



Diplomová práce

Problematika ochrany a bezpečnosti zdraví při frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny

Studijní program:

N0715A270015 Materiály a technologie

Autor práce:

Bc. Anežka Ciglerová

Vedoucí práce:

doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.
Katedra obrábění a montáže

Liberec 2024



Zadání diplomové práce

Problematika ochrany a bezpečnosti zdraví při frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny

<i>Jméno a příjmení:</i>	Bc. Anežka Ciglerová
<i>Osobní číslo:</i>	S21000217
<i>Studijní program:</i>	N0715A270015 Materiály a technologie
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra obrábění a montáže
<i>Akademický rok:</i>	2023/2024

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o tvorbě prachových částic a zdravotních problémech při obrábění kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny. Vliv řezných podmínek na velikost a množství prachových částic.
2. Volba obráběného materiálu (kompozitní desky vyztužené uhlíkovými vlákny), řezného nástroje (fréz) a řezných podmínek bez procesního média.
3. Návrh metodiky experimentů pro frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny. Technika sběru a charakteristika prachových částic při experimentech.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení získaných výsledků z realizace experimentů. Optimální výběr řezných podmínek vedoucí k regulaci velikosti a koncentraci prachových částic.
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. SHYHA, Islam; HUO, Dehong. *Advances in Machining of Composite Materials*. Springer International Publishing, 2021.
2. HADDAD, Madjid, et al. Study of the surface defects and dust generated during trimming of CFRP: Influence of tool geometry, machining parameters and cutting speed range. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, 66: 142-154.
3. CAMPBELL, Flake C. *Structural composite materials*. ASM international, 2010.
3. RAMULU, M.; KRAMLICH, J. Machining of fiber reinforced composites: review of environmental and health effects. *Int J Environ Conscious Des Manuf*, 2004, 11.4.
4. KOČMAN, Karel; PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.
5. Firemní podklady.

Vedoucí práce:

doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.
Katedra obrábění a montáže

Datum zadání práce:

2. října 2023

Předpokládaný termín odevzdání:

24. května 2024

L.S.

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

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

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou diplomovou 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 diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma 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 diplomová 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 vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Anotace

Předkládaná diplomová práce poskytuje informace o frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny.

Hlavním cílem předkládané práce je zkoumání tvorby prachových částic při frézování za různých řezných podmínek a jejich vliv na množství a velikost částic.

Nezbytné základní pojmy týkající se řešené problematiky jsou uvedeny v teoretické části práce. Do této části práce jsou zahrnuty informace o frézování kompozitních materiálů, volbě řezných podmínek a velikosti zdraví škodlivých částic.

Dosažení cíle je věnována celá experimentální část, která obsahuje informace o metodice a realizaci experimentu. V závěru práce jsou popsány dosažené výsledky a celkové zhodnocení experimentu.

Klíčová slova: kompozitní materiál, uhlíková vlákna, prachové částice, frézování, bezpečnost zdraví

Annotation

The present diploma thesis provides information on milling of composite materials with carbon fibres.

The main objective of the diploma thesis is to investigate the formation of dust particles during milling under different cutting conditions and their milling under different cutting conditions and their influence on the amount and size of particles.

Necessary basic concepts related to the investigated problem are presented in the theoretical part of the thesis. This part of the thesis includes information about milling of composite materials, choice of cutting conditions and size of harmful particles.

The whole experimental part is devoted to achieving the goal which includes information on the methodology and implementation of the experiment. At the end of the work the achieved results and the overall evaluation of the experiment are described.

Keywords: composite material, carbon fibre, dust particles, milling, health safety

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucí své diplomové práce paní doc. Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D. a konzultantům paní doc. Ing. Doře Kroisové, Ph.D. a panu Ing. Martinovi Váňovi za cenné připomínky a odborné rady při vypracování této diplomové práce. V neposlední řadě bych ráda poděkovala své rodině za podporu a trpělivost během mého studia.

Obsah

1 Úvod	12
2 Teoretická část	13
2.1 Frézování kompozitu	13
2.2 Kompozitní materiály	14
2.2.1 Matrice	15
2.2.2 Uhlíková vlákna	16
2.2.3 Obrobitelnost kompozitů.....	17
2.3 Řezné podmínky a jejich vliv na velikost prachových částic	17
2.4 Prachové částice.....	19
2.4.1 Charakteristika prachu	19
2.4.2 Negativní vliv frézování PVUV kompozitu na člověka.....	20
3 Metodika.....	24
3.1 Obráběný kompozitní materiál	24
3.2 Řezný nástroj	25
3.3 Řezné podmínky	26
3.4 Obráběcí stroj.....	26
3.5 Odsávací zařízení	27
3.6 Upínací přípravek	28
3.7 Sběr prachových částic	29
3.8 Vážení prachových částic	30
3.9 Měření opotřebení nástroje a velikosti částic	31
3.10 Podmínky obrábění a měření	32
3.11 Statistické vyhodnocení	32
3.11.1 Vážení	32

3.11.2 Měření velikosti	32
4 Experimentální část	33
4.1 Analýza zachycených prachových částic	33
4.1.1 Analýza prachových částic zachycených na filtru	34
4.1.1.1 Velikost prachových částic zachycených na filtru	34
4.1.1.2 Distribuce prachových částic na filtru	37
4.1.1.3 SEM analýza	37
4.1.2 Analýza prachových částic zachycených na nástroji	40
4.1.2.1 Velikost prachových částic zachycených na nástroji	40
4.1.2.2 Distribuce částic na nástroji	43
4.1.3 Analýza prachových částic zachycených z obrobené desky a přípravku	44
4.1.3.1 Velikost prachových částic zachycených na obrobené desce a přípravku	44
4.1.3.2 Distribuce částic na obrobku a přípravku	47
4.1.4 Analýza prachových částic zachycených za filtrem	47
4.1.5 Hmotnost prachových částic	48
4.1.6 Shrnutí	49
4.2 Vliv řezných podmínek na velikost prachových částic	50
4.2.1 Vliv řezné rychlosti na velikost prachových částic	50
4.2.1.1 Filtr	50
4.2.1.2 Řezný nástroj	51
4.2.1.3 Obrobek a přípravek	52
4.2.1.4 Shrnutí	52
4.2.2 Vliv posuvu na zub na velikost prachových částic	53
4.2.2.1 Filtr	53
4.2.2.2 Řezný nástroj	54
4.2.2.3 Obrobek a přípravek	55

4.2.2.4 Shrnutí	55
4.3. Vliv opotřebení řezného nástroje na tvorbu prachových částic	56
4.3.1 Opotřebení řezného nástroje	56
4.3.2 Vliv opotřebení řezného nástroje na velikost prachových částic	57
5 Diskuze	58
5.1 Analýza zachycených prachových částic	58
5.1.1 Prachové částice zachycené na filtru:	58
5.1.2 Prachové částice na řezném nástroji:	59
5.1.3 Prachové částice na obrobené desce s přípravkem:	59
5.1.4 Hmotnost prachových částic:	59
5.2 Vliv řezných podmínek na velikost prachových částic	60
5.2.1 Řezná rychlost	60
5.2.2 Posuv na zub	60
5.3 Vliv opotřebení nástroje na tvorbu prachových částic	61
5.3.1 Opotřebení řezného nástroje:	61
5.3.2 Vliv opotřebení nástroje na velikost prachových částic	61
6 Závěr	63
Citovaná literatura	65

Seznam použitých zkratek a symbolů

3D	[-]	třírozměrné
<i>ap</i>	[mm]	přísuv
PVUV	[-]	Polymer vyztužený uhlíkovými vlákny
CNC	[-]	Computer Numerical Control
CVD	[-]	Chemical Vapor Deposition
ČSN	[-]	Česká technická norma
<i>D</i>	[mm]	Průměr vláken
<i>Df</i>	[mm]	Průměr frézy
PVV	[-]	Polymer vyztužený vlákny
<i>fz</i>	[mm]	Posuv na zub
PVSV	[-]	Polymer vyztužený sklenými vlákny
<i>L</i>	[mm]	Délka vláken
<i>Ll</i>	[mm]	Délka řezné části frézy
<i>Lf</i>	[mm]	Délka frézy
PAN	[-]	Polyakrylonitril
SEM	[-]	Rastrovací elektronový mikroskop
<i>v_c</i>	[m.min ⁻¹]	Řezná rychlost
X, Y, Z	[mm]	Osy souřadného systému pro měření povrchu, náležící povrchu

1 Úvod

Výhody kompozitních materiálů, jako jsou vysoká pevnost, nízká tepelná roztažnost, vynikající odolnost vůči korozi a flexibilita, vedly k jejich rozsáhlému využití v leteckém, námořním, automobilovém a sportovním průmyslu.

Aplikace kompozitních materiálů vyžadují následné mechanické zpracování (řezání, frézování, vrtání atd.) pro dosažení konečného tvaru navržených dílů a jejich montáž. Mechanické zpracování polymerních materiálů s vláknovou výztuží (např. PVUV, PVSU) však vytváří prach. Vznik prachu během obrábění PVV (polymer vyztužený vláknou) představuje zdravotní a environmentální rizika. Morfologie a koncentrace těchto prachových částic určují závažnost těchto potenciálních rizik. Některé toxikologické studie popisují potenciální zdravotní riziko spojené s obráběním kompozitů. Avšak s rozšiřující se aplikací těchto materiálů nebyla této problematice ani její eliminaci věnována dostatečná pozornost. [1]

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou vzniku prachových částic při frézování kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny s důsledkem na zdraví člověka.

Hlavním cílem diplomové práce je zjistit, jak velké prachové částice vznikají za různých řezných podmínek a jaký mají řezné podmínky vliv na velikost a množství těchto částic.

Diplomová práce je rozdělena do čtyř částí: teoretické, metodické, experimentální a závěrečné. Teoretická část práce je zaměřena na dosavadní znalosti o problematice frézování kompozitních materiálů, jaký mají řezné podmínky vliv na velikost prachových částic a v neposlední řadě jaký mají prachové částice vliv na zdraví člověka.

Metodická část diplomové práce se věnuje popisu strojů a zařízení použitých při prováděném experimentu. Definiuje použitý nástroj, obráběný materiál a řezné podmínky.

Experimentální část je zaměřena na dosažené výsledky experimentu.

Závěrečná část obsahuje zhodnocení a diskuzi získaných výsledků v rámci realizovaného výzkumu.

2 Teoretická část

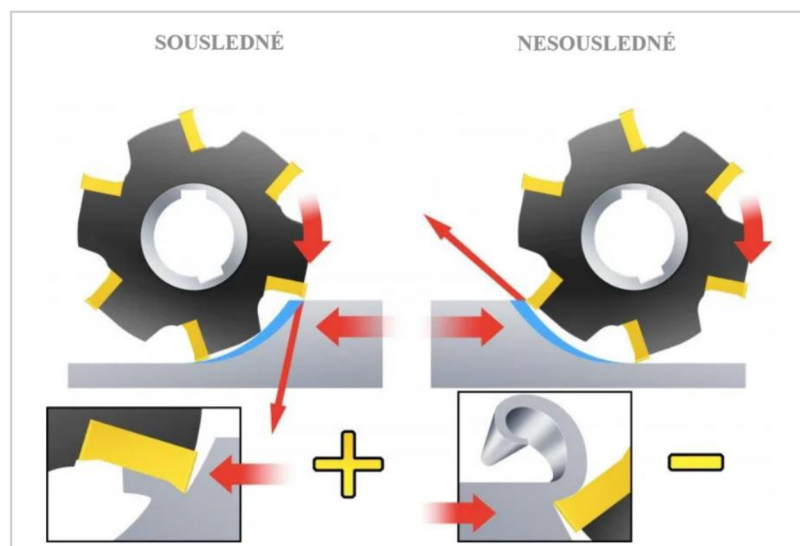
2.1 Frézování kompozitu

Technologie frézování je proces obrábění, kdy je materiál obrobku odebírán pomocí rotačního nástroje-frézy. Moderní frézovací stroje (obráběcí centra, vícesosé CNC frézky) zvládnou plynule měnit směr posuvu ve všech směrech. Řezný proces je přerušovaný, přičemž každý zub frézy odebírá krátké třísky o různé tloušťce. [2]

Frézovací operace, které jsou prováděné na dílech z PVV materiálů, se vyznačují nízkým poměrem odebraného materiálu k celkovému objemu dílu, čímž se liší od frézování kovových dílů. Frézování se většinou používá jako dokončovací operace či k vytvoření definovaných, vysoce kvalitních povrchů. [2]

Obrábění PVV materiálů je velmi složitá problematika. Je to dáno několika aspekty. Jedním z aspektů je anizotropnost materiálu. Materiál je anizotropní díky vláknům, které zajišťují mechanické vlastnosti celého materiálu v různých směrech. Tato vlastnost však negativně ovlivňuje schopnost frézování a dochází tak k rychlejšímu opotřebení nástroje a zpomalení celého procesu frézování. Dalším aspektem je nízký koeficient tepelné vodivosti, konkrétně uhlíkových vláken. Tento jev se nejvíce projevuje v místě řezu, kde jsou velmi vysoké teploty. Kvůli špatné vodivosti kompozitu je teplo odváděno pouze skrz nástroj a do okolního prostředí. Při dosažení teploty skelného přechodu dochází k degradaci matrice a místo tvorby třísky se materiál začne tavit, což je nežádoucí jev. Tepelně ovlivněn může být i povrch obrobku. Tento problém by mohlo vyřešit použití chladicí řezné kapaliny, což však není vhodné kvůli vysoké navlhavosti kompozitních materiálů. Velmi důležitý faktorem při frézování kompozitu je správná volba řezných podmínek. Není možné použít stejné řezné podmínky jako u frézování kovových materiálů. Se zvyšující se řeznou rychlostí stoupá i teplota, a kvůli zmíněnému nedostatečnému odvodu tepla z místa řezu přes obrobek, můžou vzniknout velmi vysoké teploty v místě řezu, což jak bylo již zmíněno je opět nežádoucí jev. [3] [4]

Frézování se dělí na sousledné a nesousledné. Rozdíl mezi sousledným a nesousledným frézováním můžeme vidět na Obr. 2.1. Při sousledném frézování se nástroj otáčí ve směru posuvu, při nesousledném frézování naopak proti směru posuvu. Pro frézování PVV kompozitů je doporučeno nesousledné frézování, a to z následujících důvodů. Při nesousledném frézování je materiál odebrán z minima do maxima, velmi horké třísky jsou vyváděny mimo obrobený povrch a je tak menší pravděpodobnost interakce obrobené plochy s velmi horkými třískami – může docházet k připékání k matrici. Dalším důvodem jsou trhliny, které u nesousledného frézování vznikají převážně v horizontálním směru, a ty nezasahují do obrobeného povrchu. Oproti tomu při sousledném frézování dochází k frakturám materiálu do již obrobeného povrchu. Nesousledné frézování také vykazuje menší delaminaci a lepší drsnost obrobené plochy. [3]



Obr. 2.1 Princip sousledného a nesousledného frézování

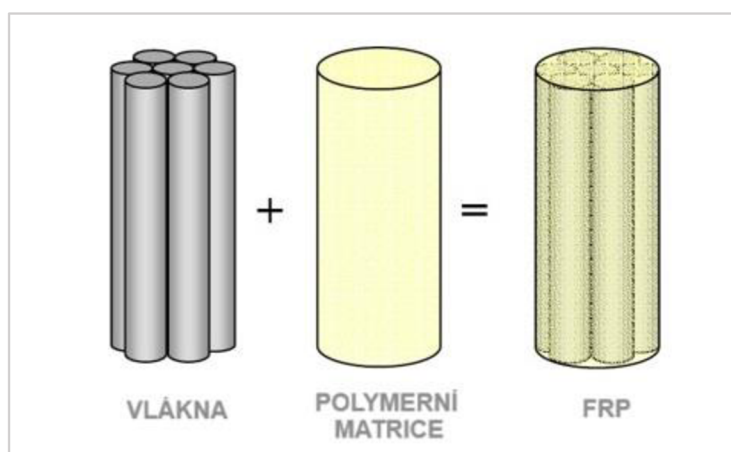
2.2 Kompozitní materiály

Kompozity patří mezi moderní a stále se rozvíjející materiály současnosti, které nacházejí uplatnění v mnoha různých průmyslových odvětvích. Jejich hlavními přednostmi jsou vynikající měrná pevnost, tuhost, odolnost proti únavě a programovatelnost mechanických vlastností. Složením jednotlivých složek lze dosáhnout vlastností materiálu dle konkrétních požadavků. [5]

Kompozity jsou tvořeny kombinací dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek, které jsou spojeny do jednoho výsledného celku. Spojením těchto složek vznikne nový materiál s jedinečnými vlastnostmi, kterých nelze dosáhnout kteroukoliv složkou samostatně ani prostým spojením. [6]

Hlavními složkami kompozitního materiálu jsou matrice a výztuž. Výztuž je tvrdší, tužší, nespojitá oproti tomu matrice, která zastává funkci pojiva výztuže, je spojitá a obvykle poddajnější. [7]

Kompozity se dělí podle druhu matrice na kovovou, keramickou a polymerní. V této práci se budeme zabývat polymery vyztužené vlákny (PVV), a proto bude teoretická část zaměřena na tuto skupinu kompozitů, konkrétněji pak na polymery vyztužené uhlíkovými vlákny.



