost k tření nástroje o obrobek. Snažíme se dosáhnout co nejmenšího opotřebení řezného nástroje, předejdeme tak následnému lomu bříty, nadměrné tvorbě tepla a v neposlední řadě i špatné výsledné kvalitě součásti. [16][17]

Zhodnocení obrobiteľnosti kompozitů je možno provádět na základě: řezné rychlosti, teploty řezání, druhu a tvaru tvořící se třísky, dosažené drsnosti obrobené plochy, množství energie potřebné k odřezání dané vrstvy materiálu. [18]

3.1 Mikrogeometrická obrobiteľnost

Mikrogeometrická obrobiteľnost je spojená s jakostí obrobené plochy. Soubor vlastností zkoumané plochy objektu označujeme jako jakost povrchu. Tyto vlastnosti je možné rozdělit na vlastnosti prostorově uspořádaného povrchu - drsnost (morfologie, textura) nebo

na vlastnosti fyzikální a chemické. Jakost povrchu určují důležité funkční vlastnosti, vnější vzhled, účinnost, spolehlivost nebo také náklady výrobního procesu. Jakost povrchu obrobku ovlivníme při obráběcím procesu volbou materiálu obrobku, vhodných řezných podmínek, řezného nástroje či procesní kapaliny. [11]

Vztah mezi požadovanými vlastnostmi povrchu a změnou vlastností povrchu nového, které vznikly určitým výrobním technologickým postupem, označujeme integritou povrchu. Integrita je způsobena také vztahem fyzikálních vlastností (tvrdost, pnutí) k mikronerovnostem. Výsledný povrch je možné hodnotit na základě dvou vlastností povrchu - fyzikálně-chemickými vlastnostmi povrchové vrstvy a prostorovým uspořádáním povrchu. [11]

3.1.1 Drsnost povrchu

Drsností povrchu (mikrogeometrií) označujeme nejmenší (popř. velmi malé) nepravidelnosti od ideálního profilu povrchu zkoumaného tělesa. Ideální profil je definován jako hladký, přesně rovný a lesklý. Výsledná drsnost povrchu je určena dokončovací metodou obrábění působením řezného nástroje nebo působením např. brousícího kotouče. Při obrábění dochází k nerovnostem obráběného povrchu, které jsou způsobeny řezným nástrojem, jiskrovým výbojem nebo volným pohybem brusných zrn. Tyto nepravidelnosti povrchu vznikají při hrubovacích i dokončovacích operacích. Řezné síly při hrubování jsou velké, a tak je zapotřebí brát v úvahu tuhost funkčního celku (stoj-upínání-nástroj-obrobek). Při dokončovacích operacích vznikají malé řezné síly, nemusíme tedy brát v úvahu tuhost celé soustavy. Do drsnosti povrchu se nezapočítávají původní vady materiálu (póry a trhliny) a náhodná poškození (sraženiny, vyboulení, otřepy, vyvýšeniny). [2][11]

Jednoznačnou kontrolu a srovnání umožní normy, které předepisují požadované vlastnosti povrchu. Toto předepisování zajistí základní podmínku vyměnitelnosti součástí. [11]



Obr. 6 Příkladný profil povrchu [15]

3.1.2 Normy popisující drsnost povrchu

Definice parametrů, struktura povrchu a vhodné měření zahrnují normy GPS (Geometrické požadavky na výrobky). Níže je popsán stručný přehled norem. [2]

- ČSN EN ISO 1302 - Základní mezinárodní norma geometrických požadavků (GPS). Je považována za všeobecnou normu, která určuje pravidla pro předepisování struktury povrchu pomocí technických značek a textu v technické dokumentaci. [7]
- DIN EN ISO 4287 - Tato mezinárodní norma stanovuje termíny, názvy, parametry a definice integrity povrchu - drsnost, primární profil, vlnitost, které jsou získány pomocí profilové metody. Jako řádně definovanou charakteristiku struktury povrchu uvádí profil drsnosti a jeho parametry. [28]
- ISO 4288 - Pro stanovení pravidel pro porovnání tolerančních mezí s naměřenými hodnotami slouží tato mezinárodní norma. Pro výběr mezních vlnových délek pro parametry profilu drsnosti dle ISO 4287, které jsou měřeny hrotovými (dotykovými) přístroji, stanovuje standardní pravidla. [29]
- ISO 3274 - Tato norma je mezinárodní normou popisující profily a obecnou strukturu hrotových (dotykových) přístrojů, které slouží k měření vlnitosti a drsnosti povrchu. Umožňuje také uplatnění stávajících mezinárodních norem pro praktické hodnocení profilu povrchu. Dále poskytuje základ pro specifikaci dotykových (hrotových) přístrojů a také stanovuje specifické vlastnosti přístrojů ovlivňujících hodnocení profilu. [30]
- ISO 25178-2 - Plošnou strukturu povrchu popisují geometrické požadavky (GPS), které udává tato norma. Stanovuje přesné termíny, definice a parametry textury povrchu. [31]

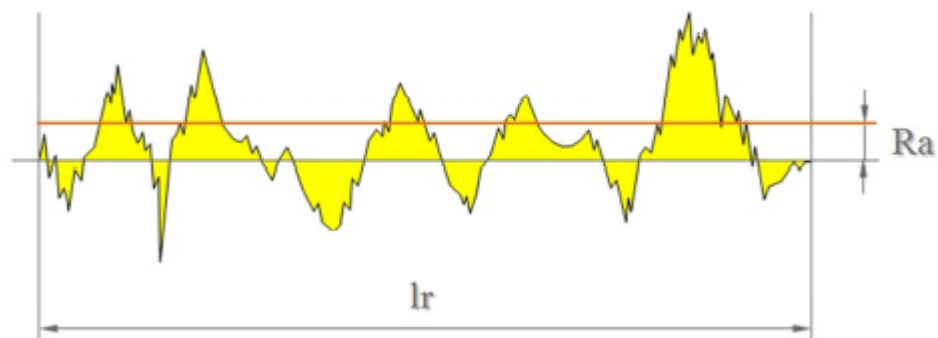
3.1.3 Parametry profilu povrchu

Parametry profilu povrchu jsou standardně rozdělené do tří následujících skupin z hlediska charakteristiky hodnocení nerovnosti povrchu: výškové parametry definované v ose Z, dále délkové parametry definované v ose X a hybridní parametry, které jsou definované v osách X i Z. [9]

3.1.3.1 Výškové parametry profilu

Výškami výstupků a prohlubní nebo jejich kombinací jsou určeny výškové parametry profilu povrchu. Neuvažují se však rozměry parametrů v horizontálním směru. [8]

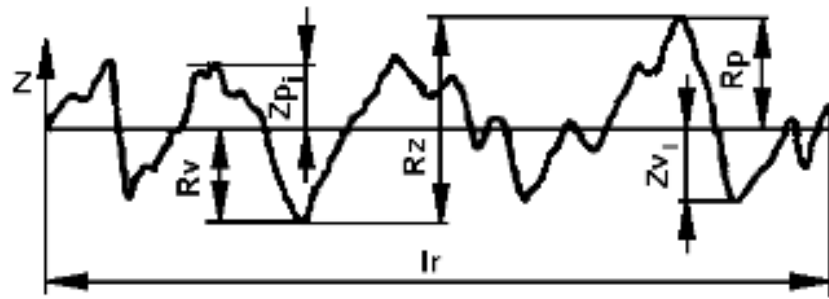
- Střední aritmetická úchylka profilu R_a - jedná se o přednostní výškový parametr, který je charakterizován jako střední aritmetická hodnota absolutních úchylek profilu pro rozsah základní délky l_r .



Obr. 7 Střední aritmetická úchylka profilu [8]

Stanovuje pouze střední hodnotu vzdáleností souřadnic jednotlivých bodů profilu povrchu od střední čáry profilu. Parametr R_a nereaguje citlivě na hloubky rýh profilu a extrémní výšky hrotů, proto je jeho vypovídající schopnost o profilu povrchu nízká. Může tedy vést při hodnocení drsnosti povrchu k omylům v posuzování porovitých povrchů či povrchů narušených trhlinami nebo hlubokými rýhami. Tato odchylka nám nemůže umožnit představu o tom, jak vypadá povrch vytvořený danou technologickou operací. Pro popis mikrogeometrie je však tato charakteristika základní. Hodnoty R_a získané při opakovaném měření nabývají značné přesnosti. Mohou se ovšem vyskytnout dva povrchy se sice stejnou hodnotou R_a , ale z pohledu funkční spolehlivosti mohou vykazovat zcela odlišné chování. [8]

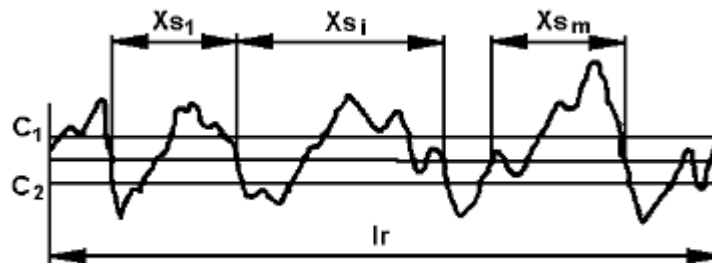
- Největší výška výstupku profilu R_p - je definována jako největší výška výstupku profilu v rozsahu základní délky l_r . [10]
- Největší hloubka prohlubně profilu R_v - v rozsahu základní délky je to největší hloubka prohlubně profilu. [10]
- Největší výška profilu R_z - je charakterizována součtem výšky nejvyššího výstupku profilu R_p a hloubky nejnižší prohlubně profilu R_v v rozsahu základní délky. [11]

Obr. 8 Parametry R_z , R_p a R_v [10]

- Celková výška profilu R_t - udává součet hloubky Z_v nejnižší prohlubně a výšky Z_p nejvyššího výstupku, ale pro rozsah vyhodnocované délky l_n . Tento parametr může mít proměnlivou nebo nestálou hodnotu. Jednotlivé výstupky profilu povrchu a rýhy ovlivňují taktéž jeho hodnotu. [9][10]
- Průměrná kvadratická úchylka profilu R_q - jedná se o kvadratický průměr pořadnic $Z(x)$ pro rozsah základní délky. R_q je zpravidla citlivější na výstupky a prohlubně měřeného povrchu, čímž ukazuje vyšší hodnoty než R_a . Pro strojírenský průmysl není tak využíván, užívá se v optickém průmyslu. [9][10]

3.1.3.2 Délkové (šířkové) parametry

Průměrná vzdálenost prvků profilu R_{Sm} - je definována jako střední vzdálenost výstupků profilu na střední čáře pro rozsah základní délky. [9][10]

Obr. 9 Parametr R_{sm} [10]

3.1.3.3 Tvarové (hybridní) parametry

Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu $R\Delta q$ - v rozsahu základní délky udává průměrnou kvadratickou hodnotu sklonu pořadnic dZ/dX . V aplikaci má tento parametr význam např. při odrazu světla nebo při galvanickém pokovování. [10]

3.1.4 Měření drsnosti povrchu- zařízení a přístroje

Metody měření povrchů můžeme obecně rozdělit na:

- Metody kvalitativní - k tomuto způsobu měření se používají vzorkovnice povrchů, ke kterým je přirovnáván měřený povrch. Je to spíše zastaralá metoda, neboť je založená na schopnostech posuzujícího pracovníka. [9]
- Metody kvantitativní (parametrické) - tyto metody jsou založené na matematickém popisu parametrů povrchu. V dnešní praxi se využívají tzv. profilometry, které kromě měření drsnosti disponují měřením vlnitosti, mnohdy i tvaru. [9]

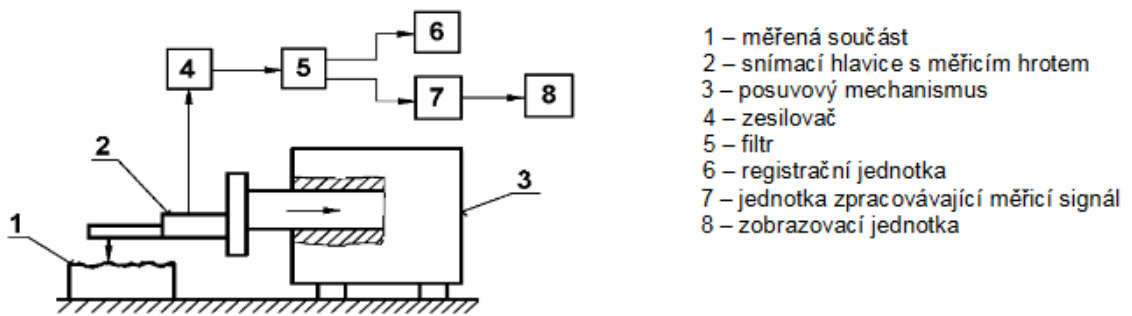
Měření se provádí dotykovými (kontaktními) přístroji nebo bezdotykovými přístroji.

3.1.4.1 Dotykové (kontaktní) přístroje

Princip dotykového přístroje spočívá v přímočarém pohybu hrotu, který vyhodnocuje povrch na základě snímaných souřadnic. Tato data jsou následně zpracována počítačově.

Kontaktní přístroj se skládá ze dvou částí:

- Mechanická část je složena ze stolku, na který se umísťuje snímaná součást. Další součástí je rameno se snímacím hrotem (snímací hlavicí). Rameno se pohybuje konstantní rychlostí a tím snímací hrot snímá nerovnosti povrchu. Rameno rovněž koná vratný přímočarý pohyb k navrácení do původní polohy.
- Elektronická část zajišťuje převod mechanického signálu generovaného snímacím hrotem na elektrický signál, který se dále zpracovává (grafický záznam nerovnosti povrchu, číselná hodnota příslušného parametru drsnosti). [12]



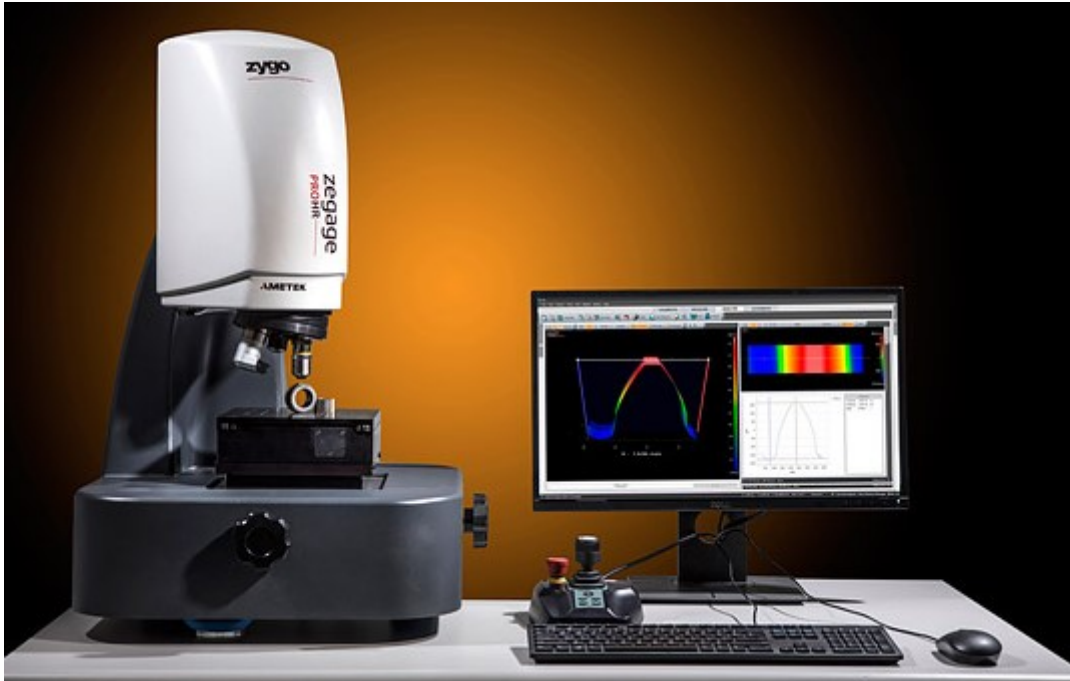
Obr. 10 Princip měření dotykovým profilometrem [10]

Správnost výsledků měření ovlivňuje poloměr zaoblení snímacího hrotu (2 μm , 5 μm , 10 μm), měřicí (přítlačná) síla (cca 0,00075 N), dále vrcholový úhel snímacího hrotu a v neposlední řadě rychlost změny měřicí síly. [12]

Ve strojírenské praxi mají kontaktní metody oproti bezkontaktním metodám výhodu, která spočívá ve větší toleranci vůči znečištění. Pohybem snímacího hrotu jsou odsunuty malé nečistoty, také olejová skvrna nepředstavuje překážku v měření. V takovém prostředí bezkontaktní sonda nemůže snímat povrch. Bezkontaktní metoda vyžaduje čistý měřený povrch. [12]

3.1.4.2 Bezdotykové přístroje

Bezdotykové měřicí přístroje využívají k analýze povrchu světelných paprsků. Tyto paprsky se odráží od cílového povrchu. Zrcadlová složka stoupá tím víc, čím je měřený povrch hladší a zmenšují se tak rozptylové složky. Světlo se nerozptyluje u ideálně hladkého povrchu. Pro měkké materiály nebo pro materiály náchylné k mechanickému poškození je možné zvolit tuto metodu snímání povrchu. [13]



Obr. 11 Bezkontaktní 3D optický profilometr [14]

3.2 Kinematická obrobitelnost

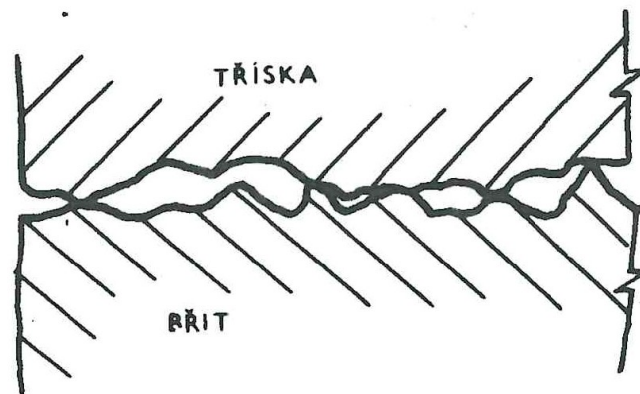
Kinematická obrobitelnost je spojena s opotřebením řezného nástroje. Při řezném procesu vlivem fyzikálních a chemických jevů a vlivem narůstajícího množství odebraného materiálu dochází ke kvantitativním a kvalitativním změnám řezné části nástroje-břítu. Tento popsáný děj se označuje jako otupování břítu nástroje. Geometrie břítu se mění v průběhu tohoto děje, dále se zhoršuje drsnost stykových míst a dochází také ke změně struktury nástroje. [19]

K základním mechanismům opotřebení nástrojů patří:

a) Mechanismy fyzikálně-mechanické:

- Křehký lom břítu - vzniká důsledkem krátkodobého přetížení nebo vysokým mechanickým zatížením (např. v důsledku nárazu břítu na tvrdou fázi, při přerušovaném řezu, změně průřezu třísky nebo vměstkem v obráběném materiálu).
- Plastická deformace - vzniká důsledkem vysokého mechanického a tepelného zatížení, které se může projevit formou lavinového opotřebení- deformace pojiva (kobaltu/niklu u slinutých karbidů) nebo odpevněním substrátu (např. martenzitu v HSS).

- Abraze - vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročásticemi nástroje uvolněných z břitu dochází k brusnému otěru.
- Adheze - popisuje vznik a následné okamžité porušování mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích nerovností třísky a čela důsledkem vysokých tlaků a teplot kovově čistých styčných povrchů.



Obr. 12 Princip adhezního otěru [19]

- Teplotní trhliny - tvorba hřebenovitých trhlin kolmých na hřbetě i čele nástroje.
- Poškozování břitů nástroje v důsledku chvění a vibrací - vlivem chvění a vibrací soustavy stroj-nástroj-obrobek dochází k nežádoucímu poškozování břitů nástroje.
- Únava materiálu - s únavou materiálu se setkáváme v důsledku cyklického namáhání rezného nástroje. [18]

b) Mechanismy chemické:

- Difuzní otěr - při tomto druhu otěru migrují atomy z obráběného do nástrojového materiálu a naopak. V tomto důsledku se tvoří mezikovové sloučeniny ve struktuře nástroje, které jsou nežádoucí.
- Tvorba chemických sloučenin - vlivem přítomnosti např. kyslíku dochází k oxidaci na povrchu nástroje.
- Interkrystalické zeslabování pojivových vazeb - v důsledku odleptání pojiva (např. kobaltu).
- Kombinace výše uvedených mechanismů. [18]

3.3 Dynamická obrobiteľnosť

Dynamická obrobiteľnosť je mierou rezných síly, krouticích momentu alebo výkonu, potrebného k úberu obrábaného materiálu. Snímanie rezných síl je možné provést dvoma spôsobmi: priamym a nepriamym merením. Ako nepriame sa označuje merenie, pri ktorom sa meria iné veličiny než síly. Na základe získaných veličín sa výčtom stanoví veľkosť síly. Nevýhodou tejto metódy je to, že lze stanoviť iba tangenciálne zložky rezných síly, nie však jej smer. Naopak priama metóda merenia umožňuje změřit všetky zložky silového zatížení. Pro priame merenie sa využíva tzv. dynamometry (prístroje na merenie zložiek síl) alebo tenzometrických sestav. Je nezbytné, aby merená veličina nebola závislá na provozních podmínkách dynamometru. Mezi hlavní požadavky pro konstrukci a funkčnost dynamometru patří tuhost, citlivost, a také schopnost měřit sledovanou veličinu v určitém rozsahu s požadovanou přesností. Měření jednotlivých složek sil by se vzájemně nemělo ovlivňovat.

Dynamometr se konstrukčně skládá z: pružného členu (vlivem zatížení se deformuje), dále ze snímače (přeměňuje mechanickou veličinu na hodnotu analogického parametru) a přijímače (zpracovává a zesiluje signál, případně zapisuje hodnoty).

Dynamometry je možné následovně dělit: podle metody měření (hydraulické, pneumatické, mechanické, elektrické, piezoelektrické nebo optické), podle počtu měřených složek síl (jednosložkové, dvousložkové, třísložkové nebo dynamometry umožňující měření točivých momentů) a podle metody obrábění (dynamometry pro frézování, broušení, soustružení, vrtání). [24]

3.3.1 Piezoelektrický dynamometr

Piezoelektrický dynamometr využívá piezoelektrického jevu, který vzniká v důsledku vzniku elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení. Vlivem deformace mřížky, ve které jsou uloženy negativní a pozitivní částice, vzniká náboj. Změnou jejich polohy se vytváří elektrický dipól. [20]



Obr. 13 Stacionární piezoelektrický dynamometr [21]

4 SHRNUÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část bakalářské práce s názvem „Frézování kompozitů s polymerní matricí“ popisuje a přibližuje témata frézování, kompozitní materiály a obrobitelnost kompozitů.

