



## **Bakalářská práce**

# **Problematika obrábění kompozitních systémů na bázi epoxidová pryskyřice – nano výztuž s ohledem na tvorbu třísky a opotřebení nástroje.**

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Autor práce:*

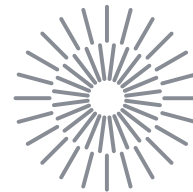
**David Lukeš**

*Vedoucí práce:*

Ing. Artur Knap

Katedra obrábění a montáže

Liberec 2024



## Zadání bakalářské práce

# Problematika obrábění kompozitních systémů na bázi epoxidová pryskyřice – nano výztuž s ohledem na tvorbu třísky a opotřebení nástroje.

<i>Jméno a příjmení:</i>	<b>David Lukeš</b>
<i>Osobní číslo:</i>	S19000068
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra obrábění a montáže
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

### Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o technologii obrábění a problematice obrábění kompozitních materiálů na bázi nano částic. Nové trendy a inovace v oblasti využívaných nástrojových materiálů a konstrukce kompozitních materiálů.
2. Volba řezných nástrojů (geometrie a nástrojový materiál) a řezných podmínek v závislosti na obráběném materiálu. Stanovení sledovaných parametrů při procesu obrábění.
3. Návrh metodiky experimentů pro obrábění kompozitních materiálů. Studie z hlediska opotřebení řezného nástroje, tvorby třísky a kvality obrobeného povrchu.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení získaných výsledků v rámci opotřebení řezného nástroje při obrábění a tvorby třísky.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

*Rozsah grafických prací:*

*Rozsah pracovní zprávy:*

*Forma zpracování práce:*

tištěná/elektronická

*Jazyk práce:*

čeština

### **Seznam odborné literatury:**

1. DVORAK, George J. Micromechanics of composite materials. Dordrecht: Springer, [2013]. Solid mechanics and its applications / series editor G.M.L Gladwell, volume 186. ISBN 978-94-007-4100-3.
2. LAKES, Roderic S. Composites and metamaterials. New Jersey: World Scientific, [2020]. ISBN 978-981-12-1636-7.
3. ŠTULPA, Miloslav. Technologie obrábění: CNC soustružení, frézování, vrtání pro praxi. Praha: Grada Publishing, 2022. ISBN 978-80-271-2883-9.
4. KOČMAN, K., PROKOP, K. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
5. BILÍK, O. Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění. Ostrava: Vysoká škola báňská TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
6. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing s.r.o, 2008. 235 s. ISBN: 8025422502.

*Vedoucí práce:*

Ing. Artur Knap

Katedra obrábění a montáže

*Datum zadání práce:*

2. října 2022

*Předpokládaný termín odevzdání:*

2. dubna 2024

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
garant studijního programu

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

# Anotace

Náplní bakalářské práce je výzkum problematiky mikrofrézování kompozitních systémů na bázi epoxidová pryskyřice – nano výztuž. Hlavním cílem práce je sledování vlivu složení obráběných materiálu na opotřebení nástroje, integritu obrobeného povrchu a tvorbu třísky. Bakalářská práce je rozdělena do 3 hlavních kapitol – teoretická, metodická a experimentální.

První kapitola shrnuje aktuální stav poznání zkoumané problematiky. Jsou zde uvedeny nezbytné informace o obráběných materiálech a o obráběcích technologiích pro potřeby experimentu.

Metodická kapitola popisuje použité vybavení, stroje potřebné k provedení měření a konkrétní metodiku použitou pro jednotlivé experimenty. Závěrečná část bakalářské práce se věnuje přípravě, realizaci a vyhodnocení experimentů.

Klíčová slova: nanokompozity, nanovýztuž, mikrofrézování, drsnost povrchu, opotřebení nástroje

# Annotation

The content of the bachelor's thesis is research into the issue of micromilling composite systems based on epoxy resin - nano reinforcement. The main goal of the work is to monitor the influence of the composition of the machined material on tool wear, the integrity of the machined surface and the formation of chips. The bachelor thesis is divided into 3 main chapters – theoretical, methodological, and experimental.

The first chapter summarizes the current state of knowledge of the investigated issue. Necessary information on machined materials and machining technologies for the needs of the experiment is presented here.

The methodological chapter describes the equipment used, the machines needed to perform the measurements and the specific methodology used for individual experiments. The final part of the bachelor's thesis is devoted to the preparation, implementation, and evaluation of experiments.

Key words: nanocomposites, nanoreinforcement, micromilling, surface roughness, tool wear

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Arturovi Knapovi za jeho odborné rady, pomoc, ochotu a čas, který mně a mé práci věnoval. Dále děkuji panu Ing. Martinovi Váňovi za jeho rady, čas a pomoc při řešení praktické části práce.

# Obsah

1. Úvod .....	9
2. Teoretická část .....	10
2.1. Nanokompozitní materiály .....	10
2.1.1. Nanokompozity s polymerní matricí .....	13
2.1.2. Nanojíllové kompozity .....	15
2.2. Mikrofrézování .....	17
2.3. Mikrofrézování nanokompozitních materiálů .....	20
2.3.1. Vliv nanovýztuže .....	21
3. Experimentální část .....	23
3.1. Zkušební vzorky .....	23
3.2. Popis strojů, nástrojů a měřicích zařízení .....	25
3.2.1 CNC frézka .....	25
3.2.2. Použité obráběcí nástroje .....	26
3.2.3. Laserový bezkontaktní profiloměr .....	27
3.3. Řezné podmínky .....	27
3.4. Metodika experimentů .....	28
3.4.1. Příprava vzorků .....	28
3.4.2. Použité obráběcí nástroje .....	28
3.4.3. Proces mikrofrézování .....	28
3.4.4. Sledování opotřebení nástroje VB .....	29
3.4.5. Drsnost obrobeného povrchu vzorku .....	30
3.4.6. Integrita povrchu .....	31
3.4.7. Tvorba třísky .....	31
3.4.8. Statistické vyhodnocení dat .....	31
3.5. Vyhodnocení výsledků .....	32
3.5.1. Vzorek č. 1 – 0 % hm. SiO <sub>2</sub> .....	32
3.5.2. Vzorek č. 2 – 2 % hm. SiO <sub>2</sub> .....	37
3.5.3 Vzorek č. 3 – 4 % hm. SiO <sub>2</sub> .....	42
3.5.4. Vzorek č. 4 – 6 % hm. SiO <sub>2</sub> .....	46
3.5.5. Vzorek č. 5 – 8 % hm. SiO <sub>2</sub> .....	51
4. Diskuze .....	56
5. Závěr .....	63
6. Seznam použité literatury .....	66

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$a_e$	[mm]	šířka řezu
AlTiN	[-]	hliník titan nitrid
$a_p$	[mm]	hloubka řezu
CMNC	[-]	nanokompozity s keramickou maticí
CrAlSiN	[-]	chrom hliník křemík nitrid
dsk	[-]	hmotnostní jednotka (díl na sto dílů)
$Fe_2O_3$	[-]	oxid železitý
$f_z$	[mm]	posuv na zub
MMNC	[-]	nanokompozity s kovovou maticí
n	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky
PMMA	[-]	polymethylmethakrylát
PMNC	[-]	nanokompozity s polymerní maticí
$R_a$	[ $\mu$ m]	průměrná aritmetická úchylna profilu drsnosti
$R_t$	[ $\mu$ m]	celková výška profilu drsnosti
$S_a$	[ $\mu$ m]	plošná drsnost
SEM	[-]	skenovací elektronový mikroskop
SiO <sub>2</sub>	[-]	oxid křemičitý
TEM	[-]	transmisní elektronový mikroskop
TiAlSiN	[-]	titan hliník křemík nitrid
TiCN	[-]	titan karbo nitrid
VB	[mm]	opotrebení nástroje
$v_c$	[mm·min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
$v_f$	[mm·min <sup>-1</sup> ]	rychlost posuvu



# 1. Úvod

Polymerní systémy jsou široce používány díky svým jedinečným vlastnostem, např. snadná výroba, nízká hmotnost, vysoká pevnost konstrukcí a další. Polymery však mají nižší modul pružnosti a pevnost ve srovnání s kovovými a keramickými materiály (rozdíl v rámci 100 až 1000 MPa). Jedním ze způsobů, jak zlepšit jejich mechanické vlastnosti je vyztužení polymerů inkluzemi (vlákny, destičkami nebo částicemi). Možností, kterými můžeme polymerní kompozity vyztužit je mnoho. V současné době probíhá vývoj v oblasti využití nanovýztuží a výroby nanokompozitů. Experimentální výzkumy poukazují na výskyt nových jevů schopných zdatelně ovlivnit vlastnosti výsledného kompozitu – zvýšení pevnosti při použití relativně malého množství výztuže. [1]

S vývojem polymerních nanokompozitů a jejich aplikací v nejrůznějších průmyslových odvětvích bylo nutné samotné nanokompozity umět přizpůsobit konstrukčním zadáním. Ke zhotovení kompozitu do finální podoby je tedy zapotřebí obráběcích operací. Obrábění těchto materiálů je na rozdíl od kovů náročnější disciplínou z důvodů nehomogenní struktury, špatné tepelné vodivosti a možným výskytem delaminace. Tyto vlastnosti ovlivňují zejména opotřebení nástroje, což má dopad na kvalitu procesu obrábění a výslednou kvalitu (drsnot) obrobené plochy. [2]

Hlavním cílem předkládané práce je zjištění vlivu rozdílného složení nanokompozitních materiálů na opotřebení řezného nástroje, integritu obrobeného povrchu, liniovou a plošnou drsnot obrobené plochy vzorku a tvorbu třísky při technologii mikrofrézování.

Bakalářská práce se skládá ze tří částí: teoretické, experimentální a závěrečné. V první části – teoretické jsou shrnuty potřebné informace o nanokompozitních materiálech, třískových technologiích a problematice mikrofrézování.

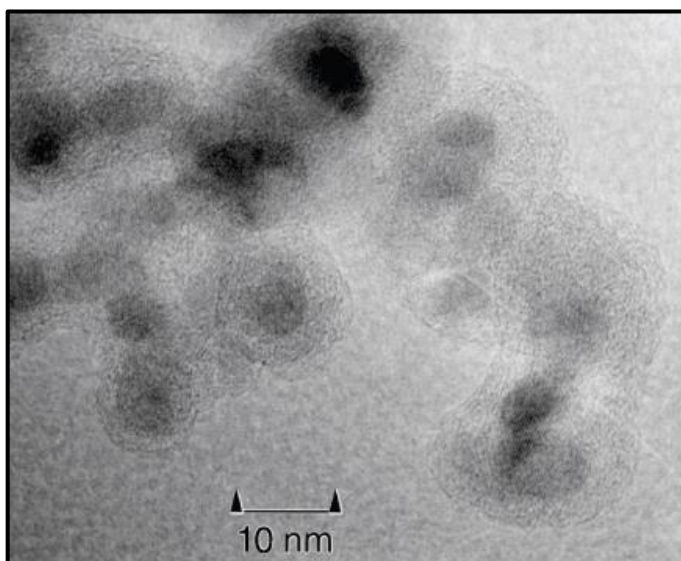
Experimentální část popisuje potřebné vybavení, stroje, přípravu experimentálních měření a získané výsledky. Dále se zabývá přípravou vzorků a definováním procesu obrábění.

V poslední části bakalářské práce se nachází vyhodnocení sledovaných parametrů, diskuze a závěr shrnující získané výsledky v rámci experimentální části bakalářské práce.

## 2. Teoretická část

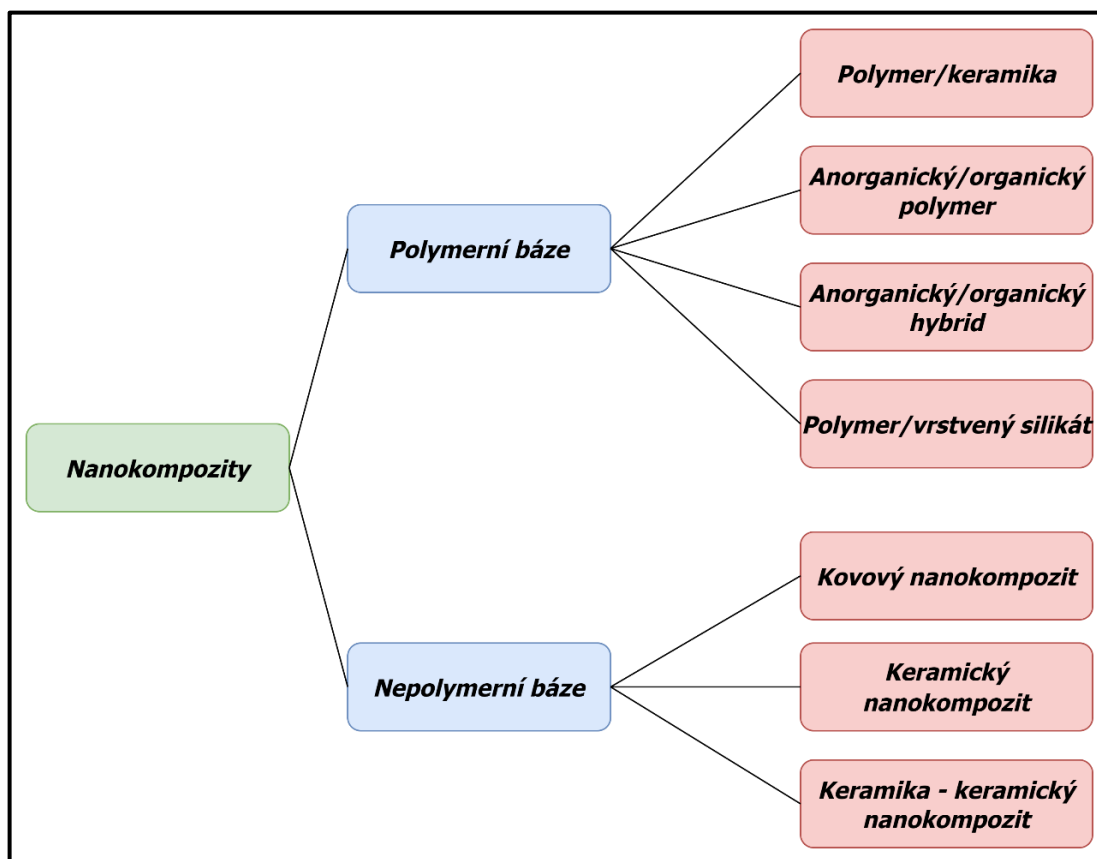
### 2.1. Nanokompozitní materiály

Nanokompozity jsou materiálové systémy skládající se z několika složek, z nichž jedna, nejčastěji vyztužující složka, má minimálně jeden svůj rozměr v řádech nanometrů viz obr.1. Snížení rozměrů těchto složek na úroveň nanometrů způsobuje zlepšení mechanických i fyzikálních vlastností kompozitu vlivem výskytu velkého množství nanočástic (velká měrná plocha vyztuže). [3]



Obr. 1 TEM fotografie nanočástic Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. [4]

Nanokompozitní systémy vycházejí ze stejného systému skladby jako makro kompozity – vzájemné prokládání vyztužující fáze (např. skelná nebo organická vlákna) se spojitým materiálem matrice. Výhody nanokompozitních systémů spočívají ve velkém poměru povrchu vůči objemu vyztužujících nanočástic. Další benefit spočívá v možnosti zlepšení mechanických a optických vlastností materiálu, které jsou způsobeny malou velikostí částic. Znatelnou nevýhodou aplikace nanovýztuží je zatím nedostatečné pochopení synergie jednotlivých fází. [3] Základní rozdělení nanokompozitních systémů je zobrazeno na obr. 2.



Obr. 2 Rozdělení nanokompozitů. [5]

V praxi se s nanokompozity můžeme setkat v široké škále aplikací: zdravotnictví (tkáňové inženýrství, stomatologie), viz obr. 3, letecký a vesmírný průmysl (v rámci konstrukčních řešení z důvodu vhodných mechanických a fyzikálních vlastností, kterými jiné třídy materiálů nedisponují). [6]



Obr. 3 Nanokompozitní zubní náhrady. [7]

Další možností využití nanokompozitních systémů spočívá v aplikacích povlakování, kdy vrstva nanášeného nanokompozitu zajišťuje prodloužení životnosti obráběcího nástroje, ukázka povlakovaných nástrojů viz obr. 4. Povlakovaný nástroj díky svým vlastnostem mimo jiné nevyžaduje tak velké množství procesních kapalin během procesu obrábění, čímž snižuje výdaje na ekologickou likvidaci odpadů vznikajících při obrábění. Výrazná výhoda nanokompozitní vrstvy spočívá v možnosti odleptání nanosené vrstvy, přebroušení geometrie nástroje a možnosti opět povlakovat nástroj. Tímto způsobem lze zvýšit životnost nástroje někdy až na 25násobek původní životnosti. [8]

Typickými výztužemi v nanokompozitech, viz obr. 5, jsou:

- nanočástice,
- nanovlákná,
- nanojíly. [3, 9]



Obr. 4 Povlakované čtyřbřité monolitní frézy s povlaky na bázi  $AlTiN$ ,  $TiCN$ ,  $CrAlSiN$ ,  $TiAlSiN$  (zleva doprava). [8]



Obr. 5 SEM fotografie jednotlivých druhů výztuží nanokompozitů. a) nanočástice, b) nanovlákná, c) nanojíly. [10]

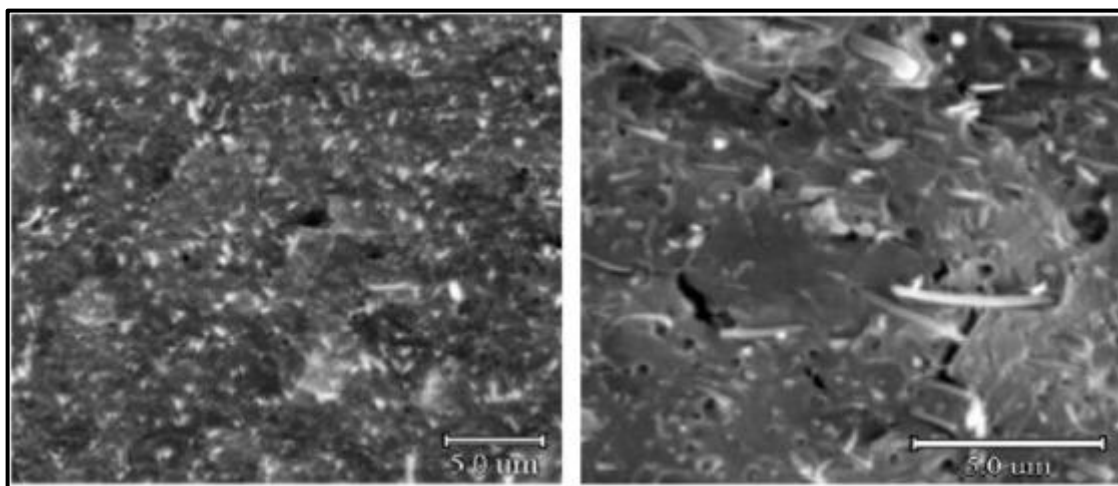
Nejčastěji využívanými nanoplňivy ve směsích s polymerní matricí dle prostorového uspořádání jsou:

- 1D vrstvené (např. montmorillonit),
- 2D lineární (např. uhlíkové nanotrubičky),
- 3D práškové (např. nanočástice stříbra). [10]

### 2.1.1. Nanokompozity s polymerní matricí

Polymerní nanokompozity mají velký potenciál k využití ve velkém množství konstrukčních aplikací. Díky velké ploše rozhraní a mezifázové interakci mezi polymerní matricí a nanoplňivem jsou polymerní nanokompozity mnohdy lepší variantou než kompozity s kovovou či keramickou vazbou. Disponují dostatečnou pevností, ořezuvzdorností, teplotní odolností a dalšími vlastnostmi, kterými se vyrovnají ostatním nanokompozitním systémům, a zároveň mají nižší hmotnost a jsou finančně výhodnější. [11, 12]

Vzhledem k tomu, že rozhraní nanovýztuž-matrice, viz obr. 6, hraje v polymerních nanokompozitech významnou roli, je vždy vyžadována vybraná povrchová úprava, která ovlivní mezifázovou interakci. O zvolené povrchové úpravě rozhoduje zejména budoucí účel nanokompozitního systému. [13]



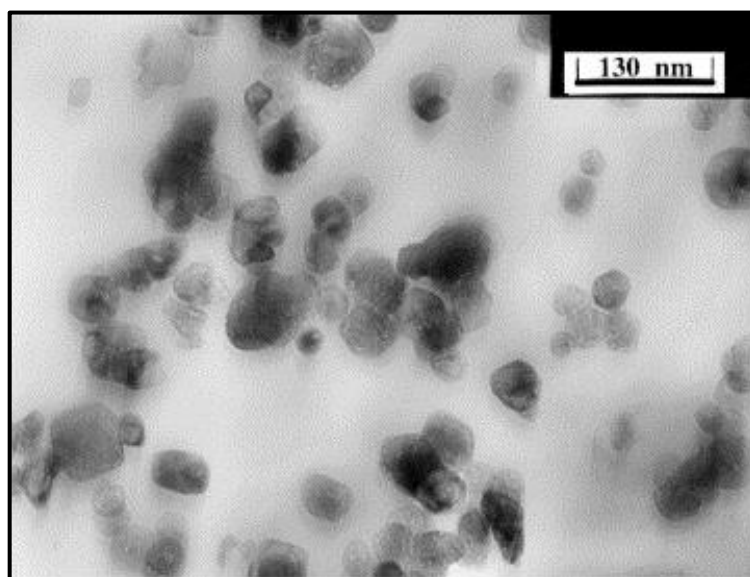
*Obr. 6 Struktura nanokompozitu s polymerní matricí vyfocená elektronovým mikroskopem (rozdíl v disperzi dvou druhů uhlíkových nanotrubic). [13]*

Povrchová úprava spočívá v úpravě nanovýztuže, která následně zajistí zvětšení vzdálenosti mezi jednotlivými částicemi, které vedou k vytvoření velké styčné plochy mezi částicemi a matricí. Nejčastěji je tohoto dosaženo tzv. iontovou výměnou zajišťující lepší kompatibilitu s organickými polymery. [13]

V nemísitelných systémech, typických pro mnoho konvenčních plněných polymerů, přináší špatná fyzikální interakce mezi anorganickými plnidly a polymery nízké mechanické a fyzikální vlastnosti. Naopak silné interakce mezi vrstevnatými silikáty a polymery mohou vést k disperzi anorganických nanofází v polymerních matricích. V důsledku toho budou polymerní nanokompozity vykazovat jedinečné mechanické a fyzikální vlastnosti, které ostatní kompozity nesdílejí. [13]

Disperze nanočástic v polymerech, viz obr. 7, je rozhodující pro dosažení vysoce výkonných polymerních nanokompozitů. Obecně jsou k dispozici tři hlavní způsoby, jak dosáhnout dobré disperze nanočástic:

- přímé smíchání nanočástic jako oddělených fází s polymery za účelem získání polymerních nanokompozitů,
- *in-situ* polymerace za přítomnosti nanočástic k přípravě nanokompozitů,
- kombinace *in-situ* tvorby nanočástic a *in-situ* polymerace za účelem získání polymerních nanokompozitů. [13]



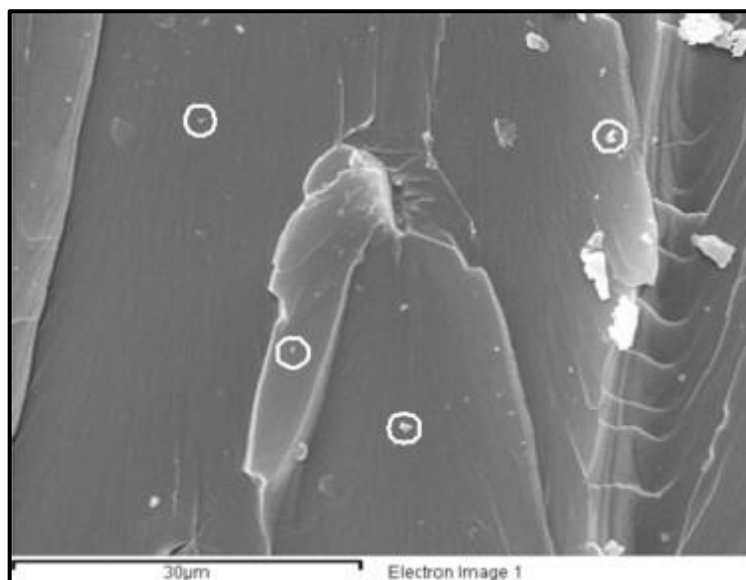
Obr. 7 TEM fotografie nanokompozitu s dispergovanými 13,2 obj. % plniva. [14]

Výrobní proces nanokompozitů vychází ze stejných principů jako výrobní procesy pro makrokompozity. Rozlišujeme tyto hlavní výrobní technologie:

- **interkalace polymeru z roztoku:** plnivo je smícháno s roztokem polymeru, výsledný produkt je získán odstraněním rozpouštědla po interkalační reakci.
- **interkalační polymerace:** plnivo je smícháno s monomerem, který následně polymerizuje, produktem je polymerní matrice s homogenně rozptýleným plnivem. Probíhá za vyšších teplot (50 až 280 °C).
- **interkalace taveniny:** plnivo se disperguje v tavenině polymeru, nejsou vyžadována rozpouštědla, rychlost difúze je menší. [15]