Obr. 2.2 Polymer vyztužený vlákny - PVV

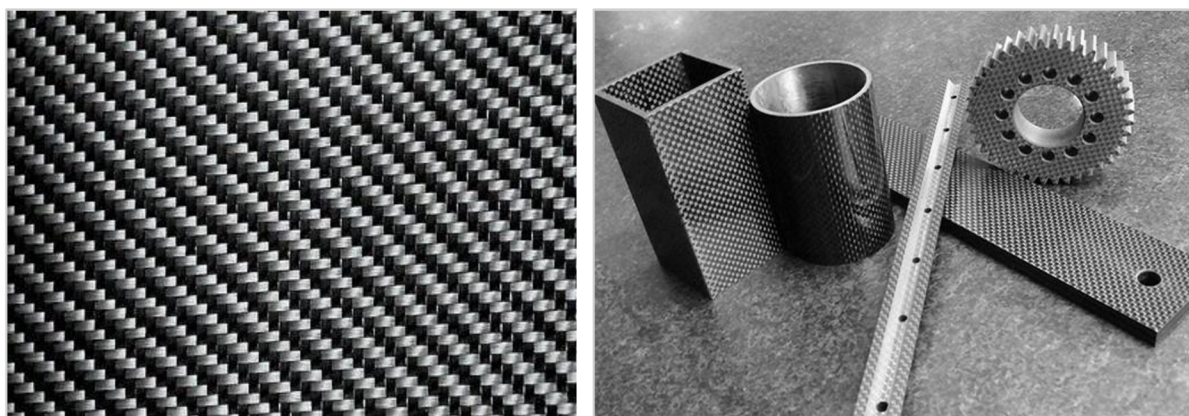
2.2.1 Matrice

Matrice pro kompozitní materiály s kontinuálními vlákny obvykle zahrnují polymerní složky, a to zejména reaktoplastické a termoplastické materiály. Mezi nejběžněji používané matrice patří nasycené polyestery, vinylestery, epoxidy a z termoplastů polypropylen a polyamid. V rámci plánovaných experimentů diplomové práce byla použita epoxidová pryskyřice jako matrice, a proto bude teoretická část zaměřena pouze na tuto konkrétní pryskyřici. [7]

Epoxidová pryskyřice má vynikající lepicí vlastnosti, pevnost, odolnost a snadné možnosti zpracování. To jsou také důvody, proč má epoxid tak široké využití. Pryskyřice je převážně ve formě kapalné nebo polotuhé (při zvýšených teplotách se stává tekutou) a tvrdne prostřednictvím tvrdidel při vyšší nebo pokojové teplotě. Aby se dosáhlo nejvyšší možné mechanické pevnosti, musí proběhnout důležitý krok zvaný zesíťování, při kterém probíhá mnoho chemických reakcí. Použitá tvrdidla mají kvůli svému složení určitou toxicitu. Epoxidové pryskyřice obsahují aromatické a alifatické aminové sloučeniny, které mohou způsobit podráždění očí, kůže a dýchacích cest. [8]

2.2.2 Uhlíková vlákna

Princip vyztužení vlákny je založen na skutečnosti, že vyztužující vlákna, která mají o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost oproti pojivu, se deformují méně než samotný polymer při vnějším namáhání. Dochází proto ke vzniku smykových sil na rozhraní mezi vláknem a polymerovou maticí. V případě adheze mezi těmito dvěma komponentami umožňují tyto smykové síly přenést veškeré napětí z měkké matrice na vlákna, která jsou schopna nést všechna napětí působící na kompozitní díl. To znamená, že měkká avšak deformovatelná matrice zůstává téměř bez napětí. [7]



Obr. 2.3 Ukázka tkaniny z uhlíkových vláken, příklad použití PVUV

Uhlíková vlákna nabízejí nejširší rozsah mechanických vlastností při relativně nízké hustotě ($1,8-2 \text{ g/cm}^3$). V současné době jsou vyráběna zejména z vláken polyakrylonitrilu (PAN), vláken novoloidu-vláken fenol-aldehydových (Kynol) a ze sulfonovaného polyetyleny a ligninu. Pro výrobu vláken PAN se provádí následující postup: [7]

- *Stabilizace* – Při teplotách $200-300 \text{ }^\circ\text{C}$. PAN vlákno je stabilizováno za působení tahového napětí v oxidačním prostředí. Dochází k cyklizaci vazeb v řetězci makromolekuly PAN a k vzájemnému zesílení makromolekul kyslíkovými můstky. Vlákno v této fázi ztmavne a stane se netavitelným.
- *Karbonizace* – Při teplotách $1000-1800 \text{ }^\circ\text{C}$, inertní prostředí (velmi čistý dusík). Ve vláknu proběhne karbonizace, což je proces, při kterém je odstraněn vodík a snížen obsah dusíku a kyslíku a to způsobí, že 80-90% hmoty tvoří uhlík.
- *Grafitizace* – Při teplotách až $3000 \text{ }^\circ\text{C}$, v prostředí argonu. Ještě více zvýšen obsah uhlíku a umožní se vznik dokonalejších mikrokystalů. Díky vyvinutým mikrokystalům budou vlákna mnohem tužší. [7]

2.2.3 Obrobitelnost kompozitů

Polymerů vyztužených vlákny (také značené jako PVV) je více druhů a můžeme je dělit podle materiálu vláken, podle materiálu matrice nebo třeba podle uspořádání vláken nebo jejich délky. Důležitým faktorem je také to jaký objemový podíl vláken je v kompozitu. Všechny tyto parametry ovlivňují nejen mechanické vlastnosti výsledného kompozitu, ale i jeho obrobitelnost, na kterou je zaměřena tato část teoretické části. [9]

PVV materiály se řadí mezi obtížně obrobitelné a to z primárně následujících důvodů. Kvůli delaminaci, otřepům či vytrhaným vláknům mají nízkou kvalitu obrobenej plochy. Dále způsobují v důsledku abrazivity vláknové výztuže značné opotřebení nástroje. A v neposlední řadě mají nízkou teplotní odolnost, která je dána teplotou tání matrice a její špatnou tepelnou vodivostí. Tyto uvedené důvody pak limitují nejen volbu řezného nástroje, ale i řezné podmínky. Protože delaminace je úzce spojena s trvanlivostí nástroje a jeho řeznou geometrií, musíme na ní brát ohled. V případě, že je nevhodně zvolena řezná geometrie či řezné podmínky, dochází k většímu silovému a tepelnému zatížení obrobku, což vede ke zhoršení kvality povrchu. [9]

2.3 Řezné podmínky a jejich vliv na velikost prachových částic

Množství prachu vznikajícího při obrábění je závislé na povaze obráběcího procesu, řezné rychlosti, posuvu, geometrii nástroje, materiálu řezného nástroje, obrobku a orientaci vlákna. Operace vrtání produkuje nižší koncentrace prachu než frézování, ale vyšší než broušení. Při vrtání PVUV se může 9,3 % prachu potenciálně dostat do průdušnice a průdušek. Oproti tomu při frézování je to 28,7 %. Přičemž 2,5 % prachu vzniklého vrtáním a 20 % prachu vzniklého frézováním má aerodynamický průměr menší než 2 μm a ten se může dostat až do plicních sklípků. Aerodynamický průměr je definován jako průměr koule o hustotě 1000 kg/m^3 , která má stejnou rychlost usazování jako příslušná prachová částice. Hmotnostní procento nedýchatelného prachu se pohybuje od 51 % při frézování a 88 % při vrtání. [10]

Tab. 2.1 Řezné podmínky použité v studii [10]

Proces			Rychlost, posuv, hloubka řezu, materiály	Velikost a koncentrace
Haddad et al. Nguyen Dinh et.al. [10]	Rychlost	PVUV	150, 250, 350, 700, 1400 m/min	Až 0,25 μm Velké množství < 1,5 μm Koncentrace > 5 mg/m ³
	Posuv		125, 250, 500, 1000 1500 mm/min	
	Hloubka řezu		2 mm	
	Řezná rychlost		150, 250, m/min	
	Posuv		500, 1000, 1500 mm/min	
	Hloubka řezu		2, 3 mm	
Miller Iyer [10]	Řezná rychlost	PVUV, HexMC	1000, 3000, 6000 RPM m/min	Aerodynamický průměr: až 0,12 μm , 0,19 μm (PVUV)
	Posuv		127, 381, 635 mm/min	Velké množství < 1 μm
	Hloubka řezu		2,54; 3,81; 6,35 mm	Celkový prach: 50 mg/m ³ > limit Dýchací prach: 30 mg/m ³ > limit

Rychlost a posuv také ovlivňují velikost a množství prachu. Při obrábění PVUV studie uvádí, že je přítomnost prachu menší než teoretická tloušťka třísek. Množství prachových částic se při obrábění PVUV zvyšuje se zvyšující se řeznou rychlostí, avšak s rostoucím posuvem klesá. Při konstantní kombinaci posuvu a hloubky řezu vytvářejí vyšší otáčky vřetena větší kontakt s obrobkem, což v konečném důsledku produkuje více prachu. Při vysokorychlostním řezání se prašnost zvyšuje 2–8krát. Naproti tomu vyšší posuv vytváří menší množství prachu v důsledku hrubého řezu. Posuv se zdá mít v porovnání s množstvím částic menší vliv. Zvýšením hloubky řezu se zvyšuje množství částic prachu a to kvůli většímu kontaktu s obrobkem. Celkově kombinace vyšší rychlosti posuvu, nižší řezné rychlosti a nižší hloubky řezu vytváří třísky ve formě vláknité matrice a snižuje počet škodlivých částic při obrábění. [10]

Geometrie nástroje, materiál nástroje a geometrie řezné hrany rovněž ovlivňují tvorbu prachu při obrábění kompozitu v důsledku rozdílů v mechanismu tvorby třísek. Čtyřbřitý nástroj s diamantovým povlakem vytvářel při obrábění PVUV více prachu než nástroj s karbidem wolframu. Vliv povlaku na vznik prachu je minimální. Přítomnost drážek na řezné hraně snižuje rozptyl prachu v důsledku ulpívání prachu v dutině. Opatření nástroje také snižuje množství prachu, protože mění tvorbu třísky. Opatřené řezné hrany vytvářejí větší a těžší třísky, které mohou padat na obráběcí stůl. Bylo zaznamenáno, že během frézování

kompozitu nástrojem s polykrystalickým diamantem se vytváří větší množství prachu, než při použití karbidového nástroje, avšak nástroj z polykrystalického diamantu vytváří lepší kvalitu povrchu díky produkci menších třísek. Koncentraci prachu lze upravit změnou materiálu a geometrie nástroje. Nicméně vliv na integritu povrchu musí být ještě ověřen. [10]

Na tvorbu prachu má vliv také orientace vláken a materiál obrobku. Velikost třísek se také liší v závislosti na orientaci vláken. Je uvedeno že nejnižší hmotnostní koncentrace prachu vzniká u 0° a 90° vláken. Nejméně 50 % částic má aerodynamický průměr menší než 0,12 µm pro 0° vlákna, 0,31 µm pro 45° vlákna, 0,21 µm pro 90° vlákna a 0,35 µm pro 135° vlákna. Větší počet částic schopných se dostat do plicních sklípků při frézování jsou materiály z PVUV než při frézování materiálu HexMC. [10]

2.4 Prachové částice

Prach je jedním z nejběžnějších škodlivých látek, které mohou ohrožovat lidské zdraví, a to jak v každodenním životě, tak i při pracovní činnosti. [11]

Prašnost představuje znečištění ovzduší hmotnými částicemi, které vznikají během různých procesů zpracování, jako jsou například mletí, drcení, obrábění a opracovávání nejrůznějších materiálů. Rozsah škodlivých účinků prachu na člověka je velmi rozsáhlý a hodnocení těchto účinků závisí na několika faktorech: na původu, koncentraci v ovzduší, na vlastnostech a velikosti prachu, na délce a podmínkách působení a na individuálním vnímání člověka. [11]

Prachové částice jsou kromě svých nezdravých vlastností elektricky vodivé a mohou tedy poškodit nebo dokonce zničit mechanické i elektronické součásti stroje. [12]

2.4.1 Charakteristika prachu

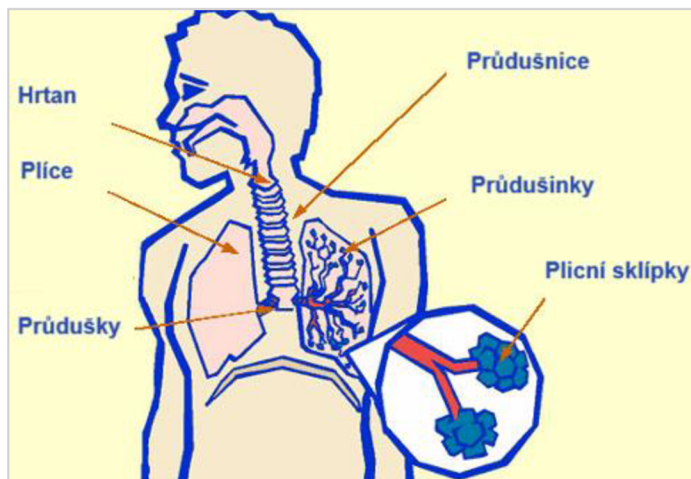
Hmotné částice, které jsou rozptýlené ve vzduchu nazýváme aerosoly. Tyto aerosoly dělíme podle skupenství na *tuhé* a *kapalné*. *Tuhé aerosoly* dělíme na prach, kouř a dým. *Kouř* vzniká při spalování organických látek. *Dým* vzniká oxidací anorganických látek. Prach je polydisperzní tuhý aerosol, který vzniká v důsledku činností prováděných člověkem, jako je mechanické zpracování pevných materiálů (vrtání, broušení, řezání apod.), při rozměňovacích procesech (drcení, mletí) či rozptýlením částic neupraveného povrchu. *Kapalný aerosol* nebo-li mlha vzniká kondenzací (zkapalněním) vodní páry. Aerosoly jsou charakterizovány velikostí částic, koncentrací a fyzikálními, chemickými a biologickými vlastnostmi částic. [11]

Podle účinku na lidský organismus můžeme prach rozdělit na *toxický* a *netoxický*. Jednotlivé typy prachu pak dělíme do skupin podle původu a od toho se pak odvíjí účinky na lidský organismus. *Toxický prach* posuzujeme spolu s plyny a párami s toxickým účinkem. [11] Netoxické prachy se dělí na: [13]

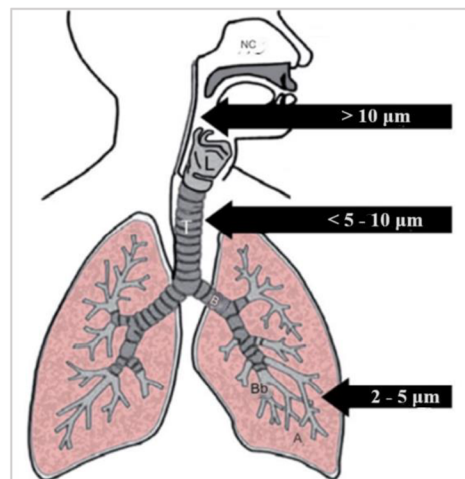
- prachy s převážně fibrogenním účinkem tzn. vedoucí k nadměrnému obsahu vaziva v určitém orgánu a následně k poruše jeho tkání a funkci (silikóza, azbestóza),
- prachy s možným fibrogenním účinkem - (slída, talek, saze),
- prachy s dráždivým účinkem - (minerální, textilní, živočišné, rostlinné-dřevný prach),
- minerální vláknité prachy,
- prachy bez výrazného biologického účinku.

2.4.2 Negativní vliv frézování PVUV kompozitu na člověka

Na Obrázku 2.4 můžeme vidět dýchací ústrojí člověka. Dýchání začíná u nosu a úst. Vzduch proniká buď nosem nebo ústy a putuje do průdušnice. Průdušnice se následně větví do dýchacích cest nazývaných průdušky. Aby plíce optimálně fungovaly, je nutné, aby tyto dýchací cesty byly při nádechu i výdechu volné, bez zánětu, otoku či nadměrného množství hlenu. Jak průdušky postupují dále do plic, rozdělují se na menší dýchací cesty nazývané průdušinky. Zakončení průdušinek je tvořeno malými balónkovitými strukturami zvané plicní sklípky. V lidském těle existuje více než 300 milionů těchto plicních sklípků. Plicní sklípky jsou obklopeny jemnou sítí krevních cév zvaných kapiláry. Kyslík z vdechnutého vzduchu prostupuje stěnami plicních sklípků až do krve. Poté, co je kyslík absorbován krví, opouští plíce a je transportován do srdce. Srdce následně pumpuje okysličenou krev do celého těla, poskytuje kyslík všem orgánům, tkáním a buněčným strukturám. Během procesu využívání kyslíku buňkami vzniká oxid uhličitý, který je absorbován do krve. Krev poté přenáší oxid uhličitý zpět do plic, kde je při výdechu z těla odstraněn. Dýchací systém má naštěstí obranné mechanismy, které ho čistí, a chrání sám sebe. [14]



Obr. 2.4 Dýchací ústrojí



Obr. 2.5 Velikost vdechovaných částic

Prach vytvořený během obrábění kompozitu může negativně ovlivnit lidské zdraví. Expozice pokožky, inhalace, požití rozlámaných vláken a jemných částic může vést k zdravotním komplikacím. Několik toxikologických studií provedených na králících a krysách potvrzuje, že má prach z kompozitu nepříznivé účinky na plíce. [10]

Obecně se částice považuje za nedýchatelnou, pokud je její aerodynamický průměr větší než 10 μm . V několika studiích se však rozlišuje dýchatelnost částice podle místa, kde se částice usazuje v dýchacích cestách viz Obr. 2.5. Téměř všechny částice s velikostí větší než 10 μm jsou zachyceny již v nosní dutině. Většina částic s velikostí mezi 5 a 10 μm se usadí v oblasti nosohltanu či hrtanu. Přibližně 40 % částic s velikostí částic mezi 2 a 5 μm se usazuje mezi průdušnicí a průduškami. Částice menší než 2 μm mají vysokou pravděpodobnost, že se dostanou až do oblastí průdušinek a plicních sklípků ze kterých se pak mohou dostávat až do krevního řečiště. Největší potenciál poškodit plíce mají částice právě v oblasti plicních sklípků, protože se nacházejí velmi blízko plicní stěny. [15]

Uhlíková, aramidová (Kevlar®) a skleněná vlákna jsou nejrozšířenějšími výztužnými materiály v letectví a mnoha dalších průmyslových odvětvích. Tato vlákna jsou chemicky inertní a nemohou snadno způsobit velké zdravotní riziko, pokud jsou ve formě suché tkaniny a po vytvrzení pryskyřicovou maticí. Nicméně, obrábění vytvrzených laminátových kompozitů může uvolnit některá krátká vlákna a prach pryskyřice, tím se dostanou částice do vzduchu, což může způsobit velká potenciální rizika pro pracovníky a inženýry. Po vdechnutí mohou být některá dlouhá a tenká vlákna zachycena hluboko v plicích a způsobit poškození tkáně. [8]

Pokud jsou vlákna vdechnuta a přilnou k plicním sklípkům, s největší pravděpodobností tam zůstanou déle vytvořením zjizvené tkáně a snížením funkce plicních sklípků pro výměnu vzduchu. Podle Úřadu pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci (OSHA) jsou dlouhá vlákna považována za dýchatelné materiály, které omezují vdechování a vyžadují ochranu dýchacích cest. Respirační ochranná maska musí mít aerodynamický průměr menší než 3 mikrony. Během obrábění kompozitních materiálů se matrice z pryskyřice tříští a uvolňuje s malými vlákny kolem pracovního místa. Velikost a průměr vláken generovaných během obrábění se může lišit v závislosti na typu vlákna: například uhlíková a grafitová vlákna uvolňují částice o průměru 7 mikrometrů, aramidová vlákna 8 mikrometrů a skleněná vlákna 3 až 25 mikrometrů. To potvrzuje, že velikost respirační masky musí být menší než 3 mikrony, aby ochrana byla dostatečná. Některý azbest může být spojen se starými kompozity a během obrábění těchto kompozitů může způsobit vážné problémy. [8]

Tab. 2.2 Nežádoucí účinky uhlíkových vláken při studii [16]

Parametry vláken			Podmínky expozice			Zotavení po expozici	Výsledek
<i>D</i> [μm]	<i>L</i> [μm]	Konc. [f/cm ³]	h/den	Den /týden	týdny		
7	20-60	40	6	5	16	32 týdnů	Žádný nepříznivý vliv na plíce Žádná fibróza Mírný pokles hmotnosti
3,5	3500	40-80	1	5	2	1,14 dní	Žádná uhlíková vlákna v žádné tkáni Žádné abnormality funkce plic
3	10-60	40	6	5	16	35,8 týdnů	Přítomnost nějak nevláknitých částic v plicní tkáni Žádná histopatologie nebo abnormální plicní funkce
1-4	-	50-90	6	5	-	4,12 týdnů	Dočasný zánět plic, reverzibilní po 10 dnech Žádná histopatologická reakce nebo fibróza plicní tkáně

Podle studie [10] projevil krys, které byly vystavené nasekaným uhlíkovým vláknům po dobu 16 týdnů (30 hodin týdně), mírný pokles tělesné hmotnosti a pomalejší respirační frekvenci během prvních čtyř týdnů. Nicméně nebyl hlášen žádný konzistentní efekt na funkci plic. Velikost 20–60 μm a průměr 7 μm zkoumaných vláken při koncentraci 40 f/cm³ nepřinesl kromě proměnlivé respirační frekvence žádnou trvalou toxicitu. U krys, které byly vystaveny částicím z kompozitu na bázi uhlíkových vláken s průměrem 1–4 μm a koncentrací 50-90 f/cm³,

způsobily částice dočasné zánětlivé reakce v plicích krys. Nicméně zánětlivé účinky způsobené uhlíkovými vlákny se zmírily do deseti dnů po expozici. [10]

V sérii studií při obrábění různých kompozitů způsoboval prach z vláken a epoxidu definitivní histopatologickou reakci v plicích krys. Zatímco prach z kompozitu na nástroji měl šířku od 7 do 11 μm , značné množství částic mělo rozsah od 0,8 do 2 μm a malým podílem částic menším než 0,2 μm . Histopatologická reakce a velikost prachových částic naznačují možnost, že prach z kompozitů může být fibrinogenní i u lidí. Jak PAN (polyakrylonitril), tak i prach na bázi grafitu/epoxidu mohou způsobit biologické efekty v lidských plicích, stejně jako prach ovlivňuje plíce krys. Prach z vytvrzených kompozitů může představovat větší hrozbu než běžný prach. Proto je doporučeno vyvinout odsávací systém k efektivnímu odstranění prachu a stanovit tak vztah mezi celkovým a respirabilním množstvím prachu při různých operacích zpracování kompozitu. [10]

Dalším potenciálním zdravotním rizikem spojeným s obráběním kompozitu je expozice kůže. Expozice kůže uhlíkovým a skelným vláknům byla hlášena jako příčina dermatitidy, vyrážek a podráždění kůže a nosu. Opakovaný nebo dlouhodobý kontakt těchto látek s kůží může způsobit již zmíněnou dermatitidu či znečistlivění kůže. Vyrážka vyvolaná expozicí kůže prachu z uhlíkových vláken však může zmizet po několika měsících od expozice. Na rozdíl od uhlíkových a skelných vláken jiná vlákna (například Kevlar) nevykazovala žádný potenciál pro citlivost kůže a nezpůsobovala žádné vážné podráždění kůže kromě mírného podráždění kůže způsobeného mechanickým otěrem. Většina vláken má povlak (což je často epoxidová nebo jiná pryskyřice), který může rovněž způsobit chemické podráždění. Mnoho rozpouštědel používaných v pokročilých kompozitních procesech jsou těkavé, hořlavé a dráždí pokožku či oči. Mezi typické zdravotní obtíže zapříčiněné těmito chemikáliemi jsou podráždění očí a horních cest dýchacích, závratě, ospalost, nevolnost či zvracení. [10] [14]

3 Metodika

Metodika je část práce, která pojednává o přípravě vzorků, jejich obrobení a popisu měření potřebných veličin pro zpracování hodnot podle cíle diplomové práce.