Na začátku práce je věnována pozornost základním pojmům frézování, rozdílu souslednému a nesouslednému frézování. Dále se věnují rezným podmínkám, rezným silám, frézovacímu nástroji a také CNC stroji, na kterém byly vyrobeny obrobky pro praktickou část. Další kapitola s názvem „kompozitní materiály“ popisuje kompozity z hlediska vyztužovacích částic a matrice. Závěrem této kapitoly je základní klasifikace kompozitních materiálů. Na závěr práce je uvedena kapitola o obrobitelnosti kompozitů. V této kapitole se věnují jak mikrogeometrické obrobitelnosti, tak i kinematické a dynamické obrobitelnosti.

Cílem praktické části bakalářské práce bude příprava experimentu, vytvoření 3D modelu v CAD softwaru, dále převedení 3D modelu do programu CNC stroje, výroba tří obrobků. Na těchto obrocích bude provedeno hodnocení kvality rezné plochy, stanovení obrobitelnosti a trendu chování.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 EXPERIMENT

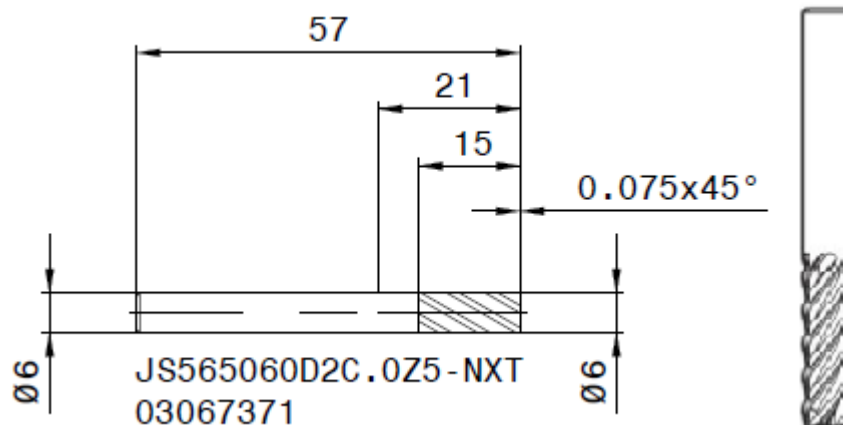
V praktické části byly provedeny tři experimenty, které se lišily v nastavení podmínek pro frézování. Obráběným dílcem byl zvolen kompozitní materiál. Výztuž tohoto materiálu tvoří skelná tkanina, matrici tvoří reaktoplastická pryskyřice.

V experimentu 1 byla řezná rychlost v_c a posuv na zub f_z konstantní. Hloubka řezu a_p však byla variabilní. Při experimentu 2 byla konstantní řezná rychlost a hloubka řezu, variabilní byl v tomto případě posuv na zub. V posledním experimentu 3 byla volitelná řezná rychlost, neměnný byl posuv na zub a hloubka řezu.

Šířka záběru a_e byla pro všechny tři experimenty konstantní.

5.1 Volba nástroje

Obráběcím nástrojem byla zvolena stopková monolitní karbidová fréza o průměru 6 mm od společnosti Seco Tools, která disponuje pěti břity.



Obr. 14 Rozměry a tvar zvoleného nástroje [24]

Následující tabulka (Tab. 1) uvádí doporučené nastavení nástroje při frézování.

Tab. 1 Doporučené parametry nástroje udávané výrobcem [25]

Monolitní stopková fréza	
Řezná rychlost v_c :	108-150 m/min
Posuv na zub f_z :	0,021-0,0545 mm/zub
Hloubka řezu a_p :	15 mm
Šířka záběru a_e :	0,3 mm
Otáčky vřetene n :	7162 ot./min
Rychlost posuvu v_f :	1504 mm/min

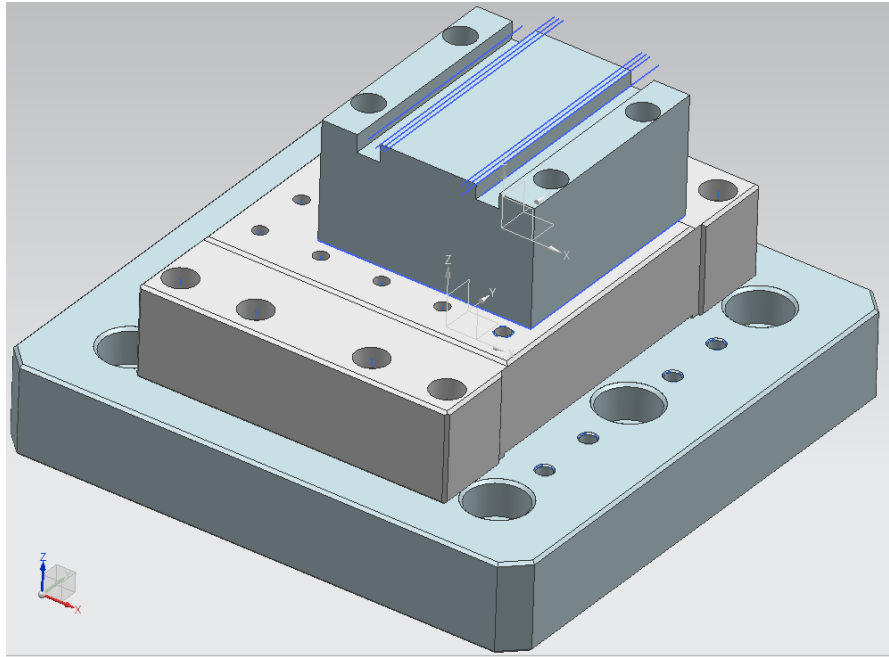
5.2 Programování experimentů

Příprava programu pro frézování kompozitních vzorků byla provedena v programu NX. Nejprve byl vytvořen v programu obráběný polotovár o rozměrech 74 x 74 x 40 mm spolu s otvory pro uchycení polotovaru k dynamometru. V každém experimentu bylo vytvořeno nesousledným frézováním šest drážek, na kterých bylo provedeno měření drsnosti. Měření bylo provedeno vždy na spodní straně a boční straně drážky.

5.2.1 Experiment 1 – Vliv hloubky řezu

Řezná rychlost a posuv na zub pro tento experiment byly voleny konstantní pro všech šest drážek. Hloubka řezu a šířka záběru byla nastavena variabilní pro všech šest drážek.

Nejprve byly vytvořeny v modelu obráběného materiálu prostřednictvím programu dvě drážky o šířce 10 mm a hloubce 6 mm. Těmto drážkám byla přiřazena hrubovací operace. Drážky byly zhotoveny z důvodu místa pro snímací hrot drsnoměru. Dále bylo nezbytné nadefinovat dráhy pohybu nástroje pomocí přímek tak, aby byly vyfrézovány jednotlivé drážky pro měření. Příмка tak tvoří dráhu nástroje a je orientována na střed nástroje. Rozmístění zkoumaných ploch bylo zvoleno následovně: hloubka řezu 1, 3 a 5 mm na jedné straně; hloubka řezu 2, 4 a 6 mm na straně druhé. Rozteč přímek mezi sebou činila 1,5 mm. Celkem tak bylo vytvořeno šest přímek, na kterých proběhla dokončovací operace.



Obr. 15 Konstrukce drah nástroje experimentu 1

Každé dokončovací operaci byly nadefinovány řezné podmínky uvedené v tabulce (Tab. 2).

Tab. 2 Řezné podmínky experimentu 1

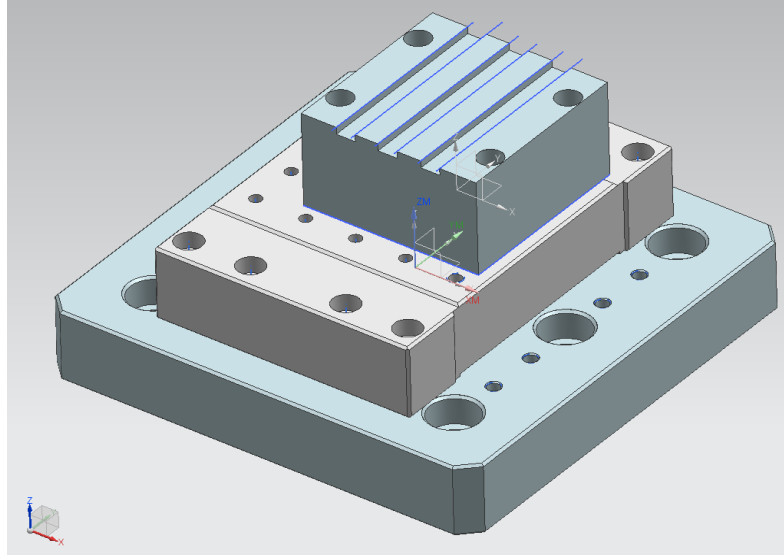
Řezné podmínky experimentu 1				
Číslo drážky	Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv na zub f_z [mm/zub]	Hloubka řezu a_p [mm]	Šířka záběru a_e [mm]
1	130	0,04	1	1,5
2	130	0,04	2	1,5
3	130	0,04	3	1,5
4	130	0,04	4	1,5
5	130	0,04	5	1,5
6	130	0,04	6	1,5

5.2.2 Experiment 2 – Vliv posuvu

V tomto experimentu byl posuv na zub zvolen variabilní pro všech šest drážek. Řezná rychlost, hloubka řezu a šířka záběru byla volena konstantní.

V modelu obráběného materiálu prostřednictvím programu byly vytvořeny 3 drážky o šířce 10 mm a hloubce 6 mm. V těchto drážkách opět proběhla hrubovací operace. Dále byly

nadefinovány dráhy pohybu nástroje pomocí přímek po obou stranách drážky. Bylo zapotřebí opět vyfrézovat 6 drážek pro jednotlivá měření. Přímka tak opět tvoří dráhu nástroje a je orientována na střed nástroje. Tyto přímky určují dráhu dokončovací operace.



Obr. 16 Konstrukce drah nástroje experimentu 2

Každé dokončovací operaci byly nadefinovány řezné podmínky uvedené v tabulce (Tab. 3).

Tab. 3 Řezné podmínky experimentu 2

Řezné podmínky experimentu 2				
Číslo drážky	Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv na zub f_z [mm/zub]	Hloubka řezu a_p [mm]	Šířka záběru a_e [mm]
1	130	0,02	3	1,5
2	130	0,04	3	1,5
3	130	0,06	3	1,5
4	130	0,08	3	1,5
5	130	0,10	3	1,5
6	130	0,12	3	1,5

5.2.3 Experiment 3 – Vliv řezné rychlosti

Řezná rychlost pro tento experiment byla zvolena variabilní. Hodnoty posuvu na zub, šířky záběru a hloubky řezu byly nastaveny konstantně pro všech šest drážek.

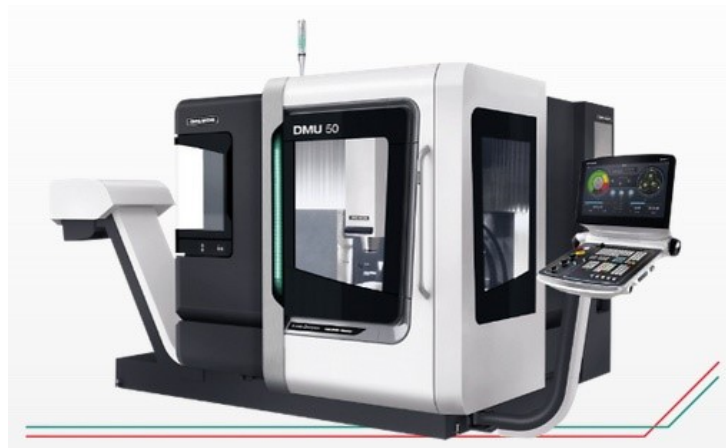
Hrubovací i dokončovací operace drážek proběhly stejným konstrukčním způsobem jako v experimentu 2. Pro dokončovací operace byly zvoleny řezné podmínky uvedené v tabulce (Tab. 4).

Tab. 4 Řezné podmínky experimentu 3

Řezné podmínky experimentu 3				
Číslo drážky	Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv na zub f_z [mm/zub]	Hloubka řezu a_p [mm]	Šířka záběru a_e [mm]
1	50	0,04	3	1,5
2	80	0,04	3	1,5
3	110	0,04	3	1,5
4	140	0,04	3	1,5
5	170	0,04	3	1,5
6	200	0,04	3	1,5

5.3 Provedení experimentů

Výroba všech tří obrobků byla provedena na univerzální CNC frézce DMU-50 od společnosti DMG MORI, která disponuje možností naklápění rotačního stolu. [26]



Obr. 17 Obráběcí centrum DMU-50 [26]

Tento stroj dominuje přehledným ovládacím panelem a dotykovým displejem, jenž napomáhá intuitivní a přímé interakci. [26]

Následující tabulka (Tab. 5) uvádí technické parametry CNC frézky DMU-50.

Tab. 5 Technické údaje DMU-50 [26]

CNC frézka DMU- 50	
Model:	DMU-50
Maximální pojezd v ose X:	500 mm
Maximální pojezd v ose Y:	450 mm
Maximální pojezd v ose Z:	400 mm
Max. zatížitelnost stolu:	300 kg
Průměr stolu:	630 mm
Max. otáčky vřetene:	18000 ot./min
Max. výška obrobku:	300 mm
Výkon pohonu:	14 kW
Točivý moment:	84 Nm
Max. pojezd v ose X, Y, Z:	30 m/min

Aby bylo možné sledovat průběh sil při obrábění, byl na stůl stroje připevněn pomocí upínací desky a šroubů stacionární piezoelektrický dynamometr od společnosti Kistler. Na takto připravený dynamometr byl vždy pevně připevněn výchozí kompozitní materiál pomocí čtyř šroubů.



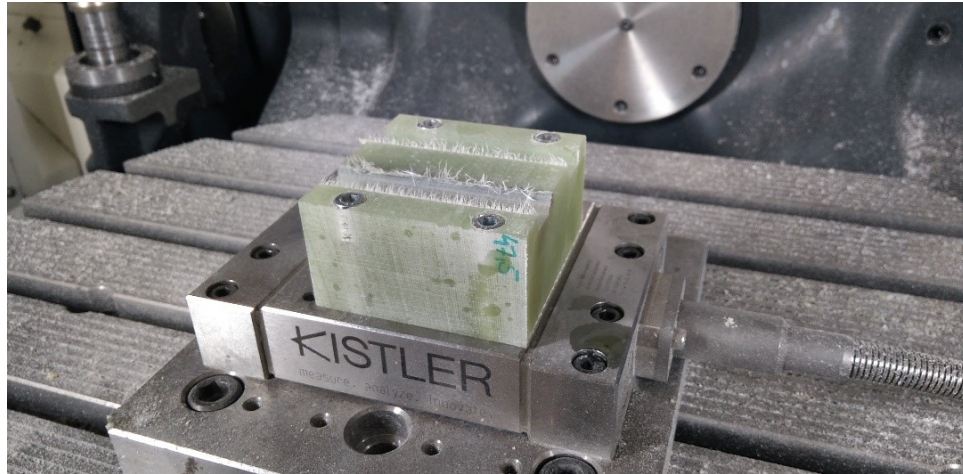
Obr. 18 Dynamometr Kistler 9129AA [21]

Následující tabulka (Tab. 6) uvádí technické parametry dynamometru Kistler.

Tab. 6 Technické údaje dynamometru [21]

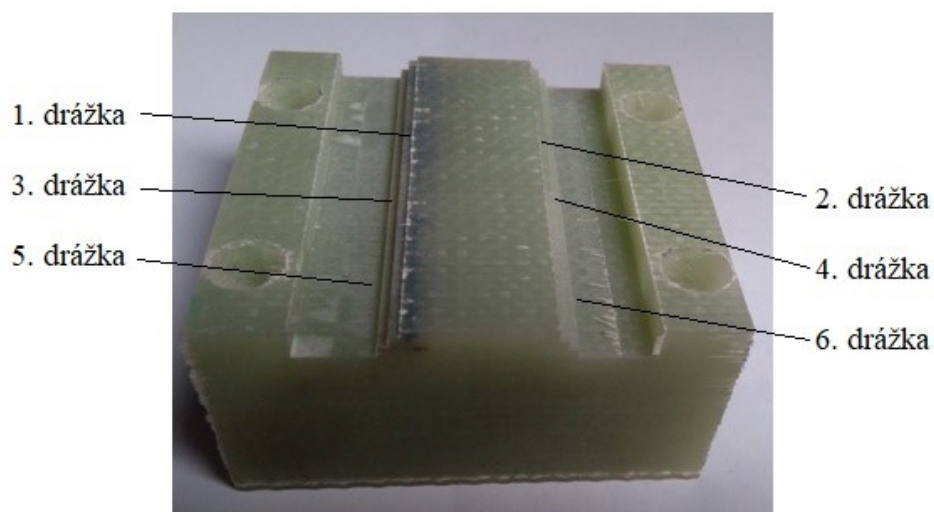
Dynamometr Kistler	
Model:	9129AA
Rozměry:	150 x 107 mm
Montážní plocha:	90 x 105 mm
Max. měření silového působení F_x, F_y, F_z :	-10 až + 10kN

Pro každý experiment byl programem NX generován tzv. G kód, což je programovací jazyk obráběcího stroje. Pomocí tohoto kódu obráběcí stroj vykonává pohybové a pomocné instrukce. Aby bylo možné snímat řezné síly vždy pro jednu drážku, byly v G kódu vytvořeny STOP příkazy. Tyto příkazy byly vytvořeny z důvodu spuštění programu pro záznam průběhu řezných sil vždy pro jednu drážku. Po načtení G kódu byl spuštěn samotný proces obrábění. [2]

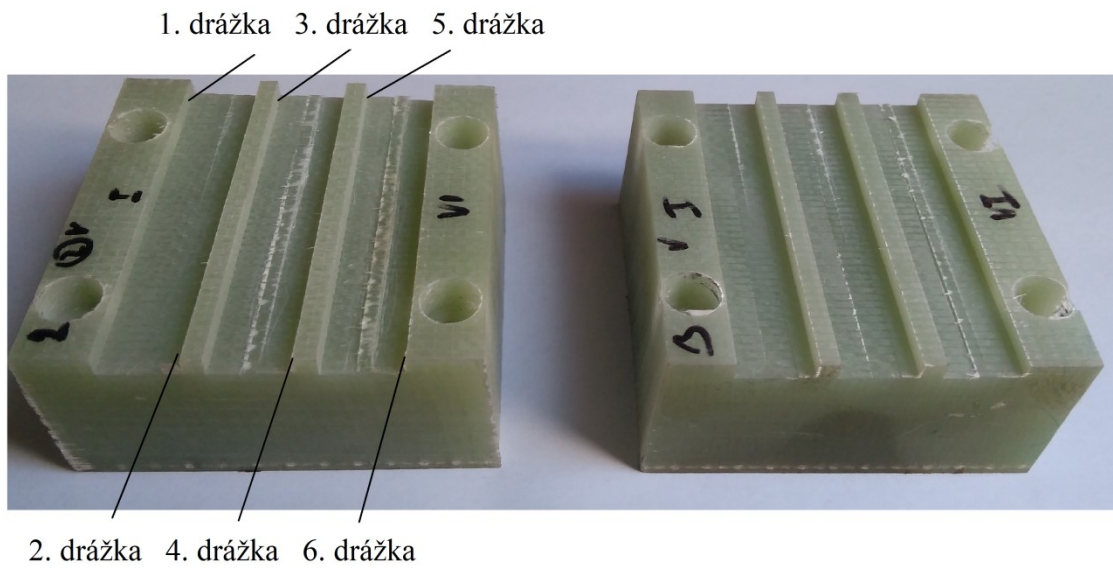


Obr. 19 Obrobek po frézování

Po obrábění byl vždy obrobek pomocí stlačeného vzduchu očištěn od třísek. Následně proběhlo začištění otřepů (skelných vláken) pomocí zalamovacího nože.



Obr. 20 Obrobek experimentu 1



Obr. 21 Obrobek experimentu 2, 3

6 KVALITA ŘEZNÉ PLOCHY

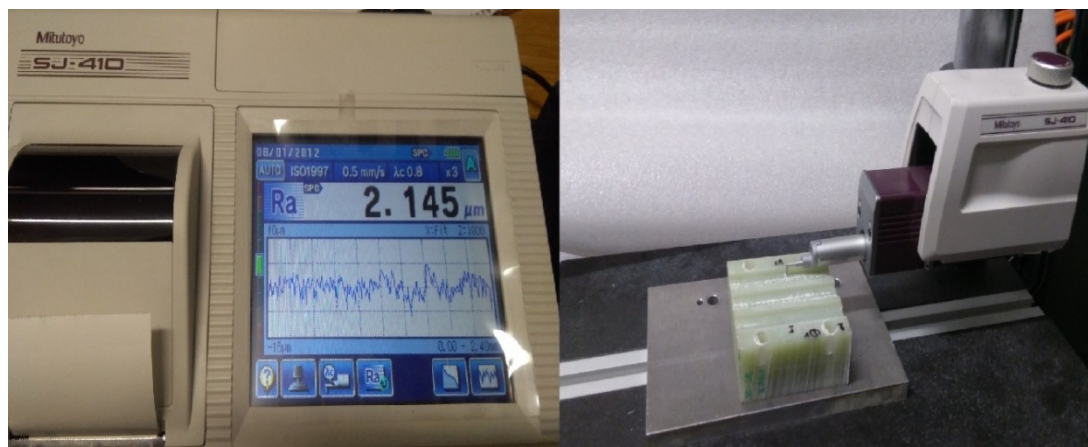
Kontaktním profilometrem od společnosti Mitutoyo SJ-410 byla provedena měření v jednotlivých drážkách. Měření proběhlo vždy na boční a spodní straně drážky. Bylo naměřeno 15 měření na jedné měřené ploše, celkem tedy na obrobku bylo provedeno 180 měření.

Tabulka (Tab. 7) odkazuje na technické údaje přístroje pro měření drsnosti povrchu.