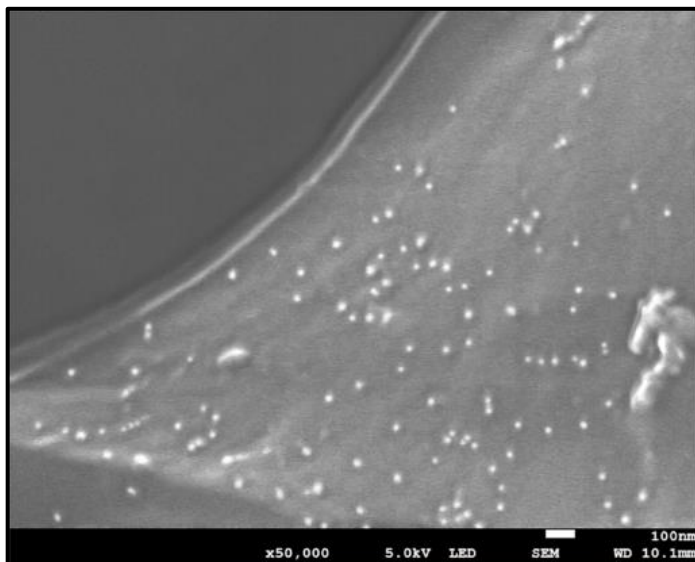
### 2.1.2. Nanojílové kompozity

Nanojíly jsou nanočástice vrstevnatých minerálních silikátů s vrstevnatými strukturálními jednotkami, které mohou vytvářet složité jílové krystality naskládáním těchto vrstev, viz obr. 8. Přidání nanojílu do polymerové matrice má za následek zlepšení mechanických vlastností jako je pevnost a modul pružnosti a také zlepšení tepelné stability výsledného kompozitu. [16]



Obr. 8 SEM snímek epoxidového nanokompozitu se 4 hm. % nanojílového plniva, kruhové oblasti označují nanojílové shluky. [14]

Jednou z nejžádanějších nanočástic je  $\text{SiO}_2$ , který je levný, netoxický, biokompatibilní, vysoce tepelně a mechanicky stabilní a zvláště účinný jako mechanická výztuž. Všechny tyto aspekty z něj dělají ideální volbu pro plnivo do kompozitů. Samotná velikost sférických nanočástic  $\text{SiO}_2$  se pohybuje okolo 20 nm, viz obr. 9. [17]



Obr. 9 SEM fotografie epoxidového kompozitu s nanokřemičitanem. [17]

Oxid křemičitý nachází uplatnění v oblasti lékařského zobrazování, jako stabilizátor pro jisté druhy léků, a dokonce je využíván i při léčbě rakoviny, kde jeho použití zvyšuje účinnost léčivé látky. Kromě toho se používá např. v katalyzátorech, chemických senzorech a chromatografii. [18]

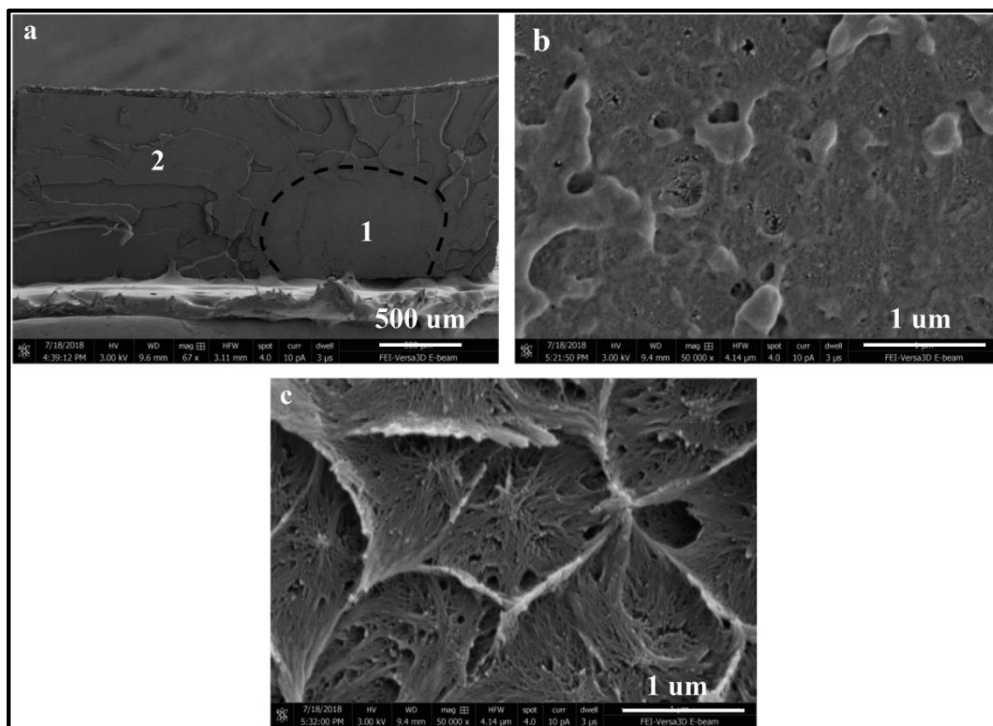
Rozlišujeme několik výrobních technologií:

- **Sol – gel:** Sérií chemických procesů vznikají silanolové skupiny a siloxanové můstky, jejichž velikost lze ovlivnit změnou pH.
- **Mikroemulzní technika:** Využívá čtyřsložkový systém, jehož kapičky působí jako nanoreaktory pro růst nanočástic.
- **Plamenová pyrolýza:** Používá se pro komerční výrobu  $\text{SiO}_2$ . Metoda spočívá ve spalování tetrachloridu křemíku za použití kyslíko – vodíkového plamene.

Nevýhodou tohoto plniva je vysoká hydrofilita povrchu  $\text{SiO}_2$ , která způsobuje slučování nanočástic, které se poté obtížně dispergují v polymerní matrici. Jedním ze způsobů, jak zlepšit dispergovatelnost nanočástic v polymerní matrici je tzv. roubování polymerů, viz obr.10, neboli jejich modifikace na křemičité nanočástice. Princip spočívá



ve vytvoření kovalentní vazby mezi polymerním řetězcem a částicí, což má za následek vytvoření anorganicko-organického materiálu. Takto hybridní materiál se skládá z anorganického jádra a z organického polymerního obalu. [17–20]



Obr. 10 Základní SEM fotografie povrchu lomu roubovaného nanokompozitu. (a) makrosnímek lomového povrchu, (b) detailní snímek oblasti 2, (c) detailní snímek oblasti 1. [21]

## 2.2. Mikrofrézování

Mikrofrézování je založeno na stejném principu úběru třísky jako konvenční frézování. Nástrojem je rotující fréza, která vytváří požadovaný profil. Nejpoužívanějšími nástroji jsou stopkové frézy, kulové hlavy a gravírovací nástroje. Pro frézování ocelových polotovárů jsou použity frézy z karbidu wolframu a pro neželezné materiály frézy diamantové. Zatímco u konvenčního frézování se průměry fréz pohybují od jednotek až po stovky milimetrů, průměry nástrojů pro mikrofrézování jsou většinou v desetinách milimetrů. Nevýhodou mikroobrábění je větší dopad chvění na opotřebením nástroje, který se díky tomu může i snadno zlomit. [22]

Při mikrofrézování se používají frézy, které jsou o 2 řády menší, než jsou nástroje na konvenční obrábění. Pro stanovení rezných parametrů při mikrofrézování se nabízejí různé metody, nejintuitivnějším řešením se nabízí zvolit rozměry mikronástroje podle konvenční frézy a ty geometricky zmenšit. To má za výsledek, že

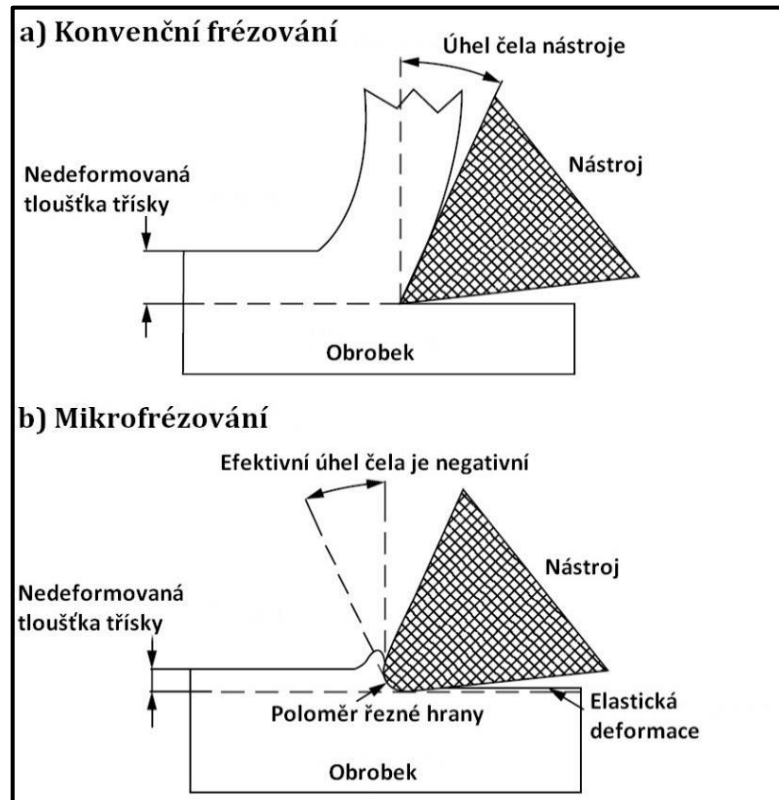
všechny řezné parametry jsou škálovány podle průměru nástroje. Geometrická konfigurace mikrofréz se však liší od konvenčních nástrojů. Poměr délky řezné části ku jejímu průměru je mnohem větší než u klasických fréz, což způsobuje zvýšení relativní řezné síly způsobené změnou geometrie, dále také přispívají ke zvyšování výchylky nástroje z požadované řezné dráhy. [23]

Výroba takovýchto nástrojů je z hlediska poloměru řezné hrany omezená, výrobní technologie jsou schopny je vyrobit s poloměrem břitu jenom v rozmezí 1 až 4  $\mu\text{m}$ . Proto není poloměr břitu zmenšen úměrně s průměrem nástroje a nelze předpokládat, že břit je dokonale ostrý. Tento jev se běžně nazývá efekt velikosti řezné hrany. To má za následek tvorbu třísky s vysoce negativním úhlem čela. Pokud však je hloubka záběru menší, než je poloměr břitu, nedochází k obrábění, ale k elastické deformaci. [23]

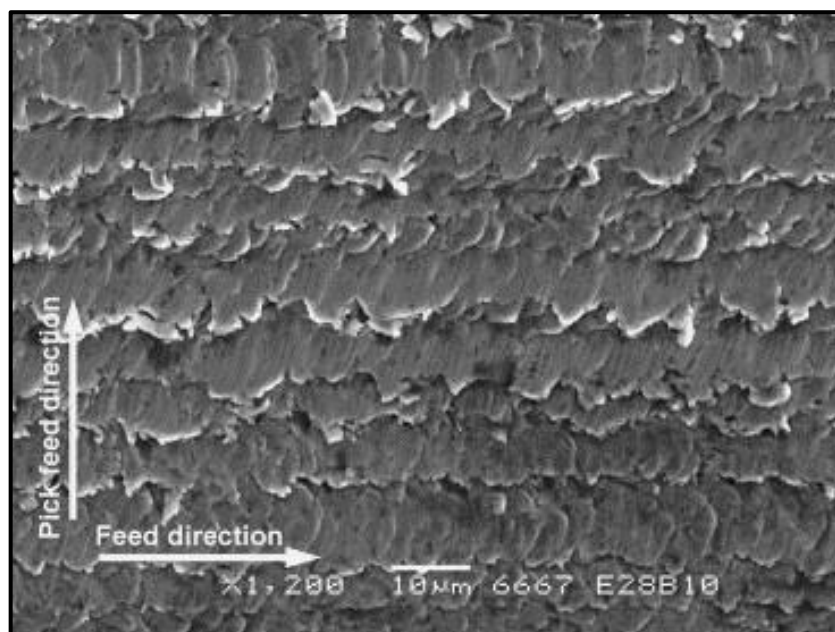
Důležitými procesními parametry při mikrofrézování kompozitů jsou:

- minimální tloušťka třísky,
- mikrostruktura obrobku,
- rádius břitu nástroje,
- měrná řezná síla,
- povrchová úprava. [24]

Zdánlivá relativní tupost nástroje zvyšuje řezné síly a nad určitou hodnotou může převládnout místo řezu orba třísky. Proto nelze slepě aplikovat geometrické zmenšení, místo toho bychom měli volit řezné parametry s ohledem na odhad řezných sil. Poměr tloušťky třísky ku poloměru břitu je často menší než 1 a blíží se k nule, to má vliv na topografii povrchu. K tomu dochází při vstupu a výstupu řezné hrany do řezu. Pokud je poměr příliš nízký dochází k orbě materiálu. To způsobí vyboulení materiálu o objemu neřezané třísky, viz obr. 11, který se poté připojí k obrobenému povrchu a zvyšuje výslednou drsnost viz obr. 12. Vlivem opotřebení nástroje se poloměr zaoblení řezné hrany zvětšuje a tím i rozsah orby. [23]



Obr.11 Schéma vzájemného působení nástroje a obrobku. [25]

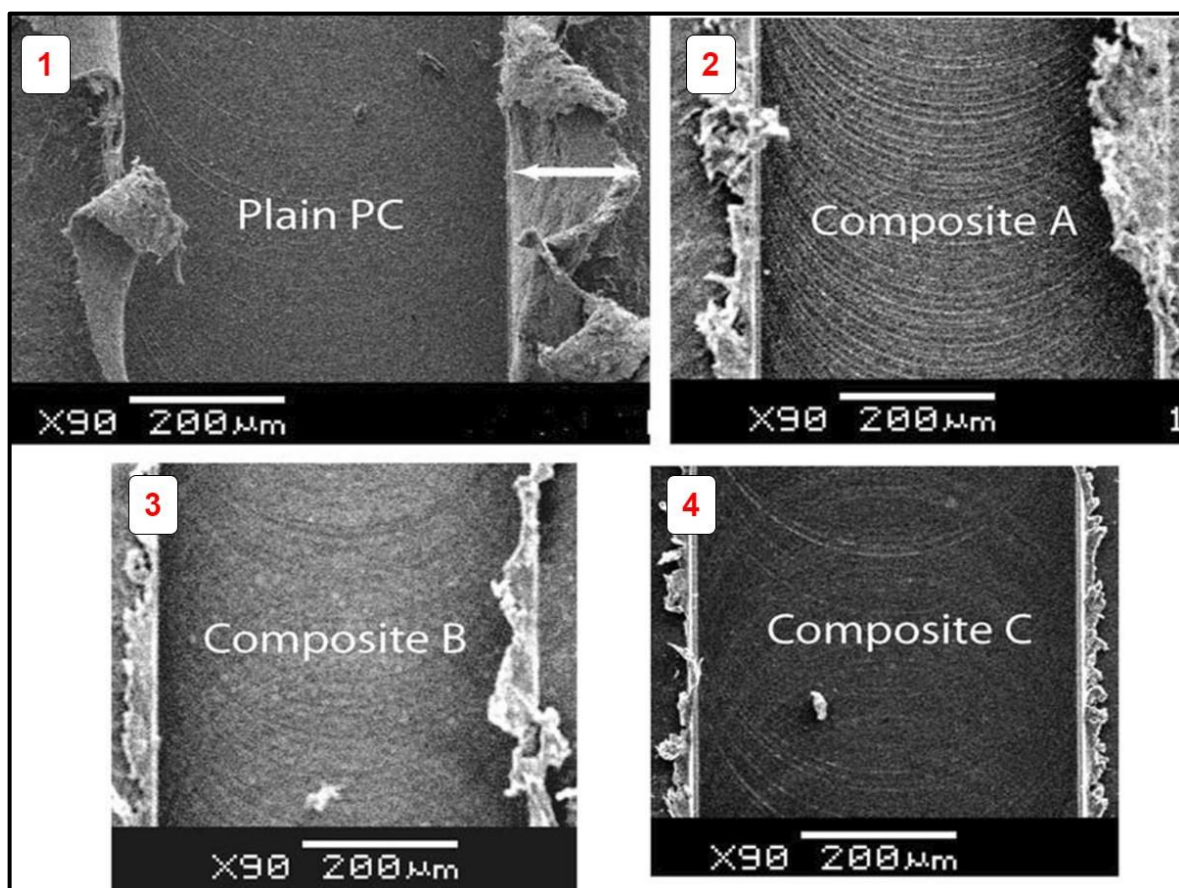


Obr. 12 Nahromadění plasticky deformovaného materiálu na straně každé lineární dráhy nástroje. Pick feed direction – předešlé dráhy nástroje; feed direction – směr posuvu. [23]

## 2.3. Mikrofrézování nanokompozitních materiálů

Většina kompozitních systémů se v rámci své výroby setká s operacemi mechanického obrábění. Mechanické obrábění je u tohoto druhu materiálu náročnější, a to zejména kvůli nehomogenní povaze vyztužujících vláken, což může a většinou i má vliv na opotřebení nástroje a na výslednou drsnost povrchu součásti. [24]

Na rozdíl od kovů, mají kompozity anizotropní charakter, tedy mají v různých směrech, odlišné vlastnosti. Při obrábění se proto mohou vyskytnout různé u kovů nevídané poruchy, jako je například delaminace a rozmazání matrice viz obr. 13. Průběh konvenčního obrábění ovlivňuje mnoho parametrů, mezi kterými jsou např. řezné podmínky, geometrie a materiál nástroje, z hlediska kompozitu jde o typ a tvar výztuže. V technické praxi se nejčastěji setkáme s vrtáním kompozitů k výrobě děr pro spojovací součásti. [2, 26]



Obr. 13 Třísky při řezné rychlosti 80 m/min. 1) čistý polykarbonát; 2) 1,75 % hm. nanoplňiva; 3) 5 % hm. nanoplňiva; 4) 15 % hm. nanoplňiva. [2]

### 2.3.1. Vliv nanovýztuže

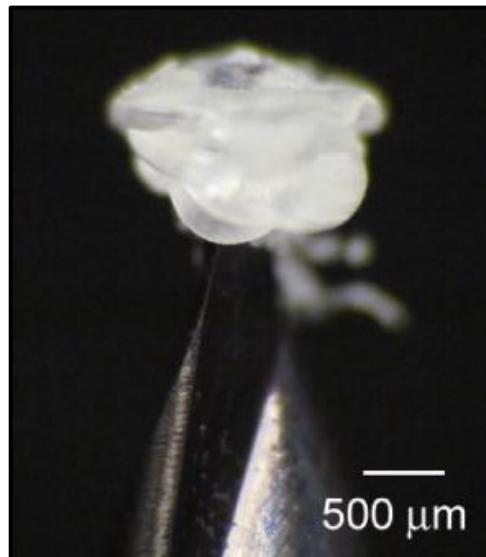
Dle výzkumu provedeného výzkumným týmem Samuel a kol. [27] lze konstatovat, že při porovnání třech druhů polykarbonátu, z nichž se jedná o čistý polykarbonát, o polykarbonát vyztužený uhlíkovými vlákny a polykarbonát obohacený o nanoplivo v podobě vícestěnných uhlíkových nanotrubic, bylo zjištěno, že během frézování má plnivo velice znatelný vliv. Z výsledku experimentu bylo patrné, že při stejných řezných podmínkách byl kompozit s nanoplivem schopen tvořit souvislé třísky, zatímco kompozit s uhlíkovými vlákny pouze třísku nespojitou. [2]

Kompozit s nanoplivem byl schopný dosáhnout znatelně lepší drsnosti povrchu a menších řezných sil působících na nástroj. Důvodem je dobrá tepelná vodivost nanovýztuže. Dále bylo zjištěno, že velký vliv na drsnost povrchu má množství nanopliva, které je obsaženo v kompozitu. Při 15 % hm. nanotrubic dosahuje materiál nejnižších hodnot drsnosti povrchu, tepelná vodivost je až o 54% vyšší než u kompozitu s 1,75 % hm. nanopliva. [2]

Při experimentálním obrábění se ukázalo, že nejlepšími hodnotami drsnosti, řezné síly a poškození povrchu se dosáhne při sklonu nanotrubic 45° při obsahu 1,5 % hm. nebo při nulovém sklonu, ale za předpokladu 6 % hm. plniva. [2]

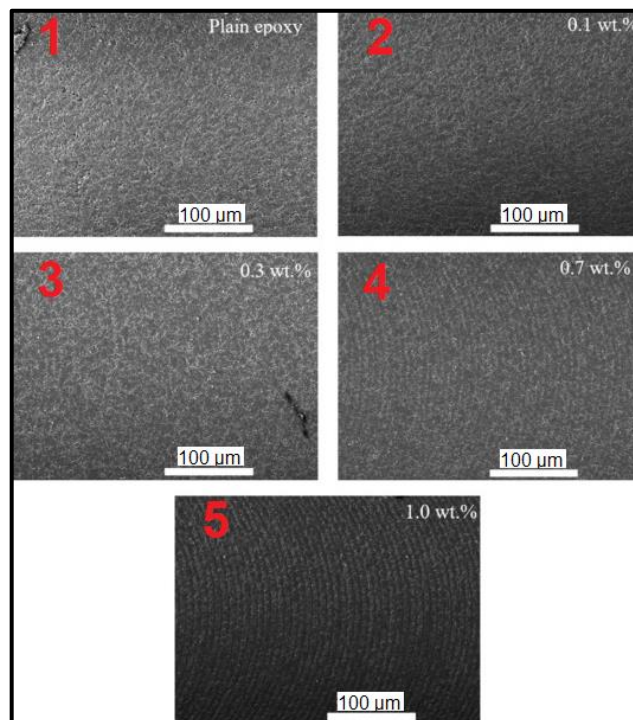
Pokud je ale obsah nanotrubic větší (0,7 až 1 % hm.) má to negativní vliv na opotřebení nástroje, zejména jeho hřbetu. Je to způsobeno vzájemným fyzickým kontaktem většího množství nanotrubic a nástroje. Dalším problémem je ulpívání částic nanopliva na těle nástroje ve formě nespojitých třísek, které mohou indikovat značnou křehkost materiálu. [28]

Při mikroobrábění konvenčních polymerních kompozitů se setkáváme se špatnou tepelnou vodivostí polymerní matrice. Z tohoto důvodu se teplo, které vzniká v místě řezu, zejména kvůli vysokým otáčkám, nemá kam odvést. Což má za následek zvýšení lokální teploty a vznik viskoelastických nebo kapalných oblastí. To samozřejmě ovlivní výslednou přesnost, ale zároveň i část matrice může přilnout k nástroji, viz obr. 14, čímž následuje další zhoršení geometrie a přesnosti. [28]



Obr. 14 Ztuhnutí polymeru kolem hrotu nástroje po řezné vzdálenosti 30 µm. [29]

Při obrábění polymerních nanokompozitů, kde se očekávaly obdobné problémy, protože řezné podmínky byly podobné, se nakonec zjistilo, že hustá síť nanotrubic v pojivu kompozitu vytváří tepelný tok, který odvádí většinu tepla ze zóny řezu. Nejvyšší hodnota tepelné vodivosti byla v kompozitu s obsahem 1 % hm. nanoplniva. Na obr. 15 lze pozorovat vliv tepelné vodivosti nanovýztuže, která ovlivňuje viditelnost map jednotlivých drah nástroje, a také na natavení polymerní matrice. [28]



Obr. 15 Morfologie obrobeného povrchu při 1) čistý epoxid; 2) 0,1 % hm. nanotrubic; 3) 0,3 % hm. nanotrubic; 4) 0,7 % hm. nanotrubic; 5) 1 % hm. nanotrubic. [28]

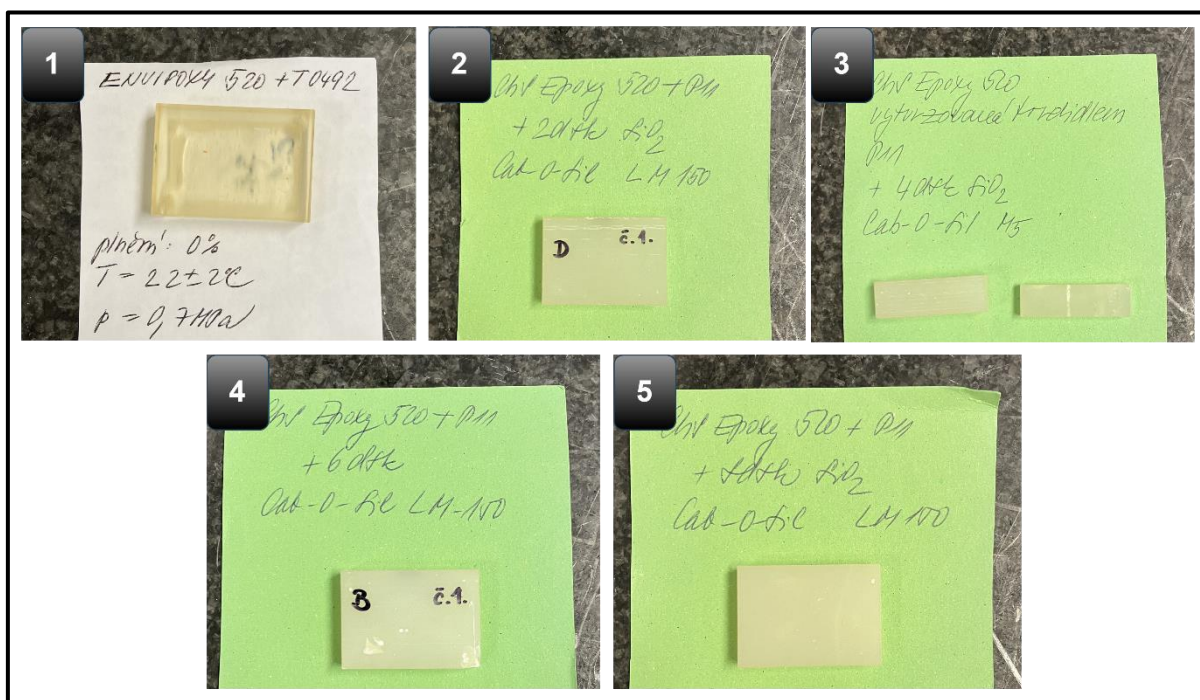
### 3. Experimentální část

Experimentální část zkoumá vliv množství nanovýtzuže na opotřebení nástroje, obrábění vzorků a výsledné parametry integrity obrobené plochy. Dále popisuje potřebné vybavení, stroje, přípravu experimentálních měření, vzorků a definování procesu obrábění.