Obráběný materiál byl obroben za různých řezných podmínek, přičemž vznikaly třísky, které byly následně zkoumány z hlediska velikosti a množství uchycených částic na několika místech.

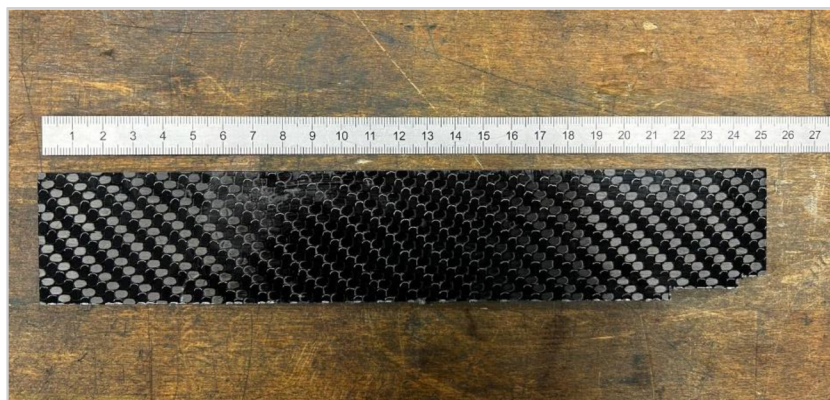
Obrábění vzorků bylo realizováno na tříosém CNC frézovacím centru DMG MORI CMX 600V a měření velikosti částic bylo prováděno na konfokálním mikroskopu Keyence v laboratoři třískových technologií a procesů v Liberci. Pro kvantifikaci velikosti a tvaru prachových částic byly použity snímky ze SEM. Rastrovací elektronový mikroskop (SEM) Tescan Mira 3. Snímky byly v rámci experimentu pořízeny Ing. Pavlem Hanusem, Ph.D. z Technické univerzity v Liberci, Fakulty strojní, Katedry materiálu.

3.1 Obráběný kompozitní materiál

Pro účely této diplomové práce byl zvolen polymerní materiál vyztužený uhlíkovými vlákny s tkaninou z keprové vazby s orientací 90°. Tento konkrétní materiál byl zvolen kvůli svému širokému využití při výrobě odlehčených konstrukcí zejména v leteckém průmyslu. Vzorek byl z ekologického ale i ekonomického hlediska použitý ze zbytkového materiálu z jiné závěrečné práce, jelikož experimentální část této diplomové práce nevyžadovala velké množství materiálu. Konkrétní informace o vlastnostech tohoto kompozitního materiálu jsou uvedeny v Tab. 3.1.

Tab 3.1 Vlastnosti destičky z kompozitního materiálu

Tloušťka [mm]	4,5
Šířka [mm]	42
Délka [mm]	250
Metoda výroby	Vakuová infuze
Matrice	Epoxidová pryskyřice LG120 - GRM Systems s.r.o.
Tužidlo	HG 356 - GRM Systems s.r.o.
Výztuž	CCH600 – Kordkarbon a.s.
Gramáž výztuže [g/cm²]	600
Typ vazby	Keprová – 2x2 cm



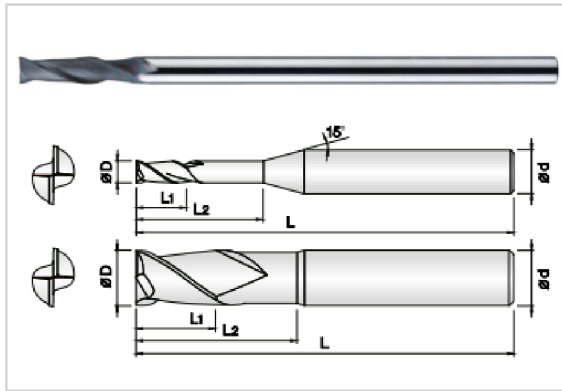
Obr. 3.1 Použitá destička z kompozitního materiálu

3.2 Řezný nástroj

V rámci experimentu byl použit řezný nástroj 2-břítá fréza od firmy PM-TECH s.r.o. Stopková fréza o průměru 6 mm z tvrdokovu s CVD diamantovým povlakem je výrobcem označena jako vhodná pro obrábění grafitu, karbonu či vyztužených plastů, a proto byla zvolena jako vhodný nástroj pro tuto práci. Technické specifikace k použitému nástroji jsou uvedeny v Tab. 3.2.

Tab. 3.2 Technické specifikace frézy

Průměr frézy D_f [mm]	6
Délka řezné části frézy L_l [mm]	18
Délka frézy L_f [mm]	60
Průměr upínací části d_{h5} [mm]	6
Úhel stoupání šroubovice [°]	30
Povlak	CVD
Označení výrobcem	2DEM-060-180-S06



Obr. 3.2 Parametry frézy



Obr. 3.3 Fréza použitá při experimentu

3.3 Řezné podmínky

Pro realizaci experimentu byly navrženy různé řezné podmínky, které jsou uvedeny v Tab. 3.3. Různé řezné podmínky byly voleny z důvodu výzkumu vlivu řezných parametrů na velikost a množství škodlivých prachových částic.

Tab 3.3 Řezné podmínky

Řezné podmínky	v_c [m/min]	f_z [mm]
1.	220	0,05
2.	220	0,1
3.	220	0,2
4.	170	0,05
5.	170	0,1
6.	170	0,2
7.	120	0,05
8.	120	0,1
9.	120	0,2

3.4 Obráběcí stroj

Experimentální část týkající se frézování vzorku byla prováděna na číslicově řízeném tříosém vertikálním centru od výrobce DMG MORI typu CMX 600V. Technické parametry stroje jsou uvedeny v následující Tab. 3.4. Při experimentu bylo použito pouze obvodové nesousledné frézování. Vzorek byl frézován vždy při daných řezných podmínkách s úběrem 4x1 mm. Tedy při jedné řezných podmínkách byly odebrány 4 mm materiálu. Frézování proběhlo bez procesní kapaliny.

Tab. 3.4 Technické parametry DMG MORI CMX 600V

DMG MORI CMX 600V	
Rychlost posuvu v osách X/Y/Z [mm/min]	30 000
Šířka stolu [mm]	900
Délka stolu [mm]	560
Maximální zatížení stolu [kg]	600
Upínací kužel [ISO]	40
Maximální otáčky [ot/min]	12 000
Maximální výkon vřetene [kW]	13
Řídící systém	Sinumerik Operate 4.8Dsl

3.5 Odsávací zařízení

Je všeobecně známo, že při jakémkoliv obrábění vzniká velké množství třísek. U kompozitních materiálů však kromě třísek vzniká i velké množství prachových částic, které jsou velmi problematické nejen kvůli nebezpečí zanesení stroje ale i z hlediska zdraví. Zdraví nebezpečné jsou hlavně prachové částice z polymerů vyztužených uhlíkovými vlákny. Proto je nutné při obrábění těchto kompozitů dbát na ochranu zdraví všech pracovníků, což může do jisté míry zajistit odsávací zařízení. Ze zmíněných důvodů bylo při experimentu použito mobilní odsávací zařízení POC9 M1 jehož parametry jsou uvedeny v Tab. 3.5.

Tab. 3.5 Technické parametry odsávacího zařízení POC9 M1

POC9 M1	
Tlak odsávání [Pa]	900
Odsávané množství vzduchu [m³/h]	1200
Výkon elektromotoru [kW]	0,7
Hlučnost [dB]	65
Minimální velikost zachycení částic [µm]	0,3

Při odsávání prachových částic z místa řezu byl použitý nástavec, který byl vytištěn na 3D tiskárně a můžeme ho vidět na Obr. 3.5.



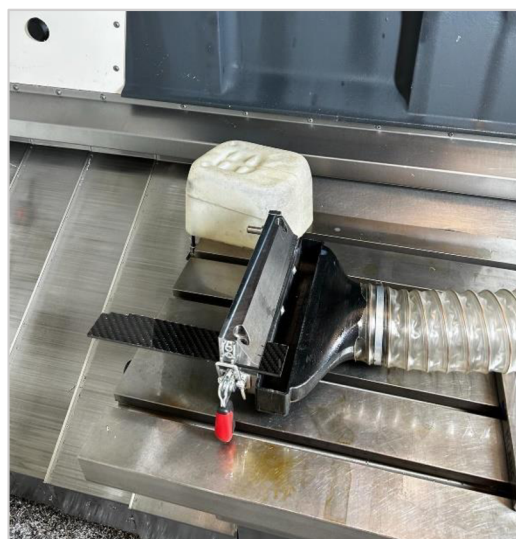
Obr. 3.4 Odsávací zařízení POC9 M1



Obr. 3.5 Nástavec k odsávání prachu

3.6 Upínací přípravek

K upnutí vzorku z kompozitního materiálu byl použitý upínací přípravek, který byl vybaven rychloupínací pákou a již zmíněným nástavcem na odsávání viz Obr. 3.6. Přípravek zajišťuje rychlé a opakované upnutí kompozitních desek a zároveň částečně chrání zdraví pracovníků, protože díky tomuto přípravku se prachové částice tolik nevíří a jsou odsávány pomocí odsávacího zařízení.



Obr. 3.6 Upínací přípravek s nástavcem

3.7 Sběr prachových částic

K zachycení prachových částic z obrobeneho povrchu byla použita netkaná textilie viz Obr 3.7 s parametry uvedenými v Tab. 3.6. Textilie byla nastříhána na rozměry 150x150 mm. Poté byla umístěna mezi nástavec zmíněný v kapitole 3.5 a hadici vedoucí do odsávacího zařízení viz Obr. 3.8, kde sloužila jako filtr.



Obr. 3.7 Filtr z netkané textilie



Obr. 3.8 Ukázka ustavení filtru mezi hadicí a nástavcem

Tab. 3.6 Informace o netkané textílii

PEGATEX – PFNonwovens (netkaná textilie)	
Materiál	Pegatex S anitsat
Číslo materiálu	408243
Číslo šarže	TRZ0A13747
Datum výroby	31.3.2020
Barva	Blue/401
Šířka	0,500 m
Délka	1000 m
Hmotnost	17 gsm

Stejná netkaná textilie byla použita i pro sběr prachových částic z nástroje a okolních ploch obrábění. Prachové částice byly tedy odebírány ze 3 různých míst – z filtru, z nástroje a z obrobku a upínacího přípravku. Po ukončení experimentu byly ještě odebrány částice z ústí

hadice pro další zkoumání viz Obr. 3.9. Při sběru prachových částic byly používány ochranné pomůcky jako rukavice, ochranné brýle a rouška.



Obr. 3.9 Sběr částic z ústí hadice po ukončení experimentu

3.8 Vážení prachových částic

Nejprve byl vždy zvážen obráběný materiál před realizací procesu frézování pro každou řeznou podmínku. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.4, byl materiál frézován za určitých řezných podmínek, 4x po šířce vzorku s úběrem 1 mm. Po každém obráběcím cyklu proběhl odběr prachových částic pomocí textilie a vyjmutí filtru z hadice a následovalo vážení.

Před každým odběrem prachových částic byla netkaná textilie zvážena viz Obr. 3.10 na váze T-Scale Electronics MFG typ NHB-1500+ jejíž parametry můžeme vidět v Tab. 3.7. Po proběhlém obráběcím cyklu proběhlo zvážení textilie a filtru s určitým množstvím prachových částic viz Obr. 3.11. Po zvážení byla netkaná textilie vložena do uzavíratelného pytlíku pro další zkoumání prachových částic.

Tab. 3.7 Parametry váhy T-Scale

Váha s neautomatickou činností T-Scale	
Výrobce	T-Scale Electronics MFG
Typ	NHB-1500+
Evidenční číslo	DM81405
Maximální hmotnost	1500 g
Mínimální hmotnost	0,2 g
<i>d</i>	0,01 g



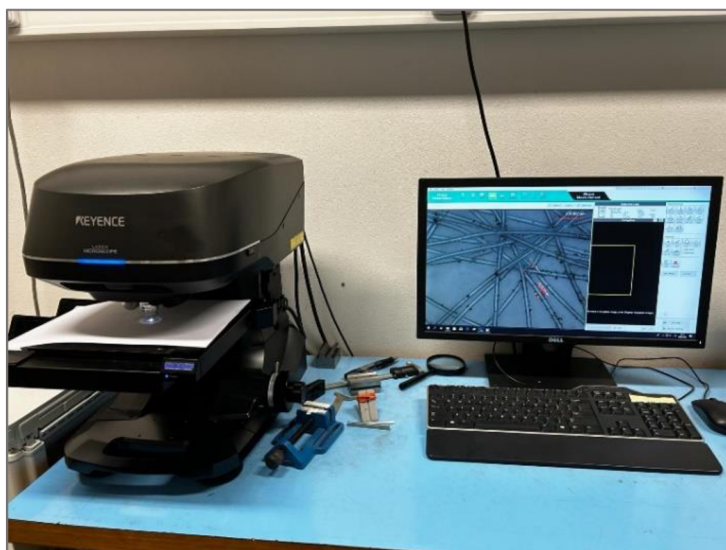
Obr. 3.10 Vážení filtru před frézováním



Obr. 3.11 Vážení filtru po frézování

3.9 Měření opotřebení nástroje a velikosti částic

Opotřebení nástroje a měření velikosti částic probíhalo na konfokálním mikroskopu Keyence VK-X 10000, který můžeme vidět na Obr. 3.12. Konfokální mikroskop umožňuje skenování povrchu či kontrolu povrchu nebo profilu povrchu. Maximální rozlišení mikroskopu je 0,01 nm.



Obr. 3.12 Keyence VK-X 1000

3.10 Podmínky obrábění a měření

V laboratoři, kde je umístěn přístroj VK-X1000 od výrobce Keyence, bylo provedeno měření při teplotě $21\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$. Hodnota $\pm 0,5\text{ °C}$ udává maximální odchylku teploty v laboratoři.

3.11 Statistické vyhodnocení

3.11.1 Vážení

Všechna provedená vážení byla vždy opakována 5x a z odečtených hodnot byl poté vypočten aritmetický průměr s příslušnou nejistotou měření. V Microsoft Excel byly poté vytvořeny příslušné grafy a tabulky.

3.11.2 Měření velikosti

Jak bylo již zmíněno, prachové částice byly odebírány vždy po jednom obráběcím cyklu při jedné řezných podmínkách. Odebrané prachové částice byly poté zkoumány na konfokálním mikroskopu Keyence VK-X 1000 pod zvětšením 20x. Při měření na mikroskopu byla vybrána tříska a změřena 5x. Z těchto dat byl pak udělán aritmetický průměr s nejistotou měření.

4 Experimentální část

Experimentální část práce byla zaměřena na vliv řezných podmínek na velikost a množství prachových částic na filtru, nástroji a obrobku s přípravkem. V podkapitole 4.1 je popsána analýza zachycených prachových částic, která uvádí, jaké typy částic byly při zkoumání zjištěny, dále tato kapitola obsahuje informace o velikosti a množství prachových částic, které byly zachyceny. Podkapitola 4.2 uvádí, jaký má vliv změna řezných podmínek na velikost prachových částic a v podkapitole 4.3 je řešen vliv opotřebení řezného nástroje na velikost částic.

4.1 Analýza zachycených prachových částic

Mikroskopická analýza odhalila přítomnost 3 typů prachových částic. Rozsahy velikosti prachových částic jednotlivých typů jsou uvedeny v Tab. 4.1. Typy prachových částic jsou ukázány na Obr. 4.1. a Obr. 4.2. Modrou barvou jsou označené shluky vláken tzv. **fragmenty**, zelenou barvou **volná vlákna** a červenou barvou **jemné prachové částice**, což je směs matrice a vláken.

Tab. 4.1 Typy a velikost zachycených prachových částic

Velikost prachových částic [μm] \pm nejistota měření		
Typ částic	Nejmenší velikost prachových částic	Největší velikost prachových částic
Jemný prach	$2,2 \pm 0,1$	$12,2 \pm 0,3$
Volná vlákna	$9,8 \pm 0,3$	$98,7 \pm 0,6$
Fragmenty	$59,5 \pm 0,5$	$354,8 \pm 0,9$



Obr. 4.1 Typy prachových částic z konfokálního mikroskopu

Obr. 4.2 Typy prachových částic ze SEM

4.1.1 Analýza prachových částic zachycených na filtru

Monitorování velikosti prachových částic na filtru ukazuje různou velikost částic od 2,2 - 98,7 μm pro odlišné posuvy na zub a řezné rychlosti. Nejmenší a největší velikost prachových částic v tabulce jsou označeny červenou barvou. Hodnoty jsou uvedeny v jednotkách μm s odpovídající nejistotou měření.

