



Bakalářská práce

Ochrana zdraví a bezpečnost při vrtání kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Karel Uhlíř

Vedoucí práce:

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

Liberec 2024



Zadání bakalářské práce

Ochrana zdraví a bezpečnost při vrtání kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny

<i>Jméno a příjmení:</i>	Karel Uhlíř
<i>Osobní číslo:</i>	S21000126
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra obrábění a montáže
<i>Akademický rok:</i>	2023/2024

Zásady pro vypracování:

- 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.
- Volba obráběného materiálu (kompozitní desky vyztužené uhlíkovými vlákny), řezného nástroje (vrták) a řezných podmínek bez procesního média.
- Návrh metodiky experimentů pro vrtání kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny. Technika sběru a charakteristika prachových částic při experimentech.
- Realizace experimentů.
- Hodnocení získaných výsledků z realizace experimentů. Optimální výběr řezných podmínek vedoucí k regulaci velikosti a koncentraci prachových částic.
- 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. CAMPBELL, Flake C. Structural composite materials. ASM international, 2010.
3. CHRISTENSEN, R. M. Mechanics of composite materials: Courier Corporation. Massachusetts: USA, 2012.
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 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.

Abstrakt

Bakalářská práce se věnuje problematice ochrany zdraví a bezpečnosti při vrtání kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny.

Hlavním cílem práce byl výzkum vlivu řezných podmínek a opotřebení nástroje na velikost a množství prachových částic vznikajících při procesu vrtání.

Potřebné informace o vrtání kompozitních materiálů, tvorbě prachových částic a vlivu částic na lidské zdraví jsou uvedeny v teoretické části práce. V metodické části práce je popsána metodika měření experimentů včetně informací o použitých strojích, nástrojích a měřicích zařízeních. Výsledky experimentu jsou uvedeny v experimentální části.

V závěrečné části je uvedena diskuse výsledků a celkové vyhodnocení experimentu.

Klíčová slova

kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny, vrtání, prachové částice, řezné podmínky, bezpečnost a zdraví

Abstract

The bachelor thesis focuses on the health and safety issues related to drilling composite materials with carbon fibers.

The main objective of the thesis was to research the influence of cutting conditions and tool wear on the size and quantity of dust particles generated during the drilling process. The necessary information about drilling composite materials, dust particle formation, and the impact of particles on human health is provided in the theoretical part of the thesis. The methodology of the experiments, including information about the used machinery, tools, and measuring devices, is described in the methodological part.

The results of the experiment are presented in the experimental section. The discussion of the results and the overall evaluation of the experiment are provided in the concluding section.

Keywords

composite material with carbon fibers, drilling, dust particles, cutting conditions, safety, and health

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí bakalářské práce paní doc. Ing. et Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D. za její odborné rady, věcné připomínky a vstřícný přístup. A panu Ing. Martinu Váňovi za jeho odbornou pomoc při realizaci experimentu. Dále bych chtěl poděkovat své přítelkyni a rodičům, kteří mě podporovali během studia na vysoké škole.

Obsah

1	Úvod	11
2	Teoretická část	12
2.1	Kompozitní materiály	12
2.2	Výroba kompozitu z hlediska bezpečnosti	13
2.3	Vrtání do kompozitních materiálů	14
2.3.1	Volba materiálu řezného nástroje	15
2.3.2	Řezné podmínky	16
2.4	Tvorba prachových částic ve vzduchu při obrábění kompozitních materiálů	17
2.5	Zdravotní problémy při obrábění kompozitních materiálů	18
2.5.1	Inhalační expozice	18
2.5.2	Dermální expozice.....	19
2.5.3	Koncentrace částic ve vzduchu, velikost částic	20
2.6	Vliv řezných podmínek na množství a velikost prachových částic	21
3	Metodika	23
3.1	Obráběný kompozitní materiál	23
3.2	Řezný nástroj	24
3.3	Řezné podmínky	25
3.4	Obráběcí stroj	26
3.5	Odsávací zařízení	27
3.6	Použité přípravky	28
3.6.1	Přípravek na uchycení filtru do odsávacího zařízení.....	28
3.6.2	Přípravek na upnutí obrobku	28
3.7	Měření velikosti prachových částic	29
3.8	Sběr prachových částic.....	30
3.9	Vážení filtrů.....	31
3.10	Měření opotřebení řezného nástroje.....	32
3.11	Postup měření	32
4	Experimentální část	33
4.1	Analýza zachycených prachových částic	33
4.1.1	Velikost a četnost prachových částic	34
4.1.2	Rozložení prachových částic	39
4.1.3	SEM analýza prachových částic.....	40
4.2	Vliv řezné rychlosti na velikost a četnost prachových částic	44

4.2.1	Vliv řezné rychlosti na velikost a četnost prachových částic (bez odsávání)	44
4.2.2	Vliv řezné rychlosti na četnost zachycených prachových částic na filtru (při odsávání).....	46
4.3	Vliv opotřebení řezného nástroje na četnost prachových částic	48
4.3.1	Opotřebení řezného nástroje.....	48
4.3.2	Vliv opotřebení řezného nástroje na četnost generovaných škodlivých prachových částic	49
5	Vyhodnocení a diskuse výsledků	51
6	Závěr	55
	Použitá literatura	56

Seznam zkratek

PVUV	Polymer vyztužený uhlíkovými vlákny	
f_n	Posuv	[mm/ot]
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop	
SK	Slinutý karbid	
SW	Software	
VB	Opotřebení nástroje	[μm]
v_c	Řezná rychlost	[m/min]