Tab. 7 Technické údaje drsnoměru [27]

Drsnoměr Mitutoyo	
Model:	SJ-410
Vyhodnocovaný rozsah:	25 mm
Rozsah měření:	800 μm , 80 μm , 8 μm
Rozlišitelnost:	0,001 μm
Měřicí síla snímače:	0,75 mN
Úhel snímacího hrotu:	60°
Poloměr snímacího hrotu:	2 μm

Pro správnost naměřených dat byla provedena kalibrace přístroje před měřením každého obrobku pomocí referenčního materiálu od výrobce profilometru Mitutoyo.



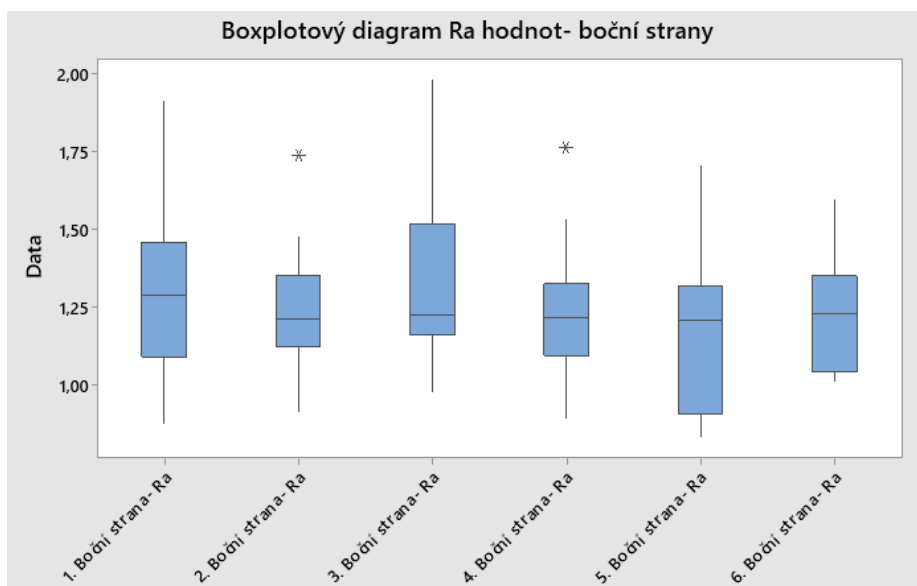
Obr. 22 Měření drsnoměrem Mitutoyo

Přehled naměřených dat v příloze P I.

6.1 Kontrola naměřených dat

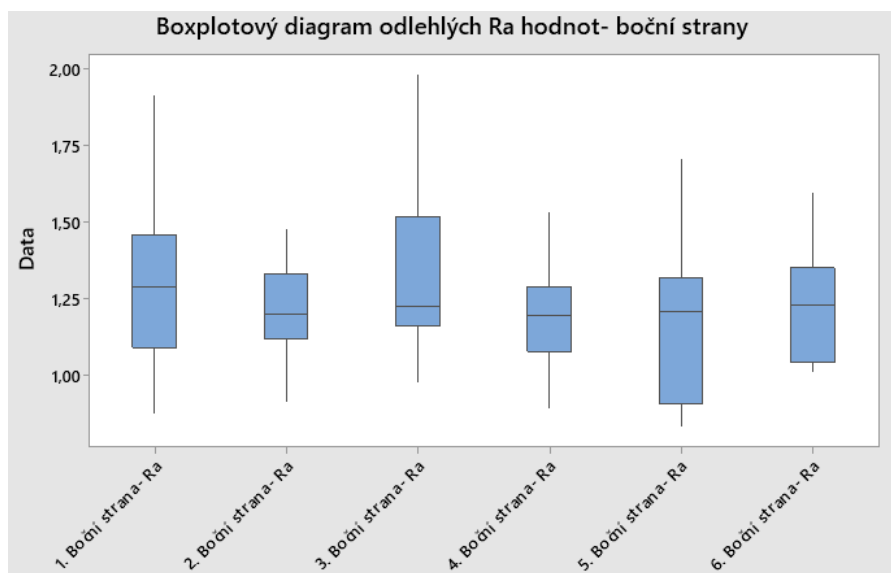
Analýza naměřených hodnot byla provedena v programu Minitab, kde pomocí tzv. boxplotového diagramu byly vyřazeny odlehlé hodnoty ze základního souboru. Odlehlé hodnoty

lze snadno z diagramu rozpoznat. Tyto hodnoty jsou značeny pomocí hvězdičky a po najetí kurzoru na odlehlou hodnotu program vypíše polohu odlehlé hodnoty.



Obr. 23 Příklad diagramu před vyřazením odlehlých hodnot

Odehlé hodnoty byly ze souboru vyřazeny. Pro zpětnou kontrolu byl vždy sestaven znovu boxplotový diagram.



Obr. 24 Příklad diagramu po vyřazení odlehlých hodnot

Přehled odlehlých hodnot v příloze P I, kde jsou zvýrazněny kurzívou.

6.2 Hodnocení kvality řezné plochy

Statistické hodnocení kvality řezné plochy bylo provedeno v programu Minitab. Získány tak byly hodnoty průměrů, nejistot měření typu A, směrodatných odchylek, minim, maxim, prvního a třetího kvartilu a mediánu.

6.2.1 Vliv hloubky řezu

Tabulky (Tab. 8, 9) dávají přehled o statistickém hodnocení parametrů Ra , Rz při volitelné hloubce řezu.

Tab. 8 Statistické zpracování naměřených hodnot experimentu 1- spodní strany

Číslo drážky-parametr	Průměr [μm]	Nejistota měření [μm]	Směr. odchylka [μm]	Min [μm]	1. kvartil [μm]	Medián [μm]	3. kvartil [μm]	Max [μm]
1- Ra	1,8888	0,0749	0,2369	1,6490	1,6905	1,8465	1,9940	2,4480
1- Rz	11,5640	0,3170	1,0030	10,2330	10,6950	11,4300	12,3210	13,3540
2- Ra	1,5758	0,0320	0,1198	1,3020	1,4980	1,6075	1,6638	1,7230
2- Rz	10,0700	0,3380	1,2630	6,7560	9,5460	10,3260	10,9060	11,7860
3- Ra	1,7879	0,0330	0,1278	1,6110	1,6730	1,7830	1,9010	2,0370
3- Rz	11,4560	0,3510	1,3590	9,2450	10,7810	11,0090	12,4210	13,9890
4- Ra	1,5144	0,0253	0,0947	1,3610	1,4145	1,5480	1,5953	1,6100
4- Rz	10,4350	0,1680	0,6280	9,5240	9,8920	10,5200	10,8720	11,5240
5- Ra	2,1053	0,0428	0,1656	1,8400	1,9730	2,1250	2,2140	2,3910
5- Rz	13,9160	0,3850	1,4920	11,6210	12,7240	13,8760	14,7750	17,2110
6- Ra	1,5465	0,0300	0,1122	1,3310	1,4615	1,5350	1,6525	1,7060
6- Rz	10,3420	0,2790	1,0450	9,4240	9,7410	10,1710	10,4530	13,5920

Nejmenší hodnoty Ra bylo dosaženo na 4. spodní straně s hodnotou $Ra = (1,514 \pm 0,095)$ μm . Nejmenší hodnoty Rz bylo dosaženo na 2. spodní straně s hodnotou $Rz = (10,07 \pm 1,27)$ μm . Největší chyba měření vznikla při měření parametru Rz 5. spodní strany.

Tab. 9 Statistické zpracování naměřených hodnot experimentu 1 - boční strany

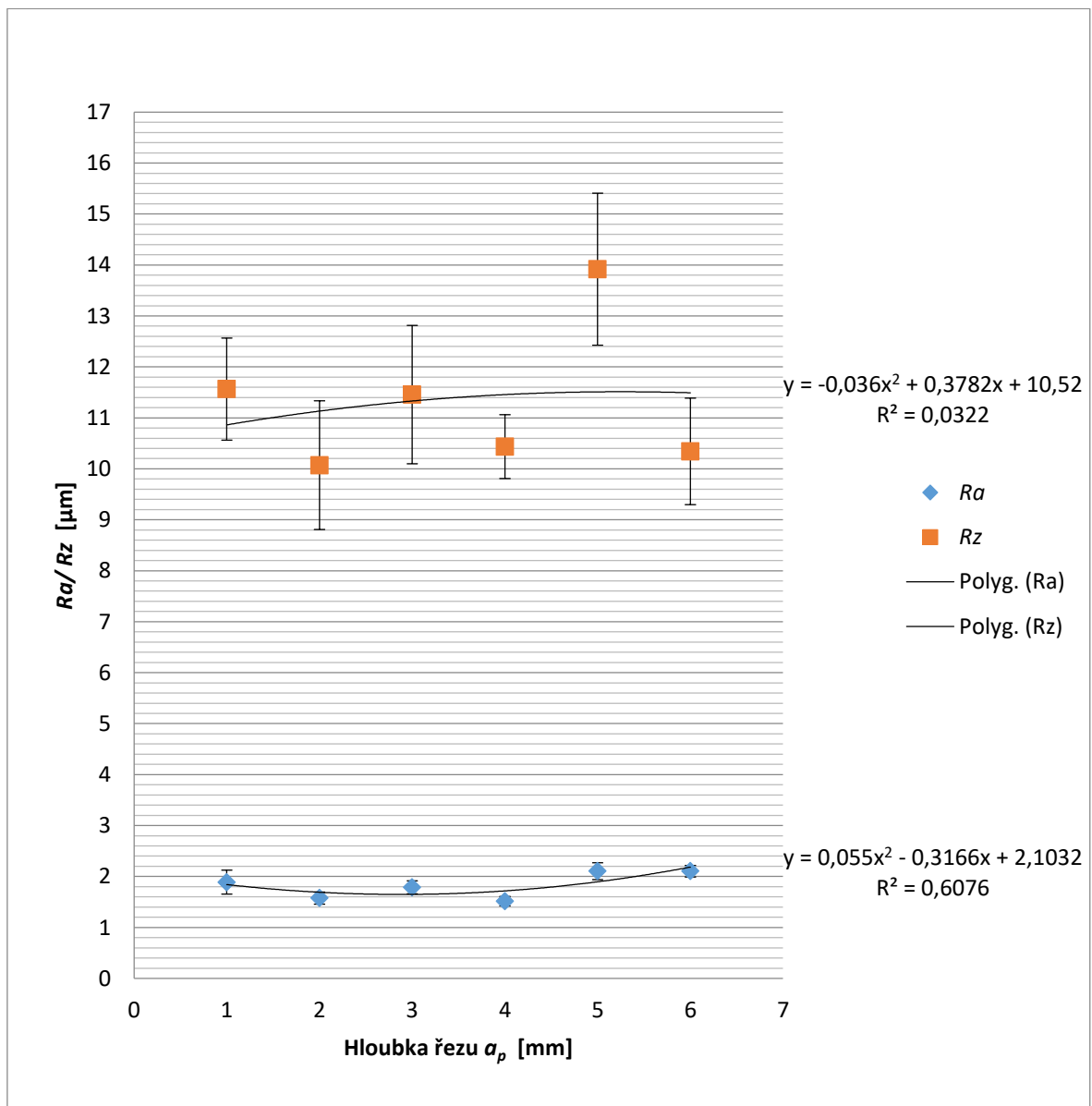
Číslo drážky-parametr	Průměr [μm]	Nejistota měření [μm]	Směr. odchylka [μm]	Min [μm]	1. kvartil [μm]	Medián [μm]	3. kvartil [μm]	Max [μm]
1- Ra	2,1670	0,1750	0,6550	1,4690	1,5700	2,1030	2,5470	3,7360
1- Rz	14,1300	1,0200	3,8000	7,4900	11,0100	14,9500	16,6400	20,8700
2- Ra	1,4235	0,0495	0,1918	1,0990	1,2490	1,3930	1,5740	1,7980
2- Rz	10,2220	0,2250	0,8710	8,4190	9,6400	10,2030	10,7780	12,0850
3- Ra	1,7581	0,0396	0,1482	1,4640	1,6387	1,7785	1,8692	2,0240
3- Rz	12,5920	0,3720	1,3930	10,5240	11,4680	12,2910	13,9900	14,8030
4- Ra	1,5882	0,0522	0,2020	1,3410	1,4530	1,5590	1,7380	2,0670
4- Rz	11,0330	0,4190	1,6230	9,1000	10,1940	10,7020	11,4900	16,0830
5- Ra	2,9600	0,3350	1,2060	0,6350	2,4810	2,5890	3,7820	5,0860
5- Rz	16,6000	1,9200	6,9400	2,9200	13,4400	15,7100	22,5500	29,3900
6- Ra	1,3884	0,0398	0,1320	1,1630	1,2640	1,4340	1,4880	1,5950
6- Rz	10,7180	0,3740	1,2400	9,0070	9,7320	10,3480	12,0720	12,5520

Nejmenší hodnoty Ra bylo dosaženo na 6. boční straně s hodnotou $Ra = (1,39 \pm 0,14) \mu\text{m}$.

Nejmenší hodnoty Rz bylo dosaženo na 2. boční straně s hodnotou $Rz = (10,22 \pm 0,88) \mu\text{m}$.

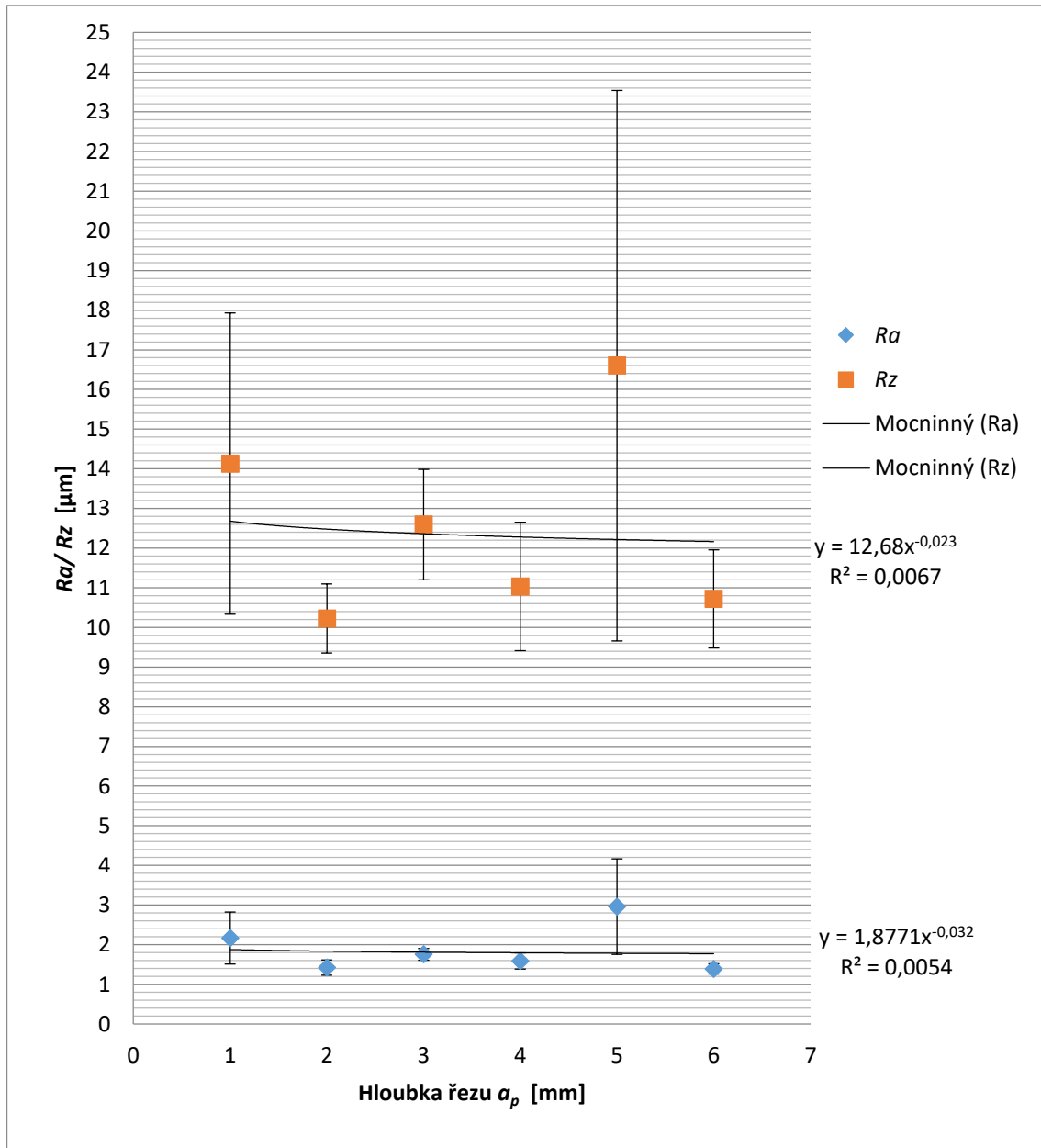
Největší chyba měření vznikla při měření parametru Rz 5. boční strany.

Následující grafická hodnocení zobrazují závislosti Ra , Rz na hloubce řezu, obrázek (Obr. 25) pro spodní strany a obrázek (Obr. 26) pro boční strany.



Obr. 25 Graf závislosti Ra , Rz hodnot na hloubce řezu - spodní strany

Trend závislosti parametru Ra na hloubce řezu (Obr. 25) vykazuje polynomický průběh klesajícího charakteru po hloubku řezu 3 mm, dále má mírný rostoucí charakter. Závislost parametru Rz na hloubce řezu (Obr. 25) vykazuje rovněž polynomický průběh rostoucí s hloubkou řezu. Vlivem velkých chyb měření nemají trendy vypovídající charakter. Byly proto zobrazeny chybové úsečky, které ukazují velikost chyby měření.



Obr. 26 Graf závislosti Ra , Rz hodnot na hloubce řezu - boční strany

Trend závislosti parametru Ra na hloubce řezu (Obr. 26) vykazuje mocninný průběh klesajícího charakteru s rostoucí hloubkou řezu. Závislost parametru Rz na hloubce řezu (Obr. 26) vykazuje rovněž klesající mocninný průběh s rostoucí hloubkou řezu. Vlivem velkých chyb měření nemají trendy vypovídající charakter, hodnota koeficientu spolehlivosti je příliš nízká. Byly proto zobrazeny chybové úsečky, které ukazují velikost chyby měření.

6.2.2 Vliv posuvu

Tabulky (Tab. 10, 11) ukazují přehled o statistickém hodnocení parametrů Ra , Rz při variabilním posuvu.

Tab. 10 Statistické zpracování naměřených hodnot experimentu 2 - spodní strany

Číslo drážky-parametr	Průměr [μm]	Nejistota měření [μm]	Směr. odchylka [μm]	Min [μm]	1. kvartil [μm]	Medián [μm]	3. kvartil [μm]	Max [μm]
1- Ra	1,2325	0,0340	0,1319	1,0300	1,1340	1,1910	1,3730	1,4510
1- Rz	8,9350	0,2580	0,9980	7,7030	8,2300	8,9550	9,3700	11,5030
2- Ra	1,4020	0,0245	0,0948	1,2270	1,3290	1,3800	1,4840	1,5640
2- Rz	9,6810	0,2550	0,9870	8,5100	8,6870	9,8480	10,5340	11,1390
3- Ra	1,5599	0,0585	0,2265	1,3010	1,3540	1,5470	1,7340	2,0420
3- Rz	11,4690	0,5220	2,0200	8,9540	9,7170	11,2460	13,1480	15,4580
4- Ra	1,7809	0,0441	0,1707	1,5540	1,6410	1,7550	1,8810	2,1960
4- Rz	12,6340	0,3650	1,4130	10,6390	11,1140	12,7450	13,3230	15,2280
5- Ra	1,7699	0,0319	0,1194	1,5700	1,6935	1,7130	1,8820	1,9590
5- Rz	12,0450	0,2380	0,8890	11,0510	11,2820	11,9870	12,3050	14,0310
6- Ra	2,0874	0,0612	0,2372	1,7520	1,8750	2,1450	2,2300	2,5120
6- Rz	14,4490	0,5190	2,0090	10,9430	12,8280	14,3290	15,6710	19,0930

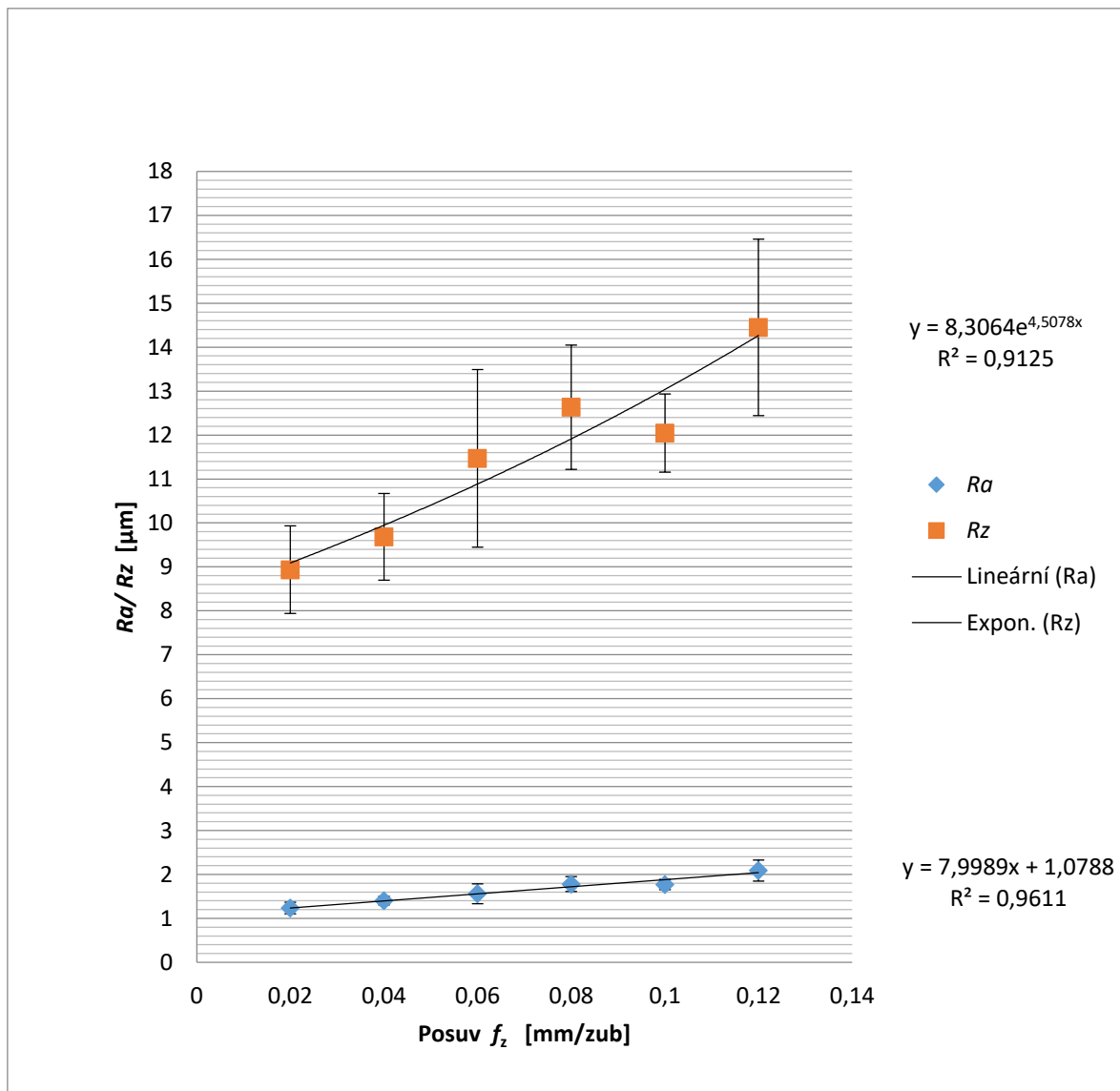
Nejmenší hodnoty Ra bylo dosaženo na 1. spodní straně s hodnotou $Ra = (1,23 \pm 0,14) \mu\text{m}$. Nejmenší hodnoty Rz bylo dosaženo na 1. spodní straně s hodnotou $Rz = (8,935 \pm 0,998) \mu\text{m}$. Největší chyba měření vznikla při měření parametru Rz 3. spodní strany.