4.1.1.1 Velikost prachových částic zachycených na filtru

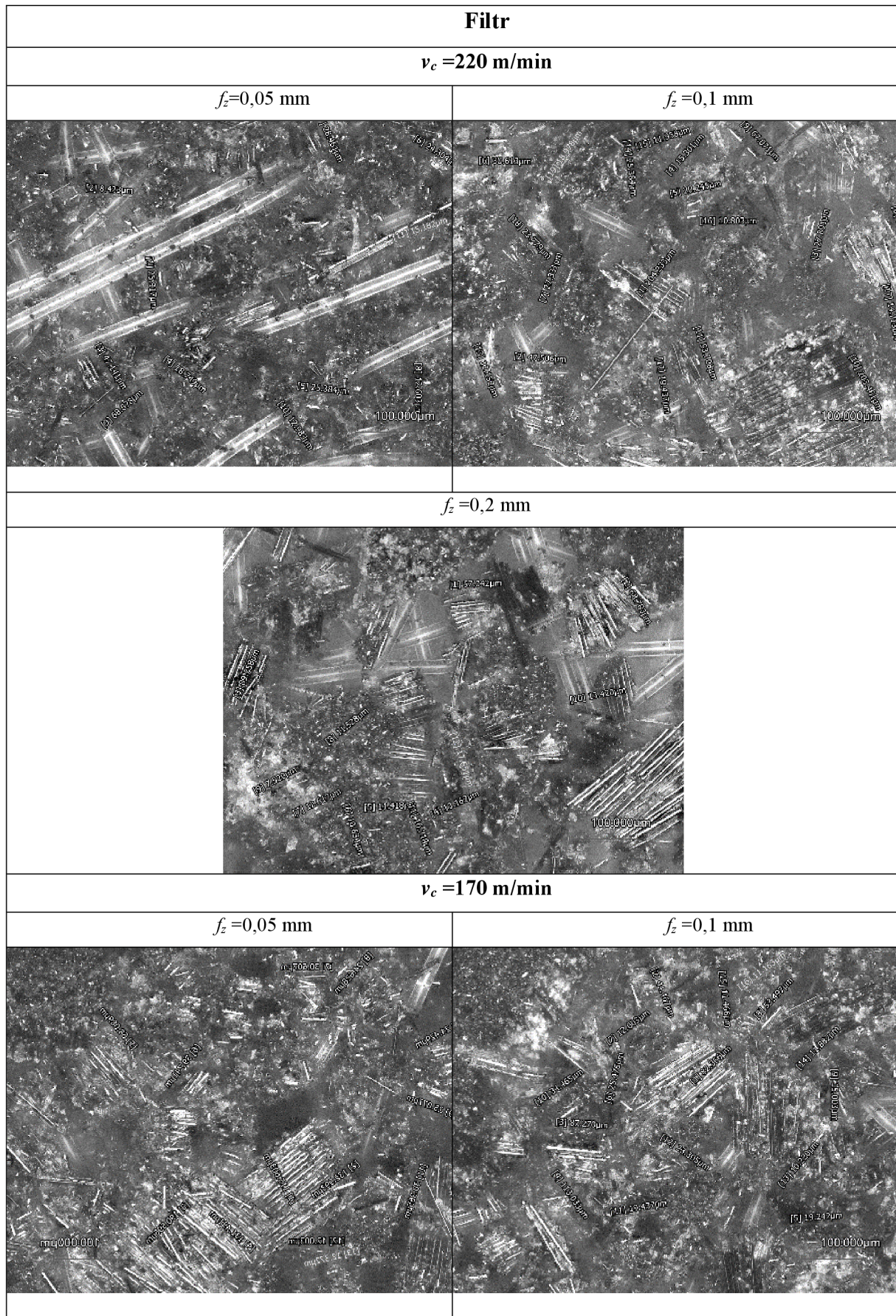
Z následující tabulky 4.2 vyplývá, že největší prachová částice s velikostí 98,7 μm i nejmenší s velikostí 2,2 μm byly naměřeny při posuvu na zub 0,2 mm. Nejmenší velikost prachových částic byla změřena při řezné rychlosti 120 m/min a největší při řezné rychlosti 220 m/min.

Tab. 4.2 Velikost částic zachycených na filtru

Velikost prachových částic na Filtru [μm] \pm nejistota měření						
$v_c = 220 \text{ m/min}$						
	$f_z=0,05 \text{ mm}$		$f_z=0,1 \text{ mm}$		$f_z=0,2 \text{ mm}$	
	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice
<2 μm	X	X	X	X	X	X
2-5 μm	X	X	X	X	4,8 \pm 0,4	4,8 \pm 0,4
5-10 μm	8,2 \pm 0,3	9,8 \pm 0,5	7,3 \pm 0,5	9,8 \pm 0,4	6,3 \pm 0,6	9,9 \pm 0,7
>10 μm	10,2 \pm 0,8	81,9 \pm 0,9	10,6 \pm 0,8	68,1 \pm 0,7	10,4 \pm 0,5	98,7 \pm 0,9
$v_c = 170 \text{ m/min}$						
	$f_z=0,05 \text{ mm}$		$f_z=0,1 \text{ mm}$		$f_z=0,2 \text{ mm}$	
	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice
<2 μm	X	X	X	X	X	X
2-5 μm	X	X	4,9 \pm 0,3	4,9 \pm 0,3	4,9 \pm 0,5	4,9 \pm 0,7
5-10 μm	7,5 \pm 0,4	7,8 \pm 0,4	5,7 \pm 0,4	8,9 \pm 0,8	5,2 \pm 0,9	9,7 \pm 0,6
>10 μm	10,6 \pm 0,9	76,8 \pm 0,7	10,1 \pm 0,9	69,2 \pm 1,0	10,6 \pm 0,8	97,4 \pm 1,1
$v_c = 120 \text{ m/min}$						
	$f_z=0,05 \text{ mm}$		$f_z=0,1 \text{ mm}$		$f_z=0,2 \text{ mm}$	
	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice
<2 μm	X	X	X	X	X	X
2-5 μm	3,8 \pm 0,6	3,8 \pm 0,4	3,5 \pm 0,3	4,3 \pm 0,3	2,2 \pm 0,3	4,2 \pm 0,3
5-10 μm	8,2 \pm 0,5	9,3 \pm 0,3	5,4 \pm 0,4	9,6 \pm 0,4	6,7 \pm 0,3	9,8 \pm 0,2
>10 μm	10,4 \pm 0,6	68,8 \pm 0,4	10,5 \pm 0,4	63,2 \pm 0,7	10,3 \pm 0,5	96,3 \pm 0,8

V následující tabulce 4.3 můžeme vidět obrázky s velikostmi prachových částic, které byly zachycené na mikroskopu pro různé řezné podmínky. Při všech řezných podmínkách se prokázala přítomnost všech 3 typů prachových částic. Na filtru bylo zaznamenáno velké množství tzv. fragmentů viz Tab. 4.2.

Tab. 4.3 Obrázky prachových částic zachycených na filtru



$v_c = 170 \text{ m/min}$

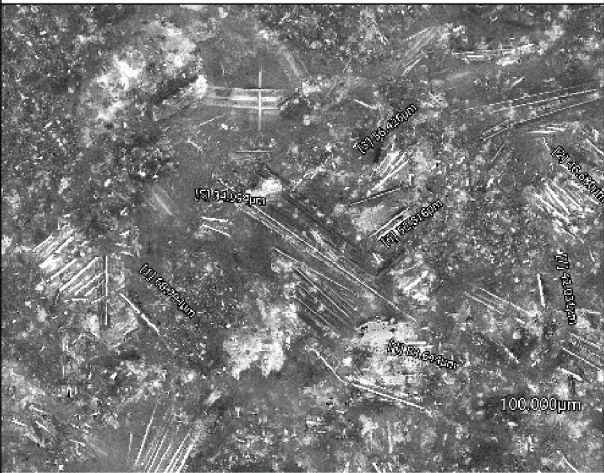
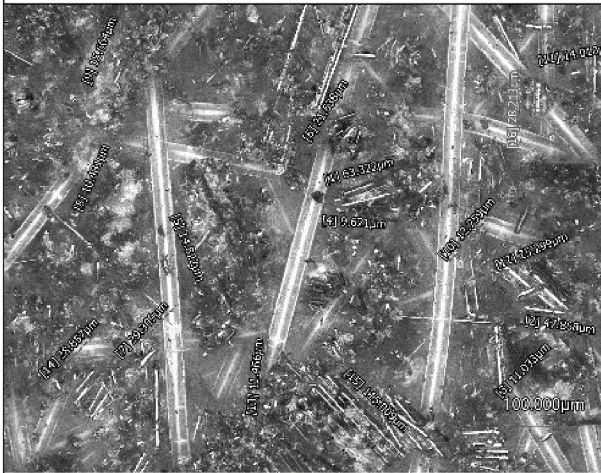
$f_z = 0,2 \text{ mm}$



$v_c = 120 \text{ m/min}$

$f_z = 0,05 \text{ mm}$

$f_z = 0,1 \text{ mm}$

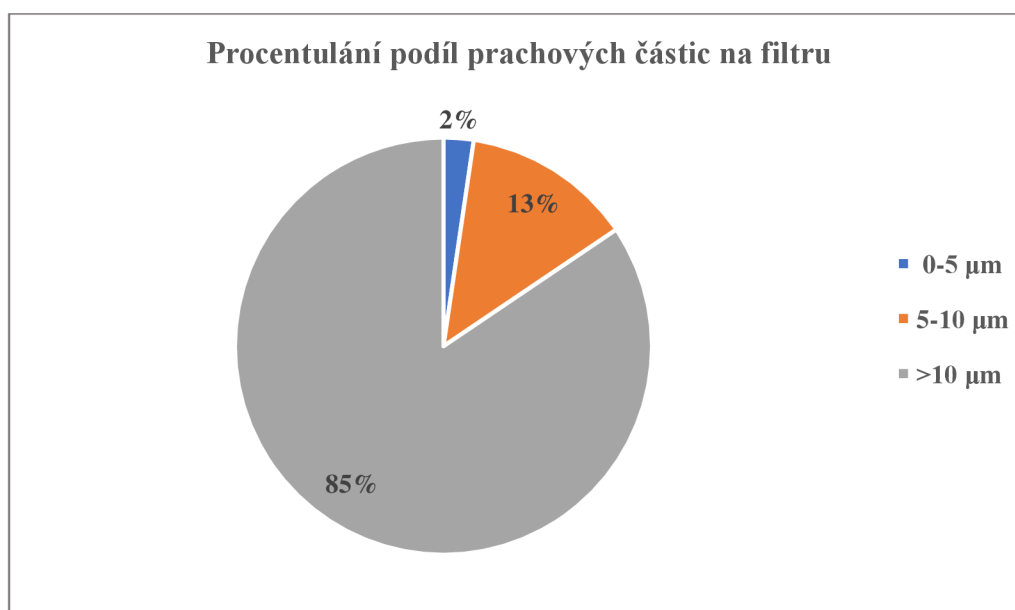


$f_z = 0,2 \text{ mm}$



4.1.1.2 Distribuce prachových částic na filtru

Při zkoumání prachových částic byl zkoumán procentuální podíl částic menší než 10 μm a to z toho důvodu, že je to limitní hodnota pro vdechnutí částic. Ze zachyceného množství prachových částic na filtru bylo zjištěno (viz Obr. 4.3.), že pouze 2 % prachových částic mělo velikost menší než 5 μm . Procentuální podíl prachových částic s velikostí od 5 do 10 μm byl 13 %. Dále 85 % prachových částic bylo větších než 10 μm , z čehož vyplývá, že procentuální podíl částic, které jsou pro člověka škodlivé (tedy pod 10 μm) je mnohem menší než procentuální podíl neškodlivých částic.

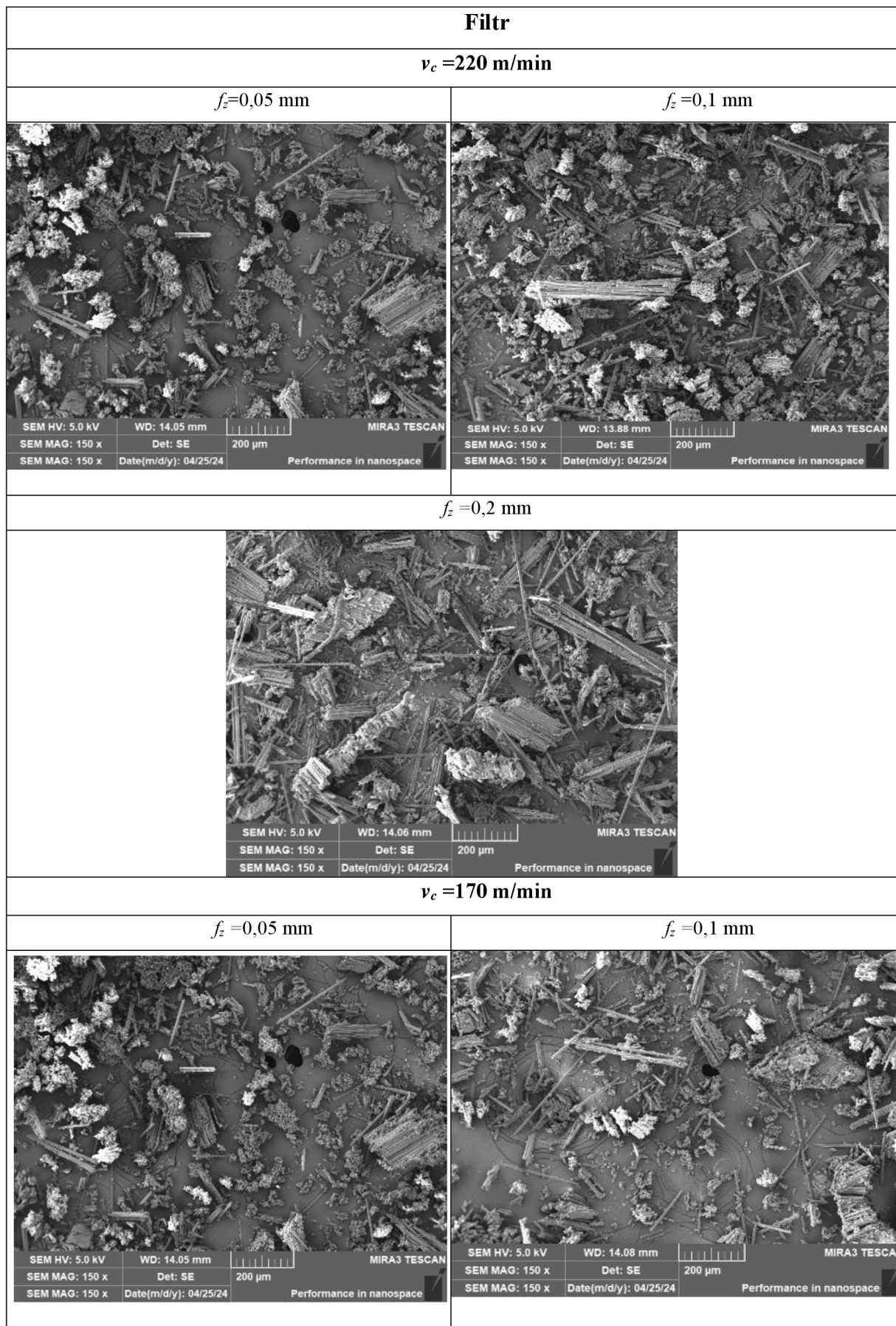


Obr. 4.3 Procentuální podíl prachových částic na filtru

4.1.1.3 SEM analýza

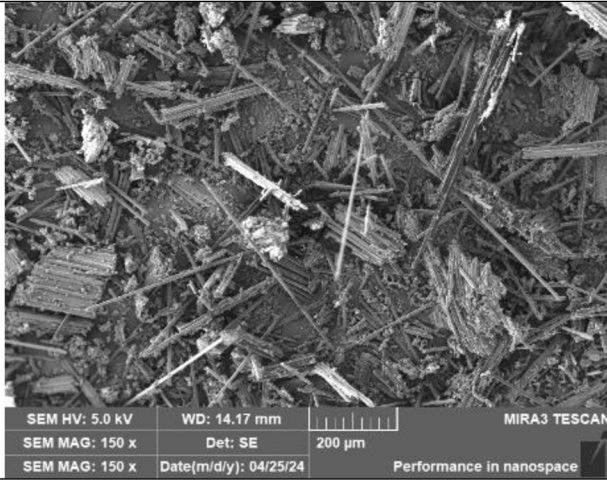
Na základě analýzy na rastrovacím elektronovém mikroskopu (SEM) bylo zjištěno následující viz Tab. 4.4. Adheze mezi polymerní matricí a uhlíkovými vlákny je malá, což může být zapříčiněno například nedostatečným prosycením vláken při výrobě. Dále bylo zjištěno, že vlákna byla štěpena příčně nebo pod úhlem, tedy se špičatým zakončením. Vlákna štěpená pod úhlem byla štěpena pod úhlem 40-60°. Vlákna mají průměr 5 μm . Nejmenší částice vznikají odštípnutím kousků na koncích vláken. Nebyl pozorován významný vliv řezných podmínek na štěpení vláken. Analýza také potvrdila výskyt 3 typů prachových částic – shluky vláken neboli fragmenty, jemné prachové částice generované odštípnutím z konců vláken, které jsou obaleny matricí, a volná vlákna různých velikostí.

Tab. 4.4 Obrázky prachových částic zachycených na filtru ze SEM



$v_c = 170 \text{ m/min}$

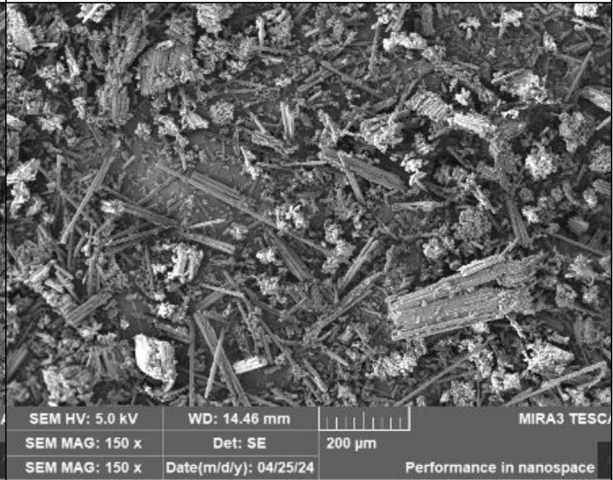
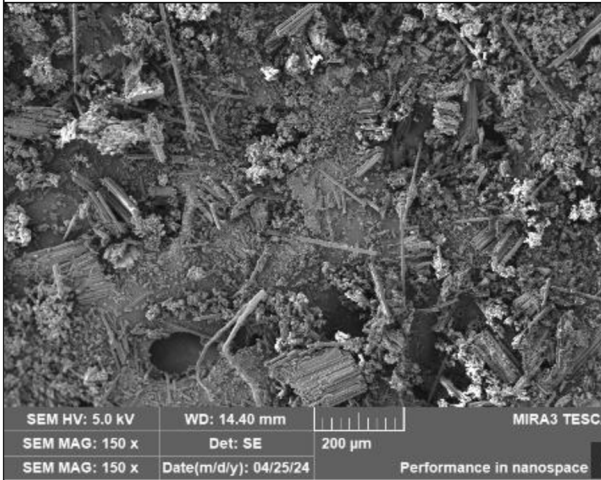
$f_z = 0,2 \text{ mm}$



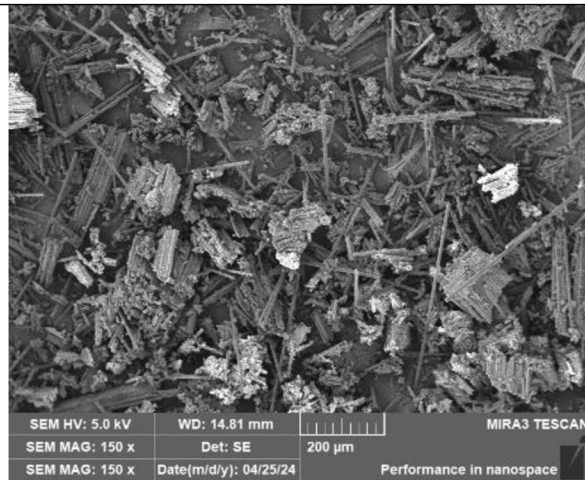
$v_c = 120 \text{ m/min}$

$f_z = 0,05 \text{ mm}$

$f_z = 0,1 \text{ mm}$



$f_z = 0,2 \text{ mm}$



4.1.2 Analýza prachových částic zachycených na nástroji

Monitorováním velikosti prachových částic zachycených na nástroji byla zjištěna různá velikost prachových částic od 1,7 – 40,4 μm pro různé řezné rychlosti a posuvy na zub. Nejmenší a největší velikost prachových částic v tabulce jsou označeny červenou barvou. Veškeré hodnoty jsou uvedeny v jednotkách μm s odpovídající nejistotou měření.