1 Úvod

V současné době dochází k prudkému nárůstu komerčního využití vláknově vyztužených kompozitních materiálů s polymerními matricemi. Tento trend je důsledkem vysoké dynamiky vývoje těchto materiálů a rostoucího vědeckého pochopení jejich základních principů. Tyto materiály jsou stále více využívány v tradičních i netradičních aplikacích. K hlavním důvodům patří zejména vysoká pevnost, tuhost, nízká hmotnost a odolnost proti korozi. Jedním z příkladů takového kompozitního materiálu je materiál s výztuží z uhlíkových vláken spojených epoxidovou pryskyřicí. I když jsou kompozitní materiály obvykle vyráběny do téměř finálních rozměrů, rostoucí požadavky na kvalitu výrobků vedou k potřebě použití technologií obrábění. Mezi nejčastější obráběcí operace při výrobě dílů z vláknově vyztužených kompozitů patří soustružení, frézování, řezání, broušení a zejména vrtání, které se používá k vytváření děr pro různé spojovací součásti.

Fyzikální povaha výztužných vláken je činí potenciálně toxickými pro člověka. Největší obavy jsou spojeny s inhalační expozicí vzdušným vláknitým částicím. Délka a průměr částice jsou důležitými aspekty rizik expozice. Průměr částice do značné míry určuje, kde se částice v dýchacím traktu uloží. Délka částice ovlivňuje, jak dobře se obranný mechanismus plic dokáže vyrovnat s částicí poté, co byla uložena. [1]

Hlavním cílem předkládané práce je zjištění vlivu řezných parametrů a opotřebení řezného nástroje na velikost a četnost prachových částic při vrtání kompozitního materiálu vyztuženého uhlíkovými vlákny.

Bakalářská práce je rozdělena do čtyř částí: teoretické, metodické, experimentální a závěrečné. Teoretická část práce souvisí se současným stavem řešené problematiky, obsahuje základní informace vztahující se k vrtání, kompozitním materiálům, používaným nástrojům a ke zdravotním rizikům spojených s jejich obráběním. Metodická část se zaměřuje na veškerou metodiku měření experimentů, včetně informací o použitých strojích, nástrojích, přípravcích a měřicích zařízeních a včetně obráběného materiálu. Experimentální část obsahuje veškeré získané výsledky a závěrečná část zhodnocuje a diskutuje výsledky získané v rámci výzkumu.

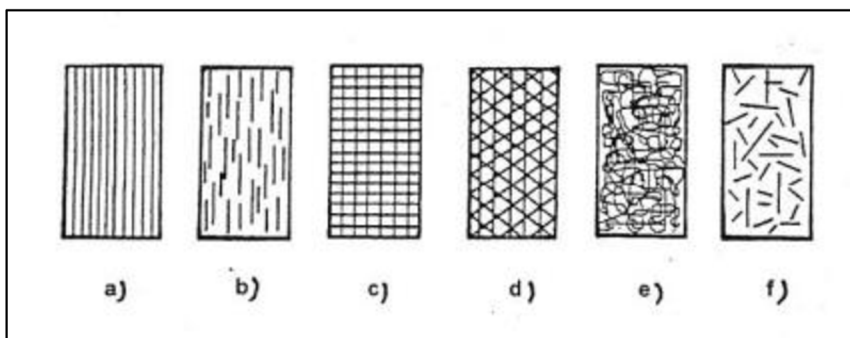
2 Teoretická část

2.1 Kompozitní materiály

Kompozit je kombinací matricového materiálu a výtuzného materiálu, jehož vlastnosti a strukturální charakteristiky jsou lepší v porovnání s vlastnostmi jednotlivých komponent. Tyto kompozitní materiály se obvykle skládají z epoxidového matricového materiálu, který plní roli pojiva a udržuje celý materiál pohromadě. Dále se kompozitní materiály skládají z vyztužujícího materiálu s uhlíkovými, grafitovými, skleněnými a/nebo para-aramidovými vlákny. Uhlíková vlákna jsou pevná, tuhá a především lehká. Matricové materiály zahrnují epoxidové, polyesterové, fenolové, fluorokarbonové, polyethersulfonové a nejběžněji jsou používány epoxidy a polyestery. [1]

Struktury vláknových kompozitních materiálů můžeme dělit podle více parametrů například typ výtuzy, uspořádání výtuzy, tvar výtuzy, typ matrice a podobně. Podle geometrického tvaru výtuzy se kompozity dělí na skeletové, částicové a vláknové. V naší práci se budeme zabývat výhradně vláknovými kompozity. Vláknové kompozity dělíme dále podle délky vláken na kompozity s dlouhými/kontinuálními vlákny a s krátkými vlákny. [1]

Charakteristické typy vláknových kompozitů jsou graficky znázorněny na následujícím Obr. 1:



Obr. 1 - Typy vláknových kompozitů [2]

a) jednosměrná dlouhá vlákna b) jednosměrná krátká vlákna c) dvousměrné vyztužení (křížová tkanina, rohož) d) vícesměrné vyztužení e) náhodná orientace vláken f) náhodná orientace krátkých vláken [2]

PVUV (polymer vyztužený uhlíkovými vlákny) jsou třídou extrémně pevných a lehkých polymerů vyztužených vlákny na bázi uhlíkových/grafitových vláken. Tyto polymery často zahrnují epoxid, ale někdy se používají i jiné polymerní materiály jako je polyester, vinylester nebo nylon. V určitých aplikacích mohou být spolu s uhlíkovými vlákny použity také některé další typy vláken, jako jsou skleněná vlákna, kevlar a hliník. PVUV nabízejí velmi vysoký poměr pevnosti k hmotnosti, vysoký poměr modulu pružnosti k hmotnosti, vysokou absorpci nárazů, dobrou rozměrovou stabilitu, vynikající tolerance proti poškození a dobrou schopnost odolávat korozi a únavě. [3]