Procesy obrábění a měření byly provedeny v laboratoři Katedry obrábění a montáže na Technické univerzitě v Liberci.

#### 3.1. Zkušební vzorky

Pro experiment bylo vytvořeno 5 vzorků viz obr. 16. Rozměry vzorků byly zvoleny dle potřeb procesu obrábění. Dle možností a dostupnosti odlévacích forem byly 4 z 5 vzorků zhotoveny ve tvaru kvádrů o stejných rozměrech (30x20x10 mm) a 1 vzorek byl vyhotoven jako kvádr s menšími rozměry (30x10x10 mm), tak aby velikost obráběné plochy byla napříč vzorky stejná.



Obr. 16 Zkušební vzorky.

1 – čistá epoxidová pryskyřice; 2 – epoxidová pryskyřice + 2 % hm. plniva; 3 – epoxidová pryskyřice + 4 % hm. plniva; 4 – epoxidová pryskyřice + 6 % hm. plniva; 5 – epoxidová pryskyřice + 8 % hm. plniva

Zvolenou matricí pro výrobu vzorků kompozitu byla zvolena dvousložková, nízkomolekulární epoxidová pryskyřice CHS – EPOXY 520 (EPOXY 15), která se nejčastěji používá k odlévání, impregnaci, záливce a lepení v různých průmyslových odvětvích. Tato pryskyřice vykazuje následující vlastnosti: Mírně nažloutlá barva, viskózní kapalina o hustotě  $1,16 - 1,17 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  při  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , viskozita  $12,0 - 14,5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  při  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , obsah epoxidových skupin  $5,2 - 5,5 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  a hmotnostní ekvivalent epoxidu  $182-192 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

K vytvrzení pryskyřice bylo použito tvrdidlo P11 v poměru 100:11 při hmotnosti a 100:13,5 při poměru objemu (pryskyřice: tvrdidlo). Tužidlo P11 je tzv. rychlé tvrdidlo s kratší dobou zpracovatelnosti a typickou úpravou povrchu vzorku, kterou lze snadno odstranit omytím vzorku v 3% roztoku kyseliny citrónové, následným omytím vodou a vysušením.

Pro výrobu vzorků byl zvolen diskontinuální proces odlévání materiálových směsí do předem připravené formy, která byla vyrobena z dvousložkového silikonového kaučuku Silastic T1. Pro výrobu formy byl zvolen silikonový kaučuk z důvodu snadné výroby a snadné manipulace. Formu nebylo nutné oddělovat, vzorky bylo možné snadno vyjmout a formu nebylo nutné složitě čistit.

Rozměry vzorků byly zvoleny podle požadavků pro následné technologické operace mikroobrábění. Jako plnivo byl použit pyrogenní amorfní oxid křemičitý LM-150 Cab-O-Sil, od firmy CABOT GmbH. Materiál je amorfní, vysoce čistý, s velkým měrným povrchem ( $150 \text{ m}^2/\text{g}$ ).

Do epoxidové pryskyřice byl přidáván v poměrech 2, 4, 6, 8 dsk, to znamená, že do 100 g pryskyřice se přidají 2g plniva, tedy  $\text{SiO}_2$ . Poté se přidává tvrdidlo.

Takto připravená směs se dobře promíchá a vlije do formy. Forma se vloží do přetlakové nádoby a při laboratorní teplotě  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  a přetlaku  $0,7 \text{ MPa}$  se směs vytvrzuje 24 hodin. Pro dosažení konečných hodnot mechanických parametrů je žádoucí dotvrzení při teplotě  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 10 hodin.



## 3.2. Popis strojů, nástrojů a měřicích zařízení

Tato kapitola obsahuje informace o všech použitých zařízeních, která byla použita pro uskutečnění experimentu. Veškerá zařízení byla dostupná v laboratoři Katedry obrábění a montáže na Technické univerzitě v Liberci.

### 3.2.1 CNC frézka

Na obrobení vzorků byl použit stroj DMG MORI CMX 600 V, jde o obráběcí centrum s jedním vřetenem. Vertikálně umístěné vřeteno, jenž je poháněno 13 kW motorem s kroutícím momentem 83 Nm je schopno vyvinout až 12 000 ot. /min. Frézka umožňuje také přívod tlakového média (vzduch, procesní kapalina). Do tohoto modelu je možné umístit obrobek o hmotnosti až 600 kg a rozměrech 600 x 560 x 510 mm do pracovního prostoru o objemu 5,5 m<sup>3</sup>.



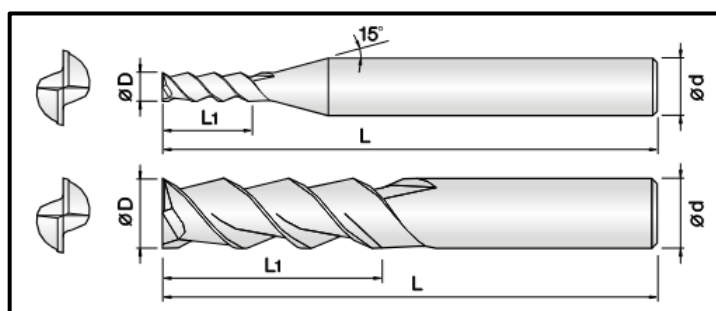
Obr. 17 Frézka DMG MORI CMX 600 V. [30]

### 3.2.2. Použité obráběcí nástroje

Pro uskutečnění experimentu byly použity nástroje s označením 2ALE – 005–005 – S04, jedná se o frézu o  $\varnothing$  0,5 mm a délce 40 mm vhodnou pro obrábění měkkých plastů a kompozitních materiálů. Bližší přehled technických parametrů mikronástroje viz tab. 1 a obr. 18 až 19.

Tab. 1 – Základní informace o nástroji.

DVOUBŘITÁ OSTRÁ FRÉZA	
průměr nástroje D [mm]	0,5 (+0/-0,01)
funkční délka $L_1$ [mm]	0,5
celková délka L [mm]	40
průměr stopky nástroje s tolerancí [mm]	4 h5
dodavatel	PM – TECH



Obr. 18 Schéma základní geometrie nástroje. [31]



Obr. 19 Snímek řezné části nového nástroje, vyfocen mikroskopem KEYENCE VK-X1100.

### 3.2.3. Laserový bezkontaktní profiloměr

Pro potřeby experimentu byl použit profiloměr KEYENCE VK-X1100, viz obr. 20. Jedná se o laserový skenovací konfokální mikroskop, schopný bezkontaktního měření profilů, drsnosti a tloušťky vrstvy jakéhokoliv materiálu nebo tvaru, a to s přesností v řádu nm. Měřicí hlava je schopna vytvářet snímky s frekvencí 4-125 Hz a lze s ní dosáhnout maximálního zvětšení až 28800x.



Obr. 20 Profiloměr KEYENCE VK-X1100.

### 3.3. Řezné podmínky

Řezné podmínky, viz tab. 2, byly stanoveny na základě doporučení výrobce řezných nástrojů a dle odborného odhadu vedoucího experimentální části bakalářské práce. Hlavními parametry byly: otáčky vřetena –  $n$ , posuv na zub –  $f_z$ , hloubka záběru –  $a_p$ , šířka záběru –  $a_e$

Tab. 2 – Řezné podmínky použité pro experimentální část.

ŘEZNÉ PODMÍNKY			
$n$ [ot/min]	$f_z$ [mm]	$a_p$ [mm]	$a_e$ [mm]
12 000	0,01	0,033	0,20

## 3.4. Metodika experimentů

### 3.4.1. Příprava vzorků

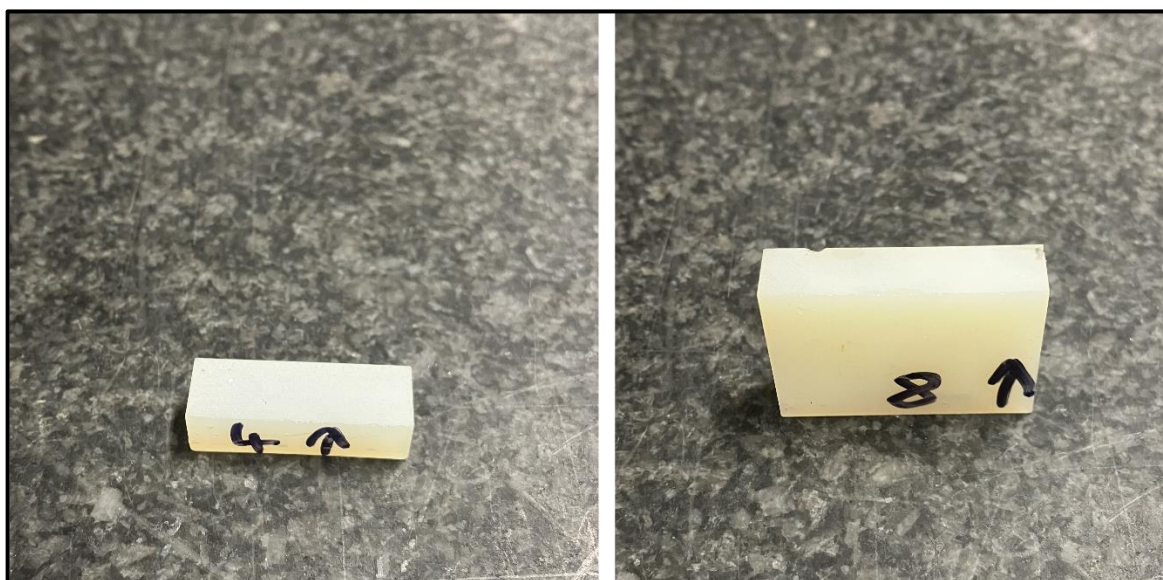
K dispozici bylo 5 typů vzorků, které se lišily obsahem vyztužující složky od 0 až do 8 % hm. SiO<sub>2</sub>. Příprava vzorků je blíže uvedena v kap. 3.1.

### 3.4.2. Použité obráběcí nástroje

Pro potřeby experimentu byl pro každý vzorek použit nový nástroj. Stopka nástroje byla opticky zkontrolována z důvodu eliminace nedostatečného upnutí do hydraulického upínače. Technické parametry použitých nástrojů jsou uvedeny v kap. 3.2.2.

### 3.4.3. Proces mikrofrézování

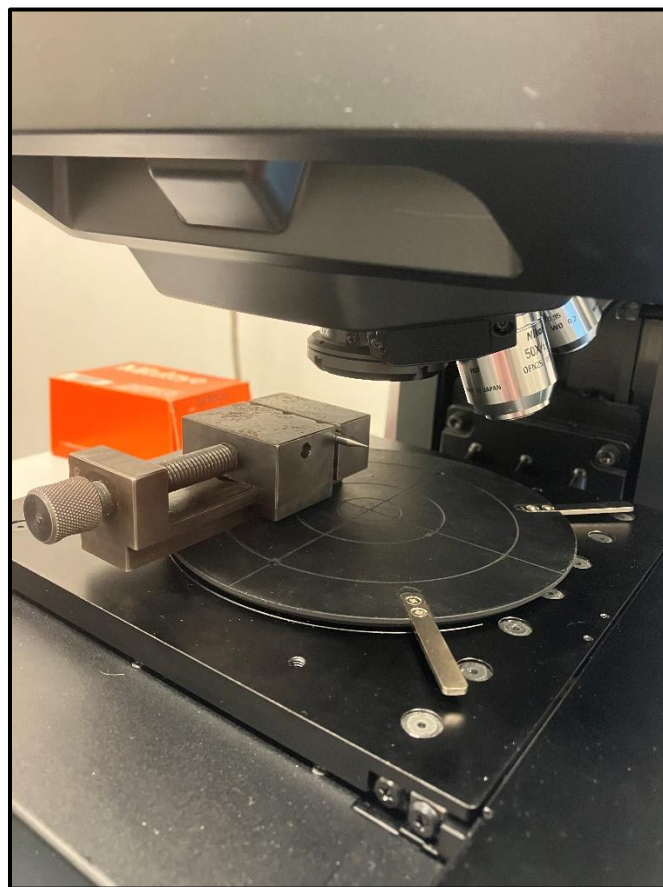
Pro frézování bylo použito obráběcí centrum DMG MORI CMX 600 V. Před zahájením procesu obrábění byly vzorky upnuty podélně vůči směru dráhy nástroje do svěráku a zauhlovány. Po zauhlování následovalo čelní rovinné mikrofrézování, které proběhlo dle definovaných řezných podmínek, viz kap. 3.3. Kontrolním kritériem pro vyhodnocení velikosti vzniklého opotřebení byl časový interval 5 minut odpovídající obrobené ploše o velikosti 296 mm<sup>2</sup> (plocha půdorysu vzorku při upnutí). Příklad orientace vzorku při obrábění viz obr. 21.



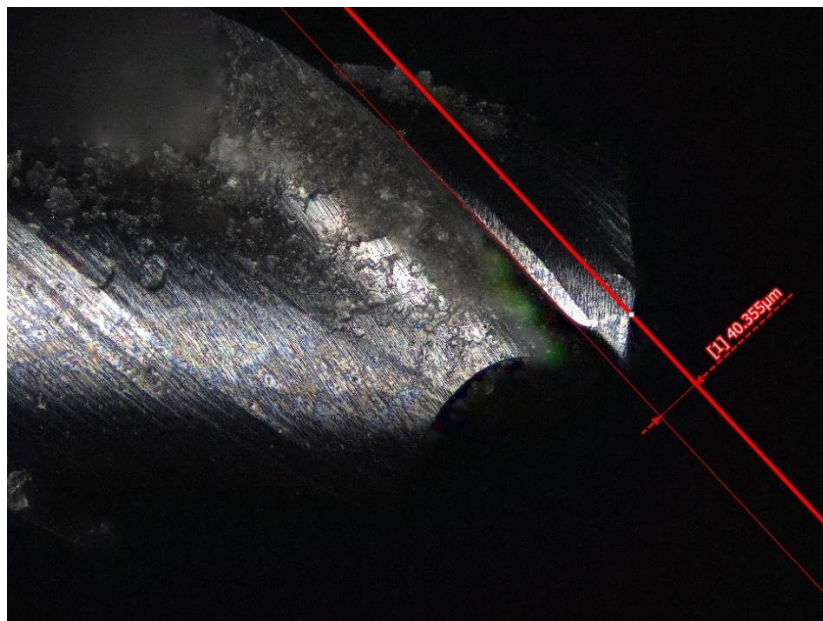
Obr. 21 Orientace vzorků při obrábění (obráběná plocha označena šipkou).

### 3.4.4. Sledování opotřebení nástroje VB

Opotřebení nástroje VB bylo měřeno na profiloměru KEYENCE. Nástroje byly změřeny po 5, 10, 15, 20, 25 a 30 minutách nástroje v řezu. Nástroj byl pokaždé napozicován do stejné výchozí pozice pro měření do laboratorního svěráku a následně upnut, viz obr. 22. Pomocí měřicího softwaru bylo 5x změřeno vzniklé opotřebení řezné části nástroje, viz obr. 23. Tento způsob měření proběhl u každého z 5 použitých nástrojů.



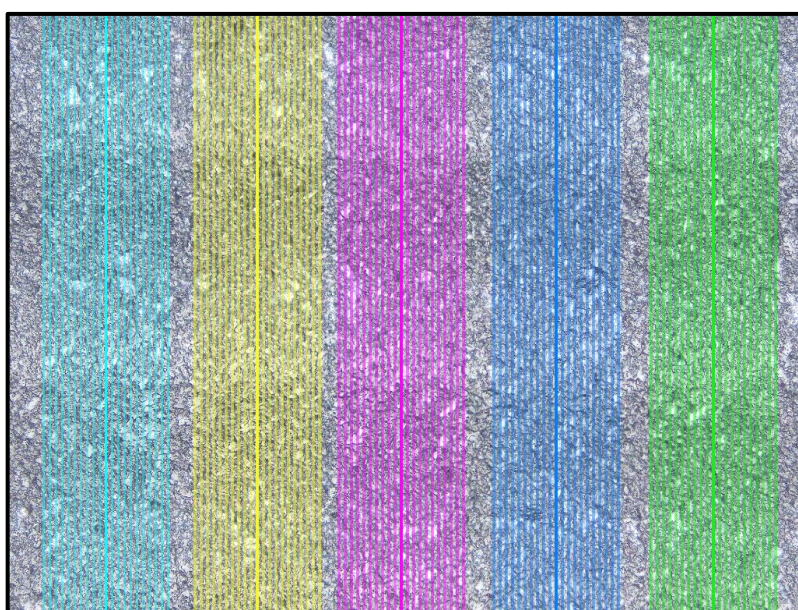
*Obr. 22 Způsob zakládání nástroje při měření opotřebení.*



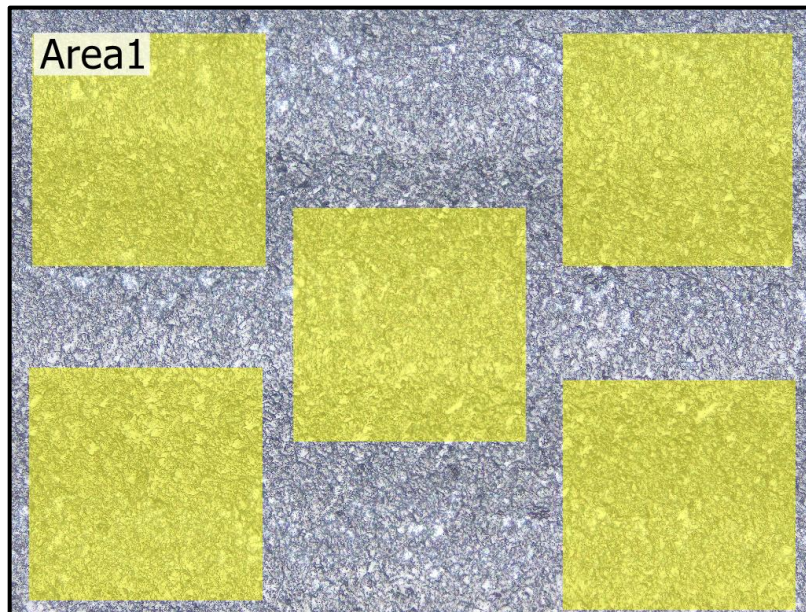
Obr. 23 Příklad způsobu měření opotřebení nástroje.

### 3.4.5. Drsnost obrobeného povrchu vzorku

Po uplynutí časového intervalu 5 minut nástroje v řezu následovalo měření drsnosti obrobené plochy. Sledovanými parametry drsnosti byly  $R_a$  a  $R_t$ . Pro každý z parametrů bylo provedeno 5 měření kolmo na směr posuvu nástroje na různých místech obrobené plochy vzorku, viz obr. 24. Naměřené hodnoty byly následně statisticky zpracovány dle metodiky, viz kap. 3.4.8. Dále byl sledován parametr  $S_a$ , který byl měřen pomocí 5 oblastí o ploše  $200 \times 200 \mu\text{m}$ , viz obr. 25, které byly následně statisticky vyhodnoceny.



Obr. 24 Náhled měřených oblastí pro  $R_a$  a  $R_t$ .



*Obr. 25 Náhled měřených oblastí pro  $S_a$ .*

### **3.4.6. Integrita povrchu**

Po uplynutí 5 min. intervalu obrábění byla pozorována jakost již obrobené plochy, včetně nedokonalostí (např. kavity) na profiloměru. Po procesu obrábění byl povrch vzorku očištěn ofukem.

### **3.4.7. Tvorba třísky**

V rámci prvního 5 min. cyklu a na konci experimentu (30 minutách nástroje v řezu) byly z povrchu vzorku opatrně odebrány vzorky nahromaděné třísky pomocí netkané textilie. Následně byl pod mikroskopem zkoumán jejich charakter ovlivněný velikostí opotřebení nástroje a také i množstvím výplně jednotlivých vzorků.

### **3.4.8. Statistické vyhodnocení dat**

Pomocí statistického procesu zpracování naměřených dat proběhl výpočet aritmetického průměru spolu s nejistotou měření (statický interval spolehlivosti měření). Tato nejistota byla spočtena v souladu se zněním dokumentu EA-4/02 M:2013.

### 3.5. Vyhodnocení výsledků

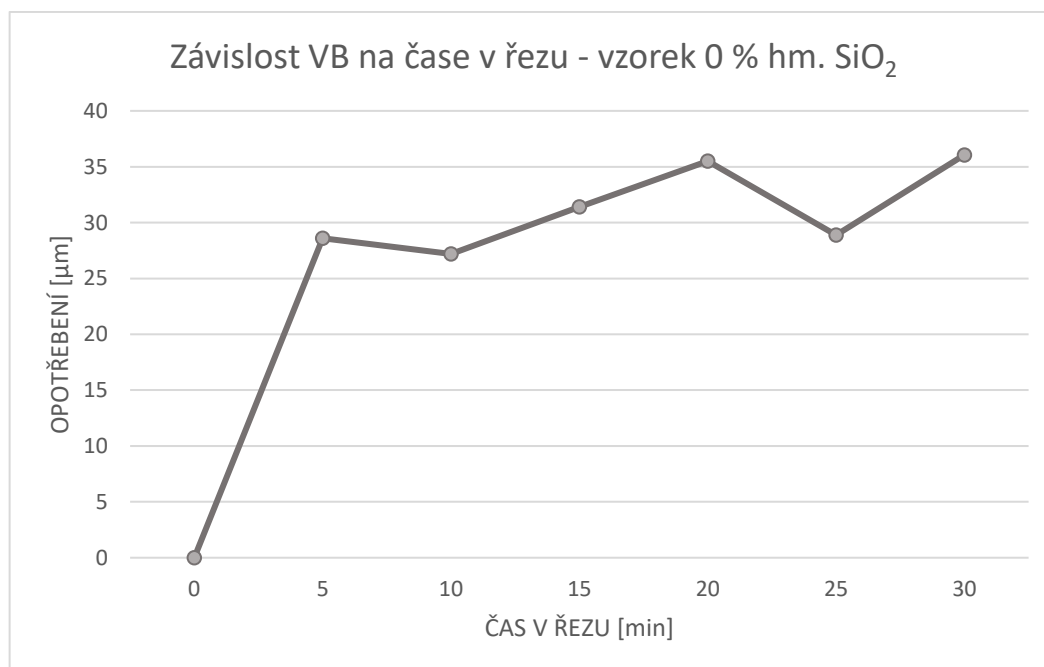
Tato kapitola se zabývá zpracováním výsledků opotřebení nástrojů, drsnosti povrchu a morfologie třísek naměřených během experimentu do přehledných tabulek a grafických závislostí.

#### 3.5.1. Vzorek č. 1 – 0 % hm. SiO<sub>2</sub>

##### a) Opotřebení nástroje VB

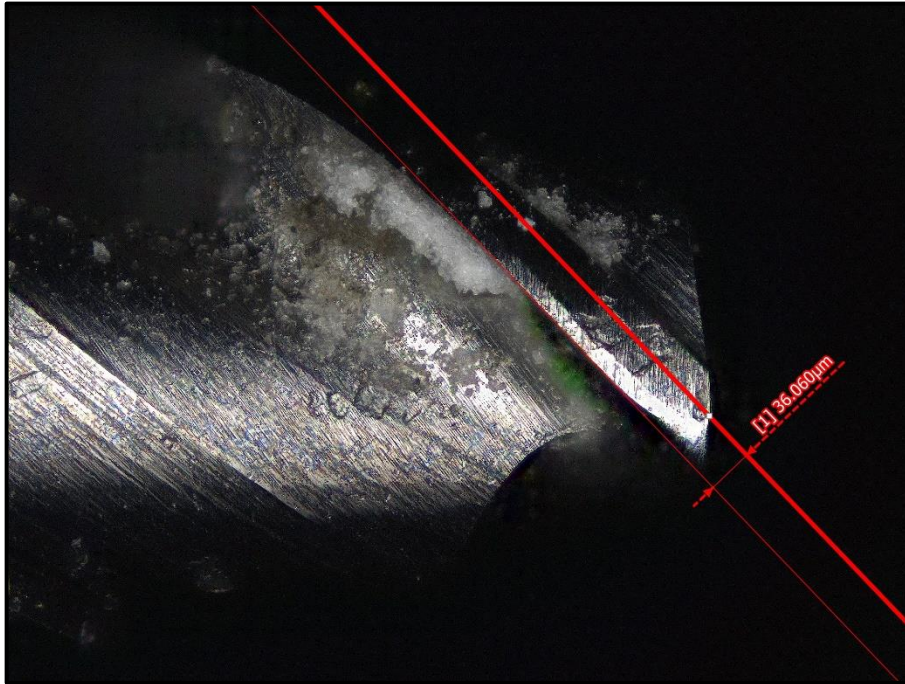
Tab. 3 – opotřebení nástroje při frézování vzorku č. 1.