4.1.2.1 Velikost prachových částic zachycených na nástroji

Z tabulky 4.5 vyplývá, že největší velikost prachových částic na řezném nástroji byla zachycena při řezné rychlosti 170 m/min s posuvem na zub 0,05 mm a to 40,4 μm . Na řezném nástroji byly zachyceny částice menší než 2 μm pouze za jediných řezných podmínek, kdy byla použita nejnižší řezná rychlost 120 m/min a nejvyšší posuv na zub 0,2 mm. Při těchto řezných podmínkách byly naměřeny prachové částice o velikosti 1,7 μm .

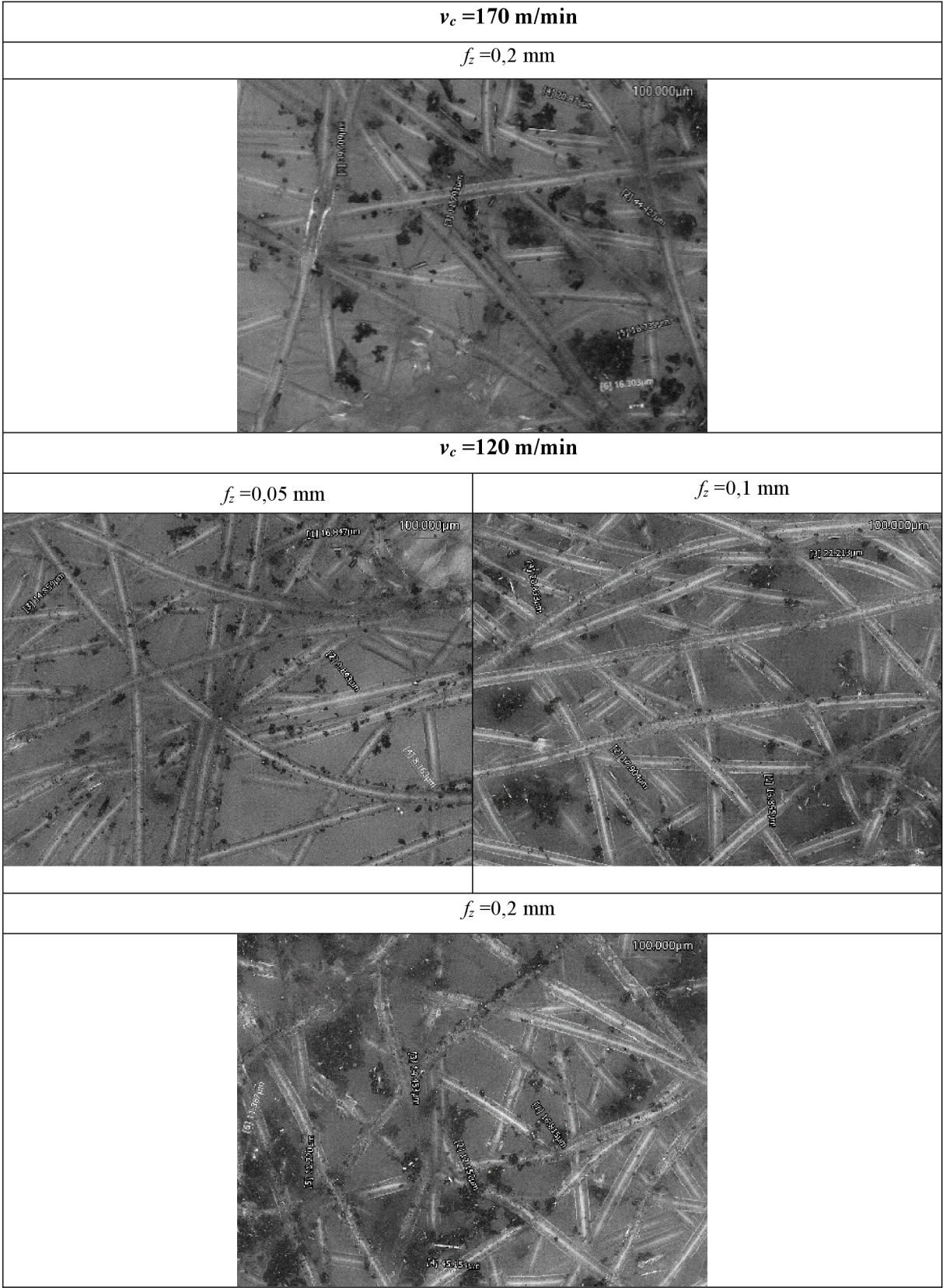
Tab. 4.5 Velikost částic zachycených na nástroji

Velikost prachových částic na Nástroji [μm] \pm nejistota měření						
$v_c = 220 \text{ m/min}$						
	$f_z = 0,05 \text{ mm}$		$f_z = 0,1 \text{ mm}$		$f_z = 0,2 \text{ mm}$	
	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice	Největší částice	Nejmenší částice
<2 μm	X	X	X	X	X	X
2-5 μm	3,5 \pm 0,5	5,0 \pm 0,5	2,8 \pm 0,3	4,6 \pm 0,3	2,4 \pm 0,3	4,8 \pm 0,4
5-10 μm	5,1 \pm 0,4	9,2 \pm 0,2	5,3 \pm 0,5	9,3 \pm 0,5	5,2 \pm 0,6	9,1 \pm 0,5
> 10 μm	10,1 \pm 0,6	38,3 \pm 0,7	10,3 \pm 0,4	22,2 \pm 0,7	10,4 \pm 0,4	30,1 \pm 0,6
$v_c = 170 \text{ m/min}$						
	$f_z = 0,05 \text{ mm}$		$f_z = 0,1 \text{ mm}$		$f_z = 0,2 \text{ mm}$	
	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice
<2 μm	X	X	X	X	X	X
2-5 μm	X	X	4,6 \pm 0,2	4,6 \pm 0,2	4,8 \pm 0,3	4,8 \pm 0,3
5-10 μm	5,3 \pm 0,6	9,6 \pm 0,6	5,7 \pm 0,7	9,9 \pm 0,7	5,5 \pm 0,6	9,5 \pm 0,7
> 10 μm	10,2 \pm 0,5	40,4 \pm 0,7	10,4 \pm 0,8	30,6 \pm 0,6	10,5 \pm 0,7	39,6 \pm 0,9
$v_c = 120 \text{ m/min}$						
	$f_z = 0,05 \text{ mm}$		$f_z = 0,1 \text{ mm}$		$f_z = 0,2 \text{ mm}$	
	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice
<2 μm	X	X	X	X	1,7 \pm 0,3	2,0 \pm 0,4
2-5 μm	2,2 \pm 0,5	4,9 \pm 0,4	2,1 \pm 0,9	5,0 \pm 0,7	2,3 \pm 0,2	4,7 \pm 0,6
5-10 μm	5,1 \pm 0,6	9,8 \pm 0,7	5,4 \pm 0,5	9,1 \pm 0,8	5,5 \pm 0,5	8,7 \pm 0,5
> 10 μm	10,8 \pm 0,7	16,9 \pm 0,8	11,5 \pm 0,6	16,7 \pm 0,6	10,2 \pm 0,6	17,4 \pm 0,4

Z obrázků v Tab. 4.6 je patrné, že na nástroji jsou zachycené pouze 2 typy prachových částic, a to jemný prach a volná vlákna, kterých je oproti jemnému prachu mnohem méně.

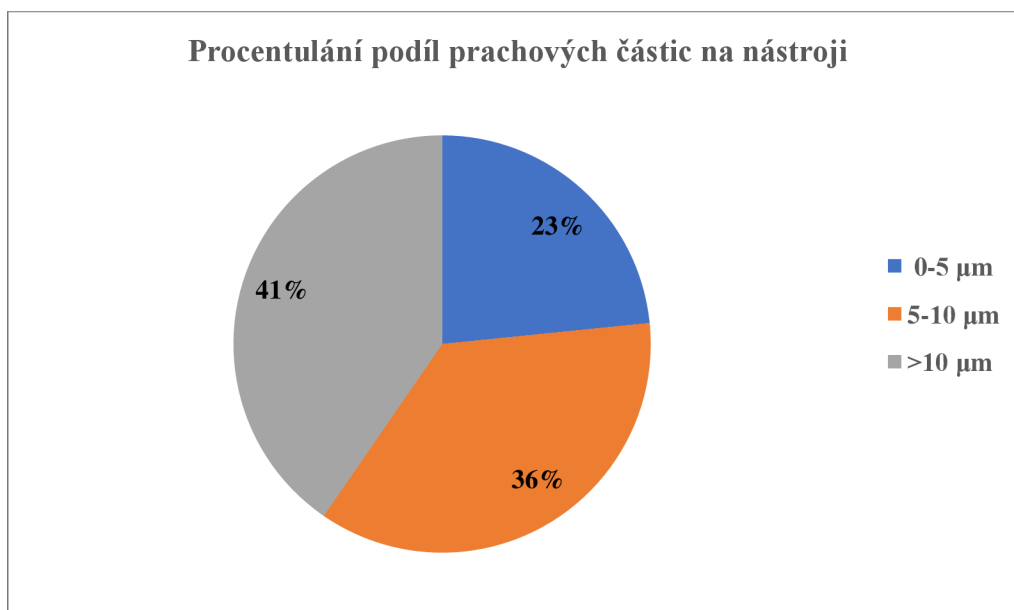
Tab. 4.6 Obrázky prachových částic zachycených na řezném nástroji

Řezný nástroj	
$v_c = 220 \text{ m/min}$	
$f_z = 0,05 \text{ mm}$	$f_z = 0,1 \text{ mm}$
$f_z = 0,2 \text{ mm}$	
$v_c = 170 \text{ m/min}$	
$f_z = 0,05 \text{ mm}$	$f_z = 0,1 \text{ mm}$



4.1.2.2 Distribuce částic na nástroji

Na nástroji bylo zachyceno oproti filtru mnohem méně prachových částic, a to z důvodu použitého odsávacího zařízení. To zachytilo nejvíce prachových částic, díky použitému filtru. Opět byly zkoumány částice s rozměrem pod 10 μm z důvodu rizika vdechnutí člověkem. Ze zachycených prachových částic bylo vyhodnoceno, že 23 % prachových částic mělo rozměr menší než 5 μm , 36 % prachových částic se pohybovalo mezi 5 až 10 μm a 41 % prachových částic bylo větších než 10 μm viz Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Procentuální podíl prachových částic na nástroji

4.1.3 Analýza prachových částic zachycených z obrobené desky a přípravku

Při monitorování velikosti prachových částic zachycených na obrobené desce a přípravku byly zjištěny různé velikosti částic od 2,4 – 42,9 μm pro různé posuvy na zub a řezné rychlosti. Hodnoty jsou uváděny v μm s příslušnou nejistotou měření. Nejmenší a největší částice jsou zvýrazněny červenou barvou.

4.1.3.1 Velikost prachových částic zachycených na obrobené desce a přípravku

Usazené prachové částice byly odebírány z obrobené desky a přípravku. Na těchto plochách byly zaznamenány prachové částice viz Tab 4.7 s nejmenšími rozměry 2,4 μm u řezné rychlosti 170 m/min s posuvem na zub 0,05 mm. Částice s největším rozměrem 42,9 μm byly zaznamenány při řezné rychlosti 220 m/min a posuvu na zub 0,1 mm. Na těchto plochách nebyly ani při jedné řezných podmínkách zachyceny prachové částice menší než 2 μm .

Tab. 4.7 Velikost částic zachycených na obrobené desce a přípravku

Velikost prachových částic na Obrobku a Přípravku [μm] \pm nejistota měření						
$v_c = 220 \text{ m/min}$						
	$f_z = 0,05 \text{ mm}$		$f_z = 0,1 \text{ mm}$		$f_z = 0,2 \text{ mm}$	
	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice
<2 μm	X	X	X	X	X	X
2-5 μm	X	X	4,2 \pm 0,3	4,2 \pm 0,3	X	X
5-10 μm	5,2 \pm 0,5	8,2 \pm 0,6	5,9 \pm 0,4	9,7 \pm 0,4	7,0 \pm 0,5	7,4 \pm 0,5
>10 μm	10,3 \pm 0,3	35,1 \pm 0,5	10,5 \pm 0,3	42,9 \pm 0,4	12,9 \pm 0,6	33,5 \pm 0,4
$v_c = 170 \text{ m/min}$						
	$f_z = 0,05 \text{ mm}$		$f_z = 0,1 \text{ mm}$		$f_z = 0,2 \text{ mm}$	
	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice
<2 μm	X	X	X	X	X	X
2-5 μm	2,4 \pm 0,2	4,9 \pm 0,2	3,7 \pm 0,5	4,69 \pm 0,5	2,4 \pm 0,4	4,8 \pm 0,5
5-10 μm	5,3 \pm 0,3	8,9 \pm 0,4	5,1 \pm 0,4	7,64 \pm 0,4	5,6 \pm 0,3	9,5 \pm 0,5
>10 μm	10,2 \pm 0,2	36,5 \pm 0,3	11,8 \pm 0,4	28,5 \pm 0,5	10,2 \pm 0,5	28,7 \pm 0,3
$v_c = 120 \text{ m/min}$						
	$f_z = 0,05 \text{ mm}$		$f_z = 0,1 \text{ mm}$		$f_z = 0,2 \text{ mm}$	
	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice	Nejmenší částice	Největší částice
<2 μm	X	X	X	X	X	X
2-5 μm	3,2 \pm 0,3	4,7 \pm 0,3	4,2 \pm 0,3	4,8 \pm 0,3	4,4 \pm 0,5	4,9 \pm 0,3
5-10 μm	5,4 \pm 0,6	9,9 \pm 0,4	5,2 \pm 0,6	9,7 \pm 0,7	5,4 \pm 0,4	9,1 \pm 0,5
>10 μm	11,9 \pm 0,5	40,1 \pm 0,6	10,8 \pm 0,3	38,2 \pm 0,9	14,1 \pm 0,5	34,3 \pm 0,9

Na obrobené desce a přípravku byly zachyceny převážně 2 typy prachových částic – jemné částice a volná vlákna. Zřídka se pak vyskytly tzv. fragmenty, které můžeme vidět zachycené na obrázcích v Tab. 4.8 pro řeznou rychlost 220 m/min a posuvech na zub 0,05 mm a 0,2 mm.

Tab. 4.8 Obrázky částic zachycených na obrobené desce a přípravku

Obrobená deska s přípravkem	
$v_c = 220 \text{ m/min}$	
$f_z = 0,05 \text{ mm}$	$f_z = 0,1 \text{ mm}$
$f_z = 0,2 \text{ mm}$	
$v_c = 170 \text{ m/min}$	
$f_z = 0,05 \text{ mm}$	$f_z = 0,1 \text{ mm}$

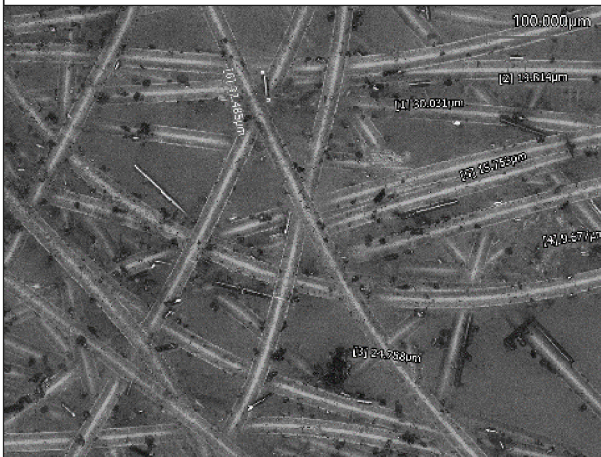
$v_c = 170 \text{ m/min}$

$f_z = 0,2 \text{ mm}$

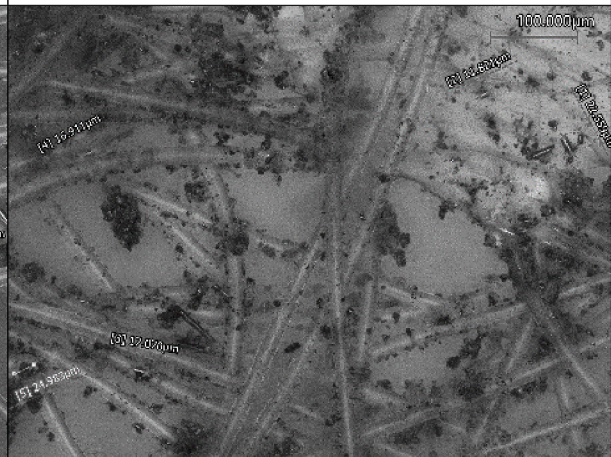


$v_c = 120 \text{ m/min}$

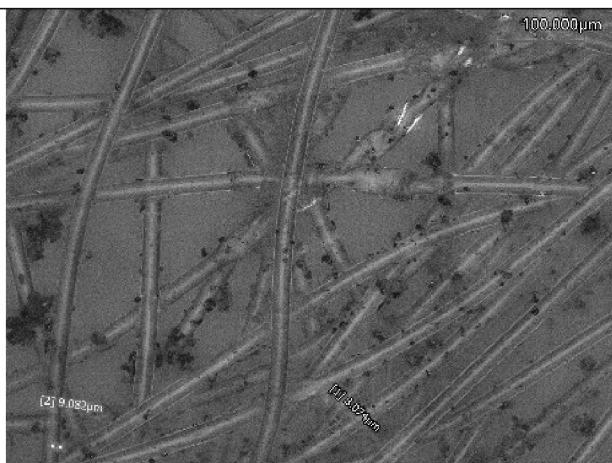
$f_z = 0,05 \text{ mm}$



$f_z = 0,1 \text{ mm}$

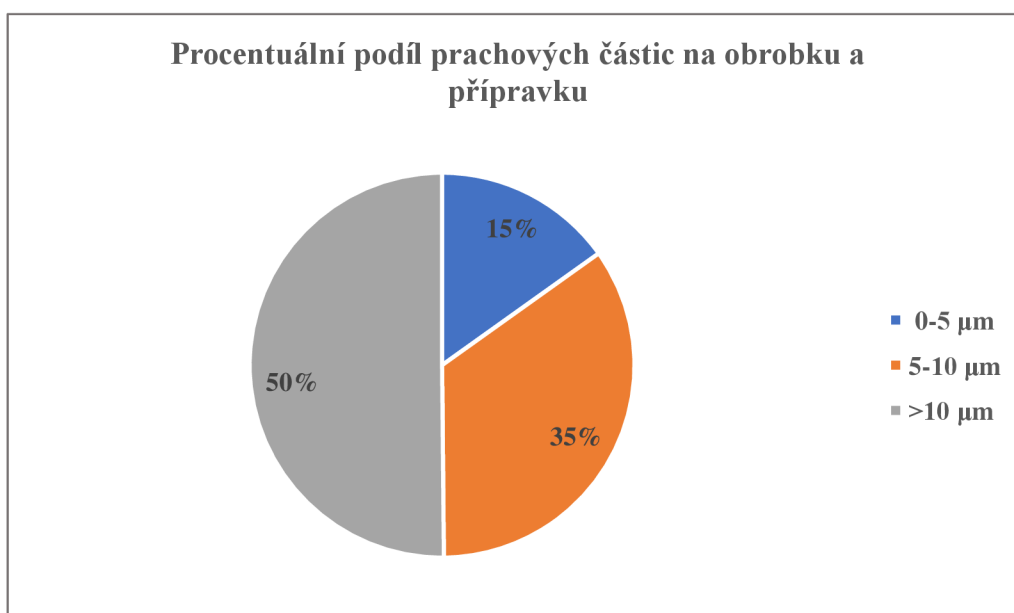


$f_z = 0,2 \text{ mm}$



4.1.3.2 Distribuce částic na obrobku a přípravku

Největší podíl prachových částic na obrobku a přípravku, tedy 50 % viz Obr. 4.5, měly částice s velikostí větší než 10 μm , což je limitní hodnota pro vdechnutí prachových částic. Prachové částice s velikostí v rozsahu 5 až 10 μm měly podíl 35 %. Prachových částic menších než 5 μm pak bylo zjištěno pouze 15 %.