Tab. 11 Statistické zpracování naměřených hodnot experimentu 2 - boční strany

Číslo drážky-parametr	Průměr [μm]	Nejistota měření [μm]	Směr. odchylka [μm]	Min [μm]	1. kvartil [μm]	Medián [μm]	3. kvartil [μm]	Max [μm]
1- Ra	1,3806	0,0522	0,1954	1,0560	1,2190	1,3485	1,5740	1,6780
1- Rz	10,9110	0,5100	1,9090	8,2560	8,9700	11,0520	12,3280	14,5580
2- Ra	1,1611	0,0436	0,1688	0,8950	1,0130	1,1720	1,2420	1,4590
2- Rz	8,9490	0,3980	1,5400	5,9890	7,2900	9,2430	10,0990	11,1050
3- Ra	1,3913	0,0355	0,1327	1,1530	1,3250	1,3685	1,4998	1,6080
3- Rz	10,7700	0,2990	1,1200	9,1130	9,9910	10,5300	11,7260	12,8030
4- Ra	1,3727	0,0610	0,2364	1,1360	1,1680	1,2760	1,5800	1,7830
4- Rz	9,6940	0,3660	1,4160	8,0400	8,4460	9,2530	10,4580	12,1370
5- Ra	1,6305	0,0315	0,1134	1,4620	1,5490	1,6210	1,6855	1,8880
5- Rz	10,6650	0,2760	0,9940	8,5370	10,1720	10,6450	11,2220	12,2380
6- Ra	2,0150	0,0469	0,1757	1,6830	1,9057	2,0595	2,1060	2,2510
6- Rz	11,5900	0,3050	1,1420	9,2920	10,8800	11,6270	12,3870	13,7290

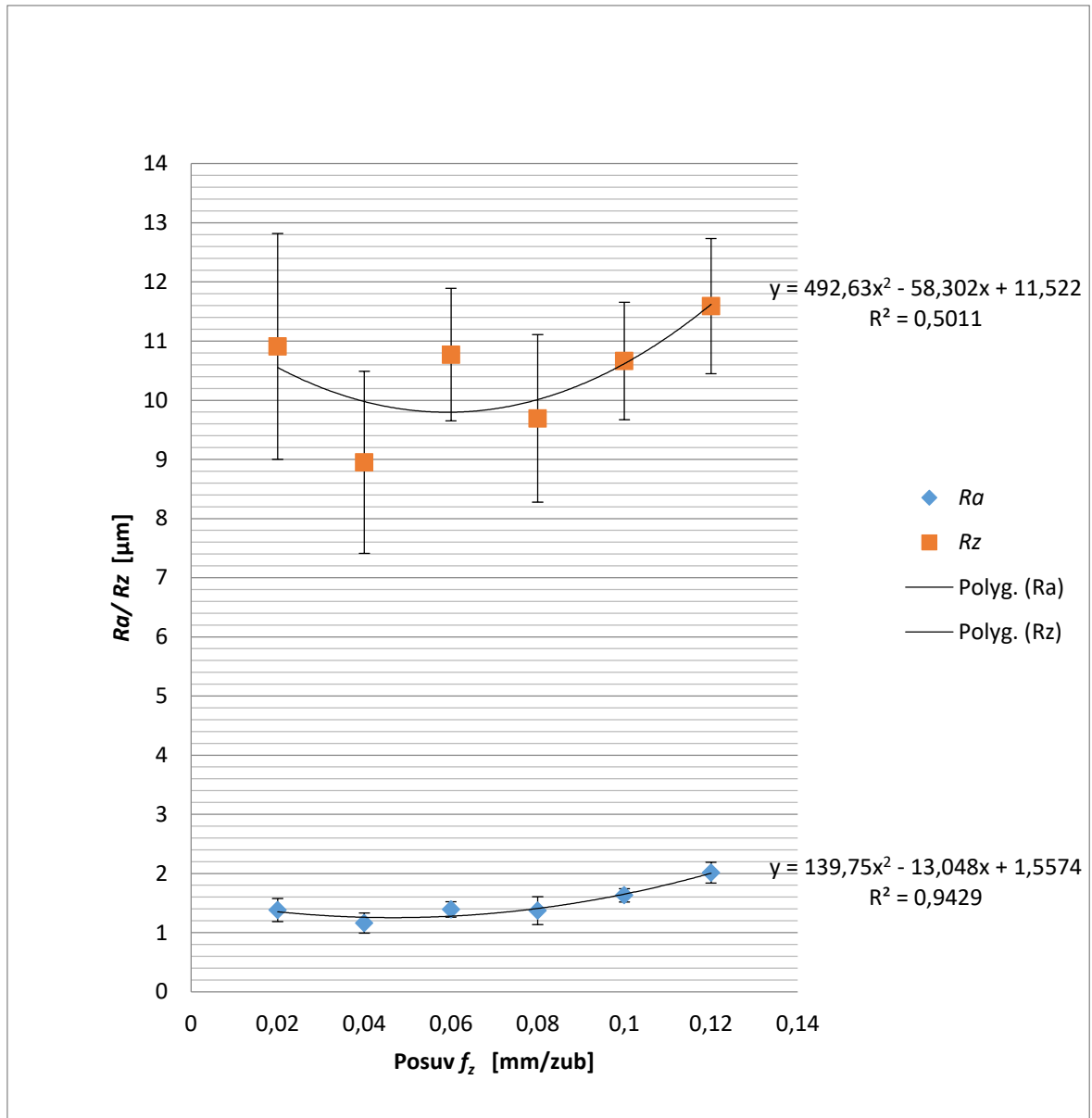
Nejmenší hodnoty Ra bylo dosaženo na 2. boční straně s hodnotou $Ra = (1,16 \pm 0,17) \mu\text{m}$. Nejmenší hodnoty Rz bylo dosaženo na 2. boční straně s hodnotou $Rz = (8,95 \pm 1,54) \mu\text{m}$. Největší chyba měření vznikla při měření parametru Rz 1. boční strany.

Následující grafická hodnocení zobrazují závislosti parametrů Ra , Rz na posuvu, obrázek (Obr. 27) pro spodní strany a obrázek (Obr. 28) pro boční strany.



Obr. 27 Graf závislosti Ra , Rz hodnot na posuvu - spodní strany

Trend závislosti parametru Ra na posuvu (Obr. 27) vykazuje lineární průběh rostoucího charakteru s rostoucím posuvem. Závislost parametru Rz na posuvu (Obr. 27) vykazuje rostoucí exponenciální průběh s rostoucím posuvem.



Obr. 28 Graf závislosti Ra , Rz hodnot na posuvu - boční strany

Trend závislosti parametru Ra na posuvu (Obr. 28) vykazuje polynomický průběh, který klesá po hodnotu posuvu 0,04 mm/zub, dále roste se zvyšujícím se posuvem. Závislost parametru Rz na posuvu (Obr. 28) vykazuje rovněž polynomický průběh, který klesá po hodnotu posuvu 0,06 mm/zub, dále tento trend roste s rostoucím posuvem.

6.2.3 Vliv řezné rychlosti

Tabulky (Tab. 12, 13) dávají přehled o statistickém hodnocení parametrů Ra , Rz při volitelné řezné rychlosti.

Tab. 12 Statistické zpracování naměřených hodnot experimentu 3 - spodní strany

Číslo drážky-parametr	Průměr [μm]	Nejistota měření [μm]	Směr. odchylka [μm]	Min [μm]	1. kvartil [μm]	Medián [μm]	3. kvartil [μm]	Max [μm]
1- Ra	1,7169	0,0197	0,0681	1,5760	1,6702	1,7160	1,7788	1,7930
1- Rz	12,1390	0,3560	1,2350	9,7030	11,7360	11,9830	12,8630	14,6960
2- Ra	1,8984	0,0442	0,1655	1,5320	1,7680	1,9090	2,0337	2,1270
2- Rz	13,4010	0,5330	1,9940	10,0660	11,8730	13,4380	14,7580	17,0680
3- Ra	1,2322	0,0266	0,0994	1,0450	1,1732	1,2400	1,2953	1,4200
3- Rz	8,9730	0,1900	0,7100	7,8210	8,4160	8,8090	9,7540	9,9540
4- Ra	1,3566	0,0488	0,1892	1,0340	1,2790	1,3240	1,5250	1,7750
4- Rz	9,6560	0,3850	1,4920	7,8780	8,4850	9,7670	10,3420	13,7010
5- Ra	1,5451	0,0450	0,1682	1,2030	1,4375	1,5590	1,6600	1,8180
5- Rz	11,3040	0,3640	1,3620	9,5640	10,0780	11,2160	12,3760	13,8140
6- Ra	1,5129	0,0349	0,1210	1,3150	1,4670	1,4805	1,6102	1,7010
6- Rz	11,6100	0,4790	1,6600	8,6960	10,5120	11,6480	12,8010	14,5730

Nejmenší hodnoty Ra bylo dosaženo na 3. spodní straně s hodnotou $Ra = (1,23 \pm 0,10) \mu\text{m}$.

Nejmenší hodnoty Rz bylo dosaženo na 3. spodní straně s hodnotou $Rz = (8,97 \pm 0,71) \mu\text{m}$.

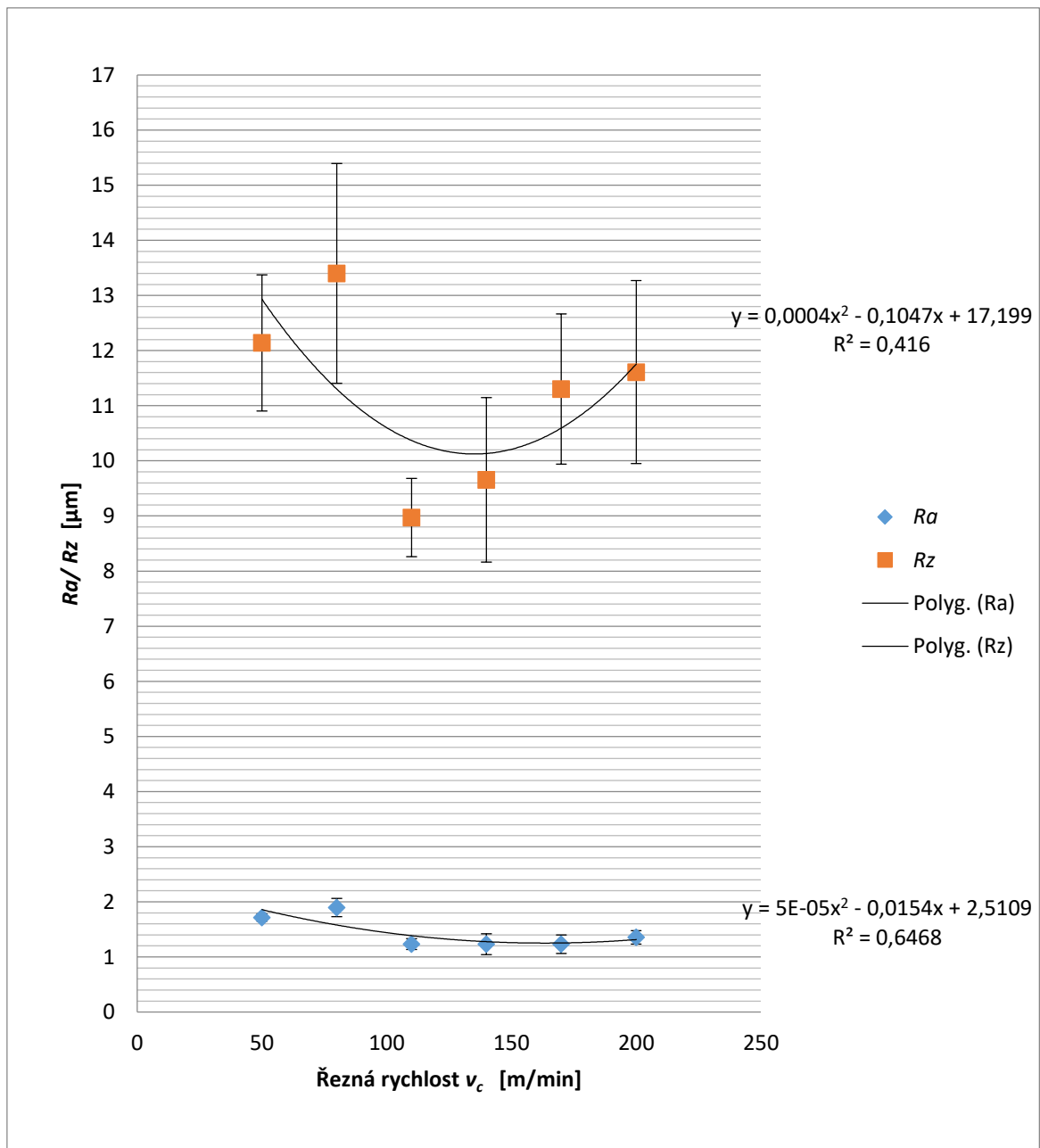
Největší chyba měření vznikla při měření parametru Rz 2. spodní strany.

Tab. 13 Statistické zpracování naměřených hodnot experimentu 3 - boční strany

Číslo drážky-parametr	Průměr [μm]	Nejistota měření [μm]	Směr. odchylka [μm]	Min [μm]	1. kvartil [μm]	Medián [μm]	3. kvartil [μm]	Max [μm]
1- Ra	1,3205	0,0733	0,2840	0,8750	1,0890	1,2870	1,4590	1,9100
1- Rz	10,2470	0,6200	2,4010	7,5540	8,0920	9,5870	12,3080	15,6240
2- Ra	1,2024	0,0450	0,1683	0,9150	1,1155	1,1995	1,3315	1,4750
2- Rz	9,2330	0,2730	1,0230	6,9780	8,7930	9,4050	9,8250	10,8070
3- Ra	1,3290	0,0761	0,2946	0,9770	1,1590	1,2240	1,5180	1,9800
3- Rz	9,8230	0,5450	2,1090	6,9730	8,2770	9,3980	11,6940	13,7140
4- Ra	1,1886	0,0433	0,1620	0,8920	1,0770	1,1935	1,2887	1,5310
4- Rz	9,2160	0,2700	1,0090	7,4330	8,4230	9,2120	10,0960	11,0180
5- Ra	1,1482	0,0682	0,2641	0,8320	0,9040	1,2060	1,3160	1,7050
5- Rz	9,2300	0,5020	1,9430	6,7190	7,6520	8,8490	10,3900	13,9240
6- Ra	1,2122	0,0485	0,1879	1,0110	1,0410	1,2290	1,3490	1,5910
6- Rz	9,1890	0,2220	0,8600	7,8040	8,5600	9,0270	10,1260	10,7190

Nejmenší hodnoty Ra bylo dosaženo na 5. boční straně s hodnotou $Ra = (1,15 \pm 0,2) \mu\text{m}$. Nejmenší hodnoty Rz bylo dosaženo na 6. boční straně s hodnotou $Rz = (9,19 \pm 0,86) \mu\text{m}$. Největší chyba měření vznikla při měření parametru Rz 1. boční strany.

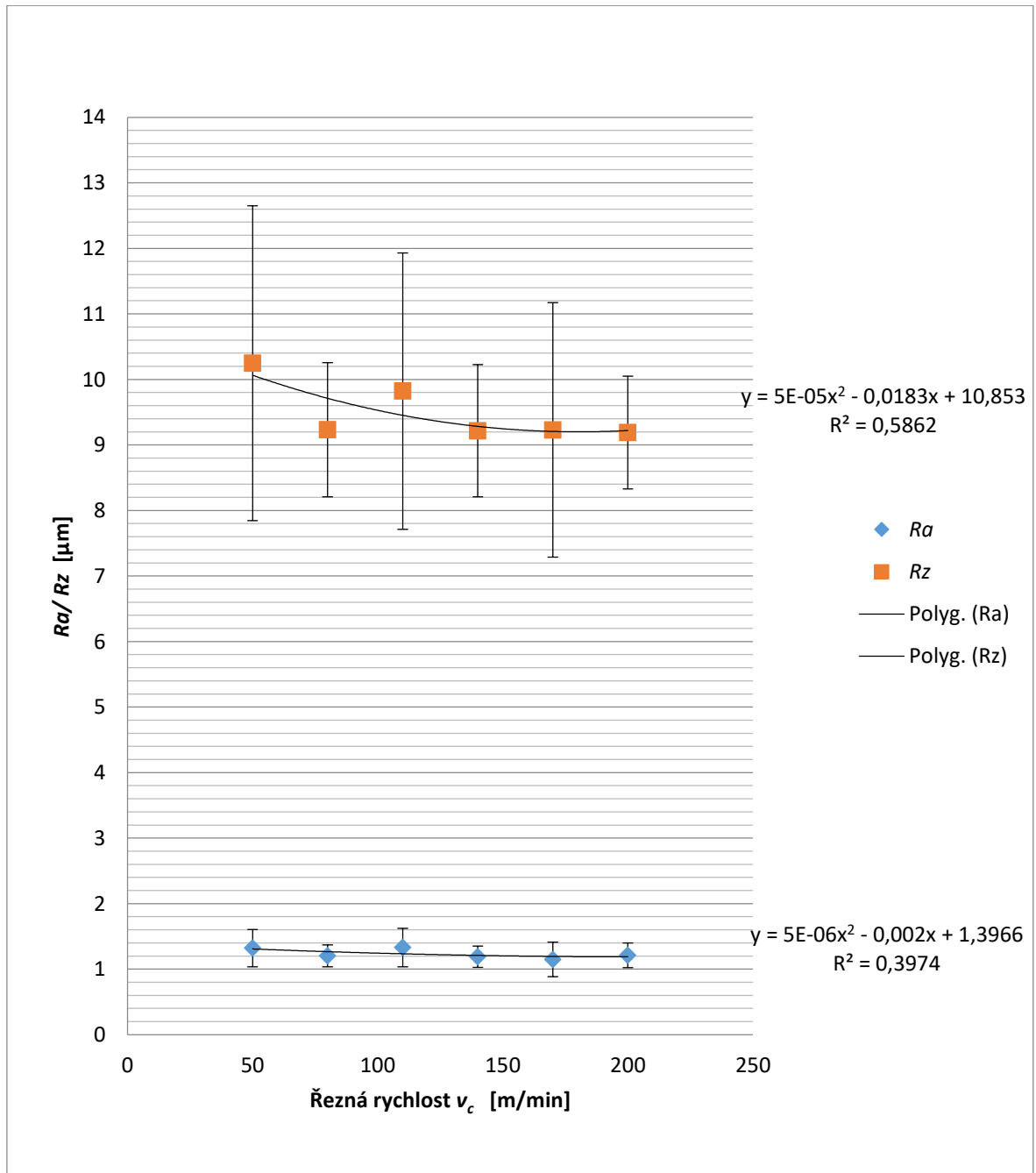
Následující grafická hodnocení zobrazují závislosti parametrů Ra , Rz na řezné rychlosti, obrázek (Obr. 29) pro spodní strany a obrázek (Obr. 30) pro boční strany.



Obr. 29 Graf závislosti Ra , Rz hodnot na řezné rychlosti - spodní strany

Trend závislosti parametru Ra na řezné rychlosti (Obr. 29) vykazuje polynomický průběh, který klesá po hodnotu řezné rychlosti 170 m/min a dále roste se zvyšující se hodnotou

řezné rychlosti. Závislost parametru Rz na řezné rychlosti (Obr. 29) vykazuje rovněž polynomický průběh, který strmě klesá po hodnotu 140 m/min, dále tento trend strmě roste s rostoucí řeznou rychlostí. Tyto rovnice však nemají vypovídající hodnotu vzhledem k R faktorům. Byly proto vytvořeny chybové úsečky, které ukazují chybu měření příliš velikou ke stanovení závislosti.