ČAS V ŘEZU [min]	OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE [ $\mu\text{m}$ ]
0	0
5	28,60 $\pm$ 0,73
10	27,18 $\pm$ 0,61
15	31,40 $\pm$ 0,97
20	35,50 $\pm$ 0,35
25	28,88 $\pm$ 1,13
30	36,06 $\pm$ 0,24



Obr. 26 Graf opotřebení nástroje v závislosti na době obrábění vzorku č. 1.





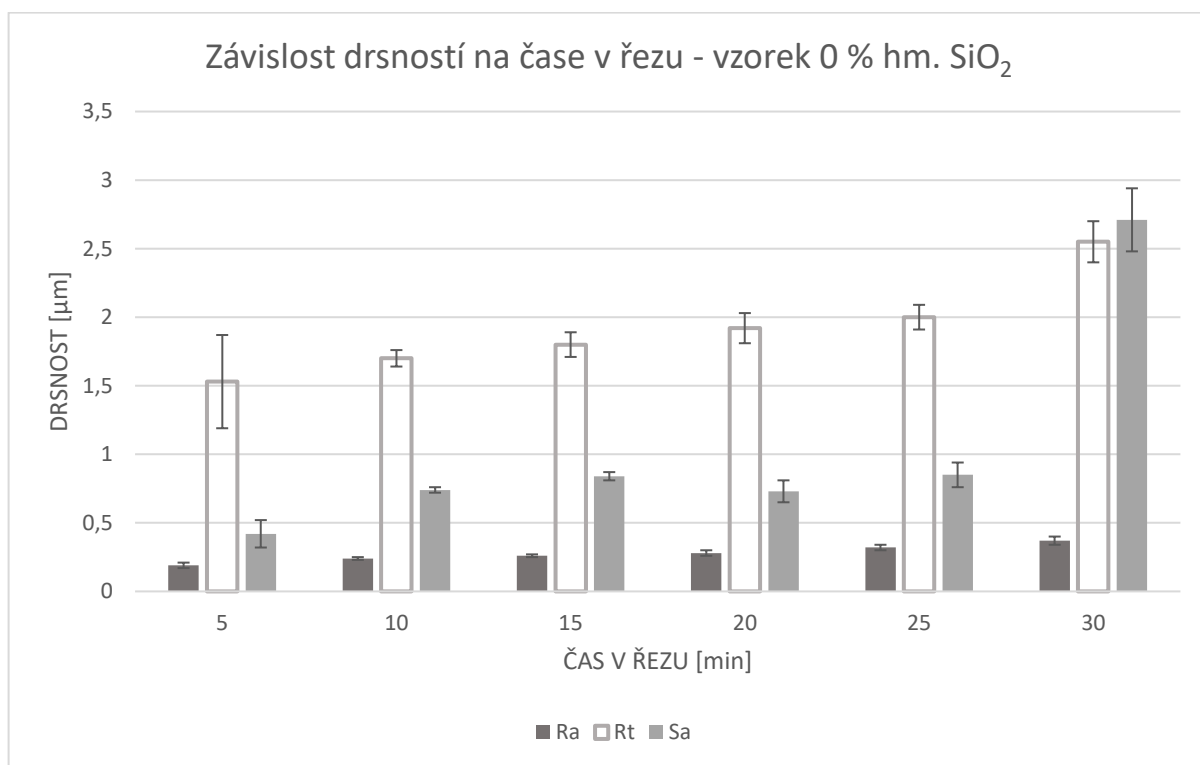
*Obr. 27 Opotřebení nástroje po 30 min. obrábění vzorku č. 1.*

Při obrábění vzorku bez přídavku nanoplniva došlo k téměř 80 % celkového opotřebení během prvním 5 minut frézování. Trend opotřebení měl vzrůstající charakter, kromě míst odpovídajících 10 a 25 minutám v řezu. Za těmito poklesy stojí obtížné pozicování mikronástroje do výchozích měřících pozic a výskyt nečistot po obrábění (shluky třísek), které mohou opticky působit jako řezný materiál nástroje.

## b) Drsnost $R_a$ , $R_t$ a $S_a$

Tab. 4 Vyhodnocení  $R_a$ ,  $R_t$  a  $S_a$  vzorku č. 1.

ČAS V ŘEZU [min]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	statický interval spolehlivosti [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	statický interval spolehlivosti [ $\mu\text{m}$ ]	$S_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	statický interval spolehlivosti [ $\mu\text{m}$ ]
5	0,19	$\pm 0,02$	1,53	$\pm 0,34$	0,42	$\pm 0,10$
10	0,24	$\pm 0,01$	1,70	$\pm 0,06$	0,74	$\pm 0,02$
15	0,26	$\pm 0,01$	1,80	$\pm 0,09$	0,84	$\pm 0,03$
20	0,28	$\pm 0,02$	1,92	$\pm 0,11$	0,73	$\pm 0,08$
25	0,32	$\pm 0,02$	2,00	$\pm 0,09$	0,85	$\pm 0,09$
30	0,37	$\pm 0,03$	2,55	$\pm 0,15$	2,71	$\pm 0,23$

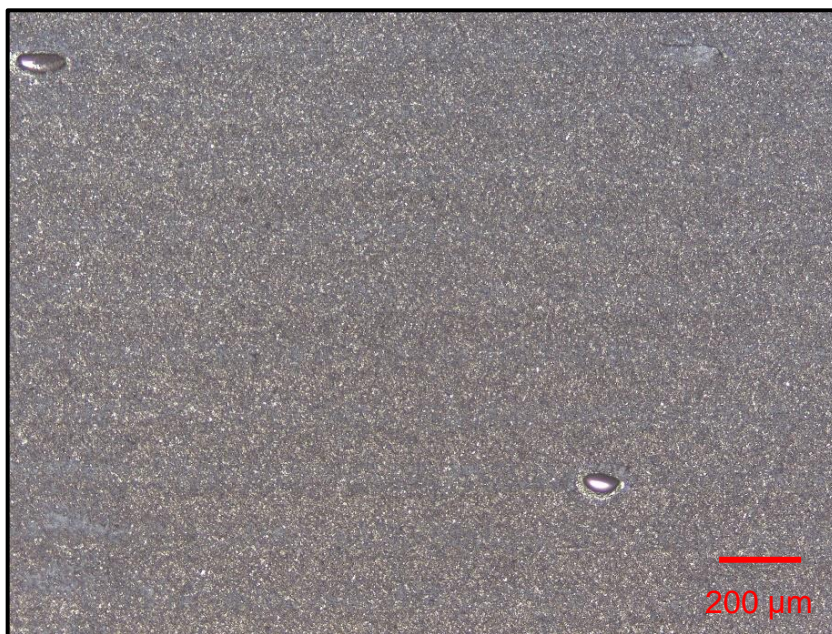


Obr. 28 Graf závislosti drsností na době obrábění vzorku č. 1.

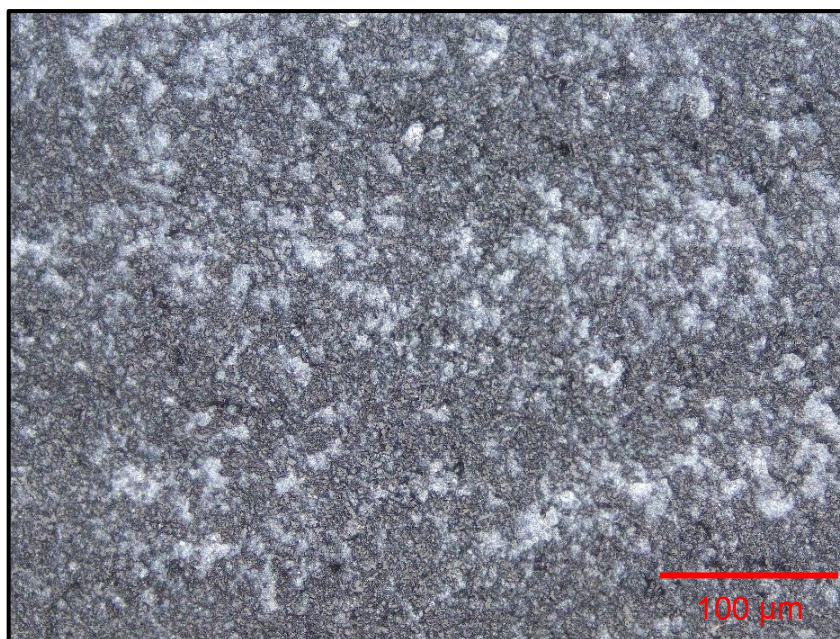
Závislost drsností na čase nástroje v řezu pro vzorek č.1 vykazuje mírný vzrůstající trend společně s narůstající velikostí opotřebení VB. Pouze plošná drsnost se z této charakteristiky vymaňuje, kdy v rámci posledního měření lze pozorovat více než trojnásobný nárůst měřené veličiny  $S_a$ . Toto lze vysvětlit plochy vzorku, ve které mohlo dojít např. k orbě materiálu což má za následek nárůst plošné drsnosti, ulpěním většího množství velmi jemných částic třísek či větším výskytem kavit ve vzorku.

### c) Integrita povrchu

Obráběcí cykly odhalily přítomnost dutin, viz obr. 29, které ve vzorku vznikly během výroby polotovarů pro experimentální část např. nedostatečným odvzdušněním při odlévání. Tyto dutiny mohou zvyšovat opotřebení nástroje vlivem přerušení plynulého záběru nástroje. Dále lze pozorovat povrch materiálu, kde vlivem opotřebení nástroje začalo docházet k orbě materiálu, a takto oddělená tříška se poté připojila k obrobenému povrchu viz obr. 30.



*Obr. 29 Přítomnost dutin na povrchu vzorku č. 1.*



*Obr. 30 Povrch vzorku č. 1 po posledním cyklu obrábění.*

#### d) Tvorba třísky

Obráběním vzorku, který obsahuje pouze epoxidovou pryskyřici, vznikly třísky červíkovitého tvaru viz obr. 31. Namodralá vlákna viditelná mezi pozorovanými třískami patří netkané textilií, pomocí které byly třísky odebrány ze vzorku. Lze pozorovat stejnou morfologii třísek i při posledním cyklu obrábění viz obr. 32.



Obr. 31 Snímek třísek po 5 min. obrábění vzorku č. 1 (5x přiblíženo).



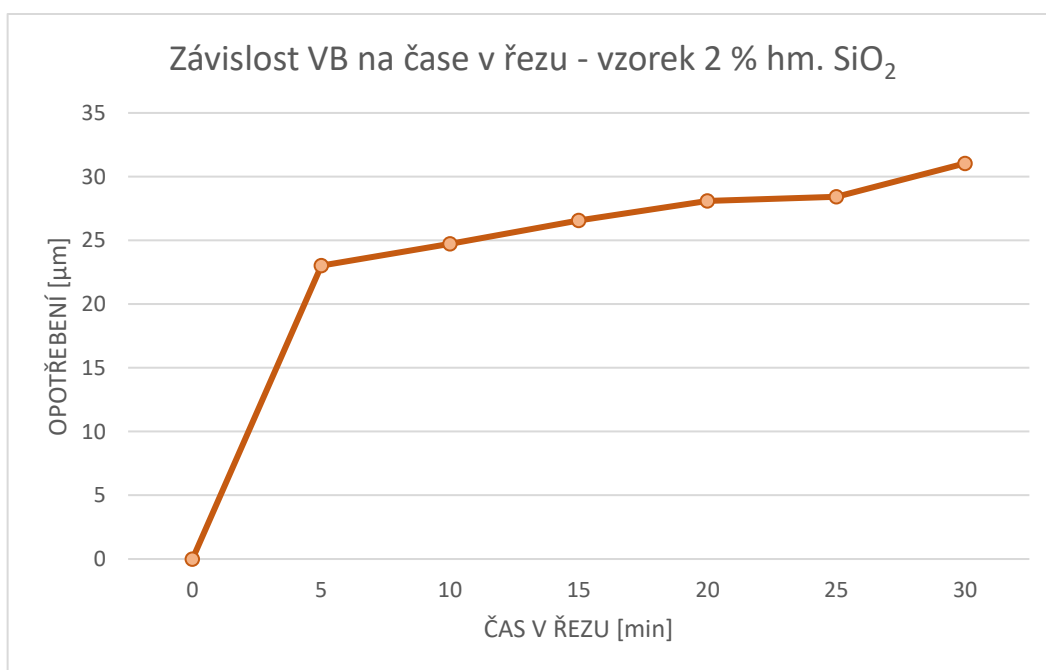
Obr. 32 Snímek třísek po 30 min. obrábění vzorku č. 1 (20 x přiblíženo).

### 3.5.2. Vzorek č. 2 – 2 % hm. SiO<sub>2</sub>

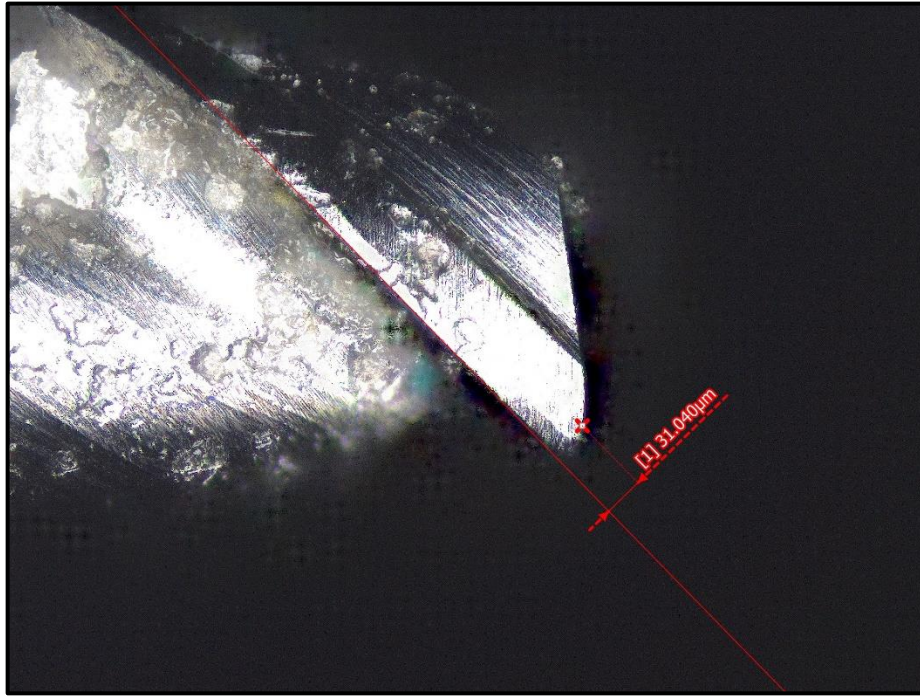
#### a) Opotřebení nástroje VB

Tab. 5 – opotřebení nástroje při obrobení vzorku č. 2.

ČAS V ŘEZU [min]	OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE [μm]
0	0
5	23,03 ± 0,46
10	24,72 ± 1,49
15	26,55 ± 2,18
20	28,09 ± 0,79
25	28,43 ± 0,91
30	31,04 ± 1,08



Obr. 33 Graf opotřebení nástroje v závislosti na době obrábění vzorku č. 2.



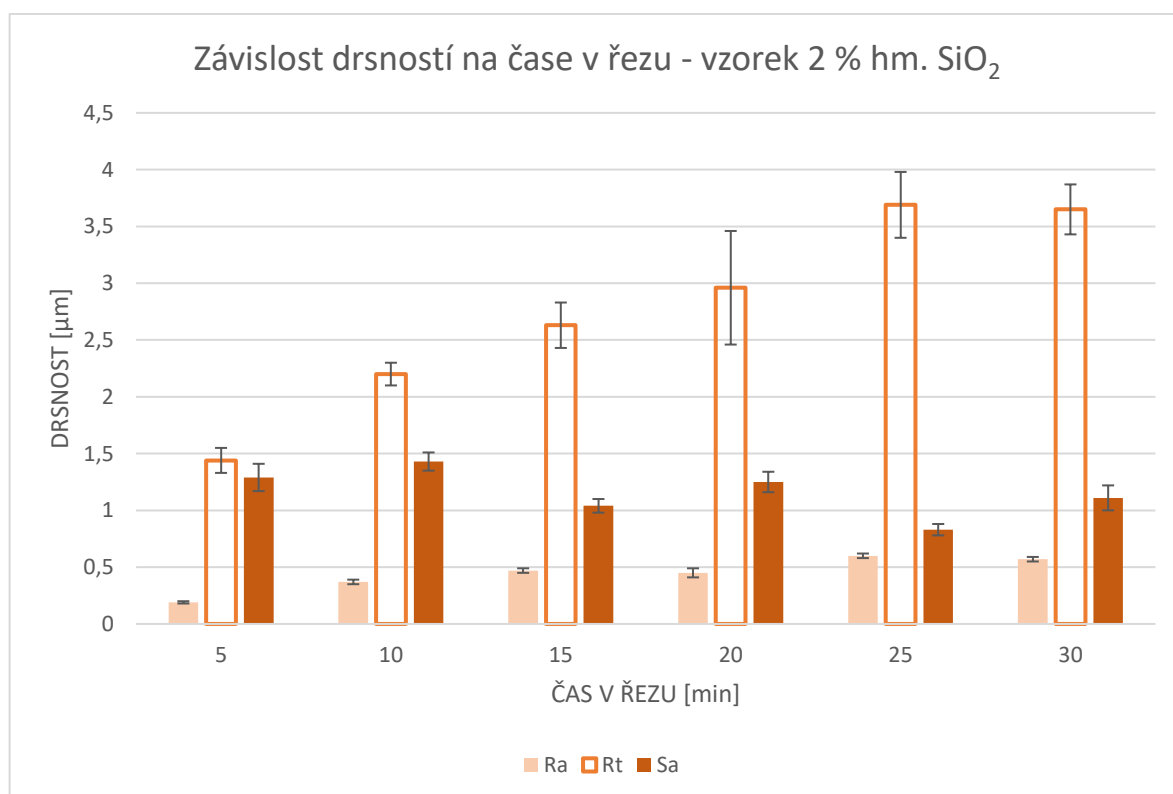
*Obr. 34 Opotřebení nástroje po 30 min. obrábění vzorku č. 2.*

Stejně jako u vzorku č. 1 i zde došlo k největšímu opotřebení během 1. cyklu obrábění, a to k přibližně 74 % celkového opotřebení. Trend křivky je rostoucí a rozdíly mezi jednotlivými měřenými úseky jsou téměř konstantní. Navzdory očekávání je celkové opotřebení přibližně o 5 µm menší než u nástroje, který frézoval vzorek bez nanovýztuže.

## b) Drsnost $R_a$ , $R_t$ a $S_a$

Tab. 6 Vyhodnocení  $R_a$ ,  $R_t$  a  $S_a$  vzorku č. 2.

ČAS V ŘEZU [min]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	statický interval spolehlivosti [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	statický interval spolehlivosti [ $\mu\text{m}$ ]	$S_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	statický interval spolehlivosti [ $\mu\text{m}$ ]
5	0,19	$\pm 0,01$	1,44	$\pm 0,11$	1,29	$\pm 0,12$
10	0,37	$\pm 0,02$	2,20	$\pm 0,10$	1,43	$\pm 0,08$
15	0,47	$\pm 0,02$	2,63	$\pm 0,20$	1,04	$\pm 0,06$
20	0,45	$\pm 0,04$	2,96	$\pm 0,50$	1,25	$\pm 0,09$
25	0,60	$\pm 0,02$	3,69	$\pm 0,29$	0,83	$\pm 0,05$
30	0,57	$\pm 0,02$	3,65	$\pm 0,22$	1,11	$\pm 0,11$

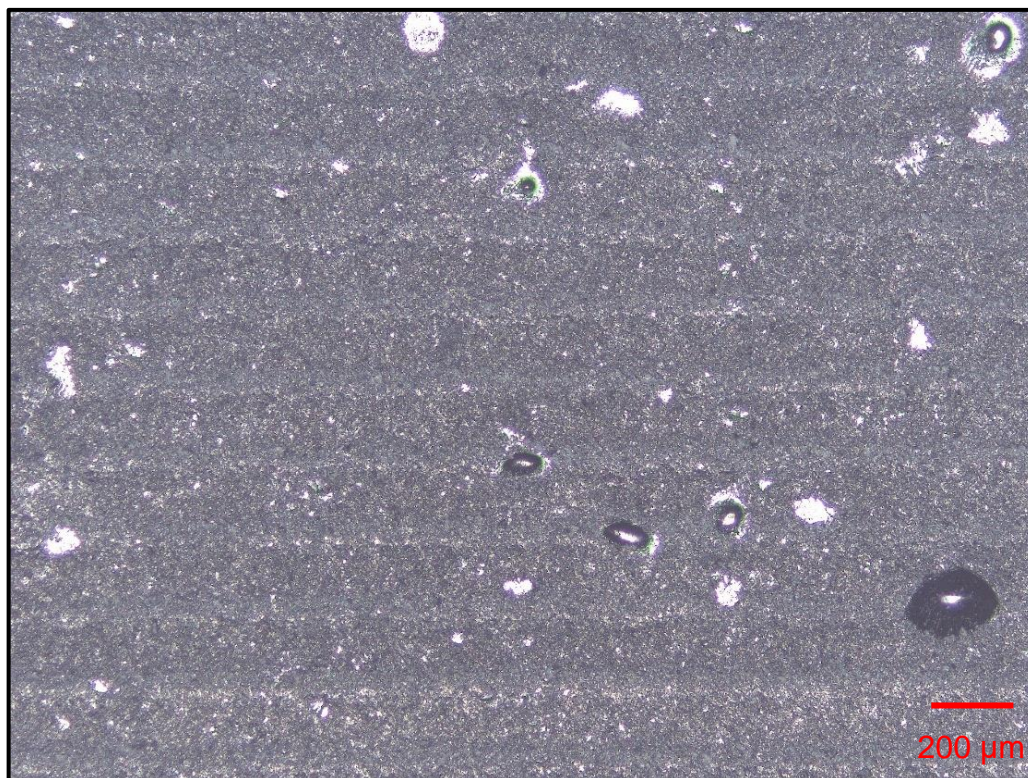


Obr. 35 Graf závislosti drsností na době obrábění vzorku č. 2.

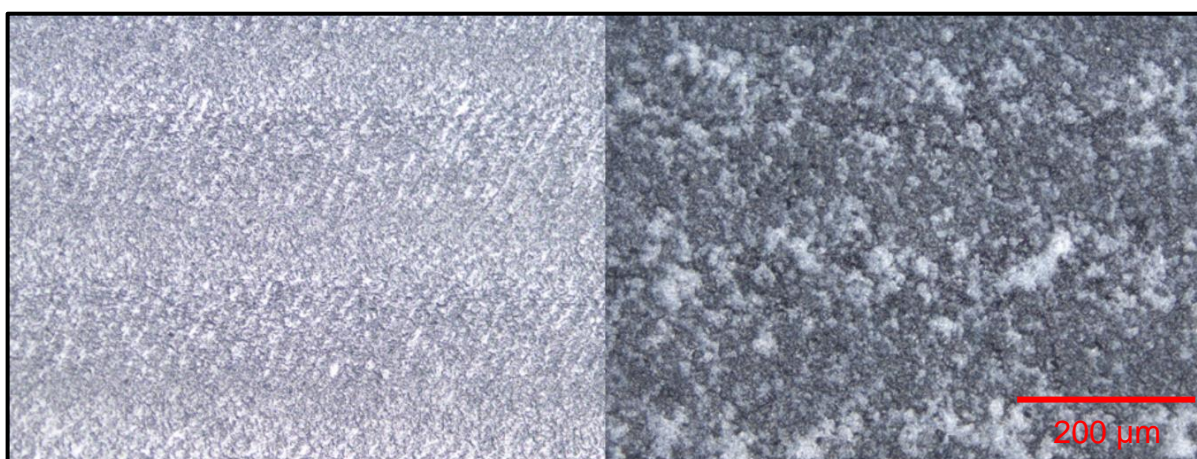
U grafu drsností lze pozorovat pravidelný nárůst hodnot  $R_a$  a  $R_t$ . Sledovaný parametr plošné drsnosti  $S_a$  však tomuto trendu neodpovídá. Obdobně jako u vzorku č. 1 může být tento vývoj způsobený pouze měřenou oblastí. Z měření drsností je však zřejmé, že výsledný povrch vzorku č. 2 vykazuje vyšší plošnou drsnost než vzorek č. 1.