Obr. 4.5 Procentuální podíl prachových částic na obrobku s přípravkem

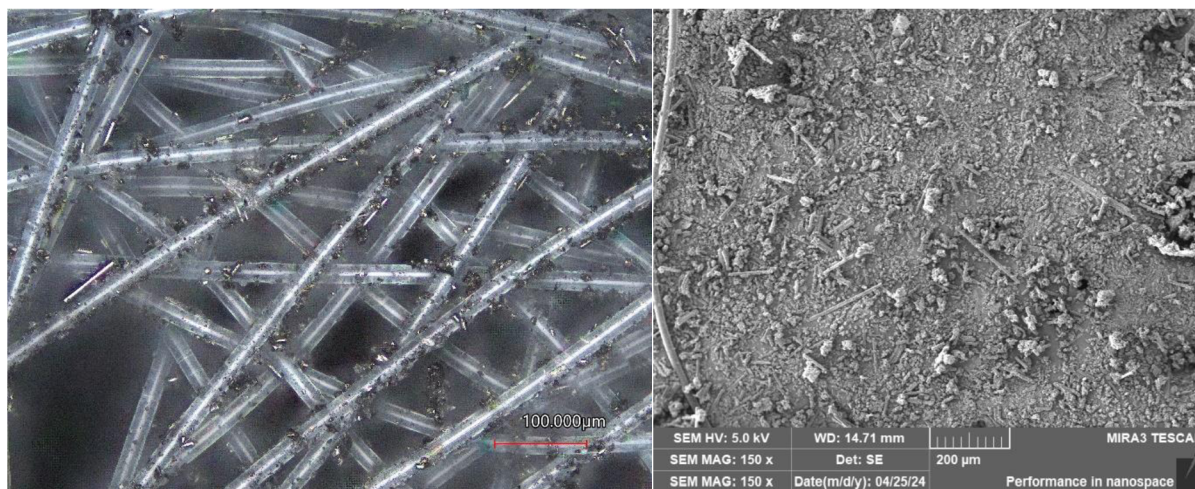
4.1.4 Analýza prachových částic zachycených za filtrem

Jelikož filtr nezachytil všechny prachové částice, byla zjišťována velikost i těchto nezachycených částic. Tyto částice byly usazeny v ústí hadice odsávacího zařízení odkud byly po provedeném experimentu odebrány pomocí textilie. V Tab. 4.9 jsou uvedeny naměřené hodnoty odebraných částic uvedené v jednotkách μm s odpovídající nejistotou měření.

Tab. 4.9 Velikost prachových částic zachycených na ústí hadice

Velikost prachových částic na hadici [μm] \pm nejistota měření		
	Nejmenší částice	Největší částice
<2 μm	1,7 \pm 0,4	2,0 \pm 0,6
2-5 μm	2,1 \pm 0,5	4,9 \pm 0,6
5-10 μm	5,1 \pm 0,6	9,6 \pm 0,4
> 10 μm	10,2 \pm 0,5	66,5 \pm 0,9

Na Obr. 4.6 a Obr. 4.7 jsou vidět částice nezachycené filtrem a tedy usazené na hadici. Na tomto místě byly zachyceny mnohem menší prachové částice a vlákna oproti předchozím zkoumaným místům. Tyto částice jsou tedy velmi nebezpečné, ať už z hlediska škodlivosti na člověka, tak i kvůli možnému poškození stroje. Částice s takto malými rozměry jsou lehké a poletují ve vzduchu, tudíž je tak člověk může snadno vdechnout. Usazené částice se také mohou dostat do obráběcího stroje, kde díky svým abrazivním schopnostem a vodivosti vláken mohou způsobit poškození. Odsávací zařízení odsálo velké množství škodlivých částic, můžeme tedy říci, že má při procesu velký význam.

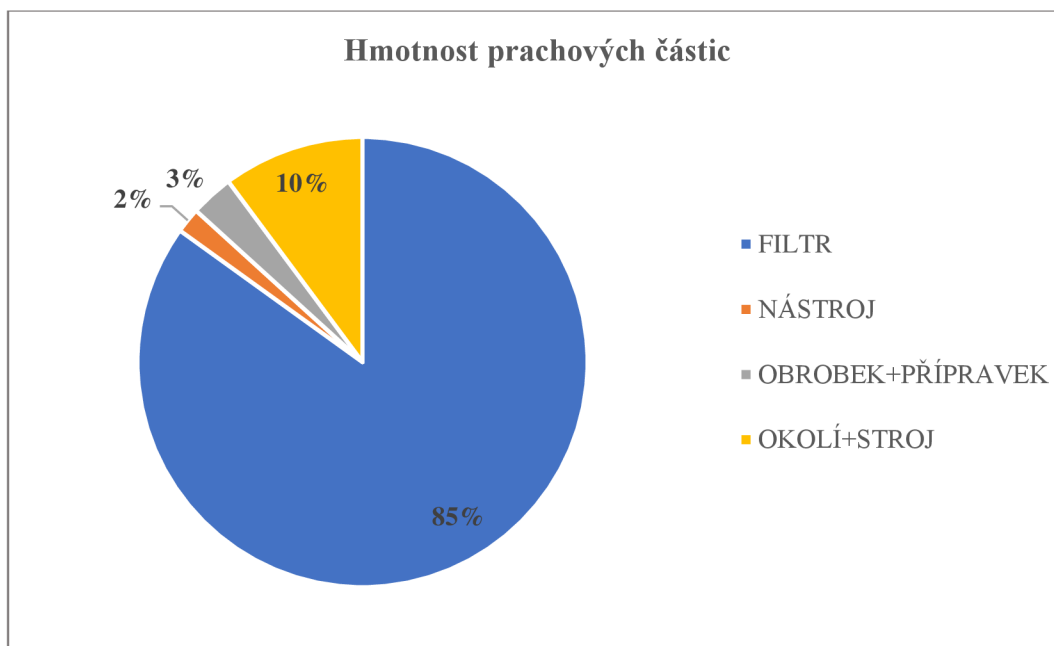


Obr. 4.6 Zachycené částice z konfokálního mikroskopu

Obr. 4.7 Zachycené částice na SEM –
Rastrovacím elektronovém mikroskopu

4.1.5 Hmotnost prachových částic

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3. Metodika, bylo prováděno vážení prachových částic odebraných z filtru, nástroje a obrobku s přípravkem. Procentuální podíl zachycený na jednotlivých místech můžeme vidět na Obr. 4.8. Nejvíce prachových částic bylo zachyceno díky odsávacímu zařízení na filtru a to 85 % z celkové hmotnosti odebrané z materiálu. Prachové částice zachycené na nástroji obsahují pouze 2 % celkového množství a částice zachycené na nástroji a přípravku pak jen 3 %. Do celkové hmotnosti odebraného materiálu zbývá 10 %, můžeme tedy jen předpokládat, že tyto částice byly usazené ve stroji, poletovaly ve vzduchu či nebyly zachyceny filtrem a dostaly se tak do odsávacího zařízení.



Obr. 4.8 Hmotnost prachových částic

4.1.6 Shrnutí

Monitorování prachu ukazuje přítomnost různých typů a velikostí prachových částic pro všechny řezné podmínky. Největší množství částic bylo díky odsávacímu zařízení zachyceno na filtru. Dále bylo odhaleno, že největší množství částic je právě těch nejméně škodlivých, tedy nad 10 μm . Na filtru bylo těchto částic (nad 10 μm) zachyceno 85 %, na nástroji pak pouze 41 % a na obrobku s přípravkem 50 %. Z toho nám vyplývá, že na nástroji ulpívají převážně částice škodlivé (menší než 10 μm). Částice zachycené na filtru měly rozměry od 2,2 μm až 98,7 μm . Prachové částice na nástroji se pohybovaly v rozmezí od 1,7 μm až 40,4 μm a na obrobku s přípravkem v rozmezí od 2,4 μm až 42,9 μm . Nejmenší, a tedy i nejškodlivější částice byly zachyceny na ústí hadice v odsávacím zařízení. Tyto částice nezachytil umístěný filtr. Velikost těchto částic se pohybovala v rozmezí 1,7 μm až 66,5 μm .

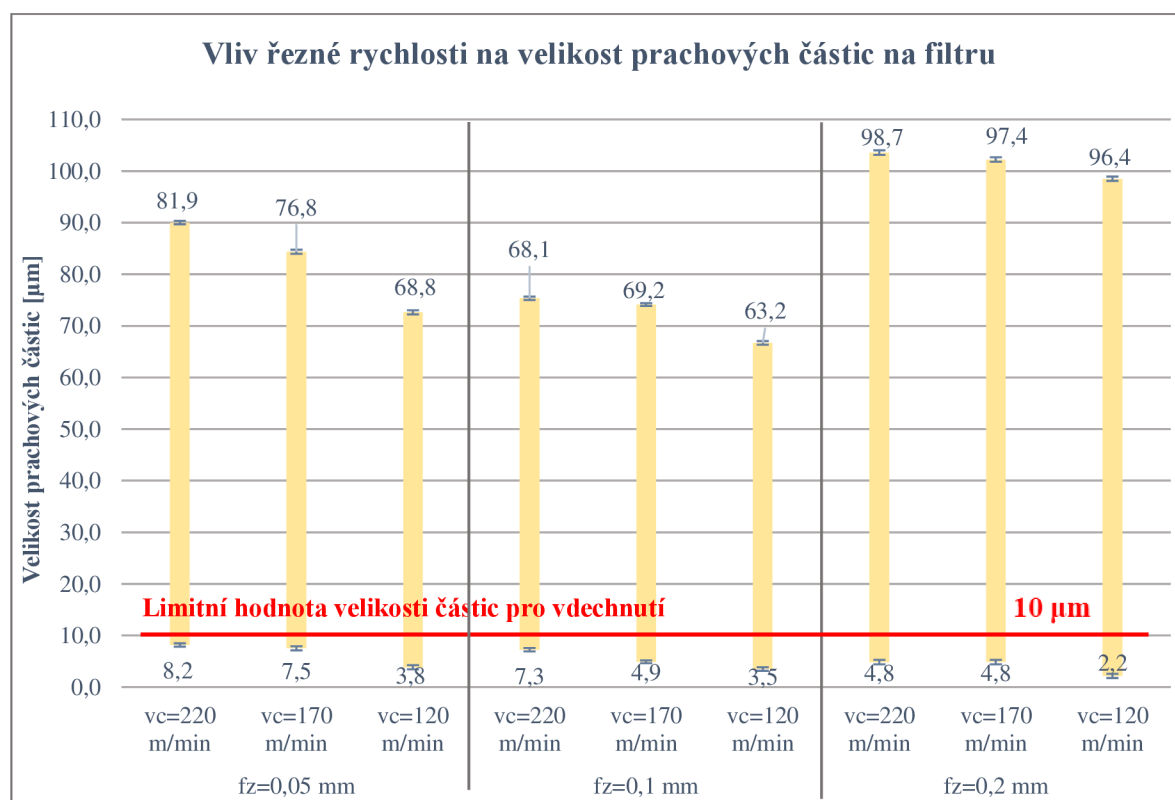
4.2 Vliv řezných podmínek na velikost prachových částic

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.3 řezná rychlost a posuv mohou velmi ovlivnit velikost prachových částic vzniklých při obrábění. Proto byl v rámci tohoto výzkumu zkoumán jejich vliv při zachování neměnného řezného nástroje s danou geometrií. Jejich vliv byl zkoumán na částicích zachycených filtrem, odebraných z nástroje a odebraných z obrobku s přípravkem.

4.2.1 Vliv řezné rychlosti na velikost prachových částic

4.2.1.1 Filtr

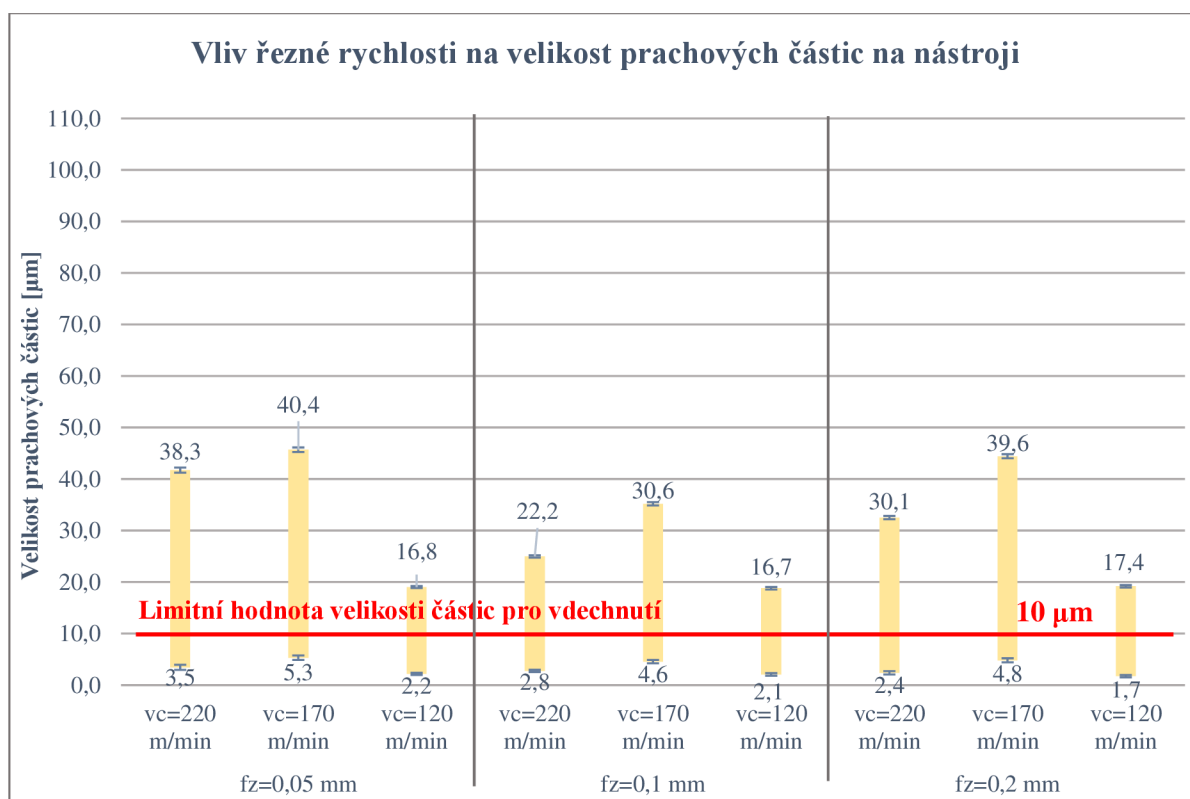
Z Obr. 4.9 je patrné, že se snižující se řeznou rychlostí se velikost prachových částic zmenšovala. Při řezné rychlosti 120 m/min byly naměřeny nejmenší velikosti částic. Nejmenší hodnoty byly v rozsahu od 2,2 až 3,8 μm a největší hodnoty 63,2 až 96,4 μm při různých posuvech na zub. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo při nejvyšší rychlosti 220 m/min, kde se rozsah minimálních hodnot pohyboval od 4,8 až 8,2 μm a rozsah maximálních hodnot 68,1 až 98,7 μm .



Obr. 4.9 Vliv řezné rychlosti na velikost prachových částic na filtru

4.2.1.2 Řezný nástroj

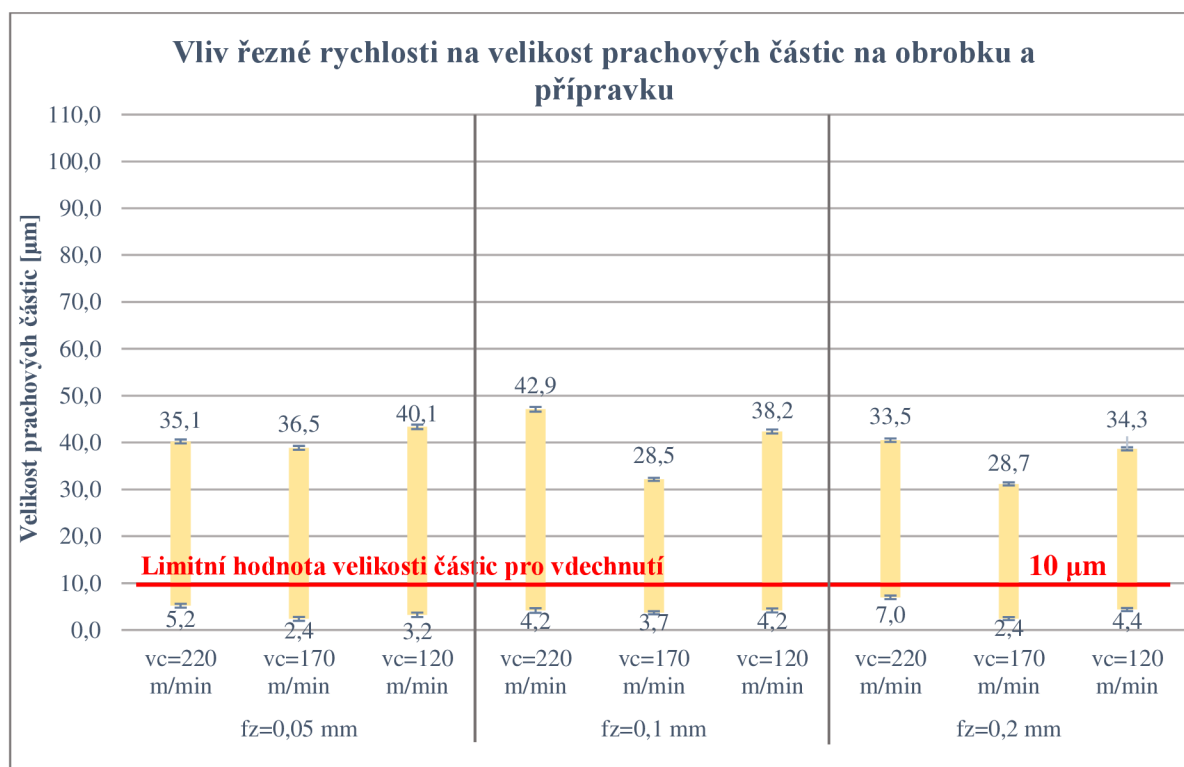
Na řezném nástroji byly zachyceny mnohem menší částice a v mnohem menším množství než na filtru. Z Obr. 4.10 vyplývá, že při řezné rychlosti 170 m/min vzniká největší velikost prachových částic. Při této řezné rychlosti byly zachyceny částice s minimální velikostí v rozmezí 4,6 až 5,3 μm a maximální velikostí v rozsahu 30,6 až 40,4 μm . Nejmenších částic bylo dosaženo frézováním s nejnižší řeznou rychlostí 120 m/min, kde se minimální hodnoty pohybovaly v rozsahu 1,7 až 2,2 μm a maximální hodnoty v rozsahu od 16,7 až 17,4 μm při různých posuvech na zub.