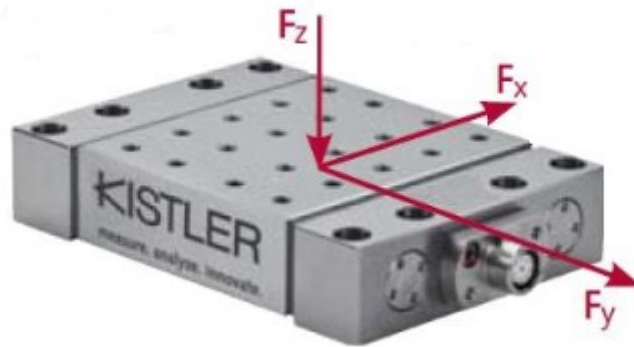


Obr. 30 Graf závislosti Ra , Rz hodnot na řezné rychlosti - boční strany

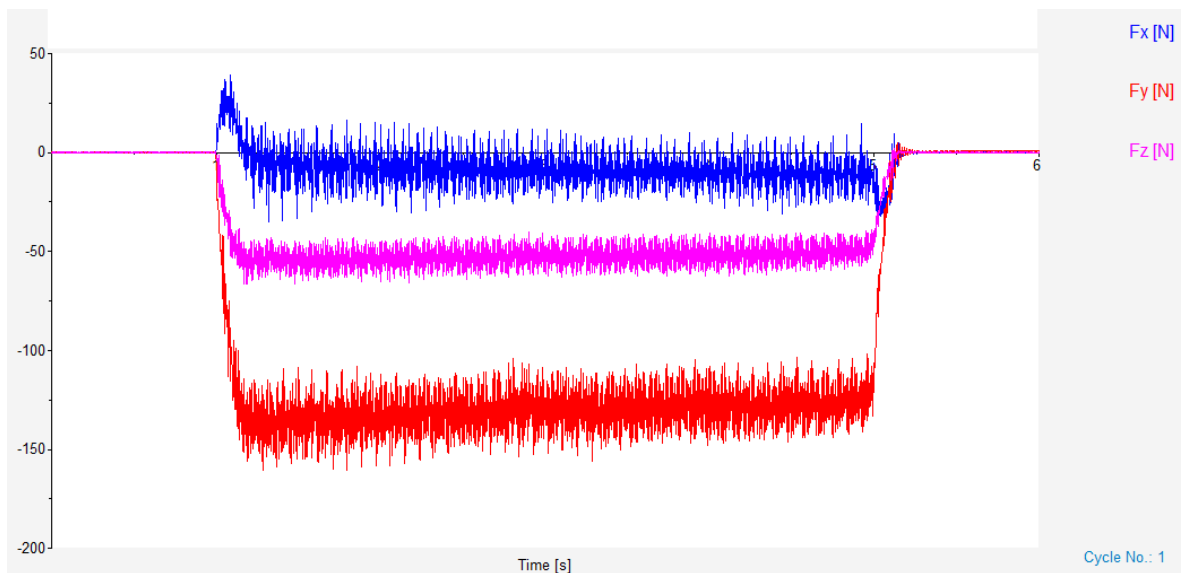
Trend závislosti parametru R_a na řezné rychlosti (Obr. 30) vykazuje polynomický průběh, který klesá se zvyšující se hodnotou řezné rychlosti. Závislost parametru R_z na řezné rychlosti (Obr. 30) vykazuje rovněž polynomický průběh, který klesá po řeznou rychlost 170 m/min, dále roste s rostoucí řeznou rychlostí. Tyto rovnice však nemají vypovídající hodnotu vzhledem k R faktorům. Byly proto vytvořeny chybové úsečky, které ukazují chybu měření příliš velkou ke stanovení závislosti.

7 PRŮBĚH SLOŽEK ŘEZNÝCH SIL PŘI OBRÁBĚNÍ

Prostřednictvím softwaru od společnosti Kistler byl zaznamenán průběh složek řezných sil F_x , F_y a F_z . Před zahájením měření bylo provedeno vynulování dynamometru. Pro každou drážku byl spuštěn nový záznam. Celkem tak bylo vytvořeno 18 záznamů průběhů složek řezných sil.



Obr. 31 Schéma osových směrů dynamometru [21]



Obr. 32 Příklad grafického průběhu složek řezných sil experimentu 1 - 6. drážka

Zbylé grafické průběhy složek řezných sil v příloze P II. Z těchto záznamů dále proběhlo statistické hodnocení složek řezných sil.

7.1 Stanovení obrobitelnosti ze složek řezných sil

V následující podkapitole bude stanovena obrobitelnost kompozitního materiálu z hlediska působení složek řezných sil. Aritmetické průměry jednotlivých složek sil v tabulkách (Tab. 14, 15, 16) jsou uváděny v absolutních hodnotách. Grafická stanovení obrobitelnosti složek řezných sil byla provedena v programu Excel. Do závislostí byly použity *RMS* hodnoty, což jsou efektivní hodnoty vhodné pro sinusové nebo proměnlivé průběhy.

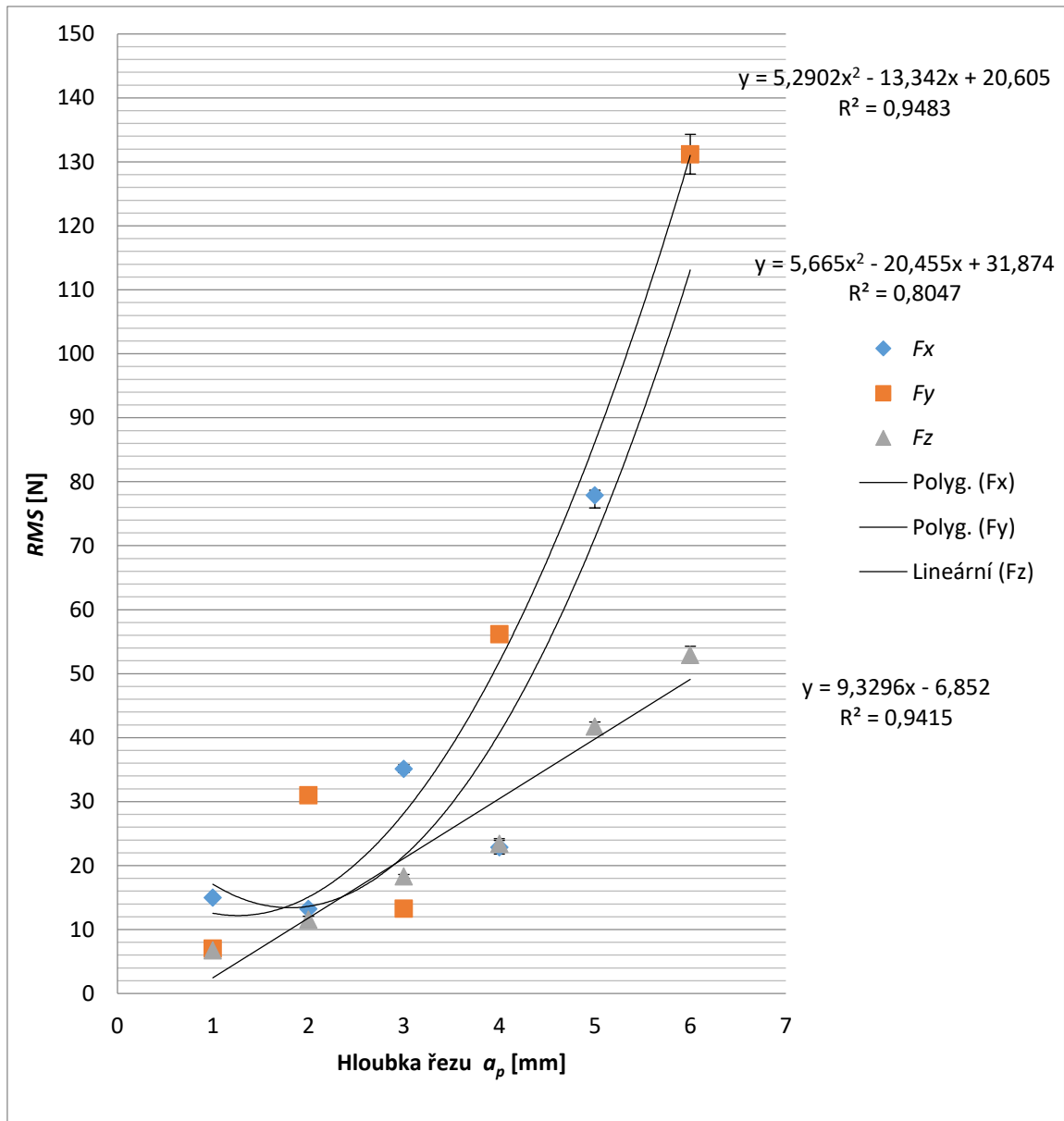
7.1.1 Vliv hloubky řezu

Tabulka (Tab. 14) uvádí statistické hodnocení složek řezných sil (Obr. I-VI) při variabilní hloubce řezu.

Tab. 14 Statistické zpracování složek řezných sil experimentu 1

		Průměr [N]	Směr. od. [N]	Min [N]	Max [N]	RMS [N]
1. drážka	F_x [N]	11,440	0,352	-23,630	73,480	14,990
	F_y [N]	3,926	0,407	-28,720	45,980	7,035
	F_z [N]	4,694	0,422	-36,160	25,320	6,769
2. drážka	F_x [N]	11,140	0,393	-33,740	21,350	13,260
	F_y [N]	29,610	1,222	-58,550	1,580	31,020
	F_z [N]	10,660	0,515	-34,910	7,128	11,590
3. drážka	F_x [N]	33,560	0,613	15,560	61,320	35,150
	F_y [N]	11,360	0,320	-4,033	31,400	13,270
	F_z [N]	16,720	0,304	-39,110	-4,534	18,320
4. drážka	F_x [N]	20,580	1,070	-50,720	29,780	22,850
	F_y [N]	54,620	1,038	-117,600	15,760	56,170
	F_z [N]	21,940	0,789	-62,870	8,458	23,410
5. drážka	F_x [N]	76,250	1,974	39,040	112,400	77,870
	F_y [N]	8,378	0,509	-14,940	37,090	12,850
	F_z [N]	40,180	0,677	-70,410	-13,310	41,770
6. drážka	F_x [N]	8,592	1,910	-35,140	37,610	13,180
	F_y [N]	130,600	3,102	-165,600	-93,010	131,200
	F_z [N]	52,540	1,335	-68,380	-34,720	52,950

Nejmenší F_x složka byla naměřena při hloubce řezu 6 mm s hodnotou $(8,59 \pm 1,91)$ N, naopak největší síla působila při hloubce řezu 5 mm, jejíž hodnota je $(76,25 \pm 1,98)$ N. Nejmenší F_y složka byla naměřena při hloubce řezu 1 mm s hodnotou $(3,93 \pm 0,41)$ N, naopak největší síla působila při hloubce řezu 6 mm, jejíž hodnota je $(130,60 \pm 3,11)$ N. Nejmenší F_z složka byla naměřena při hloubce řezu 1 mm s hodnotou $(4,69 \pm 0,43)$ N, naopak největší síla působila při hloubce řezu 6 mm, jejíž hodnota je $(52,54 \pm 1,34)$ N.



Obr. 33 Graf závislosti RMS hodnot na hloubce řezu

Obrázek (Obr. 33) ukazuje chování trendů závislosti RMS hodnot na hloubce řezu. Z grafu byly vyřazeny hodnoty složky F_y pro hloubku řezu 5 mm a složky F_x pro hloubku řezu 6 mm z důvodu nelogického chování. Tyto hodnoty by způsobily zkreslení výsledných trendů. Trend složky F_x má polynomický charakter, klesá po hloubku řezu 2 mm a strmě roste od hloubky řezu 2 mm. Trend složky F_y vykazuje rovněž polynomický charakter, roste se zvyšující se hloubkou řezu. Lineární charakter vykazuje trend složky F_z , který roste se zvyšující se hloubkou řezu.

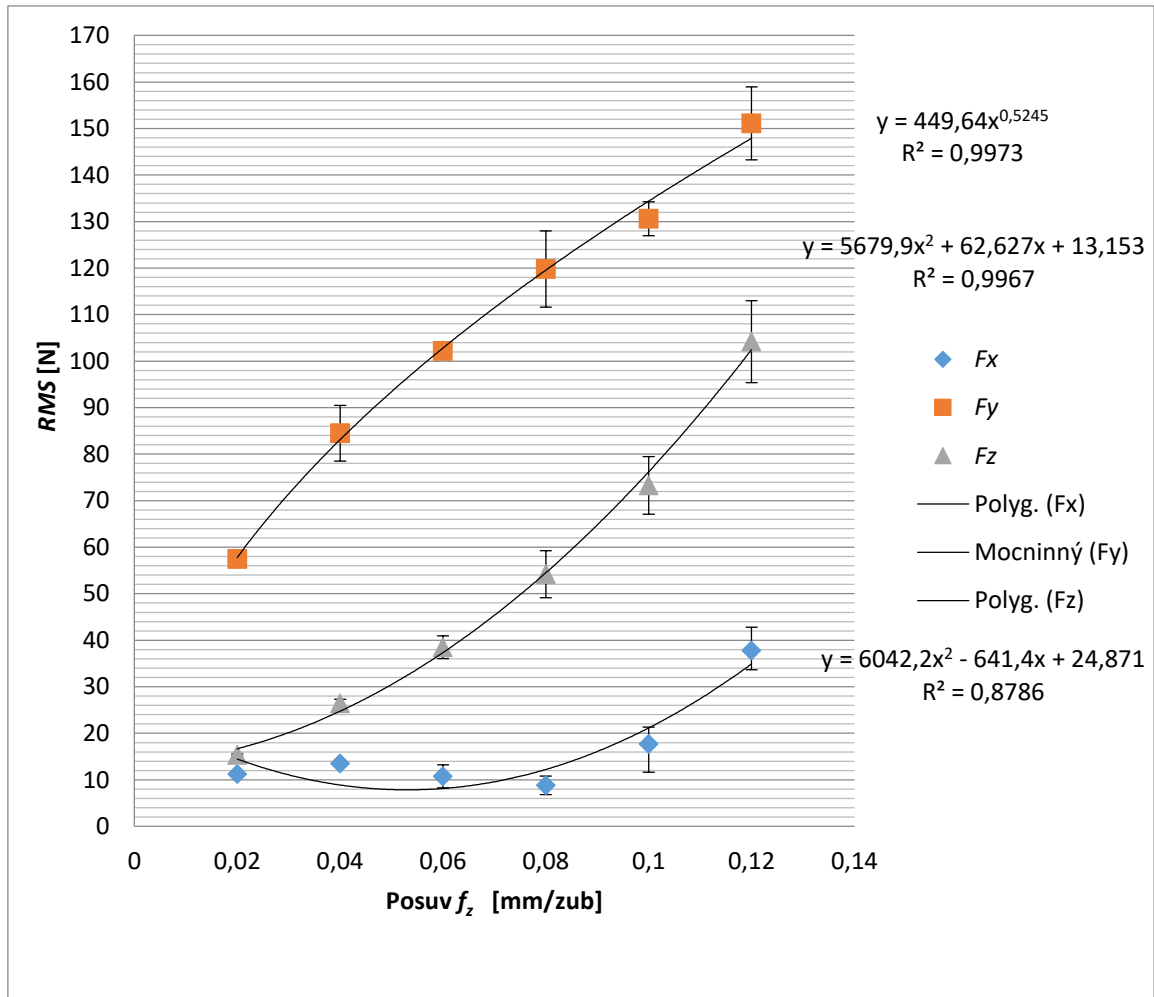
7.1.2 Vliv posuvu

Tabulka (Tab. 15) uvádí statistické hodnocení složek řezných sil (Obr. VII-XII) při variabilním posuvu.

Tab. 15 Statistické zpracování složek řezných sil experimentu 2

		Průměr [N]	Směr. od. [N]	Min [N]	Max [N]	RMS [N]
1. drážka	F_x [N]	10,060	0,369	-1,210	22,440	11,230
	F_y [N]	56,630	0,317	36,760	76,890	57,480
	F_z [N]	14,800	0,199	-23,870	-6,223	15,350
2. drážka	F_x [N]	11,940	0,530	-30,030	14,640	13,520
	F_y [N]	83,660	5,983	-117,800	-51,300	84,490
	F_z [N]	26,050	0,876	-38,290	-12,740	26,440
3. drážka	F_x [N]	7,815	2,482	-36,230	55,740	10,770
	F_y [N]	101,500	1,397	54,450	152,100	102,200
	F_z [N]	38,020	2,451	-53,060	-16,770	38,500
4. drážka	F_x [N]	0,587	1,997	-28,450	38,280	8,816
	F_y [N]	118,700	8,178	-165,400	-51,170	119,800
	F_z [N]	53,570	5,060	-78,300	-32,820	54,200
5. drážka	F_x [N]	14,620	6,080	-51,010	15,960	17,690
	F_y [N]	129,900	3,644	94,740	166,300	130,600
	F_z [N]	72,520	6,181	-104,900	-46,790	73,280
6. drážka	F_x [N]	36,280	4,103	8,338	92,750	37,750
	F_y [N]	150,300	7,829	-197,600	-104,400	151,100
	F_z [N]	103,500	8,806	-144,600	-65,080	104,200

Nejmenší F_x složka byla naměřena při posuvu 0,08 mm/zub s hodnotou $(0,59 \pm 2,00)$ N, naopak největší síla působila při posuvu na zub 0,02 mm/zub, jejíž hodnota je $(36,28 \pm 4,11)$ N. Nejmenší F_y složka byla naměřena při posuvu 0,02 mm/zub s hodnotou $(56,63 \pm 0,32)$ N, naopak největší síla působila při posuvu 0,12 mm/zub, jejíž hodnota je $(150,30 \pm 7,83)$ N. Nejmenší F_z složka byla naměřena při posuvu 0,02 mm/zub s hodnotou $(14,8 \pm 0,2)$ N, naopak největší síla působila při posuvu na zub 0,12 mm/zub, jejíž hodnota je $(103,50 \pm 8,81)$ N.



Obr. 34 Graf závislosti RMS hodnot na posuvu

Obrázek (Obr. 34) ukazuje chování trendů závislosti RMS hodnot na posuvu. Trend složky F_x má polynomický charakter, klesá po hodnotu posuvu 0,06 mm/zub, od této hodnoty dále roste. Trend složky F_y vykazuje mocninný charakter, roste se zvyšujícím se posuvem. Polynomický charakter vykazuje trend složky F_z , který roste se zvyšující se hodnotou posuvu.

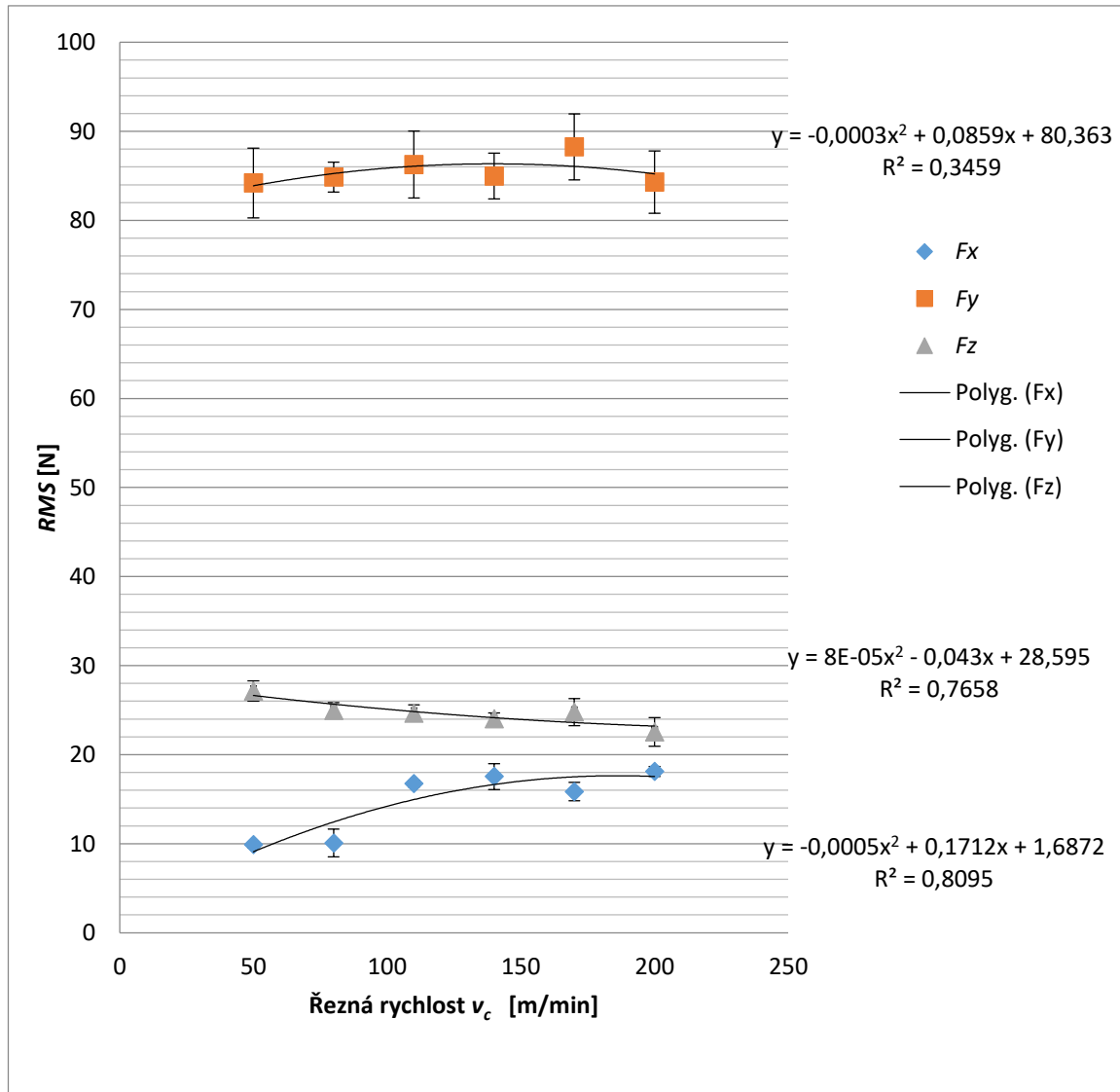
7.1.3 Vliv řezné rychlosti

Tabulka (Tab. 16) uvádí statistické hodnocení složek řezných sil (Obr. XIII-XVIII) při variabilní řezné rychlosti.

Tab. 16 Statistické zpracování složek řezných sil experimentu 3

		Průměr [N]	Směr. od. [N]	Min [N]	Max [N]	RMS [N]
1. drážka	F_x [N]	8,259	0,333	-10,580	26,830	9,888
	F_y [N]	83,380	3,918	49,960	116,000	84,210
	F_z [N]	26,630	1,140	-41,430	-14,330	27,140
2. drážka	F_x [N]	10,780	1,549	-24,730	15,260	10,080
	F_y [N]	84,190	1,669	-112,900	-53,560	84,860
	F_z [N]	24,520	0,897	-36,170	-10,960	24,960
3. drážka	F_x [N]	13,970	0,380	-15,470	40,740	16,750
	F_y [N]	85,570	3,753	53,590	119,500	86,270
	F_z [N]	24,280	0,929	-36,190	-14,550	24,660
4. drážka	F_x [N]	16,410	1,456	-32,200	3,836	17,540
	F_y [N]	84,420	2,578	-112,600	-48,660	84,980
	F_z [N]	23,680	0,675	-35,740	-9,384	24,020
5. drážka	F_x [N]	14,560	1,028	-11,340	31,230	15,850
	F_y [N]	87,520	3,715	61,830	119,200	88,250
	F_z [N]	24,160	1,530	-35,600	-9,112	24,780
6. drážka	F_x [N]	16,780	0,559	-39,260	4,785	18,100
	F_y [N]	83,490	3,504	-116,600	-46,020	84,310
	F_z [N]	22,170	1,617	-33,250	-5,548	22,560

Nejmenší F_x složka byla naměřena při řezné rychlosti 50 m/min s hodnotou $(8,26 \pm 0,34)$ N, naopak největší síla působila při řezné rychlosti 200 m/min, jejíž hodnota je $(16,78 \pm 0,56)$ N. Nejmenší F_y složka byla naměřena při řezné rychlosti 50 m/min s hodnotou $(83,38 \pm 3,92)$ N, naopak největší síla působila při řezné rychlosti 170 m/min, jejíž hodnota je $(87,52 \pm 3,72)$ N. Nejmenší F_z složka byla naměřena při řezné rychlosti 200 m/min s hodnotou $(22,17 \pm 1,62)$ N, naopak největší síla působila při řezné rychlosti 50 m/min, jejíž hodnota je $(26,63 \pm 1,14)$ N.