Epoxidová pryskyřice se používá jako matrice kompozitu převážně v leteckém průmyslu. Vyznačuje se dobrou kohezní pevností a adhezí ke většině vláken. Tento materiál se vyznačuje chemickou odolností a teplotní stálostí do 200 °. Vlastnosti materiálu se dají měnit a upravovat různou kombinací pryskyřice a tvrdidla. [2]

2.2 Výroba kompozitu z hlediska bezpečnosti

Zpracování kompozitu zahrnuje smíšení složek v nádobě obsahující pryskyřici, vytvrzovací činidlo, částice/vlákna a další materiály na základě požadavků (např. zpomalení hoření, odolnost proti únavě a creepu, a tepelná a elektrická vodivost). Potenciální nebezpečí narůstá při přidávání složek do směsi a dokončovací fázi, kdy může dojít ke vdechnutí chemikálií a stejně tak ke kontaktu s očima a pokožkou. Prepreg je proces, při kterém jsou vyztužné materiály kombinovány s pryskyřicí a vytvrzovacím činidlem. Po procesu přípravy prepregu bude připravený prepreg uložen v chladničce, aby se zabránilo dalším chemickým reakcím. Prepreg nabízí mnoho výhod oproti klasickým metodám výroby kompozitu díky snadné aplikaci, práci, konzistenci a automatizaci. Během výroby a recyklaci kompozitu mohou pracovníci přijít do kontaktu s vlákny nebo pryskyřicí při manipulaci, skladování, pokládání, vytvrzování, ale i při obrábění, ořezávání, vrtání a montáži. [4]

2.3 Vrtání do kompozitních materiálů

Obrábění kompozitních materiálů z uhlíkových vláken je podstatně obtížnější než obrábění konvenčních kovů a jejich slitin kvůli zjevně odlišným materiálovým vlastnostem. Dvě fáze materiálů s drasticky odlišnými mechanickými a tepelnými vlastnostmi odlišují PVUV od kovů a jejich slitin a vedou ke složitým interakcím mezi matricí a vláknem během obrábění, které činí fyziku obrábění PVUV zcela odlišnou od fyziky obrábění konvenčních kovů. Typ, základ a struktura uhlíkových vláken, které určují vlastnosti vláken a také pryskyřice jako matrice, určují obrobiteľnosť PVUV obrobku a následně ovlivňují výběr procesu obrábění a použitých nástrojů. V důsledku nehomogenity a anizotropie PVUV může obrábění PVUV vést k vytahování vláken a k rozpojení matrice vlákna. Řezné nástroje jsou vždy vystaveny nebezpečnějšímu prostředí a podléhají procesům opotřebení kvůli vysoké tepelné odolnosti a abrazivitě PVUV. Kvůli vnitřní slabosti epoxidu dochází k nepřijatelné delaminaci a praskání matrice v obrobku i při působení poměrně malých řezných sil, zatímco vysoké teploty v důsledku vysokých řezných rychlostí a nízké tepelné vodivosti způsobují degradaci pryskyřice. [3]

Vrtání, je hlavní operací pro výrobu šroubovaných nebo nýtovaných sestav v PVUV součástech nebo konstrukcích používaných v průmyslu. Například v malém jednomotorovém letadle je vyvrtáno více než 100 000 děr pro spojovací prvky, jako jsou nýty, šrouby a matice, zatímco ve velkém dopravním letadle jsou to dokonce miliony děr. Delaminace povrchu včetně delaminace „peel-up“ (delaminace vstupu do otvoru) a delaminace „pushout“ (delaminace výstupu z otvoru), vytahování vláken/pryskyřice a nadměrná drsnost povrchu stěny otvoru jsou považovány za hlavní nevýhody vrtání PVUV. Experimentálně bylo zjištěno, že delaminace a kvalita povrchu jsou ovlivněny řeznými parametry, geometrií vrtáku a řeznou silou. [3] Komplikace při vrtání kompozitních materiálů vyžadují pečlivý výběr nástrojů a nastavení parametrů. Například špičky vrtáků vyvinuté pro homogenní materiály jsou často nevhodné pro kompozitní materiály. Přestože jsou dražší než ostatní vrtací hroty, polykrystalické diamantové vrtací hroty jsou často nákladově nejefektivnější pro vrtání kompozitních materiálů díky jejich odolnosti proti opotřebení. [1]

Procesy vrtání, které poskytují jemné, suché třísky, obvykle poskytují lepší povrchovou úpravu a kvalitnější díly. Pokud je řezná rychlost příliš vysoká, teplo způsobí, že materiál matrice bude lepkavý a vytvoří hrudkovité třísky. Třísky, které jsou velké a

šupinaté, znamenají, že řezná hrana škrábe, ale neřeže materiál. [1] Jemné třísky, které při vrtání poskytují lepší kvalitu dílů, bohužel také představují větší zdravotní riziko, to vyžaduje aplikovat výkonná odsávací zařízení, aby nebyly překročeny zdravotní a hygienické limity pracovního prostředí. [5]

V mnoha případech se pro obráběcí operace používají procesní kapaliny. Výhody jsou nižší opotřebení nástroje, snížený vliv teploty na povrch a transport třísek. Nevýhodou kompozitů je, ale jejich vlastnost nasákavosti, která způsobí nabobtnání materiálu a změnu jeho rozměrů, kvůli které při obrábění většinou nelze aplikovat obvyklé procesní kapaliny (někdy lze použít čistou vodu s inhibítorem koroze, olejové emulze jsou doporučovány pouze výjimečně). Špatná volba procesní kapaliny může do značné míry snížit pevnost obráběného materiálu [1, 5]