Obr. 4.10 Vliv řezné rychlosti na velikost prachových částic na nástroji

4.2.1.3 Obrobek a přípravek

Při použití řezné rychlosti 170 m/min byla evidována nejmenší velikost prachových částic odebrané z ploch obrobené desky a přípravku viz Obr. 4.11. Při této řezné rychlosti byly naměřeny minimální hodnoty v rozmezí 2,4 až 3,7 μm a maximální hodnoty v rozmezí 28,5 až 36,5 μm . Naopak při zjišťování největší velikosti částic není zcela patrné, při kterých řezných podmínkách vznikaly, jelikož jsou hodnoty velmi proměnné.



Obr. 4.11 Vliv řezné rychlosti na velikost prachových částic na obrobku a přípravku

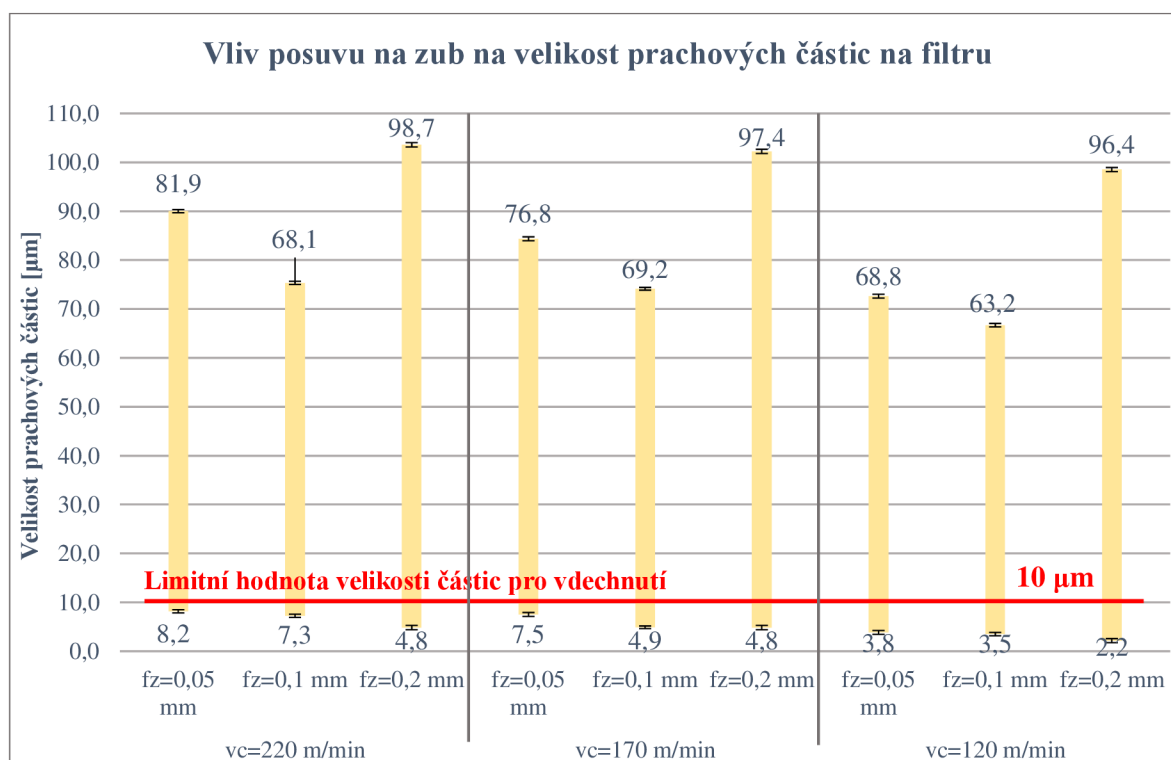
4.2.1.4 Shrnutí

Největší množství částic bylo zachyceno na filtru, proto je těmto naměřeným údajům přikládána největší váha. Limitní hodnota pro vdechnutí prachových částic je 10 μm , tudíž je věnována pozornost hlavně velikosti pohybující se okolo této hodnoty. Bylo zjištěno, že čím menší řezná rychlost byla použita, tím menší velikost částic vzniká. Naopak čím vyšší byla řezná rychlost, tím větší částice byly generovány viz Obr. 4.9.

4.2.2 Vliv posuvu na zub na velikost prachových částic

4.2.2.1 Filtr

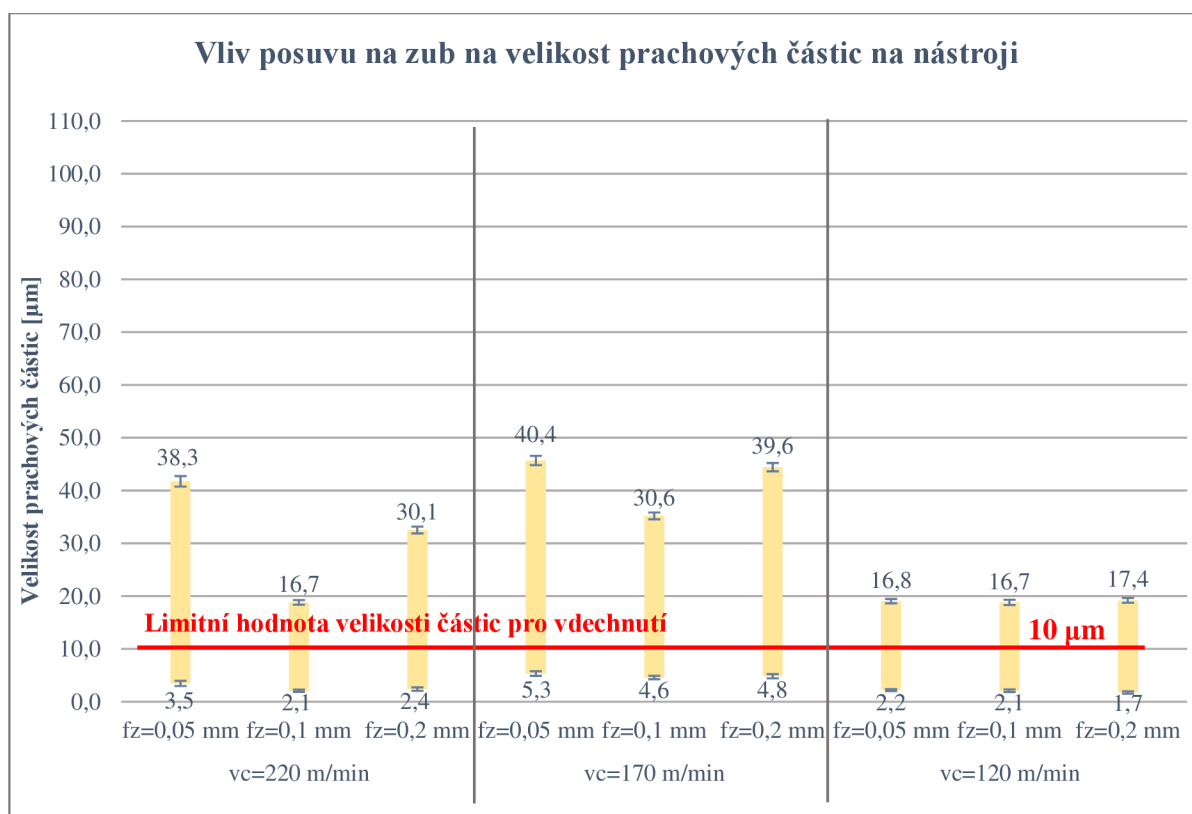
Podle Obr. 4.12 lze poukázat na následující. Se zvyšujícím posuvem na zub roste největší velikost prachových částic, naopak nejmenší velikost částic se snižuje. Pro tento výzkum jsou důležité hlavně hodnoty nejmenších částic, jejichž velikost klesá se zvyšujícím se posuvem na zub. Můžeme tedy říci, že při posuvu na zub 0,2 mm mají částice velmi široký rozsah velikostí a zároveň tento posuv na zub ukázal výskyt nejmenších částic, což potvrzuje výzkum od autorů N. Nguyen-Dinh, A. Hejjaji, R. Zitoune, C. Bouvet, M. Salem z roku 2020 [17]



Obr. 4.12 Vliv posuvu na zub na velikost prachových částic na filtru

4.2.2.2 Řezný nástroj

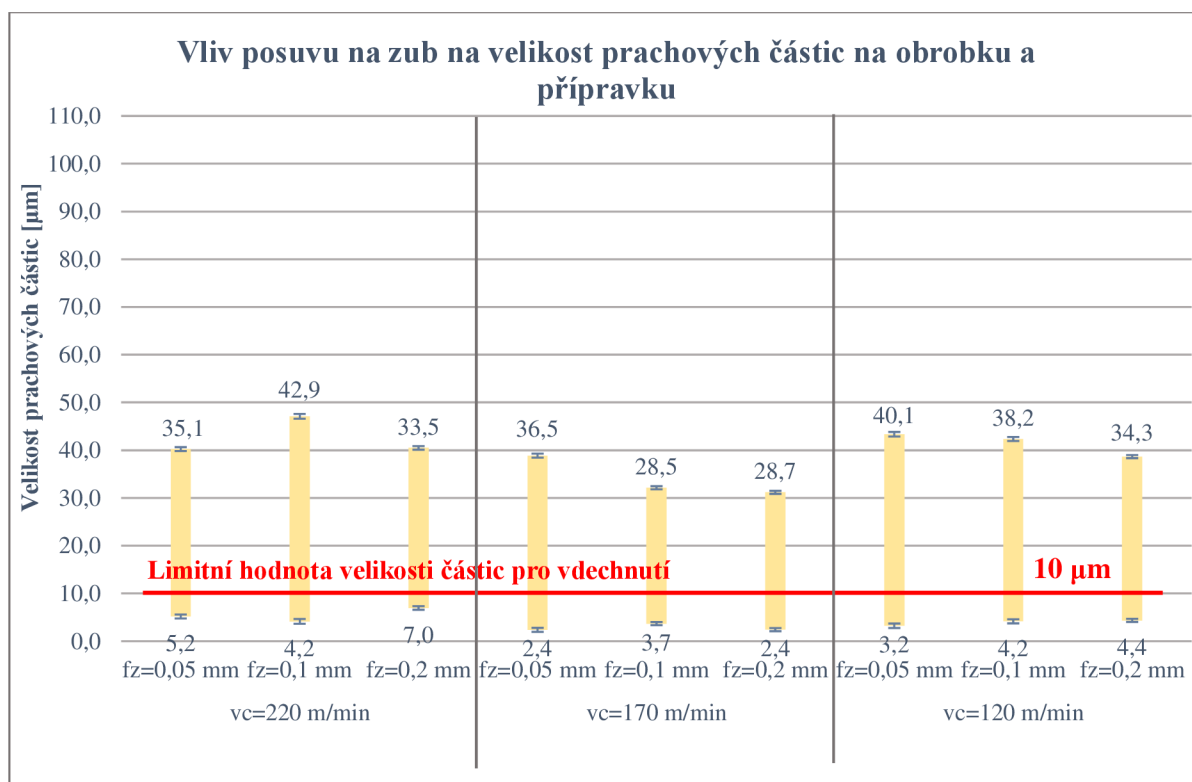
Jak si můžeme všimnout na Obr. 4.13, u nejnižší řezné rychlosti 120 m/min nemá posuv na zub téměř žádný vliv na velikost částic. Oproti tomu měl posuv na zub největší vliv při použití nejvyšší řezné rychlosti 220 m/min. Při použití posuvu na zub 0,05 mm se velikost částic pohybovala v rozmezí 3,5 až 38,3 μm , při změně na posuv na zub 0,1 mm velikost částic klesla na hodnoty s rozmezím 2,1 až 16,7 μm a při zvýšeném posuvu na zub na 0,2 mm velikost částic opět vzrostla a pohybovala se od 2,4 až 30,1 μm . Podobné chování bylo zaznamenáno i u řezné rychlosti 170 m/min.



Obr. 4.13 Vliv posuvu na zub na velikost prachových částic na nástroji

4.2.2.3 Obrobek a přípravek

Z následujícího Obr. 4.14 je zřejmé, že částice odebrané z povrchu obrobku a přípravku se od sebe velikostí částic zásadně neliší a nelze tak jednoznačně říci závislost nebo zda a jaký vliv měla změna posuvu na zub. Když se zaměříme pouze na minimální hodnoty částic, hodnoty se pohybují od 2,4 do 7,0 μm . Maximální hodnoty se pak pohybují od 28,5 do 42,9 μm .



Obr. 4.14 Vliv posuvu na zub na velikost prachových částic na obrobku a přípravku

4.2.2.4 Shrnutí

Jelikož na filtru bylo zachyceno nejvíce prachových částic, jsou údaje z tohoto místa nejvíce vypovídající. Kvůli škodlivosti částic menších než 10 μm jsou důležité údaje hlavně nejmenších částic. Podle Obr. 4.12 lze usoudit, že čím menší je posuv na zub, tím větší je velikost částic. Naopak, čím větší je posuv na zub, tím menší je velikost naměřených částic.

4.3. Vliv opotřebení řezného nástroje na tvorbu prachových částic

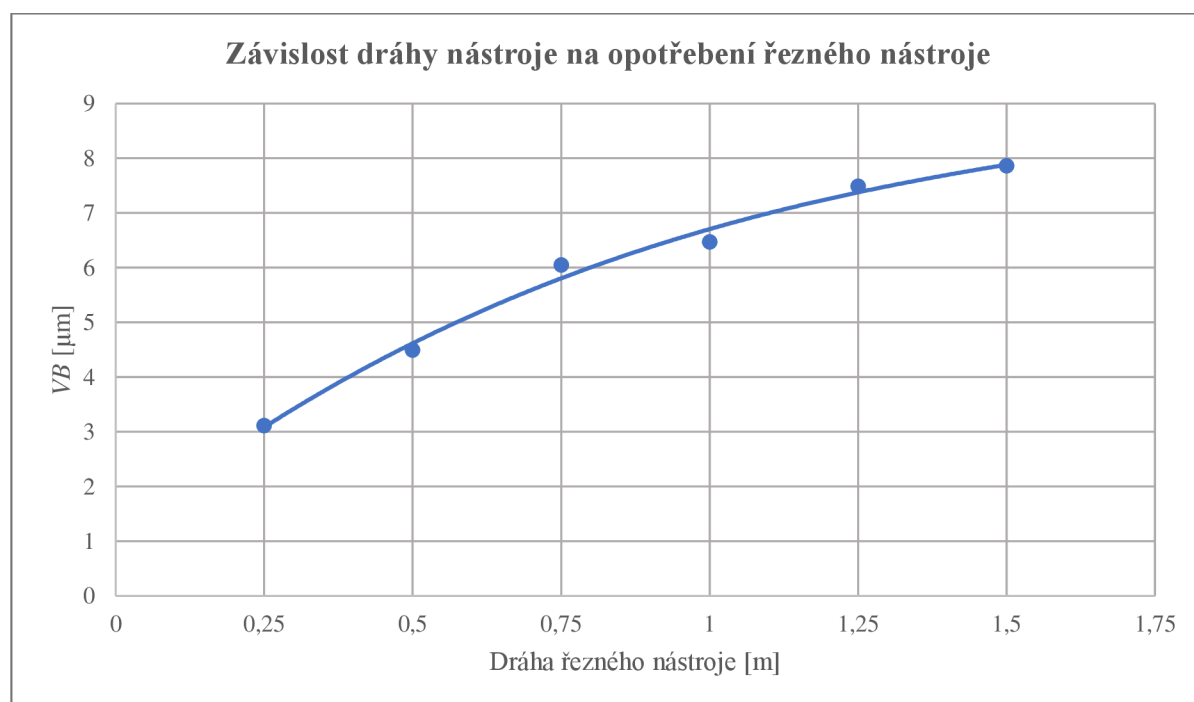
Podle již dříve zmíněné kapitoly 2.3. má na tvorbu škodlivého prachu vliv i opotřebení řezného nástroje. Z tohoto důvodu se tento výzkum zaměřuje i na opotřebení nástroje a jeho vliv na tvorbu prachových částic.

4.3.1 Opotřebení řezného nástroje

Aby mohl být prokázán jakýkoliv vliv opotřebení řezného nástroje, muselo být v první řadě zkoumáno opotřebení nástroje, které bylo zkoumáno v závislosti na ujeté dráze řezného nástroje. Hodnoty opotřebení řezného nástroje jsou uvedeny v Tab. 4.10. Grafické znázornění opotřebení na řezném nástroji je pak na Obr. 4.15. Z Tab. 4.10. i grafického vyjádření vyplývá, že čím delší dráhu nástroj ujel, tím větší opotřebení na řezném nástroji vzniklo. Kritérium životnosti řezného nástroje je VB_{krit} . Tato hodnota je stanovena výrobcem nástroje, ale při tomto experimentu jí nebylo dosaženo.