Obr. 35 Graf závislosti RMS hodnot na řezné rychlosti v_c

Obrázek (Obr. 35) ukazuje chování trendů závislosti RMS hodnot na řezné rychlosti. Trend složky F_x má polynomický charakter, roste se zvyšující se řeznou rychlostí. Trend složky F_y vykazuje polynomický charakter, roste po řeznou rychlost 140 m/min a dále klesá. Polynomický charakter vykazuje také trend složky F_z , který klesá se zvyšující se řeznou rychlostí.

8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

- Vliv hloubky řezu

Při pohledu na závislosti R_a , R_z na hloubce řezu (Obr. 25, 26) je možné si všimnout nízkých koeficientů spolehlivosti R . Zobrazené rovnice vzhledem k těmto koeficientům nemají vypovídající charakter. O těchto trendech je tak možné diskutovat. Trendy na obr. 25 jsou spíše rostoucího charakteru, zatímco trendy na obr. 26 jsou klesajícího charakteru. Nelze tedy jednoznačně z grafů stanovit, jaký celkový vliv má hloubka řezu na tento materiál. Důvodem by mohl být druh materiálu a také nízký počet měření. Změna hloubky řezu tedy nemá významný vliv na jakost. Významnější vliv má na působení složek řezných sil.

S rostoucí hloubkou řezu rostou trendy složek F_y , F_z závislostí RMS hodnot na hloubce řezu (Obr. 33). Trend složky F_x klesá po hloubku řezu 2 mm, dále roste. Celkově lze odhadnout, čím větší tedy bude volena hloubka řezu, tím větší bude působení složek řezných sil. K lepšímu stanovení závislostí by mohlo vést zvýšení počtu měření.

- Vliv posuvu

Závislost R_a , R_z na posuvu na zub na spodních stranách (Obr. 27) vykazuje rostoucí charakter. U závislosti bočních stran (Obr. 28) se jeví neoptimálnější zvolit posuv v rozmezí 0,04 - 0,06 mm/zub k dosažení co nejlepší kvality povrchu tohoto materiálu. Celkově lze říci, čím větší posuv na zub u tohoto kompozitního materiálu bude volen, tím větší bude výsledná drsnost obrobeného povrchu.

Trendy složek F_y , F_z závislostí RMS hodnot na posuvu na zub (Obr. 34) rostou se zvyšujícím se posuvem. Trend složky F_x má však klesající charakter po hodnotu posuvu 0,06 mm/zub, dále roste se zvyšujícím se posuvem. Celkově lze odhadnout, že čím větší bude volen posuv, tím větší bude působení složek řezných sil. K lepšímu stanovení závislostí by mohlo vést zvýšení počtu měření u tohoto materiálu.

- Vliv řezné rychlosti

Nízké koeficienty spolehlivosti R u závislostí R_a , R_z na řezné rychlosti (Obr. 29, 30) způsobily nevypovídající charakter zobrazených rovnic. O těchto trendech je tak možné také diskutovat. U závislostí se jeví neoptimálnější zvolit řeznou rychlost v rozmezí 140 – 170 m/min k dosažení co nejlepší kvality povrchu tohoto materiálu.

Trendy závislostí RMS hodnot na řezné rychlosti (Obr. 35) vykazují odlišné chování. Trend složky F_x roste se zvyšující se řeznou rychlostí, trend složky F_y roste po řeznou rychlost

140 m/min a dále klesá. Trend složky F_z klesá s rostoucí řeznou rychlostí. Tato nejednotnost výsledků může být způsobena druhem materiálu a také nízkým počtem měření.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vyhodnocení obrobitelnosti kompozitů, stanovení trendů obrobitelnosti a jejich chování při daných řezných podmínkách.

V teoretické části byl nejprve proveden rozbor na téma frézování. V této kapitole bylo popsáno sousledné a nesousledné frézování a jeho přednosti volby, dále řezné podmínky a také byl popsán vhodný nástroj k obrábění kompozitních materiálů. Druhá kapitola je zaměřena na kompozitní materiály, byly popsány jednotlivé druhy používaných pryskyřic jako pojivo, vyztužujících vláken vhodných ke zlepšení mechanických vlastností a také byla uvedena klasifikace kompozitů dle různých hledisek. Poslední kapitola teoretické části se zabývá obrobitelností kompozitů. Nejprve je uvedena mikrogeometrická obrobitelnost, ve které je popsána drsnost povrchu, parametry profilu povrchu a způsoby měření drsnosti povrchu. Dále je věnována pozornost kinematické obrobitelnosti z hlediska opotřebení nástroje, následně pak dynamické obrobitelnosti z pohledu působení řezných sil.

Praktická část je zaměřena na tři experimenty a jejich výrobu, přípravu programů a řezných podmínek, které byly odlišné pro každý experiment. Sledován byl vliv hloubky řezu, posuvu a řezné rychlosti. Dále je uvedena kapitola kvalita řezné plochy, kde proběhlo hodnocení řezné plochy pomocí parametrů Ra , Rz naměřených kontaktním drsnoměrem. Závěrem práce je hodnocen průběh složek řezných sil. Výsledky z těchto kapitol jsou závěrem diskutovány.

Vliv hloubky řezu stanovil nejmenší hodnoty parametru Ra při hloubce 4 mm na spodní straně a 6 mm na boční straně drážky. Nejmenší parametr Rz byl naměřen při hloubce řezu 2 mm na spodní i boční straně drážky. Z naměřených hodnot byly sestrojeny závislosti parametrů Ra , Rz na hloubce řezu (Obr. 25, 26). Zobrazené rovnice lineární regrese však vzhledem k nízkému koeficientu spolehlivosti a velkým chybám měření nemají vypovídající charakter. Toto chování může být způsobeno nejspíše nízkým počtem měření a také materiálem. Trendy závislosti RMS na hloubce řezu (Obr. 33) vykazují převážně rostoucí charakter. Lze tedy odhadnout, čím větší bude volena hloubka řezu, tím větší bude působení složek řezných sil.

Vlivem posuvu byly nejmenší Ra a Rz parametry získány při posuvu 0,02 mm/zub na spodní straně drážky a při posuvu 0,04 mm/zub na boční straně drážky. Z naměřených hodnot byly sestrojeny závislosti Ra , Rz parametrů na posuvu (Obr. 27, 28). Ze závislostí lze vyvodit stanovisko - čím menší bude volen posuv, tím lepší bude kvalita řezné plochy u

tohoto kompozitního materiálu. Trendy závislosti *RMS* na posuvu (Obr. 34) vykazují také převážně rostoucí charakter. Lze tedy odhadnout, čím větší bude volen posuv u tohoto materiálu, tím větší bude působení složek řezných sil. K lepšímu stanovení závislosti by mohlo vést zvýšení počtu měření působení složek řezných sil.

Vlivem řezné rychlosti byla nejkvalitnější jakost povrchu dosažena při řezné rychlosti 110 m/min na spodní straně drážky jak pro *Ra*, tak i pro *Rz* parametr. Na boční straně drážky se jeví neoptimalnější volba řezné rychlosti 170 – 200 m/min jak pro *Ra*, tak i pro *Rz* parametr. Z naměřených hodnot byly sestrojeny závislosti parametrů *Ra*, *Rz* na řezné rychlosti (Obr. 29, 30). Tyto trendy však nemají vypovídající charakter vzhledem k nízkému koeficientu spolehlivosti a velkým chybám měření. U závislosti se jeví neoptimalnější zvolit řeznou rychlost v rozmezí 140 – 170 m/min k dosažení co nejlepší kvality povrchu tohoto materiálu. Trendy závislosti *RMS* hodnot na řezné rychlosti (Obr. 35) vykazují rozdílné chování. Nelze tedy jednoznačně stanovit, jaký vliv má řezná rychlost na působení řezných sil, avšak empirie hovoří o poklesu řezné síly s rostoucí řeznou rychlostí (exponenciálně).

Pokud by se opakovaly tyto experimenty, doporučoval bych provést jak větší počet měření hodnocení kvality řezné plochy, tak i složek řezných sil. Důvodem však může být i zvolený materiál- kompozit. Při frézování kompozitu mohou vzniknout na řezné ploše kombinace struktury typu matrice-výztuž, které ovlivňují měření. Při měření drsnoměrem může snímací hrot přejíždět střídavě po matrici i vyztužovací tkanině (v tomto případě skelné tkanině), čímž vznikají rozdílné hodnoty parametrů popisujících drsnost.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [2] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [3] HUMÁR, A.: *Technologie I - Technologie obrábění - 1. část. Studijní opory*. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2003. [online]. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf.
- [4] DE VOS, Patrick a Jan-Eric STÅHL. *Obrábění kovů: teorie v praxi*. Lund: Division of Production and Materials Engineering, Lund University, 2014.
- [5] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [7] ČSN EN ISO 1302. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Označování struktury povrchu v technické dokumentaci výrobků*. Praha. Český normalizační institut, 2003. Třídící znak: 014457.
- [8] SKOPAL, Miroslav, Miroslav TYKAL a Miroslav POSPÍŠIL. *Drsnost jako součást struktury povrchu: sborník ze semináře: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Brno 13. února 2002*. Brno: Vysoké učení technické, 2002. ISBN 80-214-2063-4.
- [9] *Pokrok v měření a hodnocení struktury povrchu*. MM Průmyslové spektrum[online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pokrok-v-mereni-a-hodnoceni-struktury-povrchu-2.html>
- [10] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0671-1.
- [11] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK. *Základy konstruování*. Vydání šesté. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2015. ISBN 978-80-7204-921-9.

- [12] *Měření drsnosti* [online]. [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://www.mbcaltibr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [13] *Non-contact Surface Roughness/Profile Measuring Instruments, Keyence* [online]. [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/equipment/non-contact-instruments.jsp>
- [14] *3D Optical Profilers* [online]. [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://www.zygo.com/?/met/profilers/>
- [15] *2D and 3D surface characterization parameters* [online]. [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740318321854>
- [16] *Změny v obrábění kompozitních materiálů*. BENEŠOVÁ, Dana. SANDVIK COROMANT. MM Průmyslové spektrum[online]. 2011 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zmeny-v-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [17] *Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů*. SEDLÁČEK, Jan. VUT V BRNĚ, Fakulta strojního inženýrství. MM Průmyslové spektrum[online]. 2006 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [18] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [19] HOLEŠOVSKÝ, František a Martin NOVÁK. *Obrábění a montáže*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2012. ISBN 978-80-7414-530-8.
- [20] *KISTLER. Cutting Force Measurement* [online]. Kistler Group [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <http://www.technovolt.ro/cataloge/kistler/DINAMOMETRE%20%20FIXE%20SI%20ROTATIVE.pdf>
- [21] *Compact Multi-Component Dynamometer up to 10kN*[online]. [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/product/type-9129aa/>
- [22] MALLICK, P. K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 3rd ed. BocaRaton: Taylor& Francis, 2007, 640 p. ISBN 9781420005981. Dostupné také z: <http://marc.crcnetbase.com/isbn/9781420005981>

- [23] *Povlaky* [online]. [cit. 2020-01-29]. Dostupné z:<https://www.zps-fn.cz/cz/povlaky/>
- [24] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP a Marek SADÍLEK. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Ediční středisko VŠB -TUO, 2007 [cit. 2020-01-28]. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z:
<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>
- [25] *JS565060D2C.0Z5-NXT* [online]. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z:
https://www.secotools.com/article/p_03067371
- [26] *DMU 50* [online]. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z:
<https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu/dmu-50-2nd-generation>
- [27] *SURFTEST SJ-410* [online]. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z:
<https://docplayer.cz/15513079-Surftest-sj-410-prenosny-pristroj-na-mereni-drsnosti-povrchu-prenosny-pristroj-na-mereni-drsnosti-povrchu.html>
- [28] DIN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha. Český normalizační institut, 1999. Třídící znak: 014450.
- [29] ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha. Český normalizační institut, 1999. Třídící znak: 014449.
- [30] ISO 3274. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů*. Praha. Český normalizační institut, 1999. Třídící znak: 252322.
- [31] ISO 25178-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. Praha. Český normalizační institut, 2013. Třídící znak: 014451.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

v_c	Řezná rychlost
v_f	Posuvová rychlost
f_z	Posuv na zub
a_e	Šířka záběru
a_p	Hloubka řezu
F_i	Celková řezná síla
φ_i	Úhel polohy břitu
$F_{ci}, F_{cNi}, F_x, F_y, F_z$	Složky řezné síly
P_{fe}	Pracovní rovina
F_{fi}, F_{fNi}	Složky posuvové síly
p_i	Měrná řezná síla pro válcové frézování
k_{ci}	Měrná řezná síla pro čelní frézování
R_a	Střední aritmetická úchylka profilu v rozsahu základní délky
R_z	Největší výška profilu v rozsahu základní délky
Min	Minimum
Max	Maximum
RMS	Root Mean Square (efektivní hodnota)
$n, ot.$	Otáčky
N	Počet měření
mm	Milimetr
μm	Mikrometr
mN	Milinewton
kN	Kilonewton
min	Minuta

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Kinematika sousledného frézování [2].....</i>	12
<i>Obr. 2 Kinematika nesousledného frézování [2].....</i>	12
<i>Obr. 3 Řezné síly na zubu válcové frézy v pracovní rovině P_{fe}: a) nesousledné frézování; b) sousledné frézování; F_i - celková řezná síla; F_{ci} - řezná síla; F_{cNi} - kolmá řezná síla; F_{fi} - posuvová síla; F_{fNi} - kolmá posuvová síla [1].....</i>	14
<i>Obr. 4 Druhy vazeb vyztužujících tkanin [6].....</i>	20
<i>Obr. 5 Tkaniny s různou skladbou vláken v osnově a útku [6].....</i>	20
<i>Obr. 6 Příkladný profil povrchu [15].....</i>	26
<i>Obr. 7 Střední aritmetická úchylka profilu [8].....</i>	28
<i>Obr. 8 Parametry Rz, Rp a Rv [10].....</i>	29
<i>Obr. 9 Parametr Rsm [10].....</i>	29
<i>Obr. 10 Princip měření dotykovým profilometrem [10].....</i>	31
<i>Obr. 11 Bezkontaktní 3D optický profilometr [14].....</i>	32
<i>Obr. 12 Princip adhezního otěru [19].....</i>	33
<i>Obr. 13 Stacionární piezoelektrický dynamometr [21].....</i>	35
<i>Obr. 14 Rozměry a tvar zvoleného nástroje [25].....</i>	38
<i>Obr. 15 Konstrukce drah nástroje experimentu 1.....</i>	40
<i>Obr. 16 Konstrukce drah nástroje experimentu 2.....</i>	41
<i>Obr. 17 Obráběcí centrum DMU – 50 [26].....</i>	42
<i>Obr. 18 Dynamometr Kistler 9129AA [21].....</i>	43
<i>Obr. 19 Obrobek po frézování.....</i>	44
<i>Obr. 20 Obrobek experimentu 1.....</i>	44
<i>Obr. 21 Obrobek experimentu 2, 3.....</i>	45
<i>Obr. 22 Měření drsnoměrem Mitutoyo.....</i>	46
<i>Obr. 23 Příklad diagramu před vyřazením odlehlých hodnot.....</i>	47

<i>Obr. 24 Příklad diagramu po vyřazení odlehlých hodnot.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 25 Grafická závislost Ra, Rz hodnot na hloubce řezu – spodní strany.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 26 Grafická závislost Ra, Rz hodnot na hloubce řezu – boční strany.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 27 Grafická závislost Ra, Rz hodnot na posuvu – spodní strany.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 28 Grafická závislost Ra, Rz hodnot na posuvu – boční strany.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 29 Grafická závislost Ra, Rz hodnot na řezné rychlosti – spodní strany.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 30 Grafická závislost Ra, Rz hodnot na řezné rychlosti – boční strany.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 31 Schéma osových směrů dynamometru [21].....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 32 Příklad grafického průběhu složek řezných sil experimentu 1 – 6. drážka.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 33 Grafická závislost RMS hodnot na hloubce řezu.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 34 Grafická závislost RMS hodnot na posuvu.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 33 Grafická závislost RMS hodnot na řezné rychlosti.....</i>	<i>65</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Doporučené parametry nástroje udávané výrobcem [25].....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 2 Řezné podmínky experimentu 1.....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 3 Řezné podmínky experimentu 2.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4 Řezné podmínky experimentu 3.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 5 Technické údaje DMU-50 [26].....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 6 Technické údaje dynamometru [21].....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 7 Technické údaje drsnoměru [27].....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 8 Statistické zpracování naměřených hodnot experimentu 1 - spodní strany</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 9 Statistické zpracování naměřených hodnot experimentu 1 - boční strany</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 10 Statistické zpracování naměřených hodnot experimentu 2 - spodní strany</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 11 Statistické zpracování naměřených hodnot experimentu 2 - boční strany</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 12 Statistické zpracování naměřených hodnot experimentu 3 - spodní strany</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 13 Statistické zpracování naměřených hodnot experimentu 3 - boční strany</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 14 Statistické zpracování složek řezných sil experimentu 1.....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 15 Statistické zpracování složek řezných sil experimentu 2.....</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 16 Statistické zpracování složek řezných sil experimentu 3.....</i>	<i>64</i>

SEZNAM PŘÍLOH

P I NAMĚŘENÁ DATA

P II GRAFICKÝ PRŮBĚH SLOŽEK ŘEZNÝCH SIL PŘI OBRÁBĚNÍ

Tab. I Naměřená data- experiment I

N	1. spodní strana		2. spodní strana		3. spodní strana		4. spodní strana		5. spodní strana		6. spodní strana	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	1,974	12,209	1,569	9,635	1,800	9,245	1,595	10,513	2,167	14,058	1,331	9,435
2	1,774	11,308	2,533	14,393	1,658	10,067	1,361	9,524	1,973	12,258	1,547	9,631
3	2,448	13,354	1,302	6,756	1,641	11,009	1,574	10,159	2,125	13,350	1,480	9,916
4	1,695	10,627	1,723	11,786	1,611	10,948	1,491	9,530	2,214	14,187	1,466	9,424
5	3,486	19,790	1,486	11,414	1,901	10,850	1,564	10,767	2,324	16,167	1,620	9,778
6	2,054	12,657	1,545	10,234	1,762	10,781	1,596	10,868	1,899	11,621	1,650	10,126
7	9,067	37,301	1,502	8,737	1,939	13,989	1,532	9,606	1,975	14,775	1,662	10,449
8	1,850	11,551	1,611	10,008	1,783	11,340	1,368	10,527	1,892	13,104	1,650	10,216
9	1,843	10,233	1,718	11,042	1,790	12,421	1,610	11,524	2,019	13,876	2,165	17,539
10	4,274	20,588	1,623	10,418	2,037	13,495	1,859	12,065	1,840	12,397	1,706	10,463
11	7,546	35,911	1,638	10,715	1,732	11,622	1,367	11,304	2,188	14,207	1,437	10,243
12	6,609	31,517	1,659	10,861	1,719	11,544	1,520	10,268	2,115	13,658	1,523	13,592
13	1,924	12,125	1,604	10,440	1,986	13,483	1,588	10,624	2,214	12,724	1,448	11,165
14	1,677	10,857	1,678	9,319	1,673	10,933	1,430	10,883	2,391	17,211	1,471	10,433
15	1,649	10,717	1,403	9,621	1,786	10,108	1,605	9,987	2,244	15,147	1,660	9,916

Tab. II Naměřená data- experiment 1

N	1. boční strana		2. boční strana		3. boční strana		4. boční strana		5. boční strana		6. boční strana	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	3,736	19,193	1,208	9,311	1,597	11,126	1,626	10,914	0,087	0,717	3,963	21,930
2	1,919	14,786	1,249	9,640	1,865	12,301	1,344	9,100	2,589	16,856	1,507	12,072
3	2,938	16,087	1,242	10,025	1,672	11,582	1,517	10,850	5,086	29,391	1,595	12,552
4	1,650	11,105	1,099	9,564	1,846	14,174	1,559	10,937	0,635	2,923	1,488	12,205
5	1,511	10,707	1,293	9,856	2,024	13,929	1,453	10,629	9,267	57,010	1,440	9,732
6	1,566	11,579	1,548	8,419	1,762	13,794	1,627	9,977	2,588	15,707	2,092	17,125
7	2,261	16,609	1,501	10,364	1,856	12,198	1,572	10,702	2,523	12,530	1,264	10,793
8	2,453	16,734	1,497	10,257	1,882	12,543	1,762	10,487	1,813	8,125	1,163	9,007
9	2,012	15,107	1,348	10,450	2,760	17,223	1,467	10,194	3,085	14,944	1,321	10,348
10	5,679	33,911	1,625	12,085	1,464	10,524	2,067	16,083	2,535	14,359	3,124	18,235
11	1,469	7,487	1,574	10,140	1,641	12,282	1,860	12,284	2,709	15,356	4,668	29,030
12	2,231	13,032	1,353	10,203	1,694	14,279	1,738	11,490	3,962	23,359	1,434	10,265
13	1,571	9,170	1,393	10,869	1,795	10,663	1,368	9,630	2,438	16,433	1,446	10,095
14	2,194	15,346	1,625	10,778	1,632	12,083	1,522	11,949	3,601	21,731	1,395	11,666
15	2,829	20,874	1,798	11,366	1,884	14,803	1,341	10,265	4,912	24,085	1,219	9,159