2.3.1 Volba materiálu řezného nástroje

Pro obrábění kompozitních materiálů lze sice použít nástroje z rychlořezných ocelí, při jejich použití je však nutné očekávat nižší hodnoty trvanlivosti a s tím spojenou častou výměnu. Dále také přestřívání nástroje, a to především z následujících důvodů [5]:

Rychlořezné oceli jsou ve srovnání s jinými řeznými materiály charakteristické nižšími hodnotami tvrdosti a mají tudíž i menší schopnost odolávat abrazivnímu působení vyztužujících vláken. [5]

Většina kompozitních materiálů má velmi nízkou tepelnou vodivost, proto vzniklé teplo musí být ze zóny řezu v maximální míře odvedeno nástrojem. Tepelná vodivost rychlořezných ocelí je však relativně nízká, třikrát až čtyřikrát nižší než u slinutých karbidů. Vysoké teploty v oblasti ostří nástroje způsobují špatnou trvanlivost bříty. [5]

Nejčastějším způsobem, jak zvýšit odolnost proti opotřebení, a tím i trvanlivost nástrojů z rychlořezných ocelí, je aplikace různých otěruvzdorných povlaků. [6]

Nástroje ze slinutých karbidů dosahují lepších výsledků v porovnání s nástroji z rychlořezných ocelí. Mechanické vlastnosti slinutých karbidů závisí zejména na obsahu pojiva a velikosti zrna karbidické fáze. Tvrdost se zvyšuje s vyšším podílem a jemnějším

zrnem fáze karbidické, naopak velká zrna a větší podíl pojiva zvyšují houževnatost slinutého karbidu. Z těchto důvodů jsou pro účely obrábění kompozitních materiálů vyztužených abrazivními vlákny (uhlíková, skelná) vhodné především jemnozrné slinuté karbidy, které mají vyšší hodnoty tvrdosti, takže lépe odolávají opotřebení. Pro zvýšení trvanlivosti jsou tyto nástroje navíc pokryty různými druhy povlaků na bázi karbidů, nitridů, oxidů nebo diamantu. Nižší hodnoty houževnatosti nástroje je pak nutné zohlednit při procesu obrábění, zejména pokud dochází k dynamickému zatížení břitu. [5]

Nejllepších výsledků při obrábění kompozitních materiálů dosahují nástroje z polykrystalického diamantu. Především vysoká tvrdost, která umožňuje odolávat vysokému abrazivnímu účinku vláken a vynikající tepelná vodivost, která zaručuje rychlý odvod tepla z oblasti řezu, jsou předpokladem pro vysokou kvalitu obrobeného povrchu a dlouhou trvanlivost nástroje. Trvanlivost je mnohonásobně vyšší (až stonásobně) než u nástrojů ze slinutých karbidů. Ostrý břit, který vydrží po dlouhou dobu obrábění, poskytuje chladnější řez a snižuje tvorbu delaminace, protože při nadměrném opotřebení břitu se vlákna spíše odlamují, než aby byla běžně řezána. [5, 7]

2.3.2 Řezné podmínky

Při vrtání se řezné podmínky pohybují v širokém rozsahu a jsou hlavně závislé na druhu vrtáku. Hloubka záběru při vrtání do plného materiálu se odvíjí od poloměru nástroje; při vrtání do předvrtaných děr je určena rozdílem poloměru díry před a po vrtání. [8]

Při obrábění kompozitu je řezná rychlost zpravidla o 25–30 % nižší než u oceli, zatímco posuv je volen o 15–20 % vyšší. [6]

Posuv na otáčku se obvykle pohybuje v rozmezí od 0,05 mm/ot až po 1,1 mm/ot, přičemž jeho velikost závisí především na druhu nástroje a materiálu, který se obrábí. [8]

Řezné rychlosti jsou nižší než u soustružení a frézování, z důvodu nepříznivých podmínek, ve kterých nástroj pracuje. Hlavním důvodem je špatný odvod tepla z místa řezu, které způsobuje značné tepelné zatížení břitu. Z tohoto důvodu se většinou používá chlazení chladicí kapalinou. Řezné rychlosti se obvykle pohybují mezi 10 m/min až 300 m/min. [5]

2.4 Tvorba prachových částic ve vzduchu při obrábění kompozitních materiálů

Mnoho teorií obrábění kovů vychází z pozorování tvorby třísky, geometrie třísky a identifikace roviny, ve které probíhá tok třísky. Naopak, v oblasti obrábění kompozitních materiálů bylo provedeno jen omezené množství výzkumu týkajícího se tvorby třísek a geometrie třísek. V souvislosti se zdravotními riziky obrábění kompozitních materiálů jsou nespojitě třísky vytvářené během procesu obrábění emitovány jako prachové částice a prášek obsahující vlákna a/nebo vytvrzený matricový materiál. Morfologické charakteristiky těchto prachových částic a prášku závisí na způsobu, jakým jsou třísky vytvářeny. [1]

Kromě určování výkonnosti kompozitních materiálů určují fyzikální vlastnosti vlákna a matrice spolu s orientací vlákna také vliv na tvorbu třísky a geometrii třísek během obrábění. V závislosti na orientaci vláken vzhledem ke směru postupujícího řezného nástroje dochází u kompozitu při aplikaci řezné síly k lomu odlupováním, mikro-vzpěru, porušení tahem nebo lomu ve smyku. Každý z těchto mechanismů má vliv na geometrii vznikající třísky. [1]