Tab. 4.10 Opotřebení řezného nástroje

Opotřebení řezného nástroje						
Dráha řezného nástroje [m]	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5
$VB [\mu\text{m}] \pm$ nejistota měření	$3,1 \pm 0,2$	$4,5 \pm 0,6$	$6,1 \pm 0,5$	$6,5 \pm 0,3$	$7,5 \pm 0,4$	$7,9 \pm 0,5$



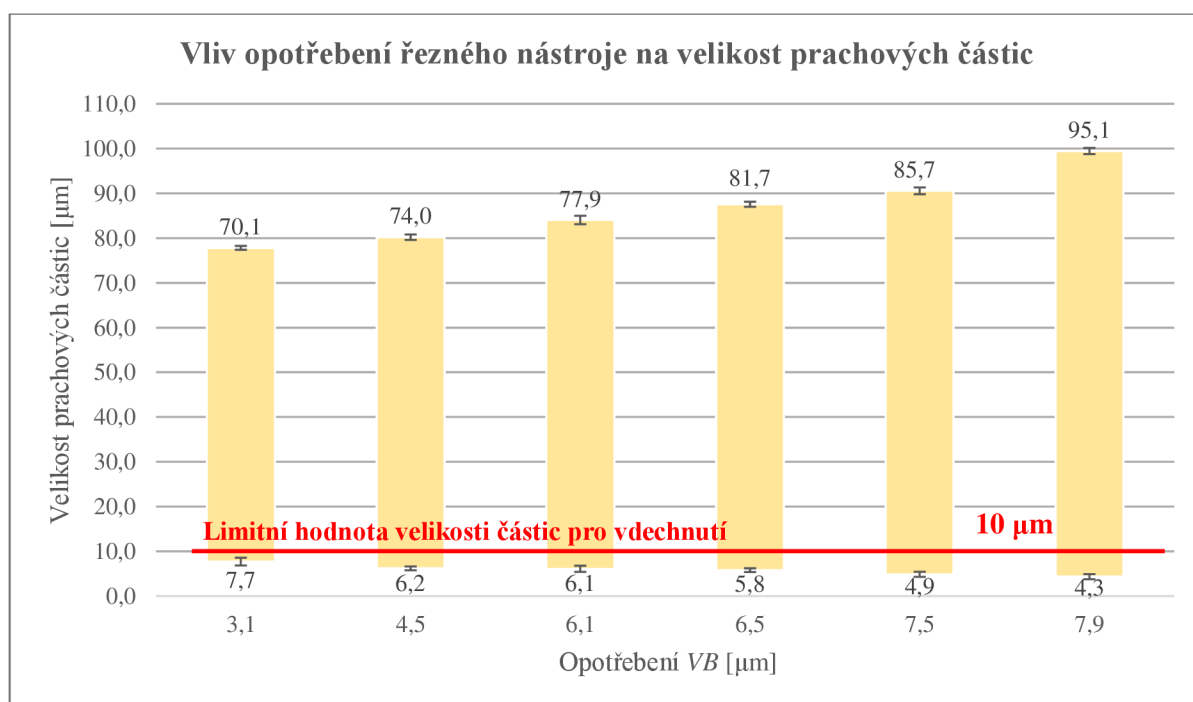
Obr. 4.15 Opotřebení řezného nástroje

4.3.2 Vliv opotřebení řezného nástroje na velikost prachových částic

Z tabulky 4.11 a grafického vyjádření na Obr. 4.16 plyne, že s opotřebením řezného nástroje roste rozsah velikostí prachových částic. Opotřebený nástroj zvyšuje maximální velikost částic a zároveň zmenšuje minimální velikost částic.

Tab. 4.11 Velikost prachových částic při různě opotřebeném řezném nástroji

Dráha [m]	VB [μm]	Nejmenší velikost částice [μm] \pm nejistota měření	Největší velikost částice [μm] \pm nejistota měření
0,25	3,1	7,7 \pm 0,9	70,1 \pm 0,4
0,5	4,5	6,2 \pm 0,4	74,0 \pm 0,6
0,75	6,1	6,1 \pm 0,7	77,9 \pm 0,9
1	6,5	5,8 \pm 0,4	81,7 \pm 0,6
1,25	7,5	4,9 \pm 0,6	85,7 \pm 0,8
1,5	7,9	4,3 \pm 0,7	95,1 \pm 0,7



Obr. 4.16 Vliv opotřebení nástroje na velikost prachových částic

5 Diskuze

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou vzniku prachových částic při frézování kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny s důsledkem na zdraví člověka. Cílem této práce bylo zjistit, jak velké prachové částice vznikají za různých řezných podmínek a jaký vliv mají řezné podmínky na velikost prachových částic.

Informace, které byly potřebné k pochopení dané problematiky a následně pak k dosažení plánovaného cíle, jsou uvedeny v kapitole 2 Teoretická část. Tato část práce obsahuje přehled dosavadních znalostí o problematice frézování kompozitních materiálů, jaký vliv mají řezné podmínky na velikost prachových částic a také jaký mají prachové částice negativní vliv na člověka.

Pro dosažení vytyčeného cíle diplomové práce bylo nutné vytvořit komplexní metodiku experimentu, která zahrnuje stanovení různých řezných podmínek (řezná rychlost, posuv na zub), volbu vhodného řezného nástroje a veškerých strojů a měřicích zařízení potřebných k provedení experimentu.

Samotný realizovaný experiment je obsažen v kapitole 4 – Experimentální část. Tato část práce obsahuje veškeré dosažené výsledky experimentu.

Z experimentálního výzkumu lze vyvodit následující závěry:

5.1 Analýza zachycených prachových částic

Mikroskopická analýza provedená na zachyceném prachu odhalila přítomnost 3 typů prachových částic odebraných z filtru, nástroje a obrobené desky s přípravkem:

- **jemný prach** (směs matrice a vláken), který měl rozměry 2,2 μm až 12,2 μm ,
- **volná vlákna** o rozměrech 9,8 μm až 98,7 μm ,
- **fragmenty** nepravidelného tvaru připomínající kvádr, které se skládají z vláken a matrice o rozměrech 59,5 μm až 354,8 μm .

5.1.1 Prachové částice zachycené na filtru:

- Na filtru byly zachyceny všechny typy prachových částic tzn. jemný prach, volná vlákna a větší množství fragmentů.
- Prachové částice na řezném nástroji dosahují hodnot v rozsahu 2,2 μm až 98,7 μm .

- Podíl prachových částic zachycených na filtru byl:
 - 85 % prachových částic mělo rozměr větší než 10 μm ,
 - 13 % prachových částic mělo velikost 5-10 μm ,
 - 2 % prachových částic mělo velikost pod 5 μm .
- SEM analýza ukázala, že uhlíková vlákna se štěpí příčně či pod úhlem (se sklonem 40-60°). Vlákna jsou velmi nebezpečné pro zdraví člověka kvůli jejich špičatému zakončení. Poměr příčně či pod úhlem štěpených vláken byl odhadnut na 50:50.

5.1.2 Prachové částice na řezném nástroji:

- Částice zachycené na řezném nástroji obsahují pouze 2 typy prachových částic, a to jemný prach a volná vlákna.
- Prachové částice na řezném nástroji dosahují hodnot v rozsahu 1,7 μm až 40,4 μm .
- Podíl prachových částic na řezném nástroji:
 - 41 % prachových částic mělo rozměr větší než 10 μm ,
 - 36 % prachových částic mělo velikost 5-10 μm ,
 - 23 % prachových částic mělo velikost pod 5 μm .

5.1.3 Prachové částice na obrobené desce s přípravkem:

- Odebrané prachové částice z obrobené desky a přípravku byly analyzovány převážně jako 2 typy prachových částic – jemný prach a volná vlákna, pouze výjimečně se objevovaly tzv. fragmenty.
- Prachové částice na řezném nástroji dosahují hodnot v rozsahu 2,4 μm až 42,9 μm .
- Podíl prachových částic na obrobené desce a přípravku:
 - 50 % prachových částic mělo rozměr větší než 10 μm ,
 - 35 % prachových částic mělo velikost 5-10 μm ,
 - 15 % prachových částic mělo velikost pod 5 μm .

5.1.4 Hmotnost prachových částic:

- 85 % prachových částic bylo zachyceno na filtru,
- 3 % z celkové hmotnosti částic bylo zachyceno na obrobku s přípravkem,
- 2 % prachových částic bylo zachyceno na nástroji.
- Zbývajících 10 % částic z celkové hmotnosti odebrané z obrobku bylo ve formě prachových částic usazeno ve stroji, poletovalo ve vzduchu či nebylo zachyceno filtrem

a dostalo se tak do odsávacího zařízení, kde mohlo díky své abrazivitě a vodivosti způsobit poruchu či stroj úplně zničit.

5.2 Vliv řezných podmínek na velikost prachových částic

Jelikož bylo nejvíce prachových částic zachycených na filtru, bereme tyto hodnoty jako nejvíce vypovídající.

5.2.1 Řezná rychlost

- Velikost částic při posuvu na zub 0,05 mm se pohybovala:
 - při rychlosti 220 m/min v rozsahu 8,2 až 81,8 μm ,
 - při rychlosti 170 m/min v rozsahu 7,5 až 76,8 μm ,
 - a při rychlosti 120 m/min v rozsahu 3,8 až 68,8 μm .
- Velikost částic při posuvu na zub 0,1 mm se pohybovala:
 - při rychlosti 220 m/min v rozsahu 7,3 až 68,1 μm ,
 - při rychlosti 170 m/min v rozsahu 4,9 až 69,2 μm ,
 - a při rychlosti 120 m/min v rozsahu 3,5 až 63,2 μm .
- Velikost částic při posuvu na zub 0,2 mm se pohybovala:
 - při rychlosti 220 m/min v rozsahu 2,4 až 98,7 μm ,
 - při rychlosti 170 m/min v rozsahu 2,4 až 97,4 μm ,
 - a při rychlosti 120 m/min v rozsahu 2,2 až 96,4 μm .

Bylo prokázáno, že se snižující se řeznou rychlostí se generovaly menší částice. Částice menší než 5 μm vznikají odštípnutím kousků z konců uhlíkových vláken.

5.2.2 Posuv na zub

- Velikost částic při řezné rychlosti 220 m/min se pohybovala:
 - při posuvu na zub 0,05 mm v rozsahu 8,2 až 81,9 μm ,
 - při posuvu na zub 0,1 mm v rozsahu 7,3 až 68,1 μm ,
 - a při posuvu na zub 0,2 mm v rozsahu 4,8 až 98,7 μm .
- Velikost částic při řezné rychlosti 170 m/min se pohybovala:
 - při posuvu na zub 0,05 mm v rozsahu 7,5 až 76,8 μm ,
 - při posuvu na zub 0,1 mm v rozsahu 4,9 až 69,2 μm ,
 - a při posuvu na zub 0,2 mm v rozsahu 4,9 až 97,4 μm ,

- Velikost částic při řezné rychlosti 120 m/min se pohybovala:
 - při posuvu na zub 0,05 mm v rozsahu 3,8 až 68,8 μm ,
 - při posuvu na zub 0,1 mm v rozsahu 3,5 až 63,2 μm ,
 - a při posuvu na zub 0,2 mm v rozsahu 2,2 až 96,4 μm .

Bylo zjištěno, že zvýšení posuvu na zub vedlo ke zmenšení velikosti částic. K obdobnému závěru došel výzkum od NGUYEN-DINH a kol. [17].

Z výše uvedeného plyne, že čím větší je posuv na zub a menší řezná rychlost, tím vznikají menší částice, a tedy i škodlivější.

5.3 Vliv opotřebení nástroje na tvorbu prachových částic

5.3.1 Opotřebení řezného nástroje:

- při ujeté dráze nástroje 0,25 m bylo změřeno opotřebení 3,1 μm ,
- po ujeté dráze 0,5 m bylo opotřebení 4,5 μm ,
- po ujeté dráze 0,75 m opotřebení odpovídalo 6,1 μm ,
- na dráze 1 m bylo změřeno opotřebení 6,5 μm ,
- na dráze 1,25 m bylo opotřebení nástroje 7,5 μm ,
- a po ujeté dráze řezného nástroje 1,5 m bylo změřeno opotřebení 7,9 μm .

Z měření opotřebení na řezném nástroji plyne, že s ujetou dráhou nástroje se opotřebení řezného nástroje zvyšuje.

5.3.2 Vliv opotřebení nástroje na velikost prachových částic

Velikost prachových částic při opotřebení řezného nástroje:

- při opotřebení nástroje 3,1 μm byla naměřena velikost částic v rozmezí 7,7 μm až 70,1 μm ,
- při opotřebení nástroje 4,5 μm byla změřena velikost prachových částic v rozsahu 6,2 μm až 74,0 μm ,
- při opotřebení nástroje 6,1 μm byla naměřena velikost částic v rozmezí 6,1 až 77,9 μm ,
- při opotřebení nástroje 6,5 μm byla naměřena velikost prachových částic s rozsahem 5,8 μm až 81,7 μm ,
- s opotřebením řezného nástroje 7,5 μm vznikaly částice s velikostí v rozmezí 4,9 μm až 85,7 μm ,

- při opotřebení řezného nástroje 7,9 μm měly částice velikost v rozsahu 4,3 μm až 95,1 μm .

Bylo prokázáno, že opotřebení řezného nástroje mělo vliv na velikost prachových částic. S opotřebením nástroje se zvětšuje největší velikost částic, ale i snižuje nejmenší velikost částic. Tedy můžeme říci, že rozsah velikostí se zvětšuje, což je nežádoucí vzhledem ke škodlivosti malých prachových částic pro člověka.

V rámci řešené problematiky bylo obecně zjištěno, že na velikost a množství prachových částic mají vliv:

- řezné podmínky (řezná rychlost, posuv na zub, tloušťka odebírané třísky),
- řezný nástroj (materiál, geometrie),
- opotřebení řezného nástroje,
- výroba kompozitu (vazba, počet vrstev, prosycení tkaniny pryskyřicí).

Z provedeného výzkumu vyplynulo, že největší vliv má:

- řezná rychlost – čím vyšší řezná rychlost, tím vznikaly částice s většími rozměry,
- opotřebení nástroje – čím větší opotřebení nástroje, tím menší částice vznikají,
- posuv na zub – čím větší posuv na zub, tím menší částice vznikají.

6 Závěr

Předložená diplomová práce zpracovaná na téma: Problematika ochrany a bezpečnosti zdraví při frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny přispívá k rozšíření poznatků o vzniku škodlivých prachových částic při frézování kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny.

Cílem této práce bylo zkoumání tvorby prachových částic při frézování za různých řezných podmínek a jejich vliv na množství a velikost částic.

Z provedeného měření lze vyvodit následující poznatky:

Při hodnocení prachových částic byly zachyceny 3 typy prachových částic, které byly charakterizovány jako jemný prach (směs matrice a vláken), volná vlákna o různých délkách a tzv. fragmenty což jsou shluky vláken s matricí.

Analýza distribuce velikosti prachových částic ukázala, že se vlákna štěpí příčně a pod úhlem se sklonem 40-60° a to v poměru 50:50. Při analýze bylo evidováno, že pouze 11 % vláken mělo velikost menší než 5 μm , 25 % vláken mělo velikost 5–10 μm a 64 % mělo velikost nad 10 μm , což není tak škodlivé pro člověka.

Snížení řezné rychlosti podporuje zvýšení škodlivých prachových částic ve vzduchu. Naopak zvýšením řezné rychlosti dochází ke snížení velikosti prachových částic ve vzduchu. Větší prachové částice mají větší hmotnost a následkem toho dochází k pádu částic k zemi (k desce stroje). Částice se nedostávají do vzduchu (nelétají ve vzduchu) a není zde tak vysoké riziko pro zdraví člověka či poškození stroje.

Z délky vláken usazených na filtru (kvůli velkému množství prachových částic) můžeme usoudit, že se zvyšujícím se posuvem na zub se zvětšuje i rozsah velikosti prachových částic. Čili nejmenší i největší částice byly naměřeny při nejvyšším posuvu na zub 0,2 mm. Největší minimální částice byly naměřeny při nejnižším posuvu na zub 0,05 mm a to jak na filtru, nástroji tak i na obrobené desce s přípravkem.

Opotřebení řezného nástroje a jeho geometrie výrazně ovlivňuje velikost a tvar prachových částic. Opotřebení řezného nástroje vzniká otěrem abrazivními uhlíkovými vlákny. Řezný nástroj, který je neopotřebený (ostrý) generuje prachové částice v rozsahu od 7,7 do 70,1 μm . Naopak opotřebený nástroj generuje prachové částice o velikosti 4,3 – 95,1 μm , které jsou zároveň jak hrubé a velké (vyšší hmotnost), tak jemné a malé, tudíž zde vzniká vysoké

riziko pro zdraví člověka (částice se dostávají do vzduchu a poletují). Problematika opotřebení řezného nástroje je velmi komplexní a vliv opotřebení na velikost vznikajících prachových částic by potřebovala další mnohem hlubší zkoumání.

Doporučení, ke kterým se v této práci dospělo jsou následující. Jelikož částice pod 10 μm může být vdechnuta, je doporučeno během obrábění kompozitu s uhlíkovými vlákny používat masky k zakrytí dýchacích cest, brýle, rukavice a například laboratorní plášť či jiný oděv, který zakryje kůži, která by v případě nezakrytí mohla být kontaminována, a hrozí tak riziko vzniku vyrážky. Dále by bylo vhodné vytvořit účinný filtrační systém, který by vedl k úplnému odbourání kontaktu prachových částic s člověkem.

Citovaná literatura

- [1] M. Ramulu a M. S. B. Abdullah, „Health and Safety Considerations in Machining of Composites,“ Springer Nature Switzerland, 2021.
- [2] F. Vápeník, „Vliv řezných parametrů při obrábění kompozitních materiálů,“ Zlín, 2023.
- [3] V. Schorník, „Frézování rovinných ploch a drážek při obrábění kompozitního materiálu,“ Plzeň, 2013.
- [4] V. Moudrý, „Vliv řezných podmínek na delaminaci a opotřebení řezného nástroje při frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny,“ Liberec, 2024.
- [5] MM Průmyslové spektrum, „MM Průmyslové spektrum,“ 31 Březen 2021. [Online]. Available: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kompozitni-materialy-na-zemi-i-ve-vesmiru>. [Přístup získán Listopad 2023].
- [6] „Vysoké učení technické v Brně,“ 2012. [Online]. Available: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/7937/final-thesis.pdf?sequence=1>.
- [7] T. Knápek, „Stanovení vhodných řezných podmínek pro frézování kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny z hlediska řezného nástroje a obráběného materiálu,“ Liberec, 2020.
- [8] E. Asmatulu, A. Alonayni a M. Alamir, „Safety concerns in composite manufacturing and machining,“ 22 březen 2018. [Online]. Available: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10596/1059623/Safety-concerns-in-composite-manufacturing-and-machining/10.1117/12.2296707.short>.
- [9] P. Mašek, „ČVUT DSpace,“ únor 2019. [Online]. Available: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82082/F2-D-2019-Masek-Petr-priloha-Teze_Masek.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. [Přístup získán 2024].

- [10] I. Shyha a D. Huo, *Advances in Machining of Composite Materials*, Springer, 2021.
- [11] PEVI, s.r.o., „Prašnost na pracovišti,“ 17 Zář 2010. [Online]. Available: <https://www.pevi.cz/cz/zajimavosti-z-oboru/prasnost-na-pracovisti-i>.
- [12] B. Denkenaa, B. Bergmanna a B.-H. Rahnera, „Energy-efficient control of dust extraction for the machining of,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118310278>. [Přístup získán 2024].
- [13] Znalostní systém prevence rizik v BOZP, „Pracovní prostředí: Prašnost na pracovišti,“ [Online]. Available: <https://zsbozp.vubp.cz/pracovni-prostredi/rizikove-factory/fyzikalni-factory/prasnost-na-pracovisti>. [Přístup získán Listopad 2023].
- [14] R. Mamidala, J. C. Kramlich a J. L. Miller, „Characterization of Composite Dust generated during Milling of Uni-Directional and Random fiber composites,“ University of Washington, 2015.
- [15] M. Ramulu a J. Kramlich, „Machining of fiber reinforced composites: review of environmental and health effects,“ *International Journal of Environmentally Conscious Design and Manufacturing*, Seattle, 2004.
- [16] „Defense Technical Information Center,“ Zář 1998. [Online]. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA355125.pdf>. [Přístup získán Listopad 2023].
- [17] N. Nguyen-Dinh, A. Hejjaji, R. Zitoune, C. Bouvet a M. Salem, „New tool for reduction of harmful particulate dispersion and to improve machining quality when trimming carbon/epoxy composites,“ Institut Clément Ader (UMR CNRS 5312), Université de Toulouse, Toulouse, 2020.