Tab. III Naměřená data- experiment 2

N	1. spodní strana		2. spodní strana		3. spodní strana		4. spodní strana		5. spodní strana		6. spodní strana	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	1,071	9,370	1,363	9,848	1,821	13,842	1,651	12,785	1,697	11,606	2,175	13,262
2	1,217	8,458	1,558	11,139	1,547	13,054	1,620	12,607	1,712	11,148	2,195	14,047
3	1,134	8,230	1,357	10,876	1,354	9,990	1,570	11,114	1,906	11,305	1,844	12,828
4	1,125	7,875	1,361	11,018	1,799	13,148	1,783	13,114	1,952	12,266	1,854	12,593
5	1,191	8,286	1,227	8,687	1,621	13,155	1,641	10,969	1,683	11,051	1,905	10,943
6	1,383	9,804	1,329	8,568	2,042	15,458	1,878	15,228	1,713	12,423	1,875	14,329
7	1,168	7,703	1,307	9,316	1,734	11,246	1,962	11,984	1,713	12,046	2,512	19,093
8	1,297	8,466	1,443	8,754	1,442	9,992	1,742	12,314	1,570	11,984	2,230	14,715
9	1,030	8,955	1,420	10,139	1,310	9,099	1,723	13,323	1,874	14,031	1,752	12,631
10	1,151	7,893	1,380	8,751	1,450	11,574	1,881	12,745	1,805	11,990	1,888	15,671
11	1,427	11,503	1,564	10,534	1,310	8,954	1,755	10,870	1,959	12,220	1,959	14,471
12	1,306	8,994	1,484	10,407	1,366	9,717	2,196	15,121	1,704	11,212	2,177	14,836
13	1,163	9,156	1,499	8,589	1,301	8,989	1,870	13,886	1,839	13,694	2,145	14,000
14	1,373	9,358	1,323	10,073	1,727	12,761	1,888	12,810	2,673	11,959	2,401	16,533
15	1,451	9,970	1,415	8,510	1,574	11,057	1,554	10,639	1,652	11,650	2,399	16,779

Tab. IV Naměřená data- experiment 2

N	1. boční strana		2. boční strana		3. boční strana		4. boční strana		5. boční strana		6. boční strana	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	1,566	11,191	1,091	9,243	1,608	11,874	1,185	8,040	1,691	11,849	2,045	12,019
2	1,056	8,968	1,216	10,295	1,192	9,332	1,580	10,458	1,552	10,931	2,251	12,358
3	1,498	13,642	1,408	9,770	1,310	10,534	1,319	9,375	1,546	9,297	1,728	10,479
4	1,195	8,256	1,172	9,769	1,348	10,526	1,215	9,253	1,659	11,161	2,089	13,111
5	1,372	12,238	1,187	9,995	1,489	12,803	1,514	10,361	1,888	11,190	2,094	11,150
6	1,249	8,858	1,397	11,105	1,532	10,486	1,504	10,451	1,586	10,593	2,063	11,603
7	1,415	12,596	1,459	10,384	1,153	9,113	1,276	8,990	1,766	11,254	2,142	11,651
8	1,179	10,319	0,895	5,989	1,341	10,450	1,735	11,880	1,493	9,896	1,948	11,822
9	1,665	11,415	1,242	10,099	1,330	10,173	1,158	8,395	1,621	10,603	2,002	12,474
10	2,539	20,574	1,001	6,419	1,389	12,449	1,168	8,568	1,462	8,537	1,683	9,292
11	1,305	9,402	0,966	7,290	1,568	11,058	1,136	8,446	1,618	12,238	1,779	10,559
12	1,678	14,558	1,198	9,122	1,335	9,445	1,783	12,137	1,680	10,645	2,251	13,729
13	1,227	8,971	1,019	8,662	1,845	13,118	1,177	8,687	1,634	10,449	2,079	11,023
14	1,325	10,912	1,013	7,280	1,412	10,859	1,152	8,426	2,227	18,290	2,056	10,987
15	1,598	11,423	1,152	8,820	1,471	11,676	1,688	11,945	2,099	23,986	2,521	14,078

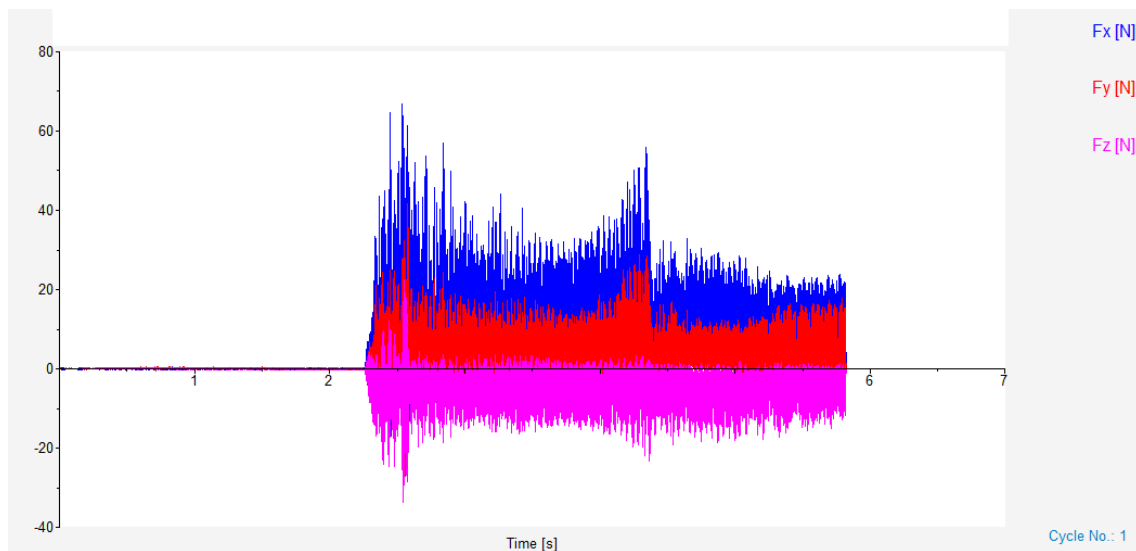
Tab. V Naměřená data- experiment 3

N	1. spodní strana		2. spodní strana		3. spodní strana		4. spodní strana		5. spodní strana		6. spodní strana	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	1,780	10,705	2,027	14,679	1,420	9,306	1,538	13,701	1,614	11,284	1,701	14,573
2	2,067	15,501	1,532	10,066	1,344	9,734	1,345	9,457	1,388	9,951	1,105	7,845
3	1,723	12,434	2,011	14,996	1,108	7,821	1,236	9,767	1,563	13,427	1,682	12,723
4	1,666	13,046	1,800	12,293	1,292	9,498	1,279	9,771	1,561	11,148	2,110	14,589
5	1,787	12,750	1,753	12,378	1,261	8,831	1,094	8,057	1,637	9,826	1,547	11,987
6	1,639	11,958	2,117	17,068	1,230	8,497	1,381	10,544	1,777	13,814	1,473	11,309
7	2,023	13,432	2,054	14,315	1,230	9,814	1,525	10,342	2,656	14,926	1,315	10,509
8	2,037	12,283	2,127	14,257	1,100	8,787	1,331	8,920	1,512	10,120	1,465	10,522
9	1,793	11,899	1,327	9,264	1,261	8,491	1,288	8,485	1,455	10,529	1,486	12,162
10	1,709	14,696	1,756	10,966	1,305	9,954	1,324	8,652	1,557	10,261	1,475	10,554
11	1,701	11,871	1,772	11,971	1,718	12,074	1,596	10,296	1,818	12,272	1,474	9,964
12	1,576	9,703	1,908	15,772	1,250	9,836	1,034	7,878	1,364	11,740	1,618	12,827
13	1,771	12,901	1,927	14,654	1,045	8,191	1,318	8,106	1,729	12,687	1,587	13,494
14	1,775	11,691	1,910	11,581	1,210	8,684	1,775	11,069	1,454	11,628	1,935	13,860
15	1,683	12,008	1,884	12,618	1,195	8,177	1,285	9,800	1,203	9,564	1,332	8,696

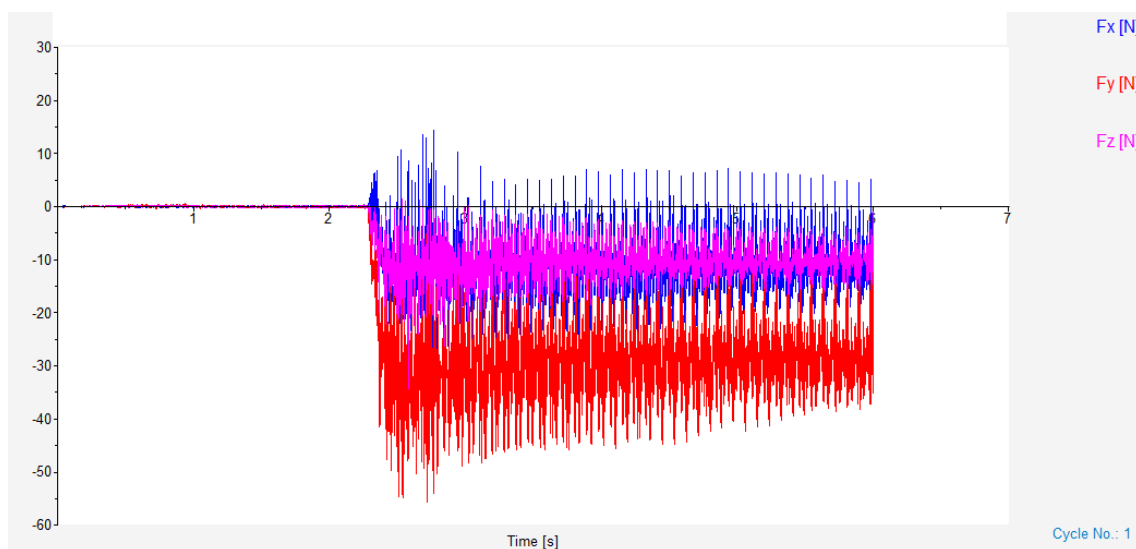
Tab. VI Naměřená data- experiment 3

N	1. boční strana		2. boční strana		3. boční strana		4. boční strana		5. boční strana		6. boční strana	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	1,042	7,763	1,189	10,139	1,980	13,714	1,763	13,897	0,832	6,719	1,020	8,615
2	1,459	13,630	1,325	9,329	1,652	10,961	1,029	9,131	1,705	13,924	1,047	7,804
3	0,875	7,554	0,924	7,469	1,192	6,973	1,093	8,386	0,904	8,511	1,404	10,126
4	1,047	7,676	1,099	9,632	1,159	10,701	1,531	10,394	1,217	10,821	1,282	8,430
5	1,089	8,092	1,236	10,232	1,018	7,404	1,324	9,549	1,316	8,676	1,249	9,027
6	1,287	9,145	1,257	9,721	0,977	8,323	1,277	9,278	1,535	11,599	1,236	9,306
7	1,158	9,063	1,351	9,058	1,030	8,277	1,356	9,472	0,922	8,849	1,067	8,200
8	1,256	9,587	1,740	12,618	1,224	8,596	1,216	8,603	1,228	9,997	1,511	10,719
9	1,370	10,253	1,121	8,674	1,793	12,527	1,105	8,435	0,893	7,652	1,229	10,182
10	1,844	15,624	1,146	8,832	1,211	7,360	1,020	7,882	0,985	7,262	1,011	8,807
11	1,236	10,950	1,210	9,302	1,518	12,021	1,135	9,145	1,381	9,731	1,022	9,665
12	1,910	12,767	1,126	9,480	1,176	8,463	1,220	10,262	1,257	10,390	1,124	8,560
13	1,413	10,280	0,915	6,978	1,295	9,398	0,892	7,433	0,884	7,875	1,349	9,618
14	1,317	9,014	1,475	10,807	1,238	10,926	1,171	11,018	0,958	7,000	1,041	8,586
15	1,505	12,308	1,459	9,608	1,472	11,694	1,271	10,041	1,206	9,446	1,591	10,189

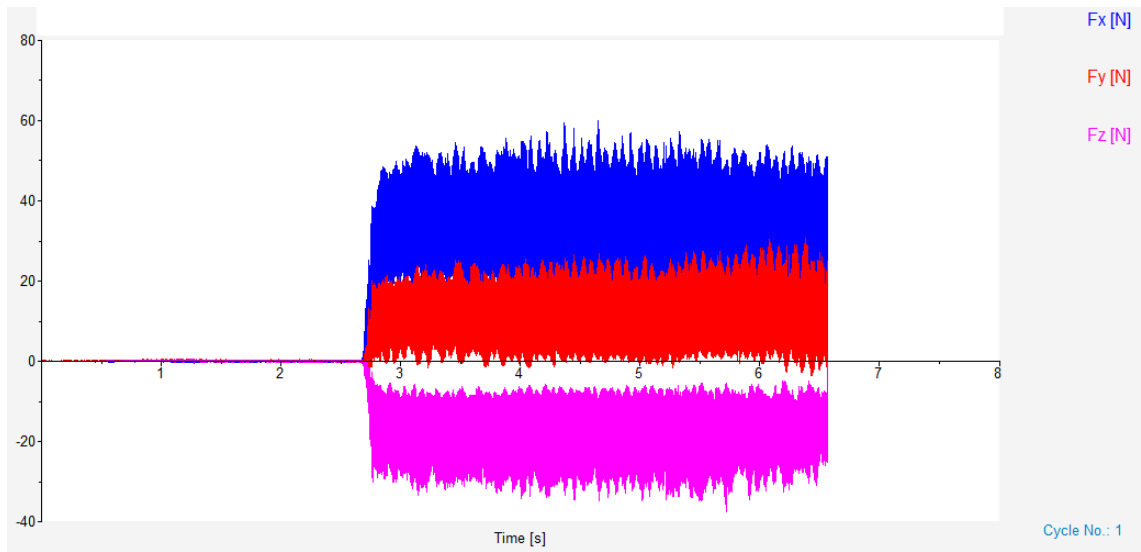
PŘÍLOHA P II: GRAFICKÝ PRŮBĚH SLOŽEK ŘEZNÝCH SIL PŘI OBRÁBĚNÍ



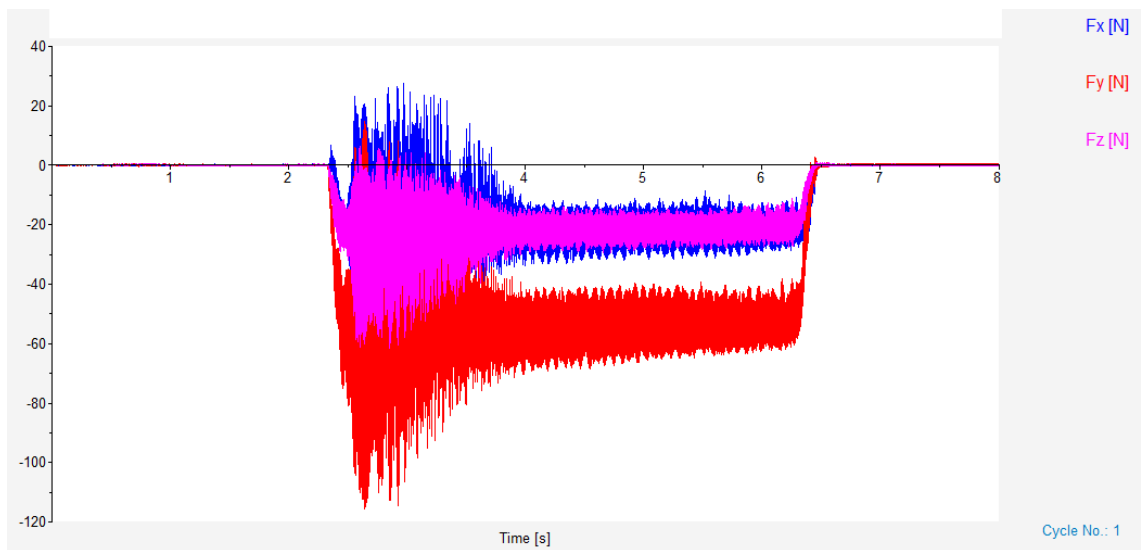
Obr. I Grafický průběh složek řezných sil experimentu 1 – 1. drážka



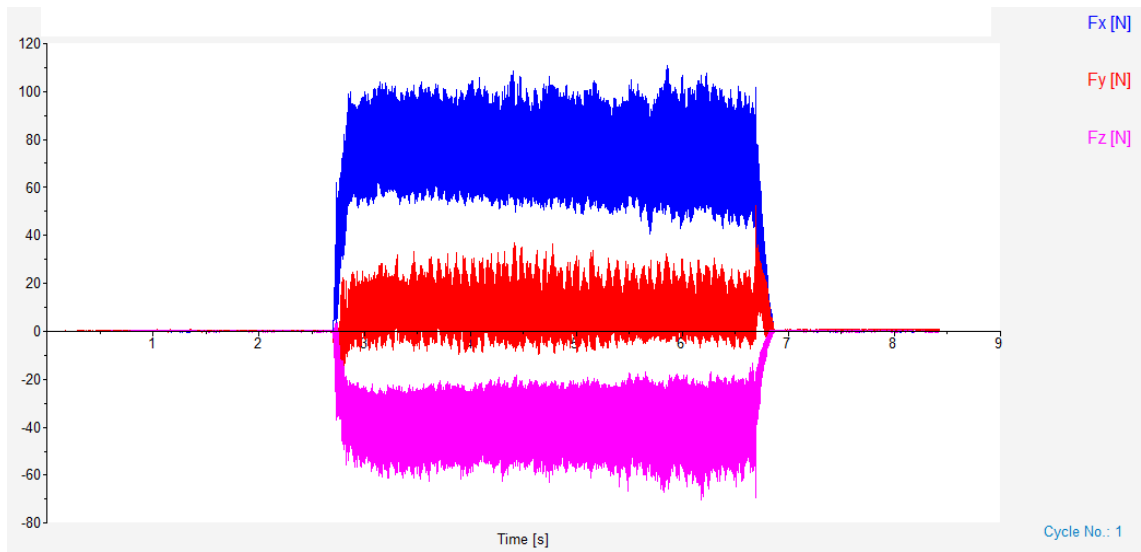
Obr. II Grafický průběh složek řezných sil experimentu 1 – 2. drážka



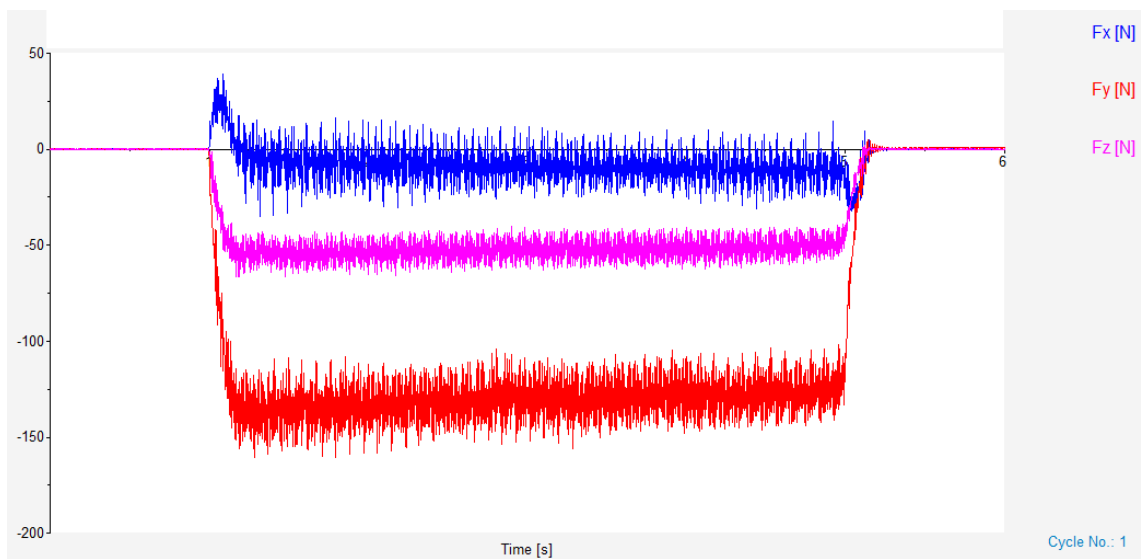
Obr. III Grafický průběh složek řezných sil experimentu 1 – 3. drážka



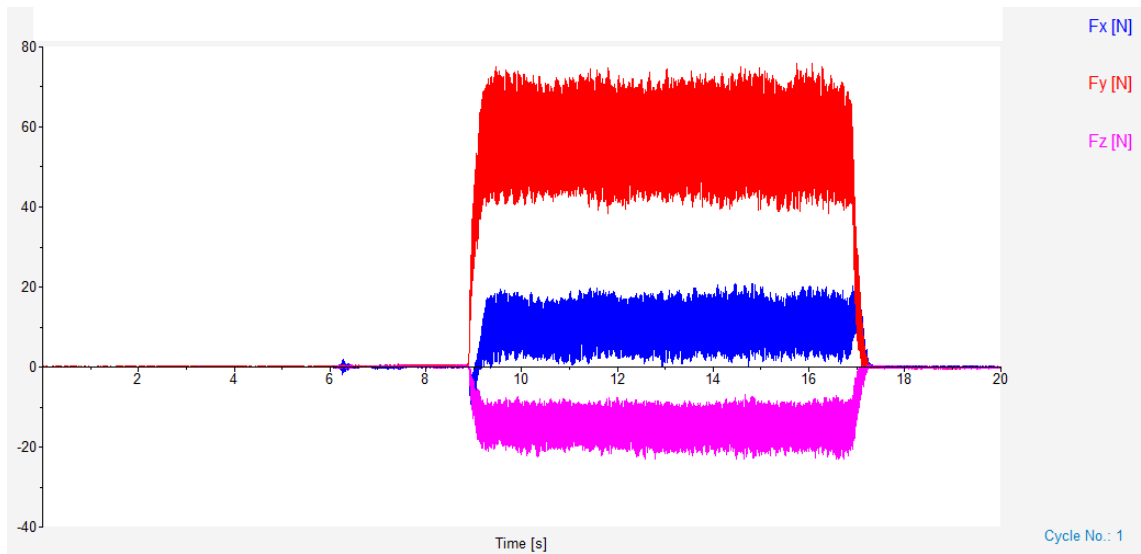
Obr. IV Grafický průběh složek řezných sil experimentu 1 – 4. drážka