Při obrábění kompozitu je kompozit obvykle řezán pod různými úhly s ohledem na orientaci vláken, což ovlivňuje distribuci velikosti emitovaného prášku a prachu. Během ořezávání je tvorba třísek a porušení vláken ovlivněno především orientací vláken, spíše než provozními parametry. Řezací mechanismy pro vrtání a broušení jsou velmi podobné jako u ořezávání. [1]

Přestože geometrii třísky ovlivňuje především orientace vlákna, parametry obrábění mohou ovlivnit i geometrii emitovaných částic. Například nástroje, které poskytují lepší řeznou hranu, produkují vyšší podíl malých (dýchacelných) prachových částic. [1]

Při ortogonálním řezání polymerních kompozitů dochází ke smykovému lomu napříč a po délce skleněných a uhlíkových vláken, které produkují vláknité třísky o zmenšeném průměru. Proces tvorby třísky a odstraňování materiálu zahrnuje částečné ohýbání vláken následované praskáním, což má za následek vytažení materiálu matrice spolu s vláknem. [1]

Jak bude diskutováno později, vzduchem nesená vlákna zmenšeného průměru představují pro pracovníky největší riziko. Geometrie částic, která přímo souvisí s geometrií polétavého prachu, je kriticky závislá na orientaci vláken v kompozitním materiálu. Parametry obrábění mohou také ovlivnit koncentraci a velikost částic ve vzduchu. Z toho důvodu může být distribuce velikosti a koncentrace emitovaných částic z tradičních obráběcích procesů řízena orientací vláken v kompozitním materiálu a parametry obrábění, jako je typ materiálu nástroje, geometrie nástroje a řezná rychlost. [1]

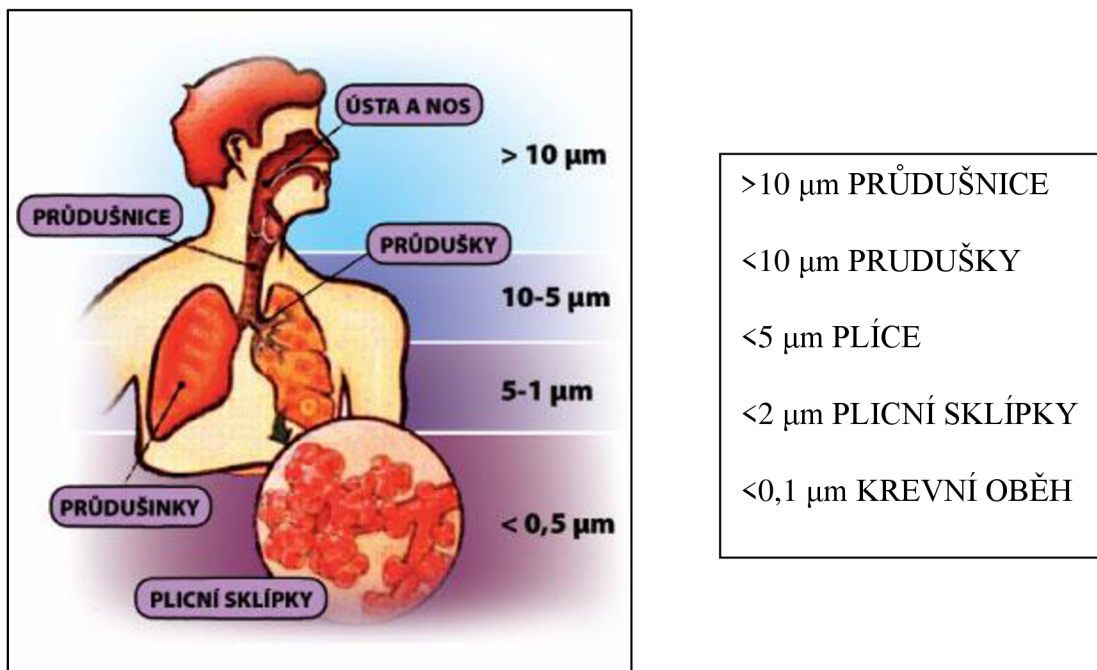
2.5 Zdravotní problémy při obrábění kompozitních materiálů

Uhlíková, kevlarová a skleněná vlákna používaná při výrobě kompozitu jsou obecně chemicky inertní a nezpůsobují značné zdravotní riziko, pokud jsou ve formě suché tkaniny a po vytvrzení pryskyřicovou maticí. Nicméně, při obrábění vytvrzených laminátových kompozitů se mohou uvolňovat některá krátká vlákna a prach pryskyřic. To může vést ke vzniku částic ve vzduchu či suspendovaných částic na pracovišti, které mohou být velkým potenciálním rizikem pro pracovníky. Po vdechnutí mohou být některá dlouhá a tenká vlákna zachycena v hlubokých plicích a způsobit poškození tkáně. Pokud jsou vlákna vdechnuta a přilnou k plicním sklípkům, s největší pravděpodobností tam zůstanou déle a mohou způsobit tvorbu zjizvené tkáně, což snižuje funkci plicních sklípků pro výměnu plynů. [4]

2.5.1 Inhalační expozice

Fyzikální povaha výztužných vláken je činí potenciálně toxickými pro člověka. Největší obavy jsou spojeny s inhalační expozicí vzdušným vláknitým částicím. Délka a průměr částice jsou důležitými aspekty rizik expozice. Průměr částice do značné míry určuje, kde se částice v dýchacím traktu uloží. Délka částice ovlivňuje, jak dobře se obranný mechanismus plic dokáže vyrovnat s částicí poté, co byla uložena. Delší částice mají menší pravděpodobnost odstranění z plic. Proto vzduchem přenášené vláknité částice dýchatelne velikosti představují největší riziko pro lidské zdraví. [1]