### c) Integrita povrchu

Při obrábění vzorků s přídavkem  $\text{SiO}_2$  bylo možné, kromě kavit (černé oblasti) pozorovat i shluky nedispergovaného nanoplniva (bílé oblasti) viz obr. 36. Vlivem narůstající velikosti opotřebení nástroje se také rapidně zhoršuje jakost obrobeného povrchu a rozeznatelnost drah nástroje, viz obr. 37.



Obr. 36 Povrch vzorku č. 2 (5x zvětšení).



Obr. 37 Povrchy vzorku č. 2 při prvním a posledním cyklu obrábění (20x zvětšeno).

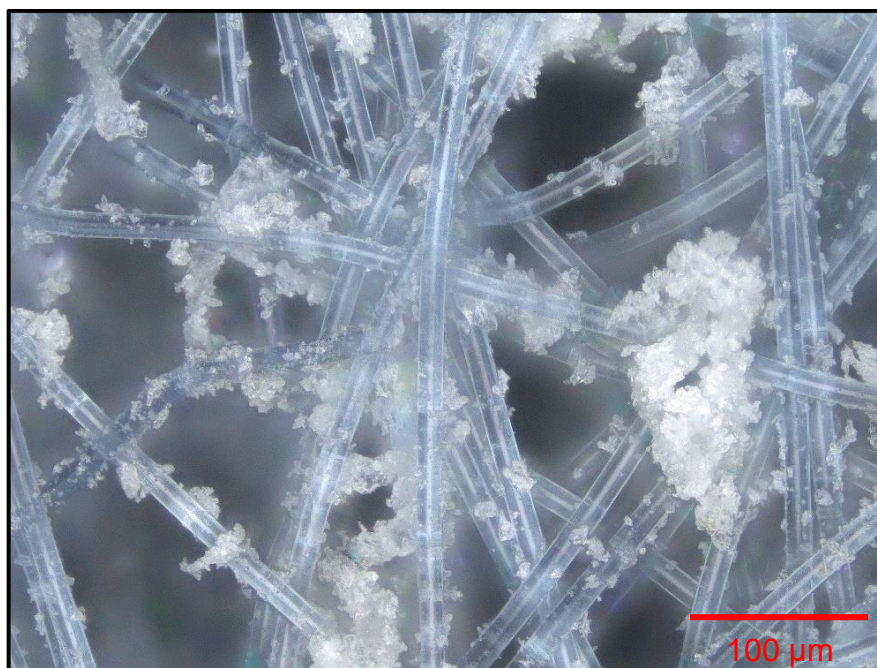


#### d) Tvorba třísky

Po přidání 2 % hm. SiO<sub>2</sub> se charakter výsledných třísek příliš nezměnil. Jejich tvar je stále červíkovitého charakteru, viz obr. 38. Po posledním cyklu obrábění, tedy 30 min., došlo k poměrně velké změně v charakteru třísek. Vlivem opotřebení nástroje se jejich tvar změnil z červíkovitého na drobný, jenž tvoří shluky třísek, které jsou ale menší než shluky u vzorku č. 1 po 30 min. obrábění, viz obr. 39.



Obr. 38 Snímek třísek po 5 min. frézování vzorku č. 2 (20x zvětšeno).



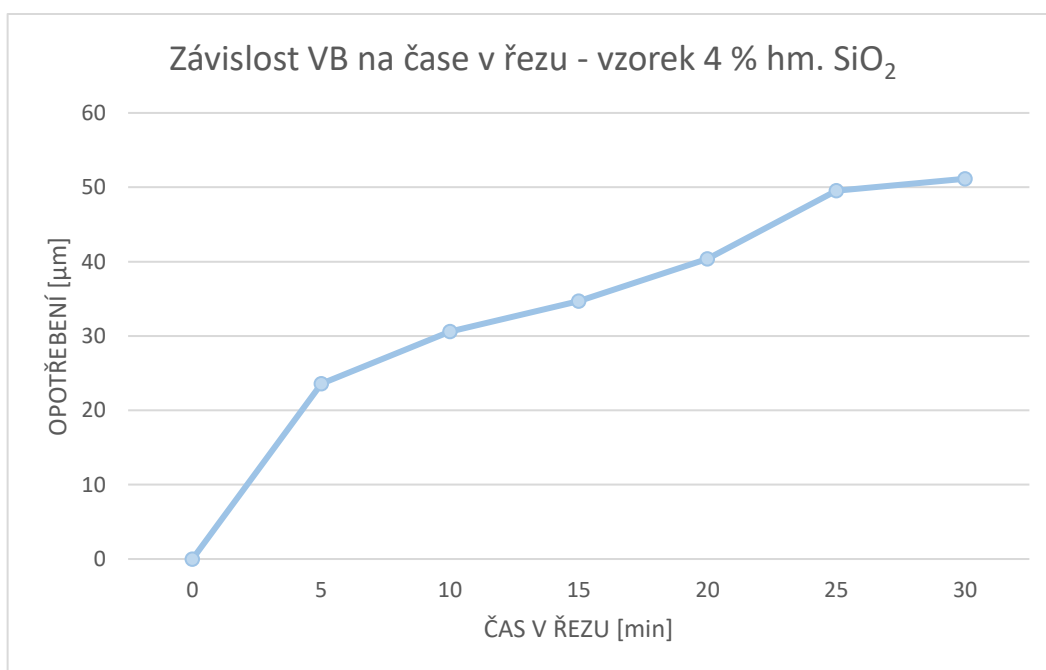
Obr. 39 Snímek třísek po šestém cyklu frézování vzorku č. 2 (20x zvětšeno).

### 3.5.3 Vzorek č. 3 – 4 % hm. SiO<sub>2</sub>

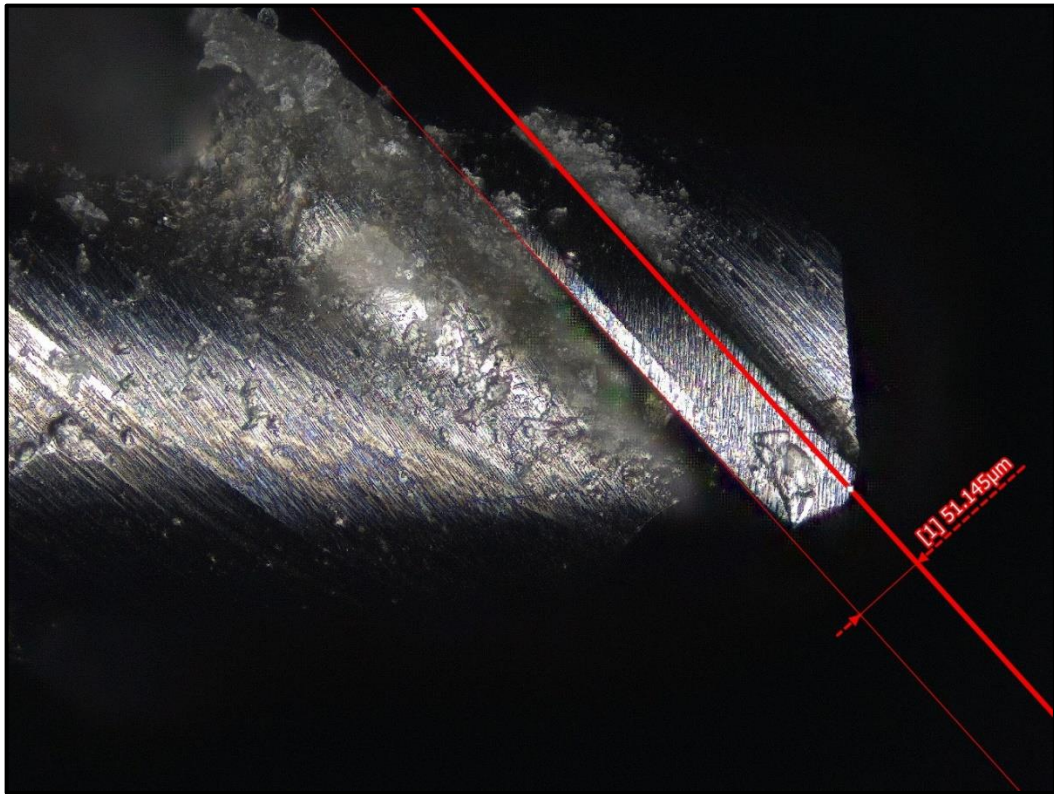
#### a) Opotřebení nástroje VB

Tab. 7 – opotřebení nástroje při obrobení vzorku č. 3.

ČAS V ŘEZU [min]	OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE [μm]
0	0
5	23,58 ± 0,55
10	30,61 ± 0,99
15	34,69 ± 1,26
20	40,36 ± 0,84
25	49,54 ± 2,64
30	51,15 ± 1,30



Obr. 40 Graf opotřebení nástroje v závislosti na době obrábění vzorku č. 3.



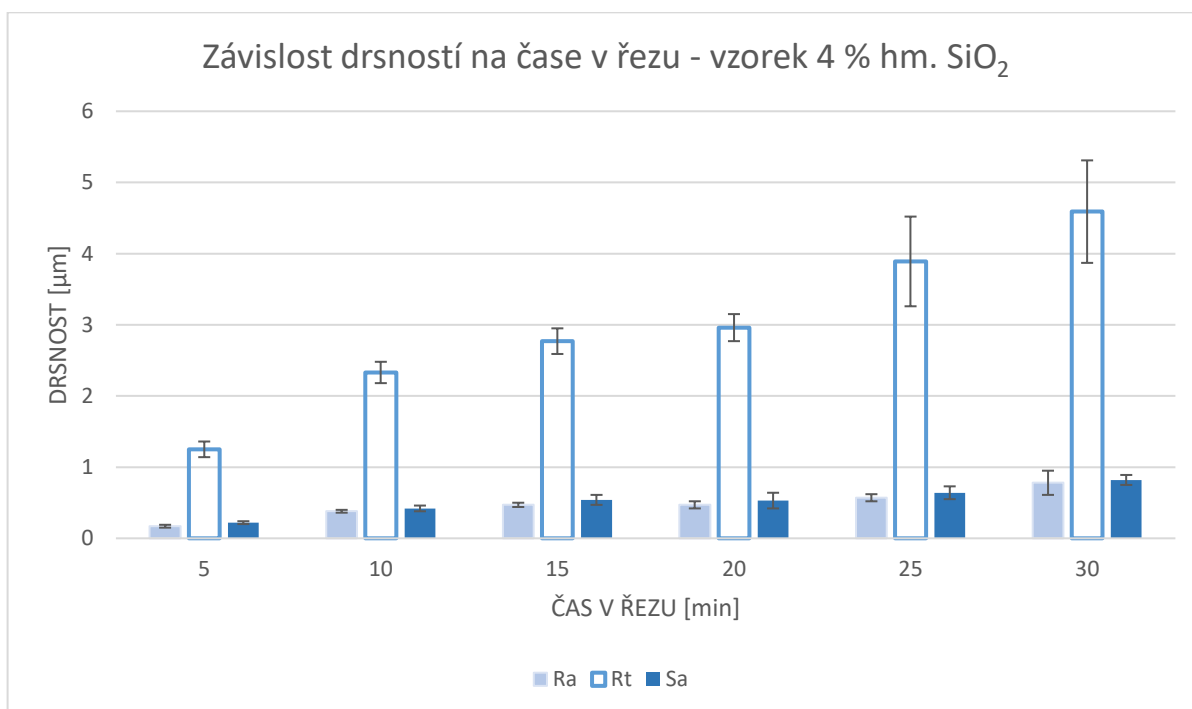
*Obr. 41 Opatřebení nástroje po 30 min. obrábění vzorku č. 3.*

U tohoto nástroje došlo k nejstrmějšímu nárůstu velikosti opotřebení také během obrábění prvního cyklu. Dále se rychlost nárůstu opotřebení v rámci jednotlivých obráběcích cyklů zpomalila a nadále docházelo k ustálenému nárůstu opotřebení nástroje.

## b) Drsnost $R_a$ , $R_t$ a $S_a$

Tab. 8 Vyhodnocení  $R_a$ ,  $R_t$  a  $S_a$  vzorku č. 3.

ČAS V ŘEZU [min]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	statický interval spolehlivosti [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	statický interval spolehlivosti [ $\mu\text{m}$ ]	$S_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	statický interval spolehlivosti [ $\mu\text{m}$ ]
5	0,17	$\pm 0,02$	1,25	$\pm 0,11$	0,22	$\pm 0,02$
10	0,38	$\pm 0,02$	2,33	$\pm 0,15$	0,42	$\pm 0,04$
15	0,47	$\pm 0,03$	2,77	$\pm 0,18$	0,54	$\pm 0,07$
20	0,47	$\pm 0,05$	2,96	$\pm 0,19$	0,53	$\pm 0,11$
25	0,57	$\pm 0,05$	3,89	$\pm 0,63$	0,64	$\pm 0,09$
30	0,78	$\pm 0,17$	4,59	$\pm 0,72$	0,82	$\pm 0,07$

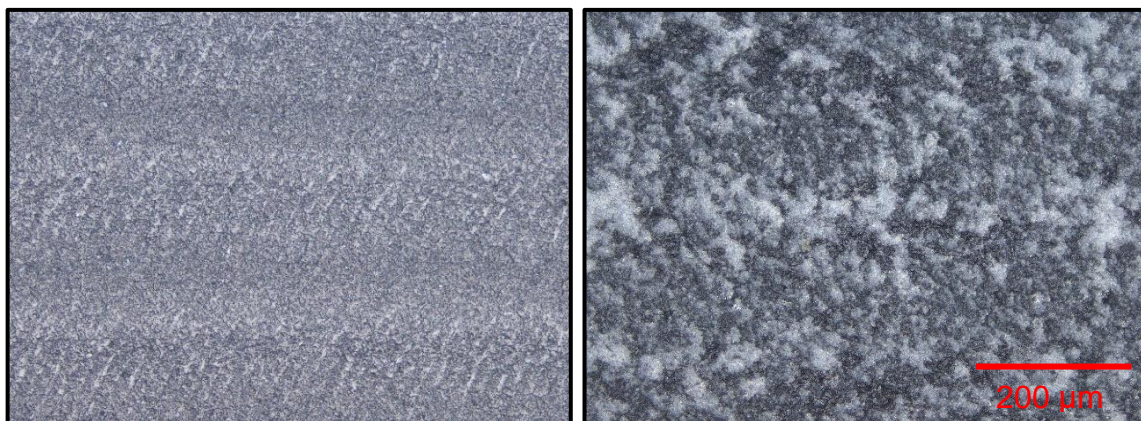


Obr. 42 Graf závislosti drsností na době obrábění vzorku č. 3.

U obrábění tohoto vzorku byl pozorován mírný růst parametrů  $R_a$  a  $S_a$ . Výrazný nárůst velikosti napříč obráběcími cykly lze pozorovat u parametru  $R_t$ .

### c) Integrita povrchu

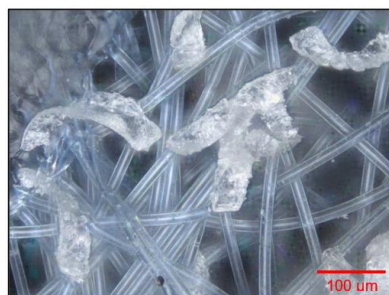
Vzorek č. 3 byl výrobou vyhotoven bez dutin, shluků nanoplniva a jiných nežádoucích struktur, které by nadměrně přispívaly k opotřebení nástroje. Tudíž se zde dalo pozorovat pouze zhoršení viditelnosti jednotlivých drah nástroje. Na obr. 43 lze pozorovat rozdíl mezi viditelností drah po prvním a posledním cyklu obrábění



Obr. 43 Srovnání stop po nástroji po prvním a posledním cyklu obrábění vzorku č. 3 (20x zvětšeno).

### d) Tvorba třísky

Vlivem přidání 4 % hm.  $\text{SiO}_2$  jsou vzniklé třísky pravidelného lupínkovitého tvaru. Tyto třísky se svou velikostí blíží 200  $\mu\text{m}$ , viz obr. 44. Stejně jako u předchozího vzorku byly třísky silně ovlivněny postupným nárůstem opotřebení nástroje a jejich charakter se postupně měnil z lupínkového opět na drobný, viz obr. 45.



Obr. 44 Snímek třísek vytvořených po 5 min. obrábění (20x zvětšeno).



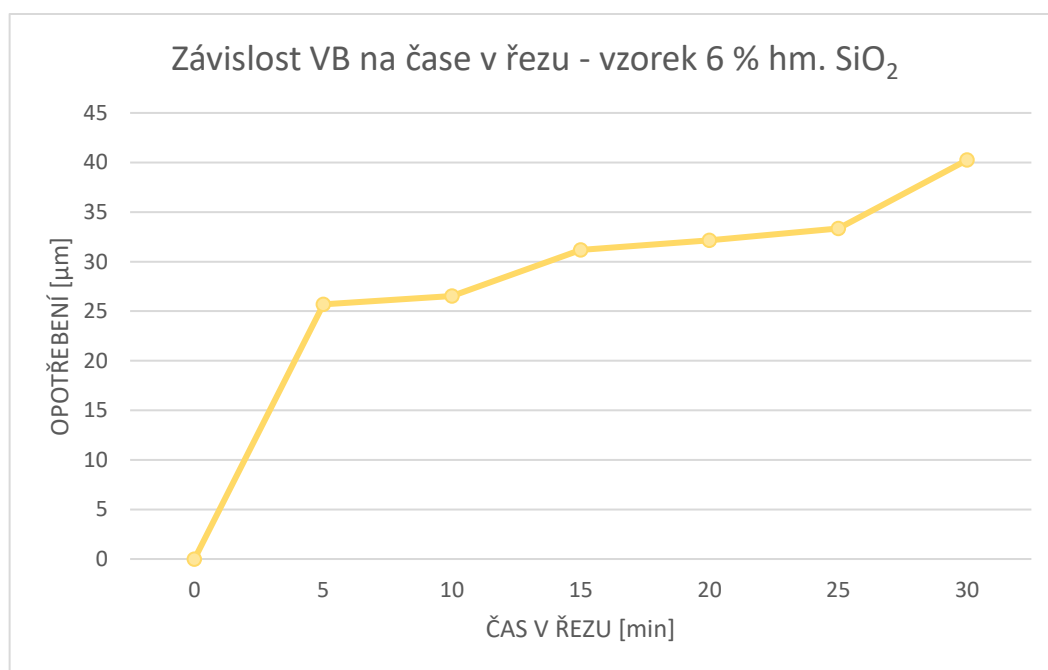
Obr. 45 Snímek třísek vytvořených během šestého cyklu obrábění (20x zvětšeno).

### 3.5.4. Vzorek č. 4 – 6 % hm. SiO<sub>2</sub>

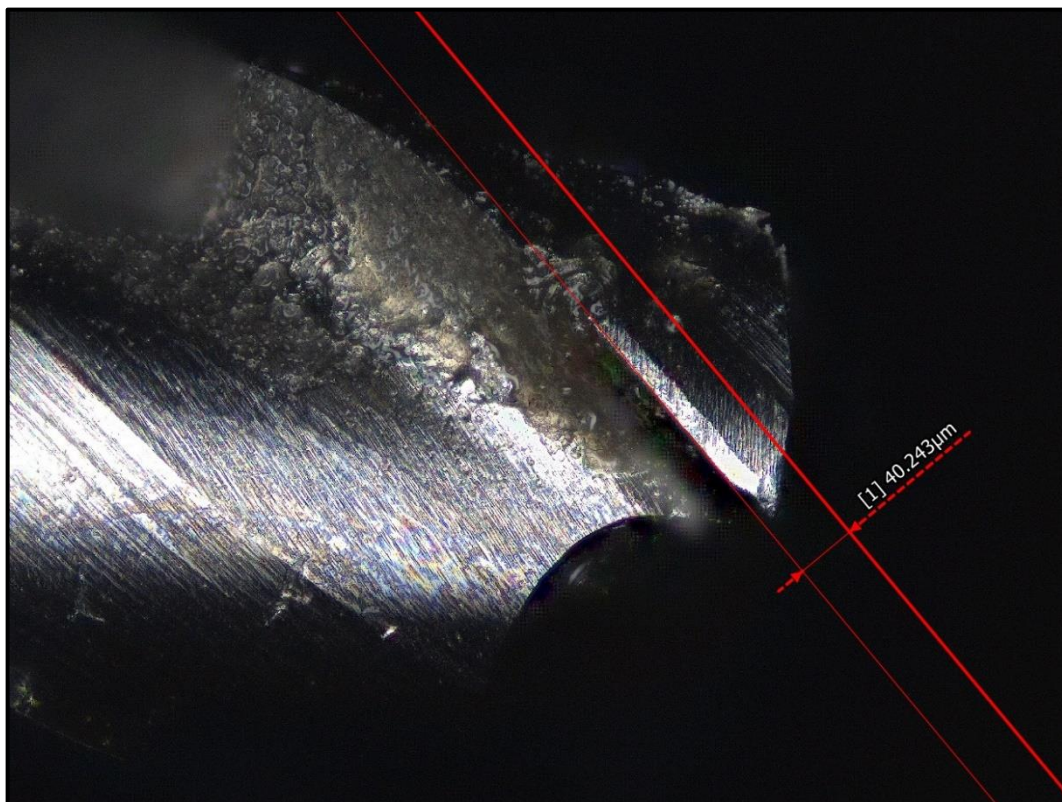
#### a) Opotřebení nástroje VB

Tab. 9 – opotřebení nástroje při obrobení vzorku č. 4.

ČAS V ŘEZU [min]	OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE [μm]
0	0
5	25,70 ± 1,78
10	26,54 ± 0,48
15	31,19 ± 0,86
20	32,15 ± 1,68
25	33,36 ± 2,18
30	40,24 ± 0,81



Obr. 46 Graf opotřebení nástroje v závislosti na době obrábění vzorku č. 4.



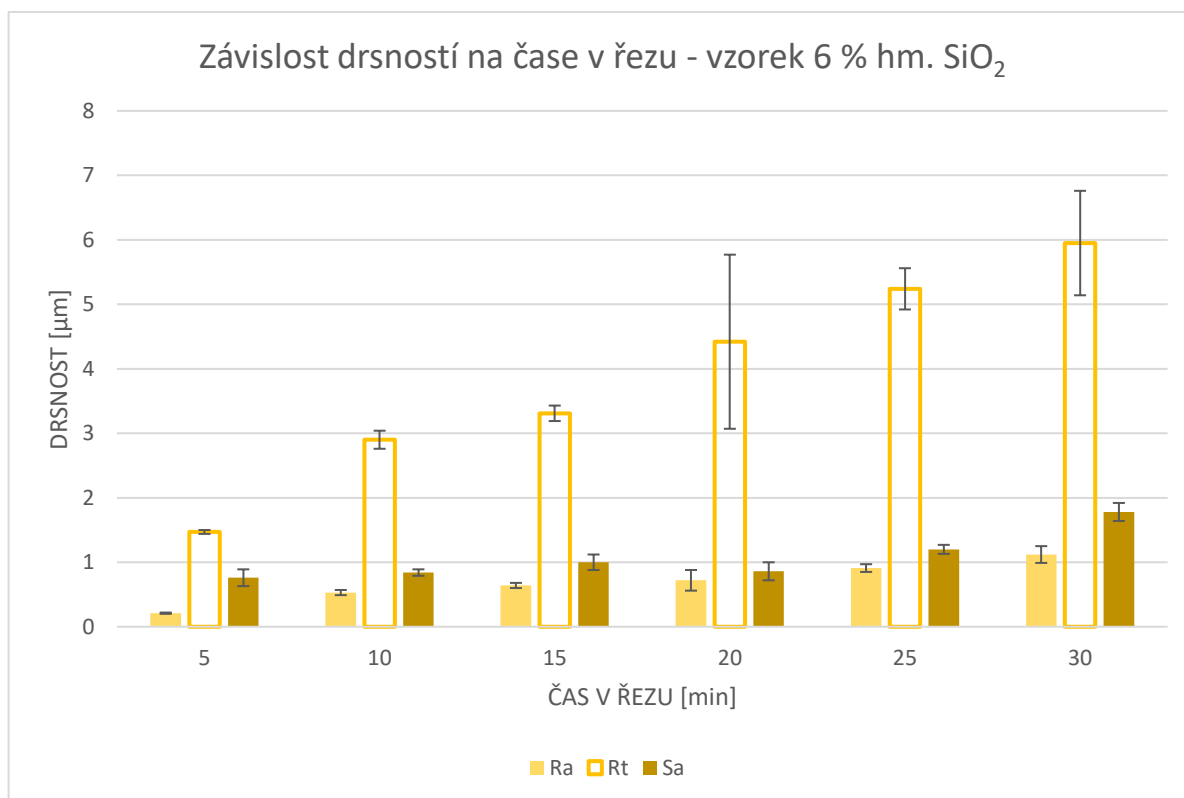
*Obr. 47 Opatřebení nástroje po 30 min. obrábění vzorku č. 4.*

U vzorku č. 4 lze pozorovat vznik většinové části opotřebení během prvních 5 minut obrábění. V případě tohoto vzorku s obsahem 6 % hm. SiO<sub>2</sub> se jedná o vznik přibližně 64 % z konečné velikosti naměřené velikosti VB. Zbylá část grafu vykazuje mírně rostoucí vývojový trend.