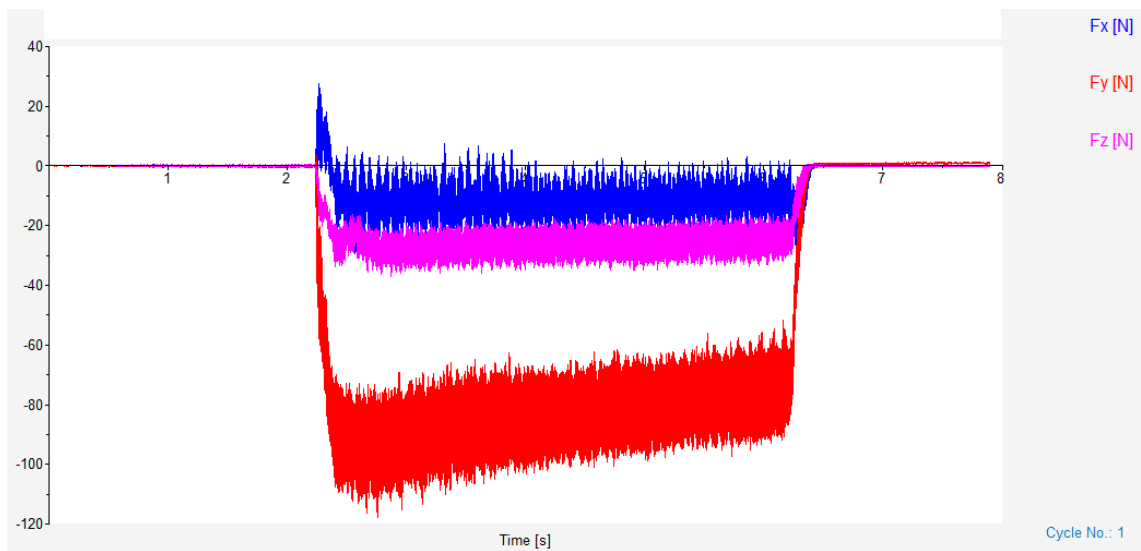
Obr. V Grafický průběh složek řezných sil experimentu 1 – 5. drážka



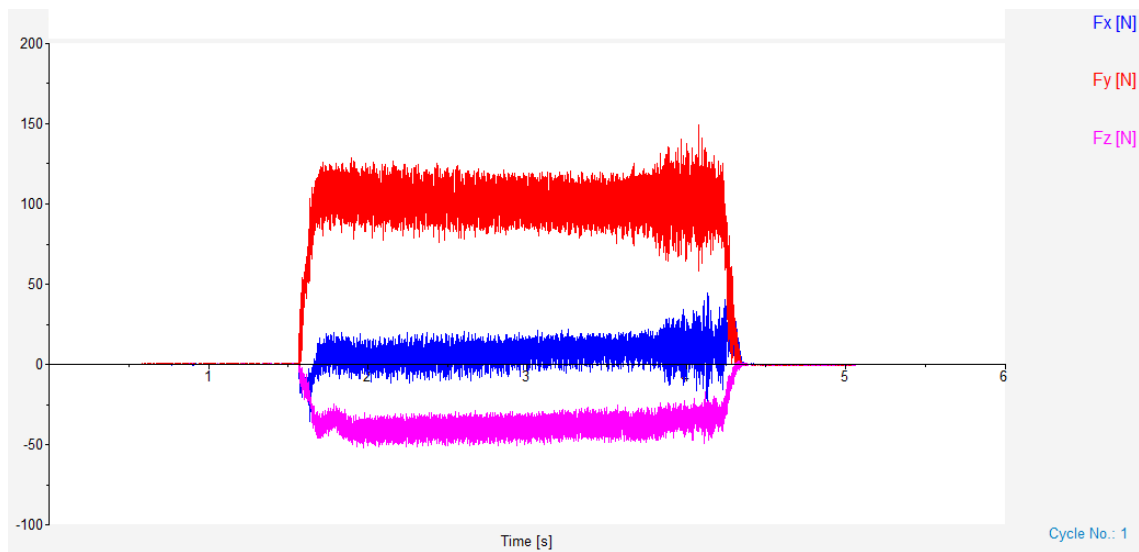
Obr. VI Grafický průběh složek řezných sil experimentu 1 – 6. drážka



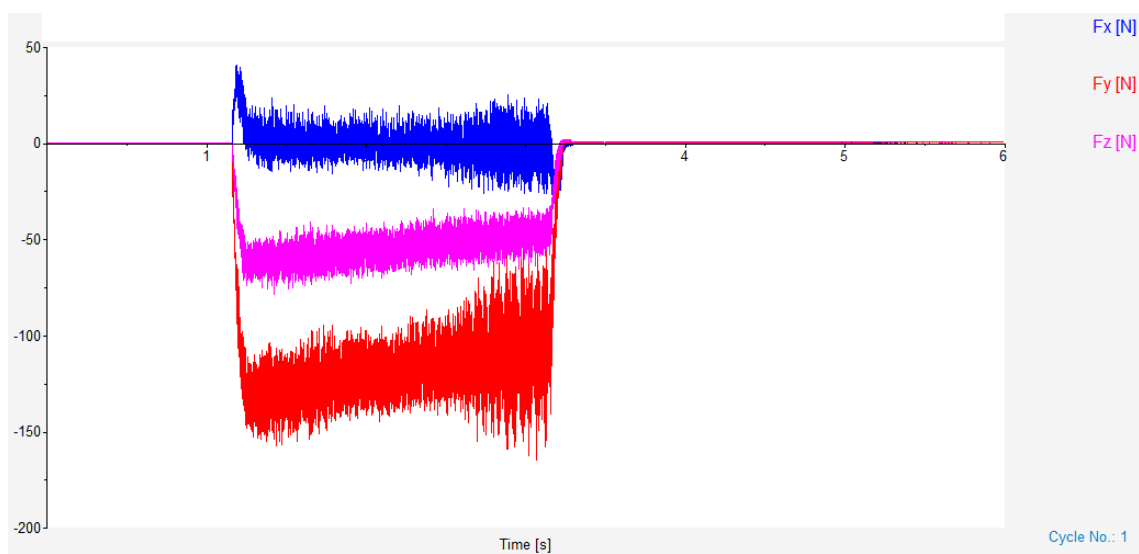
Obr. VII Grafický průběh složek řezných sil experimentu 2 – 1. drážka



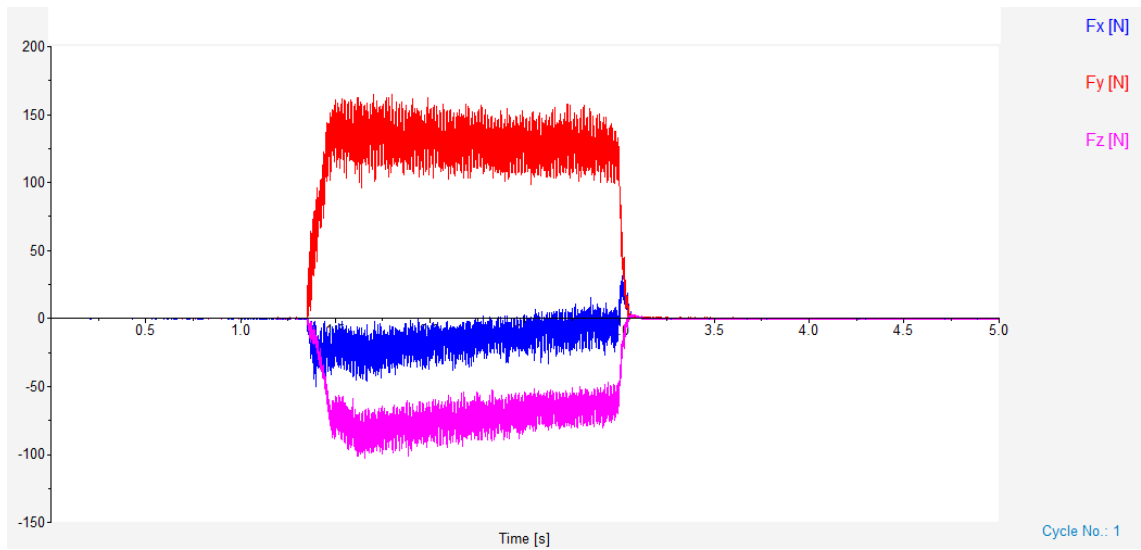
Obr. VIII Grafický průběh složek řezných sil experimentu 2 – 2. drážka



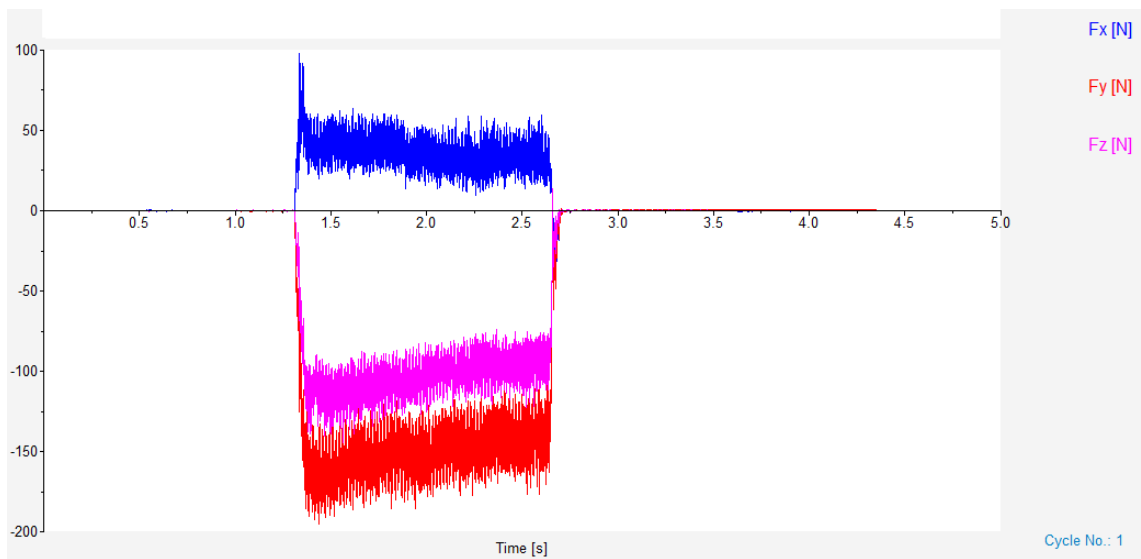
Obr. IX Grafický průběh složek řezných sil experimentu 2 – 3. drážka



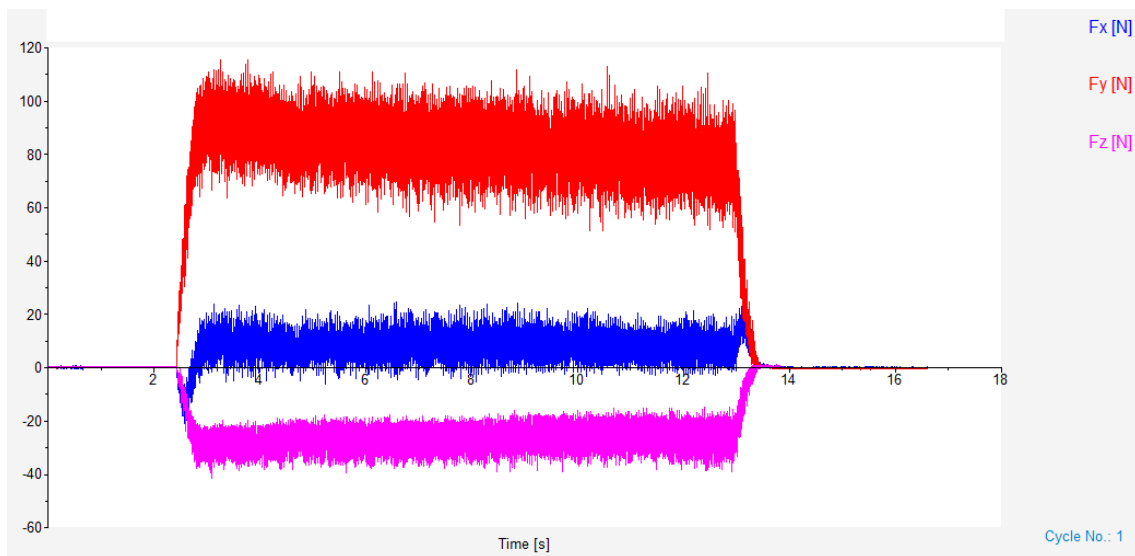
Obr. X Grafický průběh složek řezných sil experimentu 2 – 4. drážka



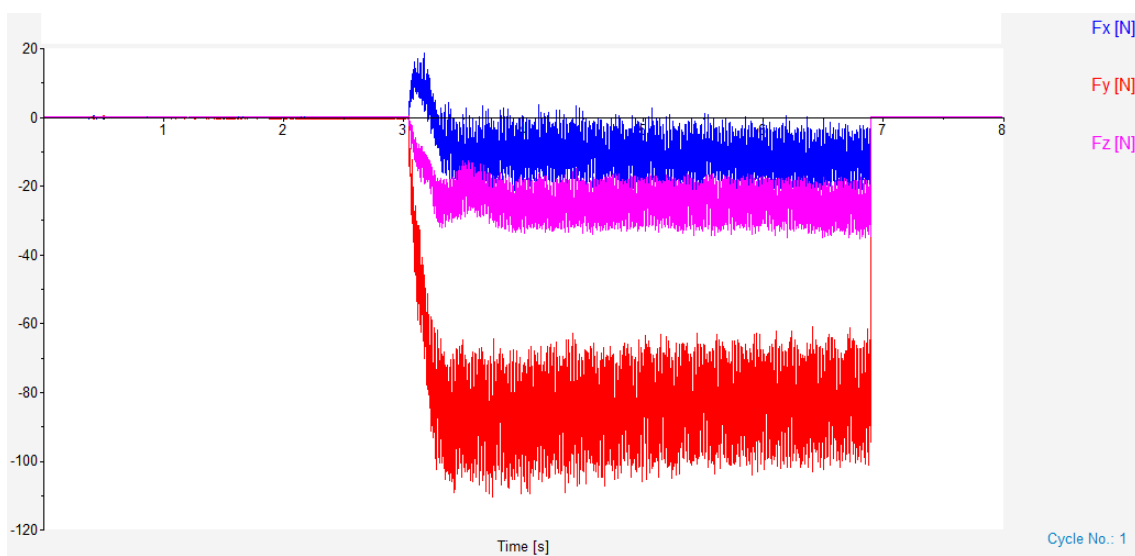
Obr. XI Grafický průběh složek řezných sil experimentu 2 – 5. drážka



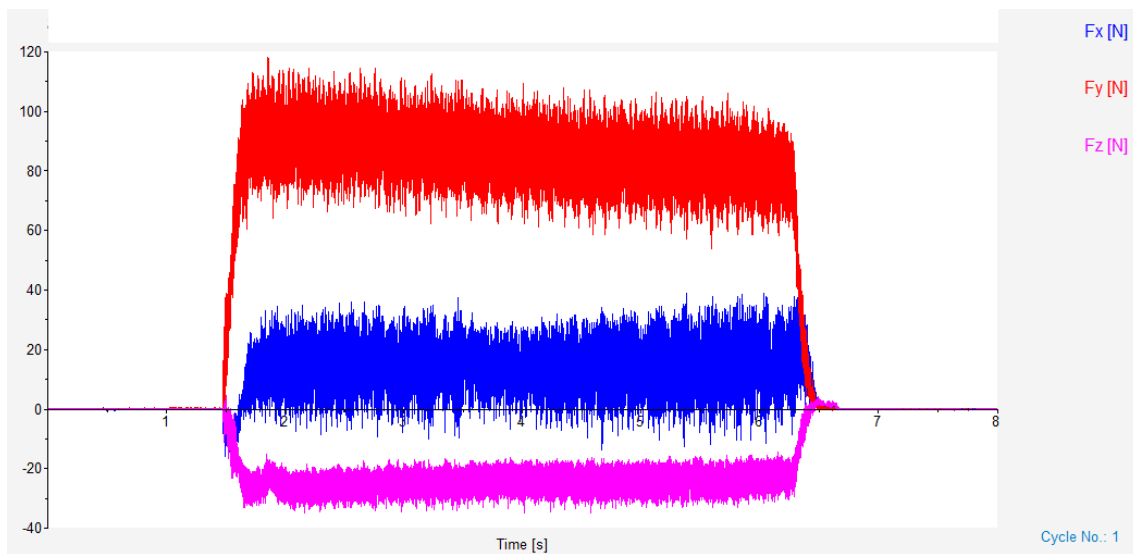
Obr. XII Grafický průběh složek řezných sil experimentu 2 – 6. drážka



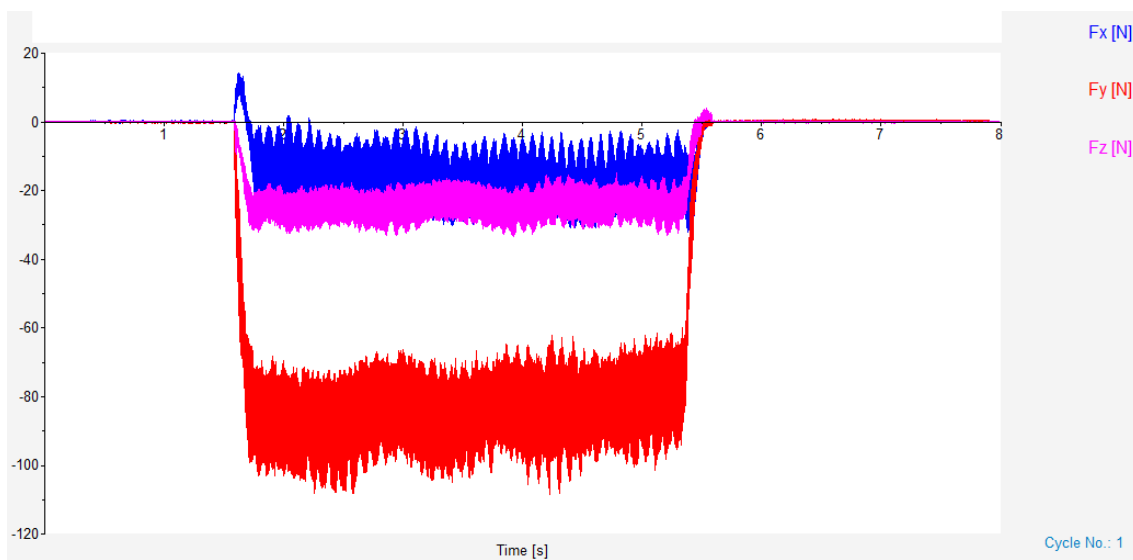
Obr. XIII Grafický průběh složek řezných sil experimentu 3 – 1. drážka



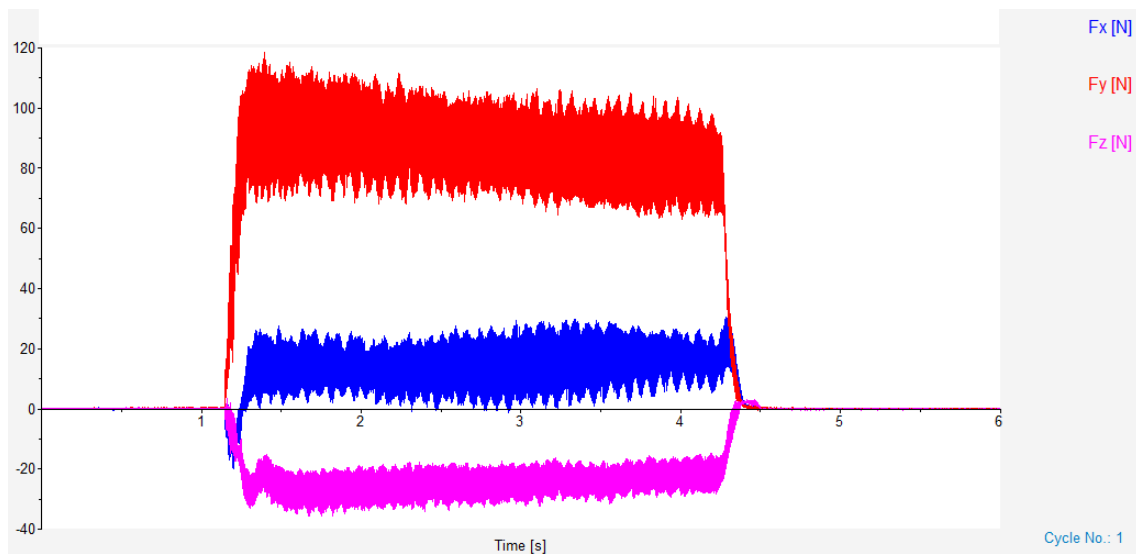
Obr. XIV Grafický průběh složek řezných sil experimentu 3 – 2. drážka



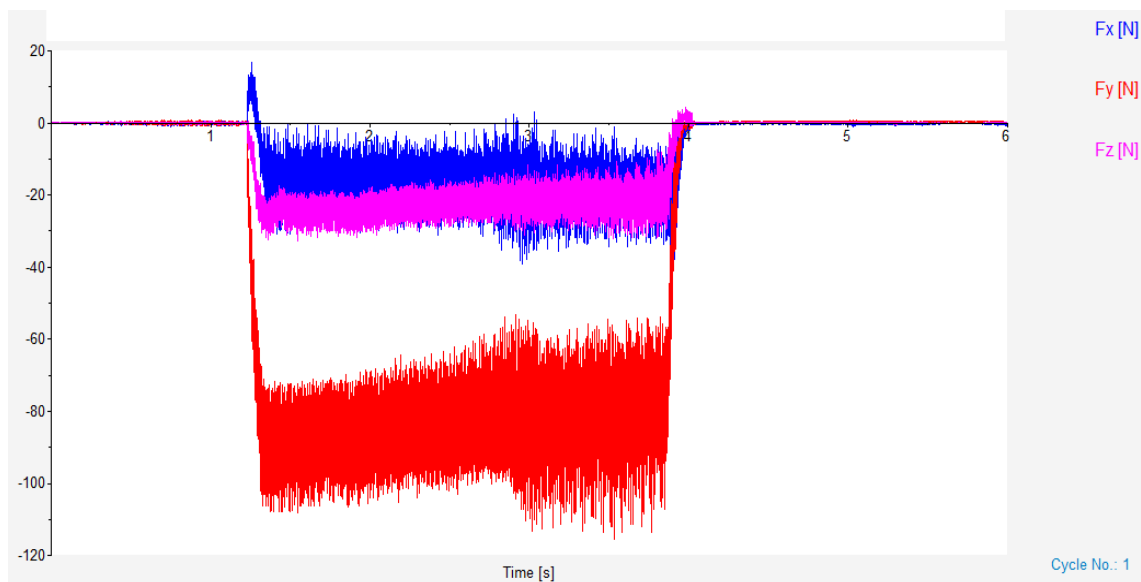
Obr. XV Grafický průběh složek řezných sil experimentu 3 – 3. drážka



Obr. XVI Grafický průběh složek řezných sil experimentu 3 – 4. drážka



Obr. XVII Grafický průběh složek řezných sil experimentu 3 – 5. drážka



Obr. XVIII Grafický průběh složek řezných sil experimentu 3 – 6. drážka