Obecně platí, že částice je považována za nedýchatelnou, pokud je jeho aerodynamický průměr větší, než $10\ \mu\text{m}$. Nicméně, mnoho studií při definování horní hranice dýchatelného průměru uvažuje místo usazení částic v dýchacím traktu. S klesajícím aerodynamickým průměrem částice se zvyšuje pravděpodobnost, že částice bude uložena v dolních oblastech dýchacího traktu, viz. Obr. 2. Téměř všechny částice s aerodynamickým průměrem větším, než $10\ \mu\text{m}$ jsou zachyceny v nosní dutině. Většina částic s aerodynamickým průměrem mezi 5 a $10\ \mu\text{m}$ bude uložena v oblast nosohltanu. Přibližně 40 % částic s aerodynamickým průměrem mezi 2 a $5\ \mu\text{m}$ se uloží v průdušnici a koncových průduškách. Částice menší než $2\ \mu\text{m}$ má vysokou pravděpodobnost dosažení koncových průdušek a oblasti plicních sklípků. [1]



Obr. 2 - Průnik dýchacích cest [9]

2.5.2 Dermální expozice

Testy kontaktu kevlaru s kůží na zvířatech a lidech neprokázaly žádný potenciál pro senzibilizaci kůže a nízký potenciál pro podráždění kůže. V případech, kdy pracovníci hlásili mírné podráždění pokožky, bylo zjištěno, že se jednalo o důsledek nahromadění vláken pod těsným oblečením. Toto podráždění bylo způsobeno mechanickým třením vláken o kůži. [1]

2.5.3 Koncentrace částic ve vzduchu, velikost částic

Dlouhá vlákna jsou 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 pryskyřičný prach rozptýlí a uvolňuje se s drobnými 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 mikronů, aramidová vlákna 8 mikronů a skleněná vlákna 3 až 25 mikronů. To podtrhuje důležitost toho že, aerodynamický průměr respirační masky musí být menší než 3 mikrony, aby byla zajištěna dostatečná ochrana pracovníků. [4] Vliv jednotlivých kompozitních komponentů na lidské zdraví je zobrazen v Tab. 1.

Tab. 1 - Složky kompozitu a jejich účinky na konkrétní orgány [4]

Kompozitní komponenty	Postižené orgány	Možné účinky na zdraví
Pryskyřice		
Epoxidové pryskyřice	Kůže, plíce, oči	Kontaktní a alergická dermatitida, konjunktivitida
Polyuretanové pryskyřice	Kůže, plíce, oči	Respirační senzibilizace, kontaktní dermatitida, konjunktivitida
Fenolformaldehyd	Kůže, plíce, oči	Jak je uvedeno výše (potenciální karcinogen)
Polyamidy	Kůže, plíce, oči	Jak je uvedeno výše (potenciální karcinogen)
Výztužné materiály		
Aramidová vlákna	Kůže (plíce)	Podráždění kůže a dýchacích cest, kontaktní dermatitida (chronické intersticiální onemocnění plic)
Uhlíková/grafitová vlákna	Kůže (plíce)	Jak je uvedeno u aramidových vláken
Skleněná vlákna (Nepřetržitě vlákno)	Kůže (plíce)	Jak je uvedeno výše
Tvrdidla a tužidla		
diaminodifenylsulfon	-	Nejsou známy žádné účinky při expozici na pracovišti
methyldianilin	Játra, kůže	Hepatotoxicita, podezření na lidský karcinogen

2.6 Vliv řezných podmínek na množství a velikost prachových částic

Vliv řezných parametrů (řezná rychlost a rychlost posuvu) a geometrie nástroje na škodlivé částice při ořezávání CFRP laminátů.

Počet škodlivých částic klesá s rostoucí rychlostí posuvu a/nebo klesající řeznou rychlostí. To znamená, že kombinace nízké řezné rychlosti a vysoké rychlosti posuvu by měla zajistit vytvoření minima škodlivých částic. Tato kombinace parametrů obrábění

však podporuje výskyt mechanických poškození (matrice a vlákna), které jsou zodpovědné za špatnou kvalitu povrchu. Optimální řezné podmínky pro snížení počtu škodlivých částic je kombinace vysoké rychlosti posuvu, nízké řezné rychlosti a malé axiální hloubky řezu. [10]

Při obrábění kompozitních materiálů záleží také na orientaci vláken laminátu. Například jednosměrné ($0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ$) a vícesměrné lamináty. Pokud jde o celkový počet shromážděných částic, jednosměrné vzorky s 90° orientací generují nejvyšší hmotnost částic. Nicméně oříznutí jednosměrných vzorků orientovaných na 0° vede k vytvoření nejnižšího počtu částic. [10]

Dalším faktorem může být i opotřebení a povlakování nástroje. Bylo pozorováno, že při obrábění vícesměrných vzorků pomocí karbidového nástroje s povlakem byla produkována vyšší hmotnostní koncentrace a počet částic ve srovnání se stejným nástrojem bez povlaku. Navíc při stejných podmínkách obrábění byla kvalita povrchu nepovlakovaného nástroje podstatně horší ve srovnání s povrchem získaným nástrojem s povlakem. Tyto výsledky byly připsány fenoménu opotřebení nepovlakovaného nástroje, který může být vyšší ve srovnání s povlakovaným nástrojem. Na základě těchto výsledků můžeme zdůraznit silnou vazbu mezi stavem opotřebení nástroje a počtem škodlivých částic generovaných po obrábění. [10]

3 Metodika

Metodika práce popisuje postup realizace experimentálních měření z pohledu jejich přípravy, provedení a vyhodnocení výsledků.