### a) Drsnost $R_a$ , $R_t$ a $S_a$

Tab. 10 Vyhodnocení  $R_a$ ,  $R_t$  a  $S_a$  vzorku č. 4.

ČAS V ŘEZU [min]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	statický interval spolehlivosti [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	statický interval spolehlivosti [ $\mu\text{m}$ ]	$S_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	statický interval spolehlivosti [ $\mu\text{m}$ ]
5	0,21	$\pm 0,01$	1,47	$\pm 0,03$	0,76	$\pm 0,13$
10	0,53	$\pm 0,04$	2,90	$\pm 0,14$	0,84	$\pm 0,05$
15	0,64	$\pm 0,04$	3,31	$\pm 0,12$	1,00	$\pm 0,12$
20	0,72	$\pm 0,16$	4,42	$\pm 1,35$	0,86	$\pm 0,14$
25	0,91	$\pm 0,06$	5,24	$\pm 0,32$	1,20	$\pm 0,07$
30	1,12	$\pm 0,13$	5,95	$\pm 0,81$	1,78	$\pm 0,14$



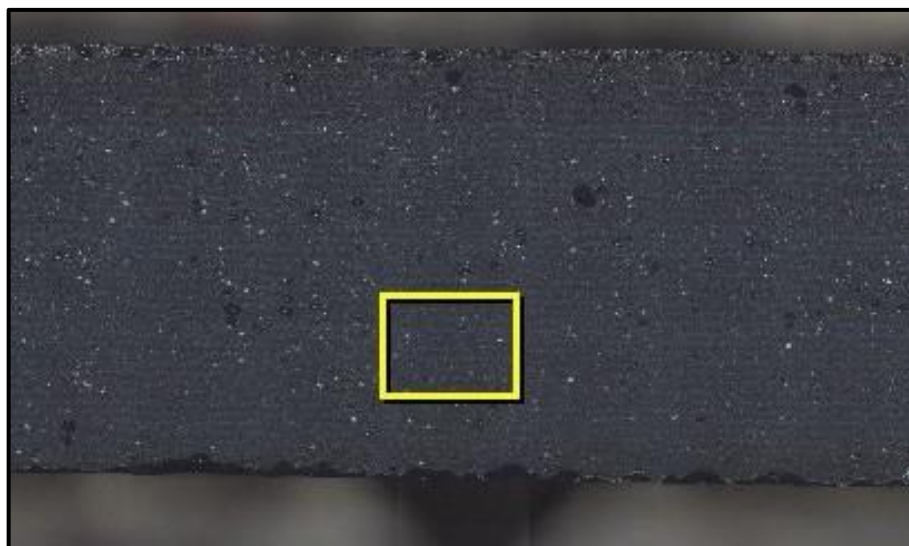
Obr. 48 Graf závislosti drsností na době obrábění vzorku č. 4.

U tohoto vzorku je možné pozorovat pravidelně se zvyšující hodnoty drsností  $R_a$  a  $R_t$ . Naopak u plošné drsnosti  $S_a$  je po 4. cyklu obrábění možné pozorovat mírný pokles hodnoty.

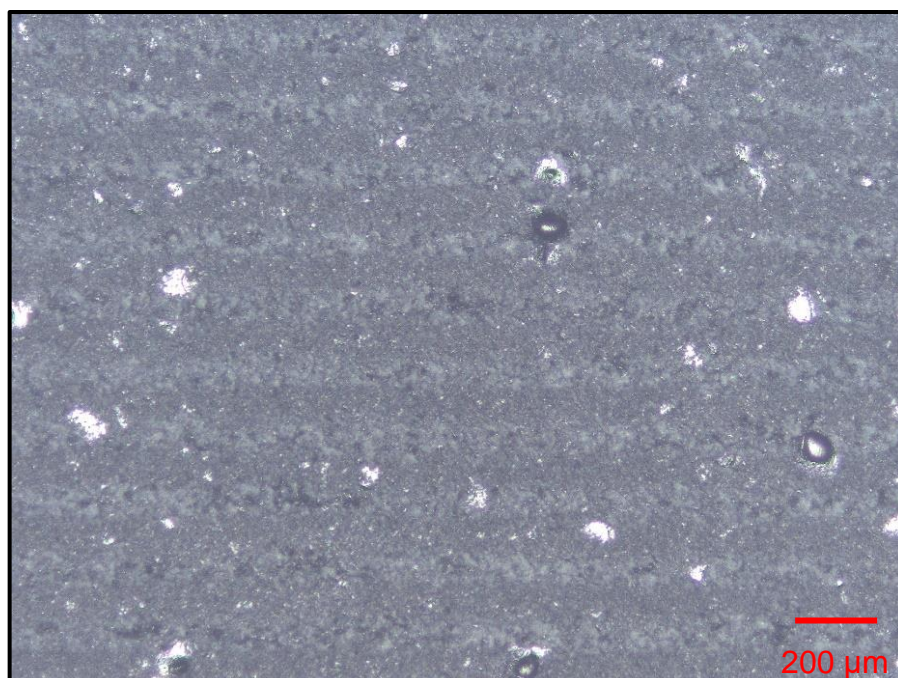


## b) Integrita povrchu

Na obr. 49 lze pozorovat velké množství bílých oblastí. Jedná se o nerozptýlené shluky  $\text{SiO}_2$ , které odhalil 4. cyklus obrábění. Na dalším snímku lze pozorovat velikost zmíněných shluků vůči drahám nástroje, viz obr. 50. Tyto shluky se mohou podílet na nárůstu velikosti opotřebení VB.



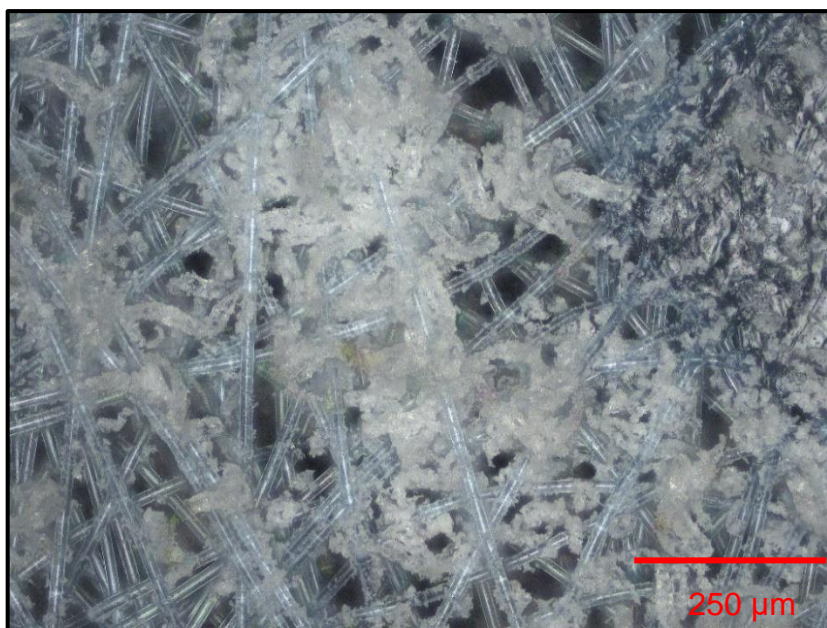
Obr. 49 Náhled na vzorek č. 4.



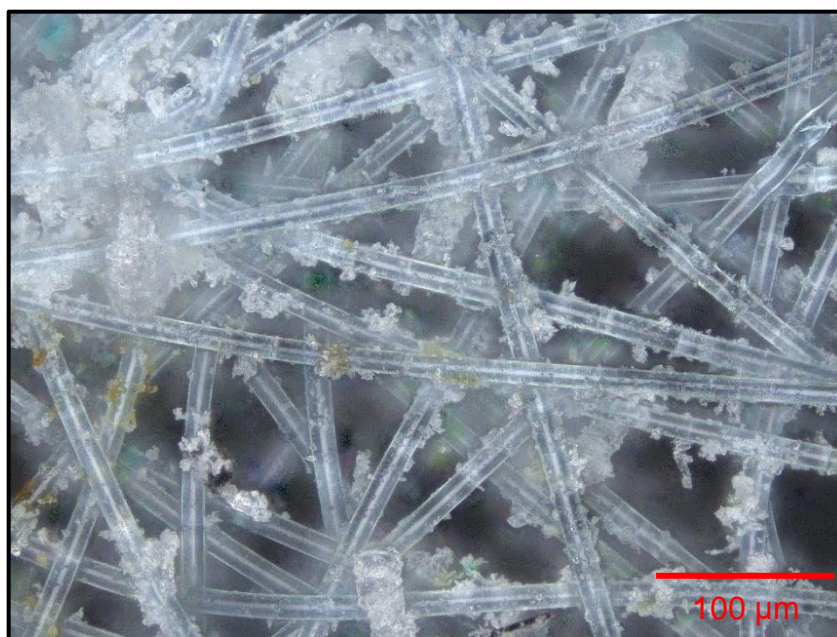
Obr. 50 Obrobený povrch vzorku č. 4 (5x zvětšeno).

### c) Tvorba třísky

S rostoucím podílem  $\text{SiO}_2$  ve struktuře vzorku je patrné, že se plnivo významně podílí na drobitosti třísky. Na snímku lze vidět, že i když třísky mají lupínkový tvar, tak se kolem a mezi nimi vyskytují oblasti drobného charakteru viz obr. 51. Vlivem opotřebení nástroje třísky přecházejí z lupínkovitého tvaru do téměř zcela drobného, kdy tvoří velmi malé částice viz obr. 52.



Obr. 51 Snímek třísek vytvořených během prvního cyklu obrábění vzorku č. 4 (10x zvětšeno).



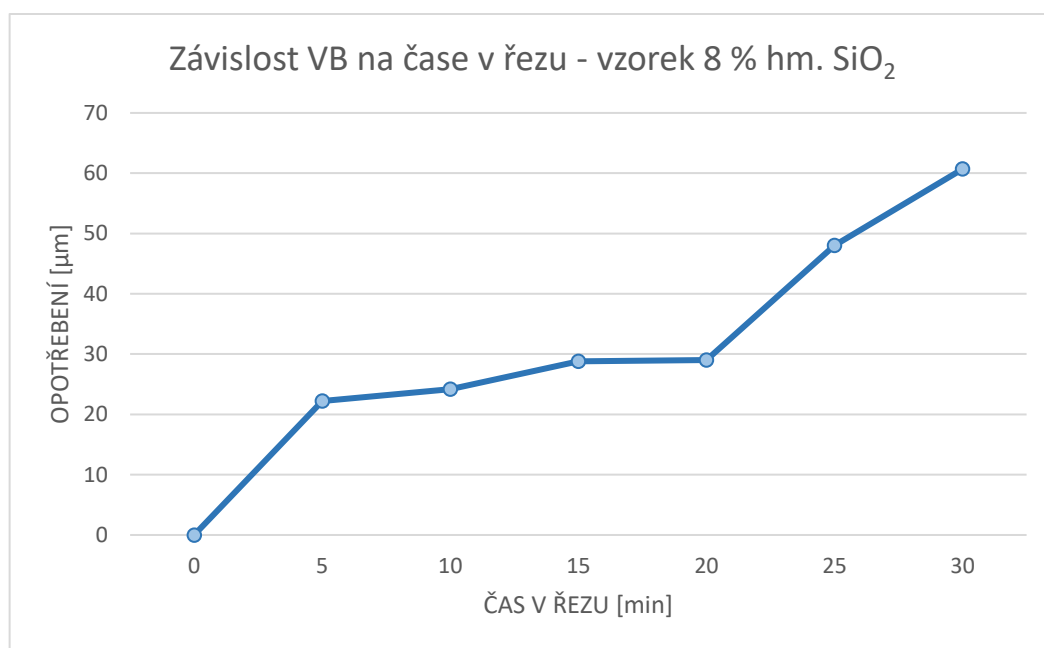
Obr. 52 Snímek třísek vytvořených během posledního cyklu obrábění vzorku č. 4 (20x zvětšeno).

### 3.5.5. Vzorek č. 5 – 8 % hm. SiO<sub>2</sub>

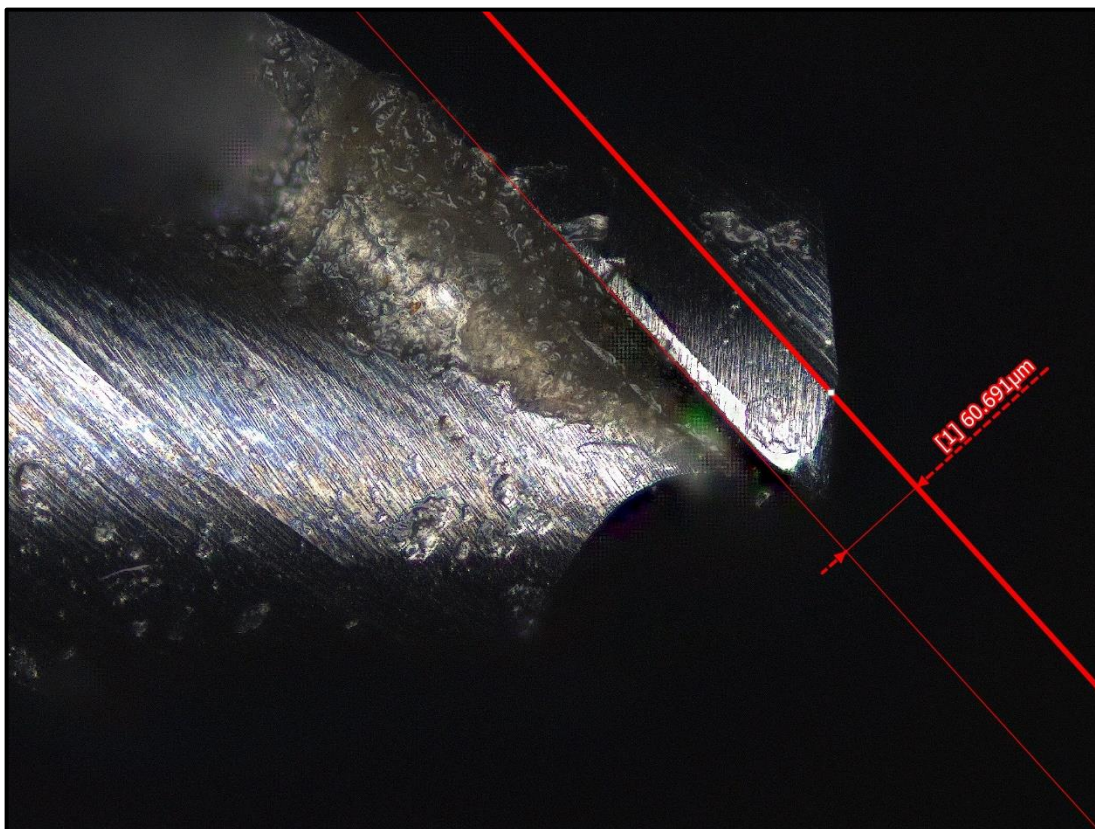
#### a) Opotřebení nástroje VB

Tab. 11 – opotřebení nástroje při obrobení vzorku č. 5.

ČAS V ŘEZU [min]	OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE [ $\mu\text{m}$ ]
0	0
5	22,20 $\pm$ 0,71
10	24,18 $\pm$ 0,62
15	28,78 $\pm$ 1,65
20	29,04 $\pm$ 1,45
25	48,04 $\pm$ 0,94
30	60,69 $\pm$ 2,97



Obr. 53 Graf opotřebení nástroje v závislosti na době obrábění vzorku č. 5.



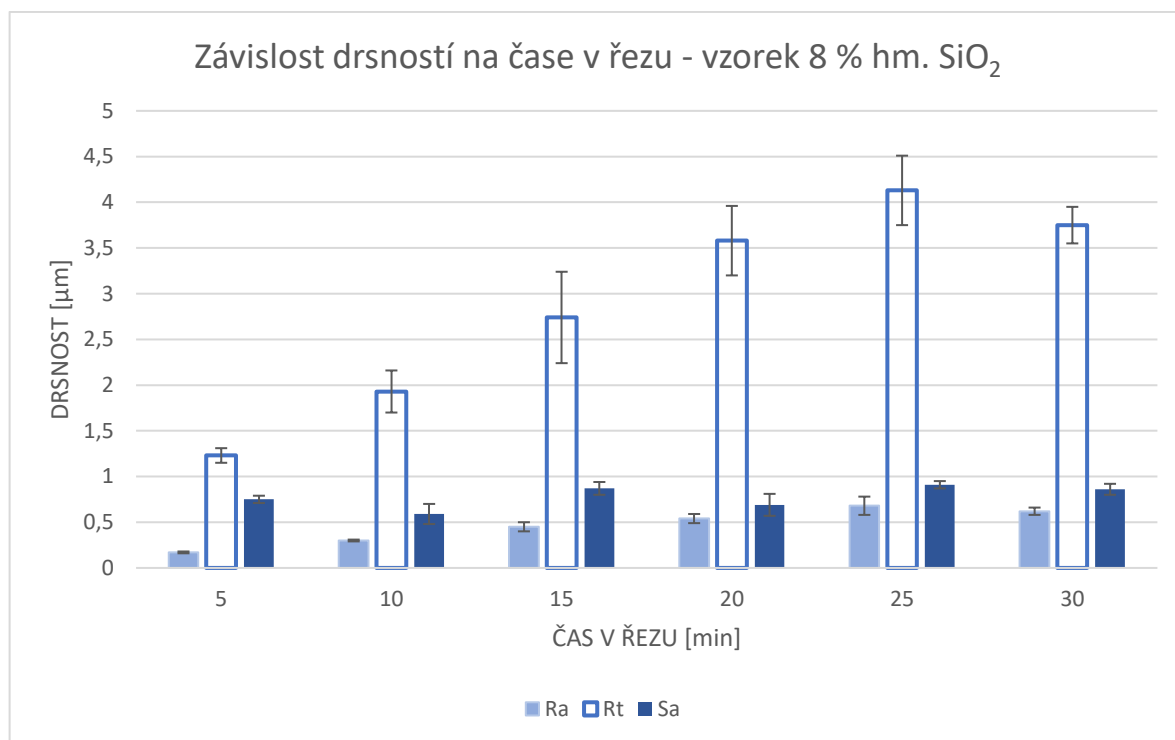
*Obr. 54 Opotřebení nástroje po 30 min. obrábění vzorku č. 5.*

Opotřebení nástroje při obrábění vzorku č. 5 vykazuje rozdílnou charakteristiku. Při 1. cyklu dochází k většímu opotřebení, jako u ostatních vzorků následně se tento trend ustálí hned po dalším cyklu. Následuje velmi pozvolný nárůst velikosti VB až do 4. cyklu. Během posledních dvou cyklů ovšem opotřebení rapidně narůstá až na téměř trojnásobek naměřené hodnoty po prvních pěti minutách obrábění.

## b) Drsnost $R_a$ , $R_t$ a $S_a$

Tab. 12 Vyhodnocení  $R_a$ ,  $R_t$  a  $S_a$  vzorku č. 5.

ČAS V ŘEZU [min]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	statický interval spolehlivosti [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	statický interval spolehlivosti [ $\mu\text{m}$ ]	$S_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	statický interval spolehlivosti [ $\mu\text{m}$ ]
5	0,17	$\pm 0,01$	1,23	$\pm 0,08$	0,75	$\pm 0,04$
10	0,30	$\pm 0,01$	1,93	$\pm 0,23$	0,59	$\pm 0,11$
15	0,45	$\pm 0,05$	2,74	$\pm 0,50$	0,87	$\pm 0,07$
20	0,54	$\pm 0,05$	3,58	$\pm 0,38$	0,69	$\pm 0,12$
25	0,68	$\pm 0,10$	4,13	$\pm 0,38$	0,91	$\pm 0,04$
30	0,62	$\pm 0,04$	3,75	$\pm 0,20$	0,86	$\pm 0,06$

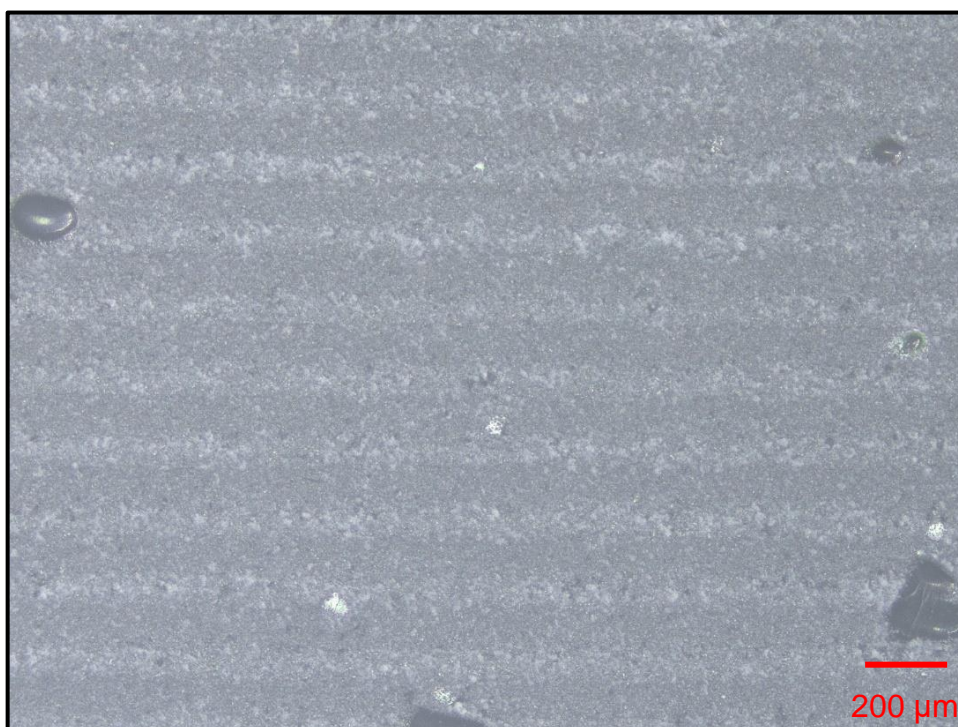


Obr. 55 Graf závislosti drsností na době obrábění vzorku č. 5.

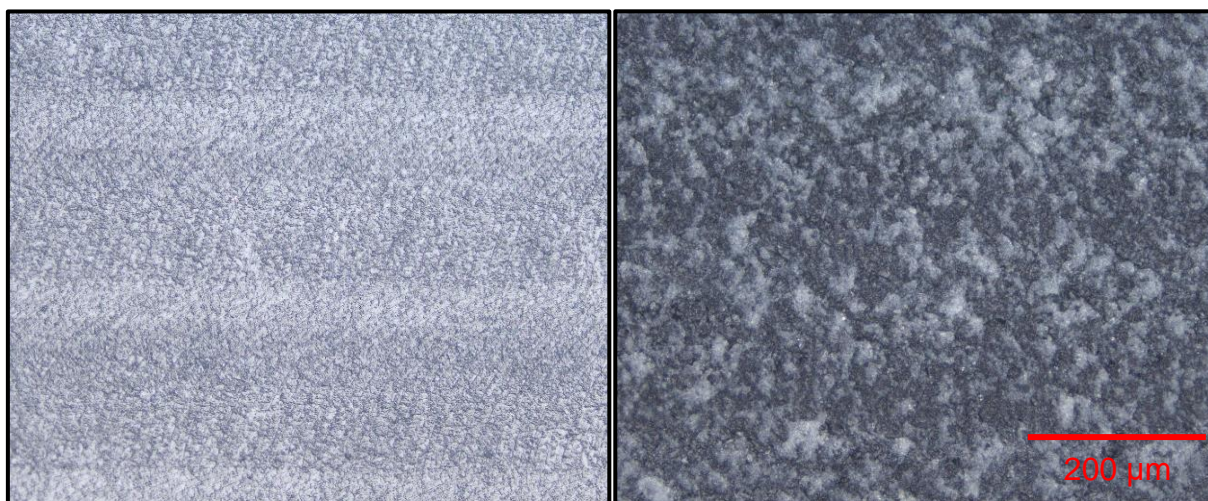
Vzorek č. 5 vykazuje atypický trend vývoje závislosti parametrů drsností. Parametry  $R_a$  a  $S_a$  nevykazují očekávaný pozvolný nárůst a u parametru  $R_t$  se tento nárůst po posledním provedeném cyklu obrábění přerušuje a výsledná hodnota je menší.

### c) Integrita povrchu

Na povrchu se objevují kavity poměrně značných rozměrů, viz obr. 56, které mnohdy zasahují přes celou šířku záběru nástroje. Tyto dutiny způsobují přerušení plynulosti záběru nástroje a způsobují nechtěné dodatečné namáhání nástroje. Dále je možné pozorovat rozdíl kvality povrchu dosaženého průběhem experimentu, viz obr. 57. Vlivem většího množství příměsi ve vzorku, došlo k většímu opotřebení nástroje, což je patrné u porovnání mezi 1. a 6. cyklem frézování. Na konci obrábění, po 30 minutách, nejsou na povrchu vzorku rozeznatelné dráhy pohybu nástroje.