Obráběný kompozitní materiál byl obráběn za různých řezných podmínek, přičemž vznikaly třísky, které byly následně zkoumány z hlediska jejich velikosti a množství.

Obrábění vzorků bylo uskutečněno na frézce FNG 32 a následné měření prachových částic probíhalo na konfokálním mikroskopu Keyence. Pro přesnou kvantifikaci velikosti a tvaru prachových částic byly použity snímky ze SEM (Rastrovací elektronový mikroskop Tesca Mira 3. Snímky byly pořízeny Ing. Pavlem Hanusem, Ph.D., z Technické univerzity v Liberci, Fakulty strojní, Katedry materiálu).

Experimentální měření probíhalo v Laboratoři třískových technologií a procesů při Katedře obrábění a montáže v prostorách Technické univerzity v Liberci na budově L.

3.1 Obráběný kompozitní materiál

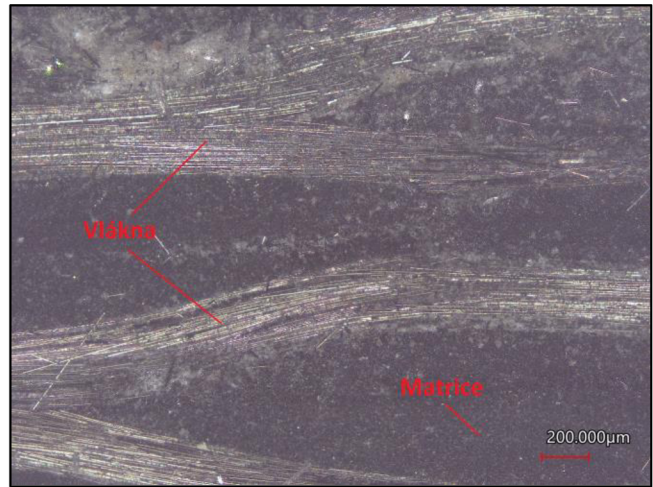
Jako obráběný materiál byly použity kompozitní desky, viz. Obr. 3, vyztužené uhlíkovými vlákny s tkaninou keprové vazby a orientací vláken 90°. Tento materiál byl zvolen pro jeho široké použití při výrobě odlehčených konstrukcí například v leteckém průmyslu. Podrobné informace o materiálu jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 – Vlastnosti obráběné kompozitní desky [11]

Délka [mm]	250
Šířka [mm]	40
Tloušťka [mm]	4,5
Metoda výroby	Vakuová infuze
Výztuž	CCH600 (Kordkarbon a.s.)
Matrice	Epoxidová pryskyřice LG120 (GRM Systems s.r.o.)
Tužidlo	HG 356 (GRM Systems s.r.o.)
Typ vazby	Keprová (2x2 cm)
Gramáž výztuže [g/cm ²]	600



Obr. 3 – Kompozitní desky

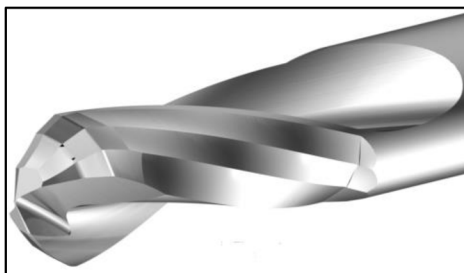


Obr. 4 - 5x zvětšený řez deskou

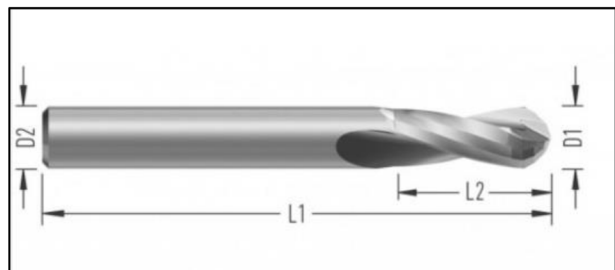
Na mikroskopickém snímku, Obr. 4, je vidět 5x zvětšený řez deskou, zřetelně vykreslující, jakým způsobem je prosycena tkanina s uhlíkovými vlákny epoxidovou pryskyřicí.

3.2 Řezný nástroj

Pro experiment této bakalářské práce byl použit 2-břítý vrták od společnosti Unicut, Obr. 5, 6 a 7. Vrták byl o průměru 6 mm a pracovní délce 12 mm. Nástroj byl vyroben ze slinutého karbidu bez povlaku. Geometrie vrtáku byla speciálně určena pro obrábění kompozitních dílů. Řezný nástroj byl volen s ohledem na dostupnost a pořizovací cenu. V experimentu se použily 3 shodné vrtáky, každý vrták měl určené jiné řezné podmínky. Měření opotřebení řezného nástroje bylo realizováno na hřbetu. Veškeré technické specifikace řezného nástroje potřebné pro experiment jsou uvedeny v Tab. 3.



Obr. 5 - Břít vrtáku [12]



Obr. 6 - Rozměry vrtáku [12]

Tab. 3 – Parametry řezného nástroje [12]

Průměr vrtáku D1 [mm]	6
Délka řezné části vrtáku L2 [mm]	12
Celková délka vrtáku L1 [mm]	57
Průměr upínací části vrtáku D2 [mm]	6
Počet břitů	2
Řezný materiál	SK
Povlak	Bez povlaku
Označení výrobce	V6010 UC-12594
Cena [Kč]	624



Obr. 7 – Vrták použitý při experimentu

3.3 Řezné podmínky

Řezné podmínky vychází z odborné literatury a doporučení výrobce řezného nástroje. Rovněž jsou určeny podle výkonu použitého stroje, na kterém experiment probíhal. Pro experimenty byly zvoleny 3 různé řezné rychlosti. Posuv byl volen jeden s konstantní hodnotou $f_n = 0,1$ mm/ot.