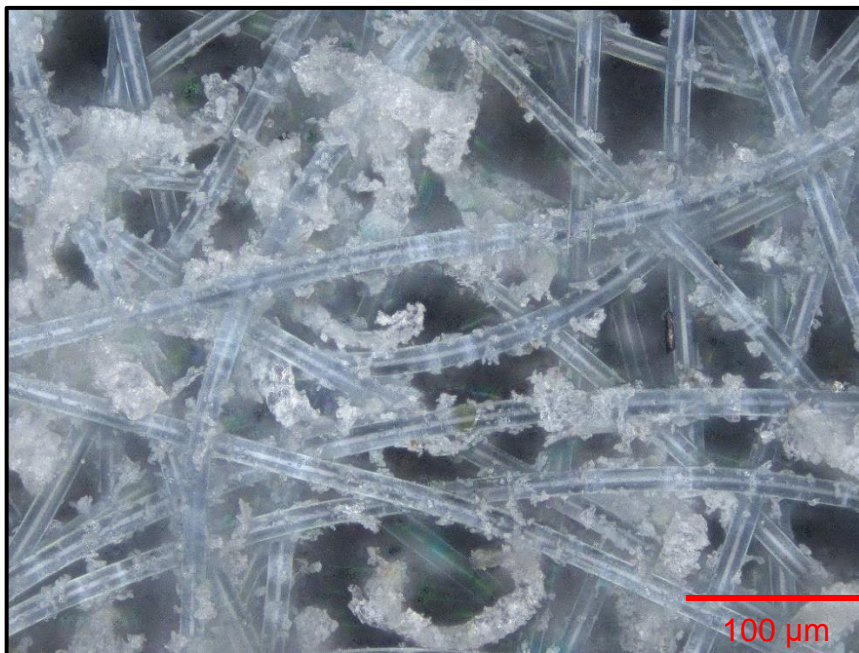
Obr. 56 Snímek obrobené vrstvy vzorku č. 5 po třetím cyklu frézování (5x zvětšeno).



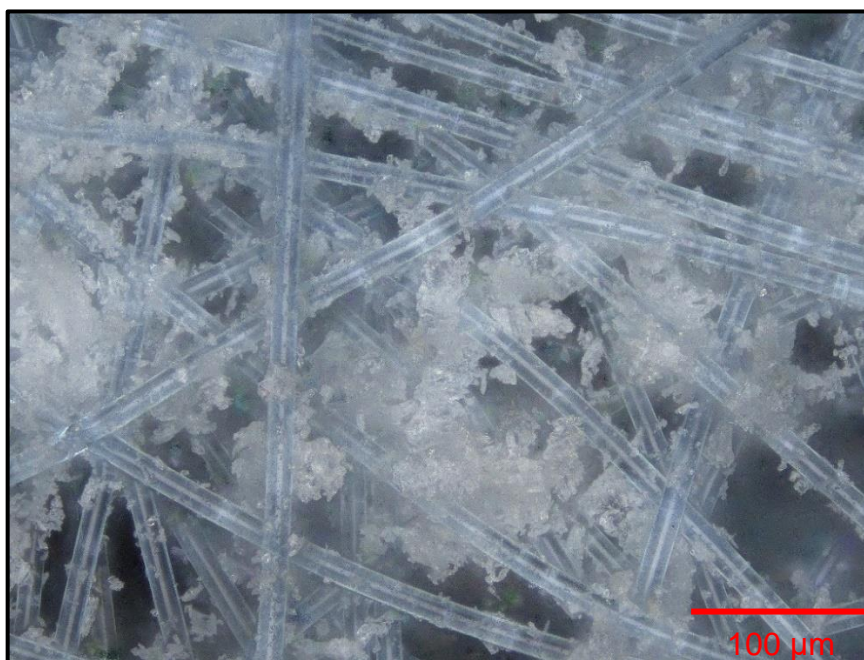
Obr. 57 Srovnání povrchů po 1. a 6. cyklu frézování (20x zvětšeno).

#### d) Tvorba třísky

Zde, již po prvním cyklu frézování lze pozorovat poměrně velké zastoupení drobné třísky, viz obr. 58, které u předchozích vzorků pozorovatelné nebylo. Na obr. 59 zobrazujícím třísky po posledním cyklu obrábění je patrné, že nejzastoupenějším druhem třísky je tříska drobná.



Obr. 58 Snímek třísek vytvořených během prvního cyklu obrábění vzorku č. 5 (20x zvětšeno).



Obr. 59 Snímek třísek vytvořených během posledního cyklu obrábění vzorku č. 5 (20x zvětšeno).

## 4. Diskuze

Cílem bakalářské práce bylo sledování vlivu množství nanovýztuže SiO<sub>2</sub> na opotřebení nástroje VB, drsnosti  $R_a$  a  $R_t$  a plošnou drsnost  $S_a$ , při frézování vzorků z nanokopozitního materiálu.

K dosažení cílů experimentální části bakalářské práce bylo nutno provést rešerši aktuálního stavu poznání zkoumané problematiky a stanovit vhodnou metodiku provedení experimentální části předkládané bakalářské práce.

Souhrnu informací k řešené problematice obsahující základní informace o materiálech a obráběcích technologiích se věnuje kap. 2. Provedení experimentu a vyhodnocení naměřených dat se věnuje kapitola 3. Jsou zde uvedeny veškeré informace o použitých strojích, nástrojích a měřidlech použitých pro provedení experimentů a taktéž popis dílčích kroků měření.

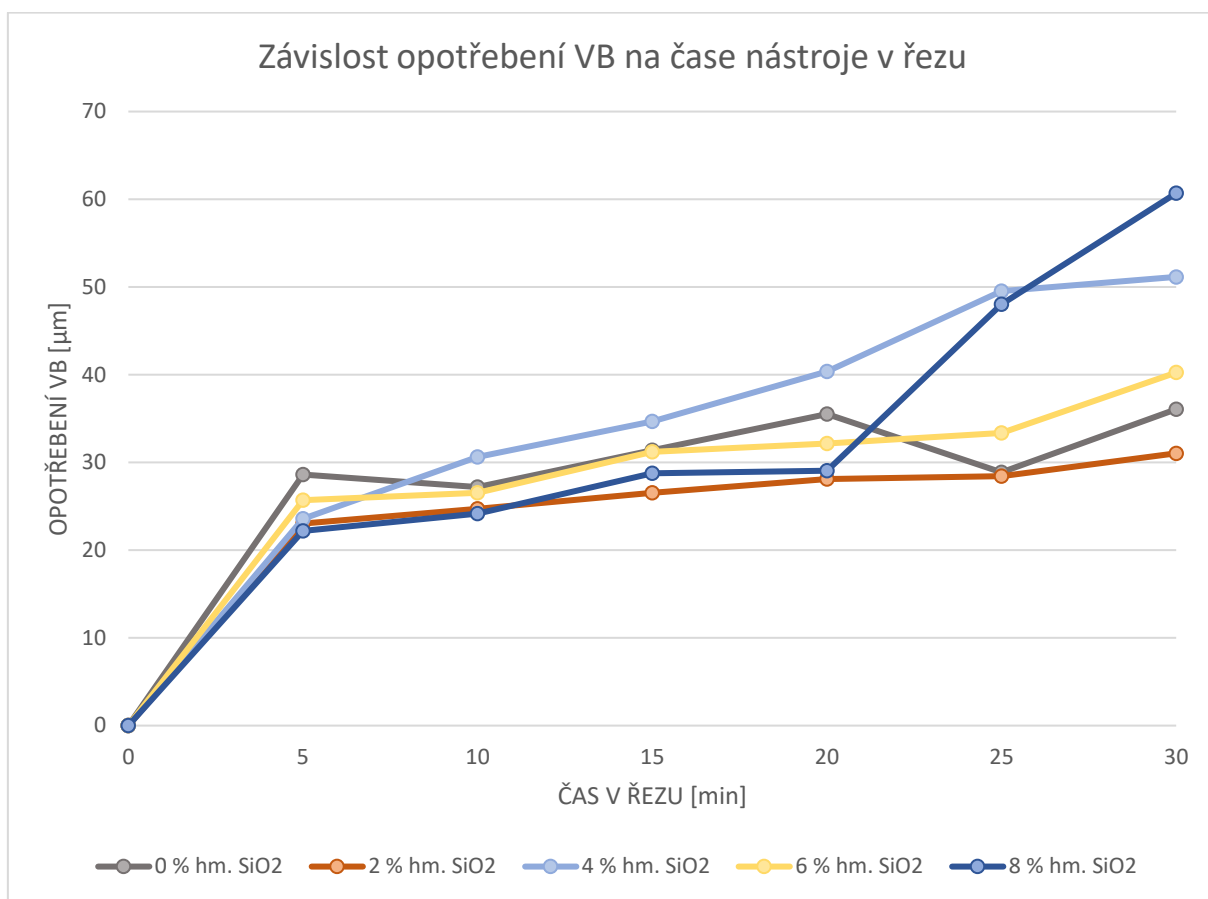
Realizace experimentu a zpracování dosažených výsledků je popsána v kap., 3.5. Tato kapitola přehledně popisuje jednotlivé sledované parametry s detailním popisem dosažených výsledků.

Z rozsáhlého souboru výsledků experimentálního výzkumu vyplývá:

### **Opotřebení nástroje VB**

Nejvyšší míra opotřebení byla pozorována u nástroje na konci procesu obrábění vzorku s 8 % hm. SiO<sub>2</sub> a to  $60,69 \pm 2,97 \mu\text{m}$ . Naopak nejnižší míru opotřebení vykazoval nástroj, který obráběl vzorek se 2 % hm. SiO<sub>2</sub> a to  $31,04 \pm 1,08 \mu\text{m}$ . Jako referenční vzorek pro porovnání změřených hodnot byl použit nástroj, který obráběl vzorek č. 1, tedy vzorek odlitý z čisté epoxidové pryskyřice bez jakékoliv příměsi SiO<sub>2</sub>. Hodnota opotřebení tohoto nástroje po 30 minutách obrábění byla  $36,06 \pm 0,24 \mu\text{m}$ . Dle výsledků měření lze porovnat procentuální rozdíly mezi opotřebeními jednotlivých nástrojů vůči referenčnímu vzorku. Opotřebení již zmíněné frézy, která obráběla vzorek č. 5 (8 % SiO<sub>2</sub>) je přibližně 168 % opotřebení referenčního nástroje. Opotřebení nástroje obrábějící vzorek č. 2 (2 % SiO<sub>2</sub>) je rovno 86 %. Opotřebení zbylých dvou nástrojů obrábějících vzorky č. 3 a 4, tedy vzorky s obsahem 4 a 6 % hm. SiO<sub>2</sub> je rovno 142 a 112 % opotřebení referenčního nástroje.

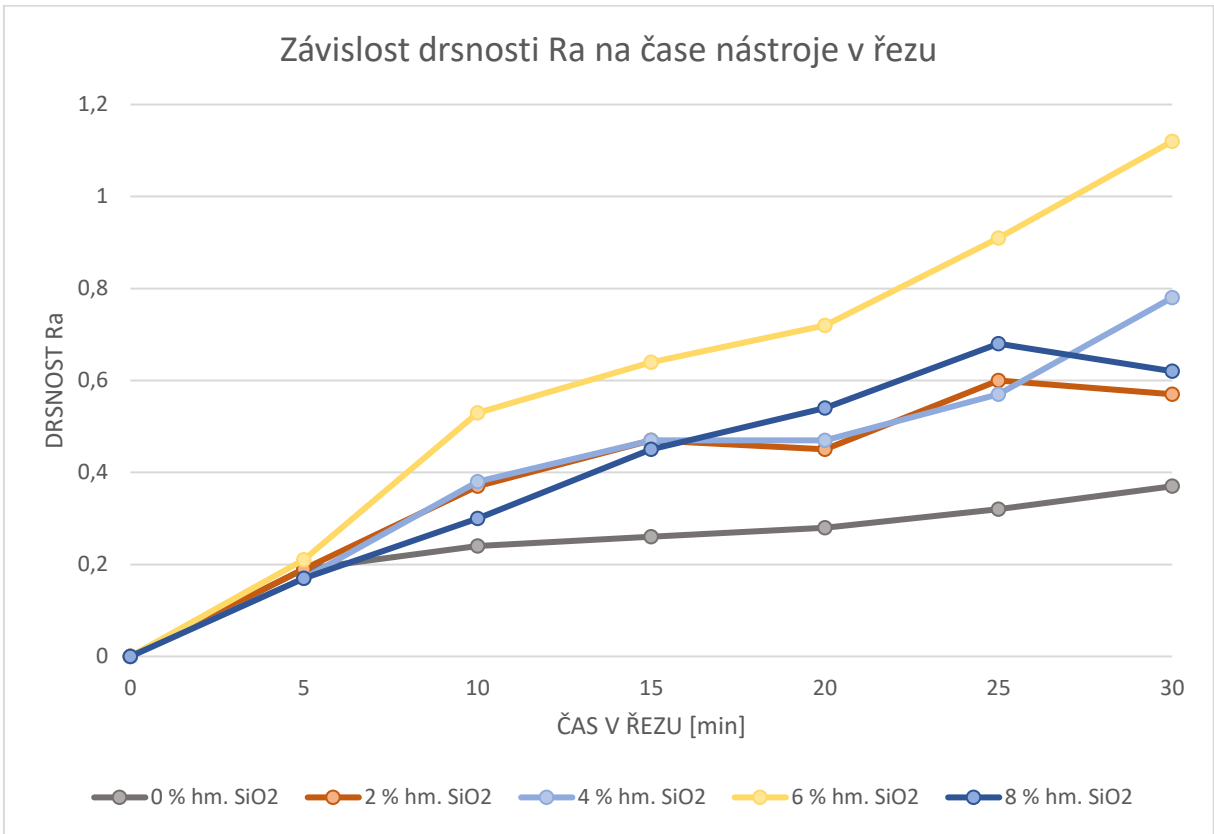




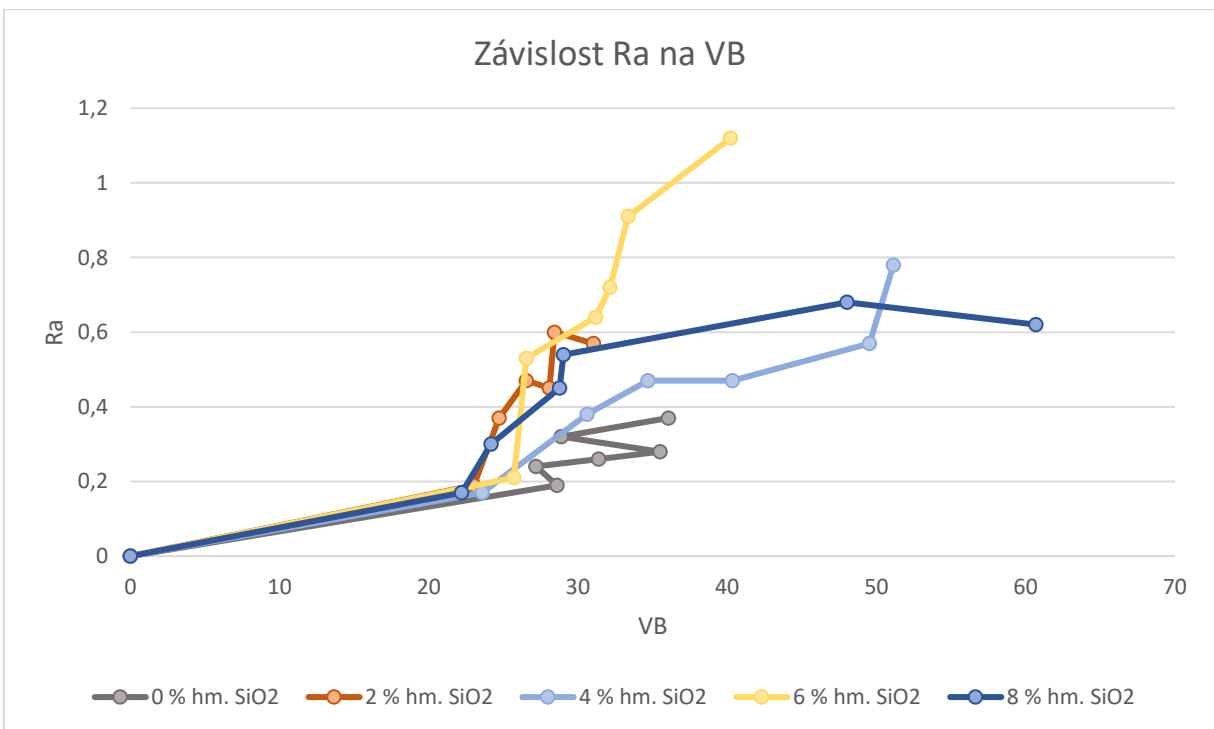
*Obr. 60 Souhrnný graf dosažených velikostí parametrů VB dle jednotlivých vzorků.*

### Parametr drsnosti $R_a$

Největší hodnota aritmetické úchytky byla naměřena u vzorku se 6 % hm. SiO<sub>2</sub> a to  $1,12 \pm 0,13 \mu\text{m}$ . Naopak nejmenší hodnota byla u vzorku s 0 % hm. SiO<sub>2</sub> a to  $0,37 \pm 0,03 \mu\text{m}$ . Stejně jako u opotřebení nástroje VB je i zde vhodné použít drsnost povrchu vzorku č. 1 (0 % hm. SiO<sub>2</sub>) jako referenční hodnotu pro škálování hodnot drsností povrchů ostatních vzorků. Hodnota drsnosti povrchu vzorku č. 4 (6 % hm. SiO<sub>2</sub>) odpovídá 303 % drsnosti povrchu referenčního vzorku. Po provedení kalkulace i pro zbývající vzorky, vyšly následující hodnoty. Pro vzorek č. 2 (2 % hm. SiO<sub>2</sub>) je procentuální poměr roven 154 %, pro vzorek č. 3 (4 % hm. SiO<sub>2</sub>) je to 211 % a pro vzorek s největším zastoupením nanovýztuže (8 % hm. SiO<sub>2</sub>) procentuální srovnání vyšlo 168 % drsnosti povrchu referenčního vzorku.



Obr. 61 Souhrnný graf dosažených velikostí parametrů  $R_a$  dle jednotlivých vzorků.



Obr. 62 Souhrnný graf dosažených velikostí parametrů  $R_a$  v závislosti na VB dle jednotlivých vzorků.

## Celková výška profilu drsnosti $R_t$

Největší celková výška profilu byla naměřena u vzorku se 6 % hm.  $\text{SiO}_2$  a to  $5,95 \pm 0,81 \mu\text{m}$ . Nejmenší výška profilu byla u referenčního vzorku s 0 % hm.  $\text{SiO}_2$  a to  $2,55 \pm 0,15 \mu\text{m}$ . Největší hodnota celkové výšky je na úrovni 233 % výšky profilu drsnosti referenčního vzorku. Pro vzorek č. 2 (2 % hm.  $\text{SiO}_2$ ) je to 143 % a pro poslední dva vzorky č. 3 a 5 jsou to hodnoty 180 a 147 % vůči profilu drsnosti referenčního vzorku.

## Plošná drsnost $S_a$

Největší hodnota plošné drsnosti byla naměřena u vzorku s 0 % hm.  $\text{SiO}_2$  a to  $2,71 \pm 0,23 \mu\text{m}$ . Nejmenší hodnota plošné drsnosti byla naměřena u vzorku se 4 % hm.  $\text{SiO}_2$  a to  $0,82 \pm 0,07 \mu\text{m}$ . Při opětovném porovnání dílčích plošných drsností vůči referenčnímu vzorku (0 % hm.  $\text{SiO}_2$ ) je nejmenší hodnota plošné drsnosti (vzorek 4 % hm.  $\text{SiO}_2$ ) rovna 30 %. Povrch dalšího vzorku (2 % hm.  $\text{SiO}_2$ ) má procentuální hodnotu 41 % vůči referenčnímu vzorku, a pro zbylé dva vzorky č. 4 a 5 jsou to hodnoty 66 a 32 %.

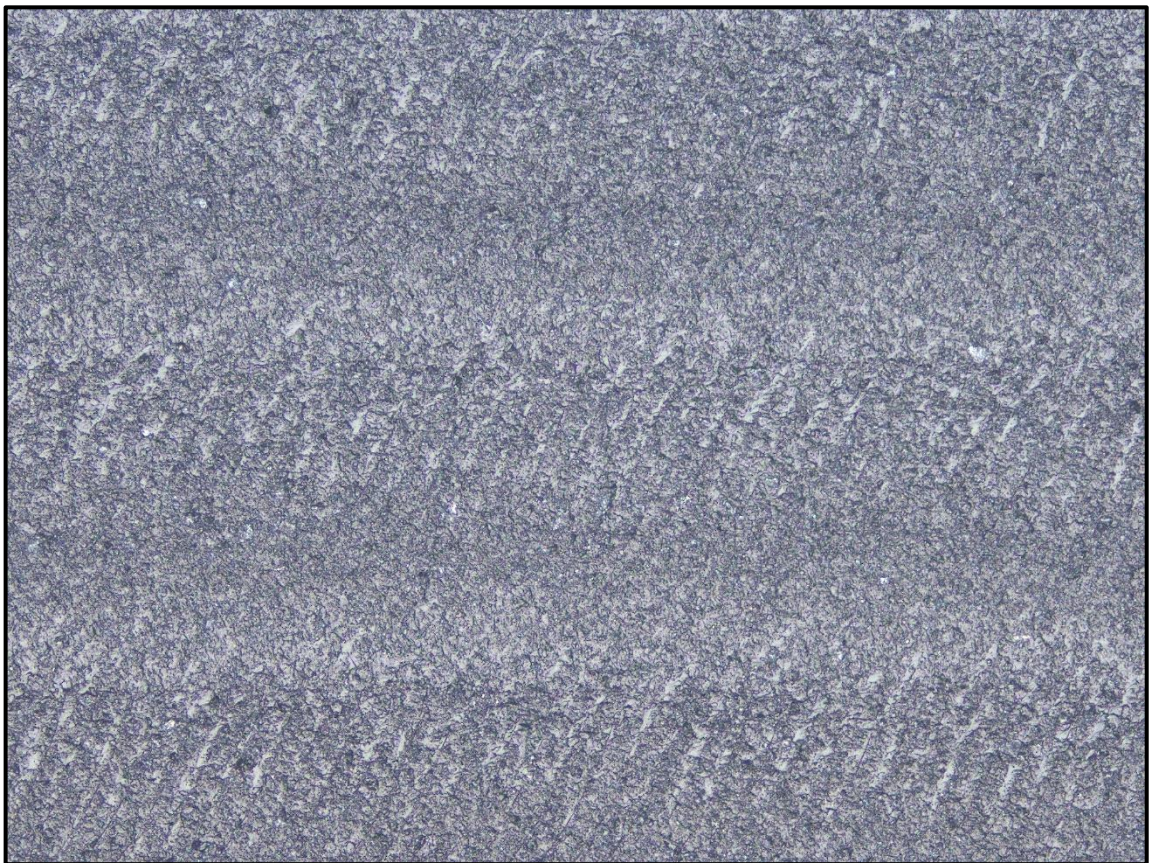
## Integrita povrchu

Integrita povrchu byla prověřována po každém cyklu obrábění. Tato pozorování odhalila veškeré nedostatky obrobených ploch. Mezi častými nálezy byly dutiny o velikosti 100-200  $\mu\text{m}$ , které se v materiálu objevily po procesu výroby vzorků, a také vady způsobené procesem obrábění, kde vlivem zhoršení geometrie nástroje docházelo k orbě a natavování třísky k již obrobenému povrchu vzorku, viz obr. 63.

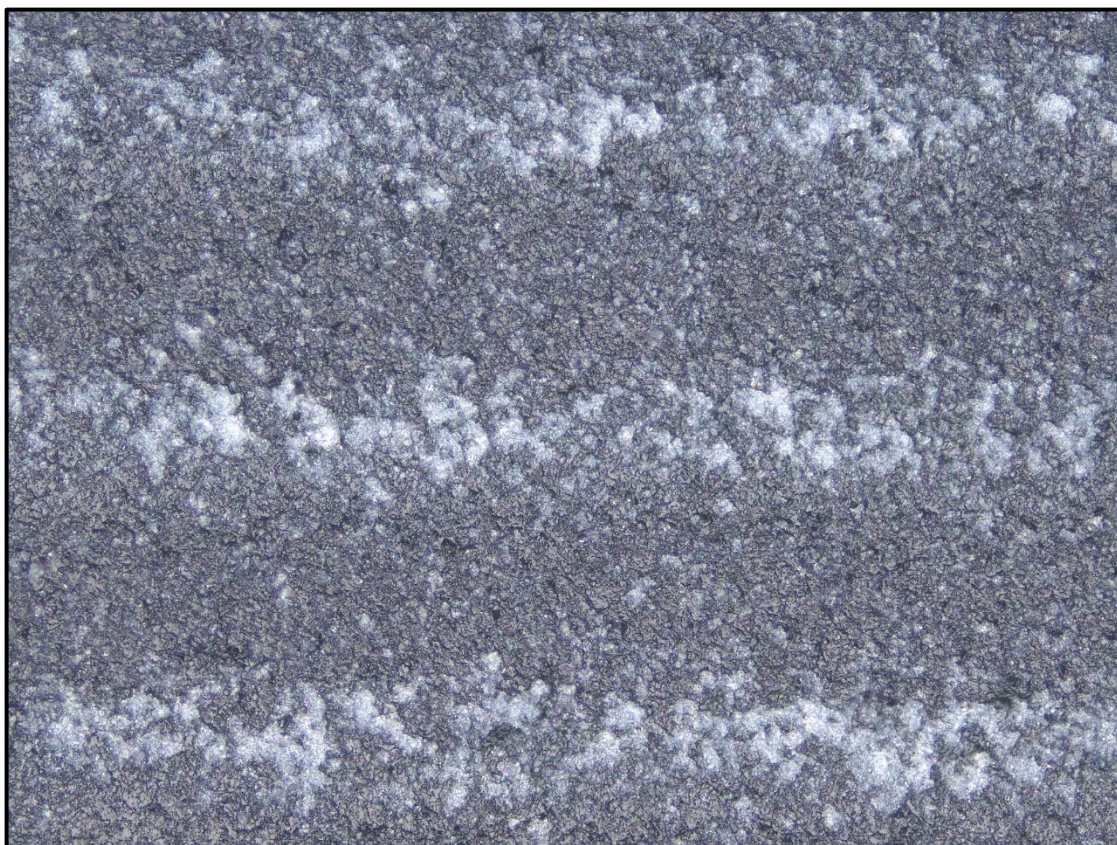


Obr. 63 Povrch vzorku č. 4 po posledním cyklu obrábění.

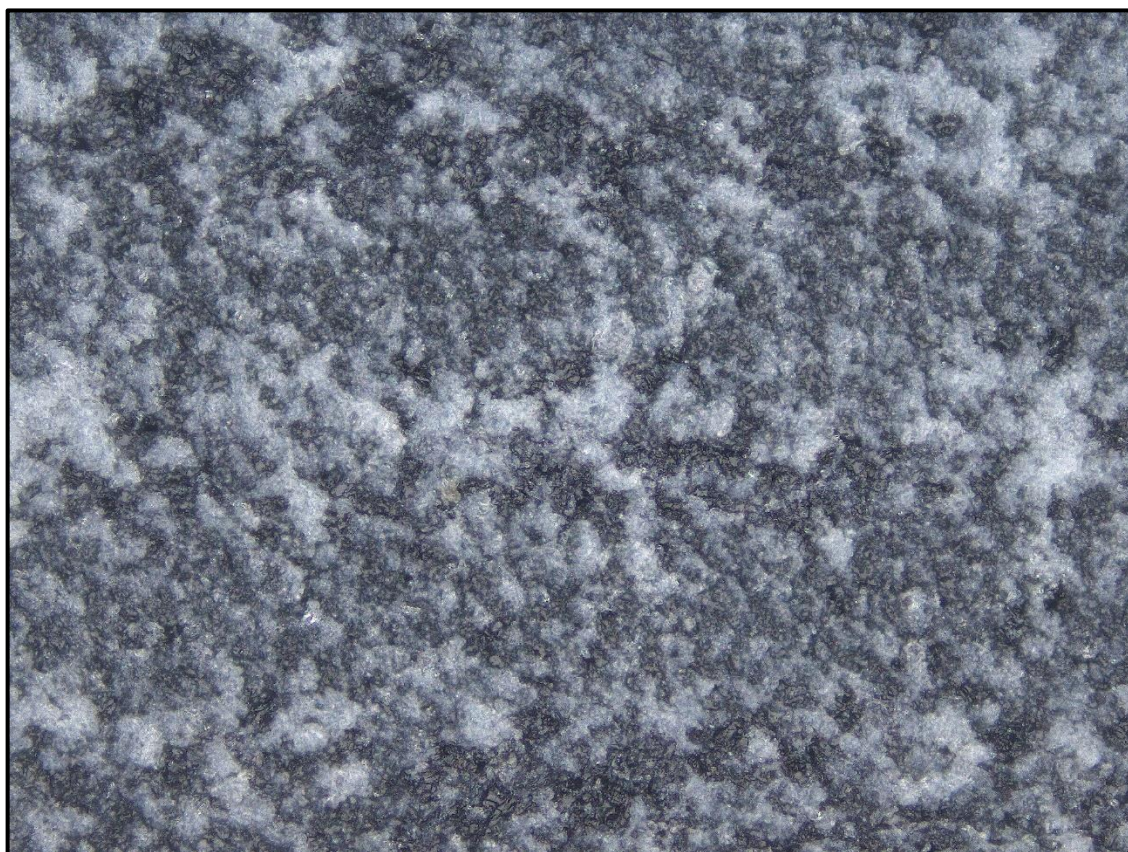
Z výsledků měření vyplývá, že trend zhoršování kvality povrchu se rychle zhoršuje, nezanedbatelný negativní vliv na výslednou kvalitu povrchu má také nanovýztuž. Trend ukazuje, že s vyšším obsahem nanoplniva ve struktuře vzorku souvisí zhoršení povrchové drsnosti, a s tím spojené kvality povrchu. Abrazivní charakter nanovýplně zvyšuje opotřebení nástroje a tato skutečnost se okamžitě projevuje na mechanismu úběru třísky, a to se následně projeví na jakosti obrobené plochy. Progresivně postupující opotřebení nástroje se viditelně projevilo už po druhém cyklu obrábění, kde zanikly stopy po střížném mechanismu oddělování třísek. Vlivem dalšího opotřebení nástroje už ke konci experimentu téměř nedocházelo k ustřížení třísky, ale spíše k orbě, což mělo za následek další zhoršení kvality povrchu. Vývoj kvality povrchu zkoumaného vzorku č. 3 lze pozorovat na obr. 64 až 66.



*Obr. 64 Struktura povrchu vzorku č. 3 po prvním cyklu obrábění (20x zvětšeno).*



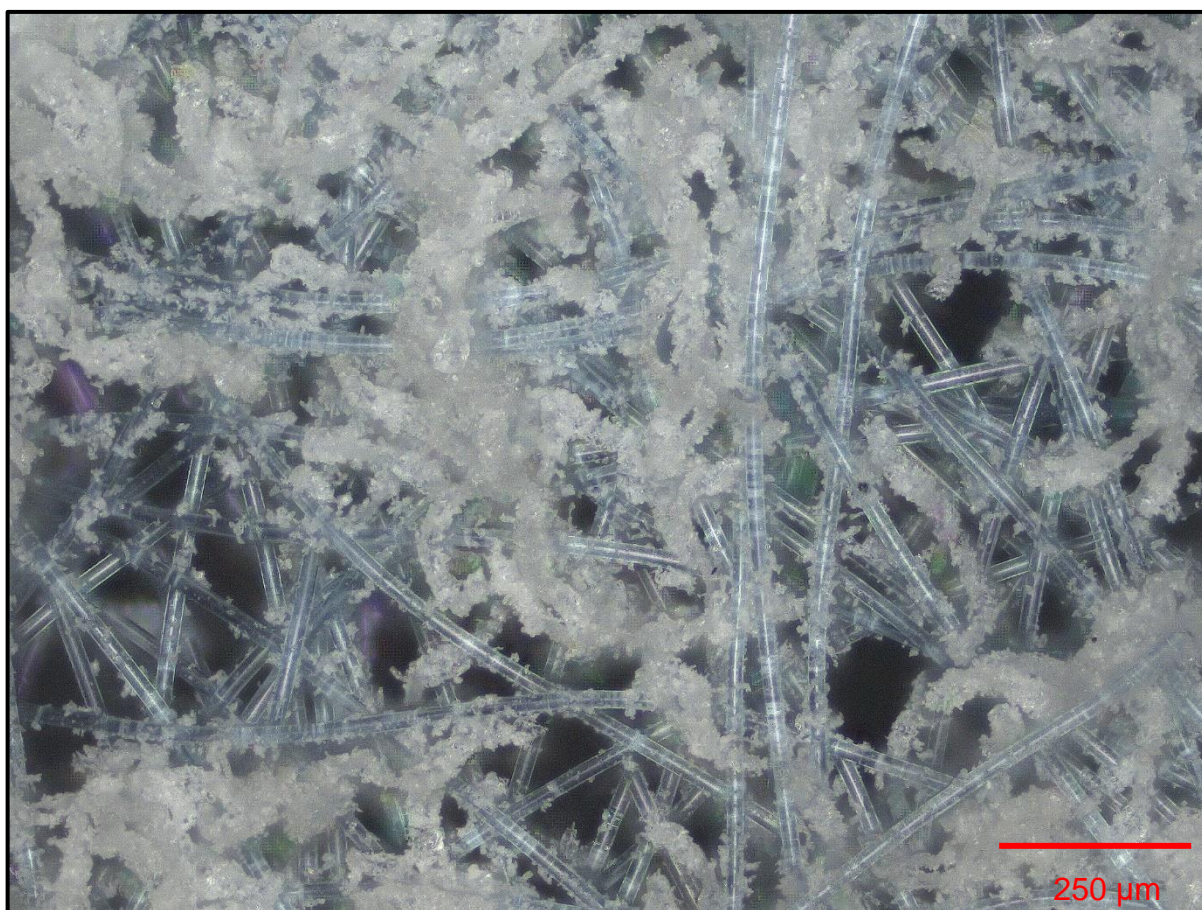
*Obr. 65 Struktura povrchu vzorku č. 3 po třetím cyklu obrábění (20x zvětšeno).*



*Obr. 66 Struktura povrchu vzorku č. 3 po posledním cyklu obrábění (20x zvětšeno).*

## Tvorba třísky

Morfologie třísek byla zkoumána vždy po 5 a 30 minutách nástroje v řezu. Jejich rozbor spočíval v charakterizaci jejich tvaru a velikosti. U všech zkoumaných vzorků docházelo k vytváření nejprve třísek červíkovitého nebo lupínkovitého tvaru, ale při zkoumání třísek vytvořených při posledním obráběcím cyklu směřoval jejich charakter vždy k drobné struktuře s částicemi menšími, než byly v počátku experimentu. Největší třísky se tvořily během prvního cyklu obrábění vzorku č. 1 (0 % hm. SiO<sub>2</sub>) a měly velikosti až 400 μm, viz kap. 3.5.1., vlivem postupného otupování nástroje docházelo ke zmenšení velikosti třísek a k vytváření drobných segmentů, viz obr. 65. Dále se na tvorbě a morfologii třísek velmi výrazně podílel obsah použité nanovýztuže, která svými abrazivními vlastnostmi urychlovala opotřebení nástroje, a tím podněcovala vznik drobné třísky.



Obr. 65 Snímek třísek po šestém cyklu obrábění vzorku č. 1.

## 5. Závěr

Bakalářská práce na téma „Problematika obrábění kompozitních systémů na bázi epoxidová pryskyřice – nano výztuž s ohledem na tvorbu třísky a opotřebení nástroje“ napomáhá k rozšíření stavu poznání řešené problematiky a napomáhá k objasnění některých jevů vyskytujících se při obrábění tohoto typu materiálu.

Cílem předkládané bakalářské práce bylo zkoumání vlivu množství nanovýztuže na sledované parametry: opotřebení nástroje VB, drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_t$ , plošnou drsnost  $S_a$ , integritu povrchu a tvorbu třísky při mikrofrézování nanokompozitního materiálu.

Z provedeného rozsáhlého souboru měření a zpracovaných výsledků lze vyvodit následující poznatky:

1. Největší velikost opotřebení vykazoval mikronástroj použitý pro vzorek s 8 %  $\text{SiO}_2$ . Konečná velikost opotřebení VB činila  $60,69 \pm 2,97 \mu\text{m}$ . Vzorek č. 5 obsahoval nejvyšší použité množství nanovýztuže v rámci experimentu. Toto množství se projevilo největším abrazivním účinkem na ostří a hřbet ze všech použitých nástrojů.
2. Nejméně opotřebovaným nástrojem byl mikronástroj vzorku č. 2 se 2 % hm.  $\text{SiO}_2$  jehož konečné opotřebení dosáhlo velikosti  $\text{VB} = 31,04 \mu\text{m} \pm 1,08 \mu\text{m}$ . Nejnižší míra opotřebení byla očekávána po obrobení vzorku č.1 (čistá epoxydová pryskyřice).
3. Rozdíl opotřebení nástrojů mezi vzorky č.1 a č.2 činí řádově 5  $\mu\text{m}$ . Vyšší míra opotřebení nástroje u vzorku bez výztuže byla způsobena vyšším výskytem kavit v objemu vzorku, které způsobovaly přerušování plynulého záběru nástroje a tím docházelo ke zvýšenému namáhání rezné části mikronástroje.
4. Největší průměrné aritmetické úchyly profilu drsnosti  $R_a$  bylo dosaženo při frézování vzorku s obsahem 6 % hm.  $\text{SiO}_2$ , nástroj po sobě zanechal povrch s drsností  $1,12 \pm 0,13 \mu\text{m}$ . Vyšší množství plniva zapříčinilo vyšší opotřebení nástroje a tím i zhoršení kvality povrchu. Rozdíl mezi dosaženými hodnotami parametru  $R_a$  mezi tímto vzorkem a vzorkem s maximálním množstvím plniva (8 % hm.  $\text{SiO}_2$ ) činí 0,5  $\mu\text{m}$ .

5. Vzorek s 0 % SiO<sub>2</sub> vykazuje nejmenší hodnotu parametru  $R_a = 0,37 \pm 0,03 \mu\text{m}$  na konci experimentu. Vlivem absence abrazivní výplně si nástroj déle zachoval svou výchozí geometrii a byl schopný vytvořit kvalitnější povrch. Ze vzorků s obsahem nanovýztuže v podobě částic SiO<sub>2</sub> vykazuje nejmenší velikost parametru  $R_a$  vzorek č. 2.  $R_a = 0,57 \pm 0,02 \mu\text{m}$ .
6. Největší celková výška profilu drsnosti  $R_t$  byla naměřena u vzorku se 6 % hm. SiO<sub>2</sub> a to  $5,95 \pm 0,81 \mu\text{m}$ . Tento výsledek můžeme opět přisoudit množství nanoplňiva ve struktuře vzorku a vyšší míře nerozptýlených nanočástic. Shluky nanovýztuže vytvářely objemové útvary, u kterých nedocházelo k plynulému odříznutí materiálu během mikrofrézování.
7. Nejmenší celková výška profilu drsnosti  $R_t$  byla pozorována u vzorku s 0 % hm. SiO<sub>2</sub> a činila  $2,55 \pm 0,15 \mu\text{m}$ . Nepřítomnost plniva eliminovala možnost vytrhávání či orby obráběné plochy.
8. Největší hodnota plošné drsnosti  $S_a$  byla naměřena u vzorku s 0 % hm. SiO<sub>2</sub> a to  $2,71 \pm 0,23 \mu\text{m}$ . Toto lze zdůvodnit častým výskytem kavit o velikosti 100  $\mu\text{m}$  ve vzorku vzniklých nedostatečným odvzdušněním a ulpíváním obrobených třísek na povrchu vzorku. U vzorku z čisté epoxydové pryskyřice lze také pozorovat výskyt natavených třísek či jejich fragmentů, které výrazně ovlivňují velikost sledované drsnosti  $S_a$ , na obrobené ploše vzorku a také na použitém mikronástroji,
9. Nejmenší hodnota plošné drsnosti  $S_a$  byla naměřena u vzorku se 4 % hm. SiO<sub>2</sub> a činila  $0,82 \pm 0,07 \mu\text{m}$ . Tento výsledek můžeme přisoudit dobré disperzi nanoplňiva ve struktuře vzorku a absenci kavit.
10. Na konečnou integritu obrobeného povrchu měla nejzásadnější vliv velikost opotřebení mikronástroje. U všech vzorků lze pozorovat stejné vývojové tendence. Zatímco po prvním obráběcím cyklu, po 5 minutách nástroje v řezu, byly zřetelné jednotlivé stopy po oddělování třísek (dráhy nástroje), na konci experimentu, po 30 minutách nástroje v řezu, už bylo obtížné rozeznat jednotlivé trajektorie nástroje. Vlivem nárůstu velikosti opotřebení VB a množství rozptýleného nanoplňiva SiO<sub>2</sub> docházelo k tzv. orbě materiálu doprovázené následným natavením vznikajících drobných třísek k povrchu vzorku.



11. Morfologii a tvorbu třísky silně ovlivňuje množství nanovýztuže  $\text{SiO}_2$  v kompozitním materiálu. Dle provedených experimentů lze pozorovat vliv množství výztuže na charakter a mechanismus vzniku třísky. Vzorky s nižším obsahem výztuže jsou charakteristické červíkovitými až lupínkovitými třískami což poukazuje na stříhový mechanismus tvorby třísky. Kdežto vzorky s obsahem 6 % a více vykazují již po prvním cyklu obrábění drobivou článkovitou a drobivou třísku.

Na základě provedených experimentů lze stanovit následující doporučení:

1. V rámci procesu mikroobrábění je důležité vhodně zvolit kontrolní parametr (např. časový interval nebo ujetou dráhu nástroje), po kterém bude probíhat kontrola nástroje z důvodu zabránění rychlého nárůstu velikosti opotřebení.
2. Pro zajištění vysoké jakosti plochy během obrábění je vhodné zavést ofuk obráběné plochy, aby se zabránilo natavení volně ležících třísek k povrchu vzorku.
3. K dosažení vysoké kvality povrchu (nízké hodnoty velikostí  $R_a$  a  $S_a$ ) a zároveň akceptovatelné velikosti opotřebení nástroje je třeba zajistit vhodné množství a rovnoměrnou disperzi výztuže ve vzorku a zabránit vzniku vzduchových dutin při výrobním procesu. Těmto kritériím odpovídají dle provedených experimentů vzorky o obsahu nano  $\text{SiO}_2$  v intervalu 2 až 6 hm. %.

## 6. Seznam použité literatury

- [1] JORDAN, Jeffrey, Karl I JACOB, Rina TANNENBAUM, Mohammed A SHARAF a Iwona JASIUK. Experimental trends in polymer nanocomposites—a review. *Materials science and engineering: A*. 2005, **393**(1–2), 1–11. ISSN 0921-5093.
- [2] THAKUR, RK a KK SINGH. Influence of fillers on polymeric composite during conventional machining processes: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021, **43**(2), 1–20. ISSN 1806-3691.
- [3] OMANOVIĆ-MIKLIČANIN, Enisa, Almir BADNJEVIĆ, Anera KAZLAGIĆ a Muhamed HAJLOVAC. Nanocomposites: A brief review. *Health and Technology*. 2020, **10**(1), 51–59. ISSN 2190-7196.
- [4] HANEMANN, Thomas a Dorothée Vinga SZABÓ. Polymer-nanoparticle composites: from synthesis to modern applications. *Materials*. 2010, **3**(6), 3468–3517. ISSN 1996-1944.
- [5] SOLAŘÍK, Tomáš. *Možnosti využití PUR odpadu jako plniva v polymerní matrici*. B.m., nedatováno. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [6] BHAT, Aayush, Sejal BUDHOLIYA, Sakthivel ARAVIND RAJ, Mohamed Thariq Hameed SULTAN, David HUI, Ain Umaira MD SHAH a Syafiqah Nur Azrie SAFRI. Review on nanocomposites based on aerospace applications. *Nanotechnology Reviews*. 2021, **10**(1), 237–253. ISSN 2191-9097.
- [7] Nanokompozit [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.microdent.cz/produkt/nanokompozit/>
- [8] BUZKOVÁ, Eva. Nanokompozitní supertvrde povlaky [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nanokompozitni-supertvrde-povlaky>
- [9] BHAGWAN, D Agarwal a J Broutman LAWRENCE. Vláknové kompozity. *SNTL Praha*. 1987.
- [10] MURARIU, Marius, Anne-Laure DECHIEF, Rindra RAMY-RATIARISON, Yoann PAINT, Jean-Marie RAQUEZ a Philippe DUBOIS. Recent advances in production of poly (lactic acid)(PLA) nanocomposites: a versatile method to tune crystallization properties of PLA. *Nanocomposites*. 2015, **1**(2), 71–82. ISSN 2055-0324.
- [11] FIEDLER, Bodo, Florian H GOJNY, Malte HG WICHMANN, Mathias CM NOLTE a Karl SCHULTE. Fundamental aspects of nano-reinforced composites. *Composites science and technology*. 2006, **66**(16), 3115–3125. ISSN 0266-3538.
- [12] MOLINARI, N, AP SUTTON a AA MOSTOFI. Mechanisms of reinforcement in polymer nanocomposites. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2018, **20**(35), 23085–23094.

- [13] FU, Shaoyun, Zheng SUN, Pei HUANG, Yuanqing LI a Ning HU. Some basic aspects of polymer nanocomposites: A critical review. *Nano Materials Science*. 2019, **1**(1), 2–30. ISSN 2589-9651.
- [14] CHAN, Mo-lin, Kin-tak LAU, Tsun-tat WONG, Mei-po HO a David HUI. Mechanism of reinforcement in a nanoclay/polymer composite. *Composites Part B: Engineering*. 2011, **42**(6), 1708–1712. ISSN 1359-8368.
- [15] SHEN, Zhiqi, George P SIMON a Yi-Bing CHENG. Comparison of solution intercalation and melt intercalation of polymer–clay nanocomposites. *Polymer*. 2002, **43**(15), 4251–4260. ISSN 0032-3861.
- [16] GUO, Feng, Saman ARYANA, Yinghui HAN a Yunpeng JIAO. A review of the synthesis and applications of polymer–nanoclay composites. *Applied Sciences*. 2018, **8**(9), 1696. ISSN 2076-3417.
- [17] LANDOWSKI, Michał, Gabriel STRUGAŁA, Michał BUDZIK a Krystyna IMIELIŃSKA. Impact damage in SiO<sub>2</sub> nanoparticle enhanced epoxy–Carbon fibre composites. *Composites Part B: Engineering*. 2017, **113**, 91–99. ISSN 1359-8368.
- [18] MALLAKPOUR, Shadpour a Mina NAGHDI. Polymer/SiO<sub>2</sub> nanocomposites: Production and applications. *Progress in Materials Science*. 2018, **97**, 409–447. ISSN 0079-6425.
- [19] ZENERINO, Arnaud, Sonia AMIGONI, Elisabeth Taffin DE GIVENCHY, Denis JOSSE a Frédéric GUITTARD. Homogeneous dispersion of SiO<sub>2</sub> nanoparticles in an hydrosoluble polymeric network. *Reactive and Functional Polymers*. 2013, **73**(8), 1065–1071. ISSN 1381-5148.
- [20] LIU, Chun-Hua a Cai-Yuan PAN. Grafting polystyrene onto silica nanoparticles via RAFT polymerization. *Polymer*. 2007, **48**(13), 3679–3685. ISSN 0032-3861.
- [21] GIOVINO, Marissa, Julia PRIBYL, Brian BENICEWICZ, Ronald BUCINELL a Linda SCHADLER. Mechanical properties of polymer grafted nanoparticle composites. *Nanocomposites*. 2018, **4**(4), 244–252. ISSN 2055-0324.
- [22] LEO KUMAR, SP, J JERALD, S KUMANAN a R PRABAKARAN. A review on current research aspects in tool-based micromachining processes. *Materials and Manufacturing Processes*. 2014, **29**(11–12), 1291–1337. ISSN 1042-6914.
- [23] BISSACCO, Giuliano, Hans Nørgaard HANSEN a Leonardo DE CHIFFRE. Micromilling of hardened tool steel for mould making applications. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005, **167**(2–3), 201–207. ISSN 0924-0136.
- [24] RAWAL, Sunil, Ajay M SIDPARA a Jinu PAUL. A review on micro machining of polymer composites. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022, **77**, 87–113. ISSN 1526-6125.
- [25] ČADKOVÁ, Dominika. *Topografie a drsnost povrchu při mikrofrézování*. B.m., 2023. b.n.

- [26] KHARWAR, Prakhar Kumar a Rajesh Kumar VERMA. Exploration of nature inspired Grey wolf algorithm and Grey theory in machining of multiwall carbon nanotube/polymer nanocomposites. *Engineering with Computers*. 2020, 1–22. ISSN 1435-5663.
- [27] SAMUEL, Johnson, Richard E DEVOR, Shiv G KAPOOR a K Jimmy HSIA. Experimental investigation of the machinability of polycarbonate reinforced with multiwalled carbon nanotubes. 2006. ISSN 1087-1357.
- [28] LE, Bao, Arnaud KERNIN, Jibrán KHALIQ, Guoyu FU, Dehong HUO, Emiliano BILOTTI, Han ZHANG a Islam SHYHA. Micro-end-milling of carbon nanotube reinforced epoxy nanocomposites manufactured using three roll mill technique. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021, **70**, 307–320. ISSN 1526-6125.
- [29] KUMAR, M Naresh, M MAHMOODI, M TABKHPAZ, SS PARK a X JIN. Characterization and micro end milling of graphene nano platelet and carbon nanotube filled nanocomposites. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017, **249**, 96–107. ISSN 0924-0136.
- [30] *DMG MORI* [online]. Dostupné z: CMX 600 V - Vertikální frézování od DMG MORI - DMG MORI Czech
- [31] PM - TECH Frézy tvrdokovové. [online]. nedatováno. Dostupné z: [https://www.pm-tech.cz/wp-content/uploads/2018/07/PM-TECH\\_frezy-tvrdokovove-nezelezne-kovy-a-plasty-2-2.pdf](https://www.pm-tech.cz/wp-content/uploads/2018/07/PM-TECH_frezy-tvrdokovove-nezelezne-kovy-a-plasty-2-2.pdf)

# PŘÍLOHY

Příloha č. 1 – DVD