Řezné podmínky jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4 - Řezné podmínky

Parametr	Hodnota	Jednotka
Řezná rychlost v_{c1}	15	m/min
Řezná rychlost v_{c2}	35	m/min
Řezná rychlost v_{c3}	55	m/min
Posuv na otáčku f_n	0,1	mm/ot

3.4 Obráběcí stroj

Experimentální část práce týkající se vrtání do obráběného materiálu byla kompletně provedena na frézce FNG 32, Obr. 8, od výrobce TOS Olomouc s.r.o. Veškeré informace o obráběcím stroji jsou uvedeny v Tab. 5. Vrtání probíhalo do plného materiálu, bez procesní kapaliny.

Tab. 5 - Parametry frézky FNG 32 [13]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Rozměr pracovního stolu	800x400	mm
Maximální nosnost stolu	350	kg
Počet upínacích drážek	7	-
Výkon hlavního motoru	4	kW
Výkon posuvového motoru	1,1	kW
Pracovní zdvih podélný (osa X)	600	mm
Pracovní zdvih příčný (osa Y)	400	mm
Pracovní zdvih svislý (osa Z)	400	mm



Obr. 8 - Frézka FNG 32

3.5 Odsávací zařízení

Při vrtání do kompozitních materiálů vznikají kromě klasických jemných třísek i prachové částice, které jsou pro zdraví člověka velmi nebezpečné. Z tohoto důvodu se musí zajistit dostatečná ochrana zdraví pracovníka obsluhujícího stroj. V našem případě ochranu zajišťovalo mobilní odsávací zařízení POC9 M1 viz. Obr. 9. Veškeré informace o použitém odsávacím zařízení jsou popsány v Tab. 6.

Tab. 6 - Parametry odsávacího zařízení POC9 M1 [11]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Množství odsávaného vzduchu	900	m ³ /h
Tlak odsávání	1200	Pa
Výkon elektromotoru	0,7	kW
Hlučnost	65	dB
Minimální velikost zachycených částic	0,3	μm

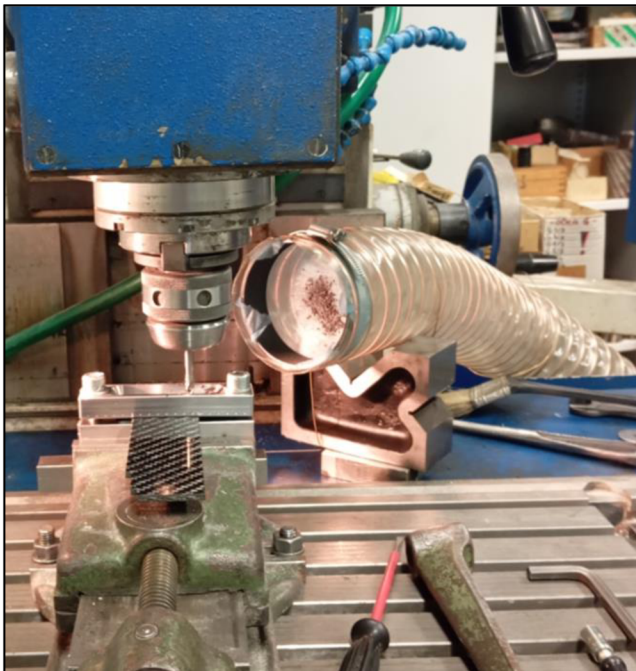


Obr. 9 - Odsávací zařízení POC9 M1

3.6 Použité přípravky

3.6.1 Přípravek na uchycení filtru do odsávacího zařízení

Do hadice odsávacího zařízení bylo potřeba upevnit filtr, který bude zachycovat polétavé částice během vrtání, aby je bylo možné sesbírat a následně zkoumat. K tomu sloužil na 3D tiskárně vytištěný přípravek, viz. Obr. 11, na který se upevnil filtr a uchytíl se na vstupu hadice do odsávacího zařízení Obr. 10.



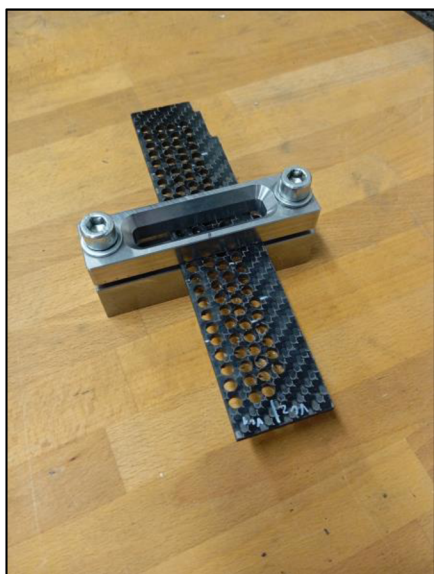
Obr. 10 - Filtr v hadici odsávacího zařízení



Obr. 11 - 3D tištěný přípravek

3.6.2 Přípravek na upnutí obrobku

Obráběná kompozitní deska byla upnuta do speciálně navrženého upínacího přípravku, který se skládal ze dvou těles spojených dvěma šrouby, Obr. 12 a 13. Tento upínací přípravek zjednodušoval vrtání, jelikož zrychlil opakované upínání kompozitních desek mezi každým měřením a zároveň chránil obsluhu před polétavým prachem díky jeho polouzavřené konstrukci.



Obr. 12 – Přípravek s kompozitní deskou



Obr. 13 – Upínací přípravek ve svěráku

3.7 Měření velikosti prachových částic

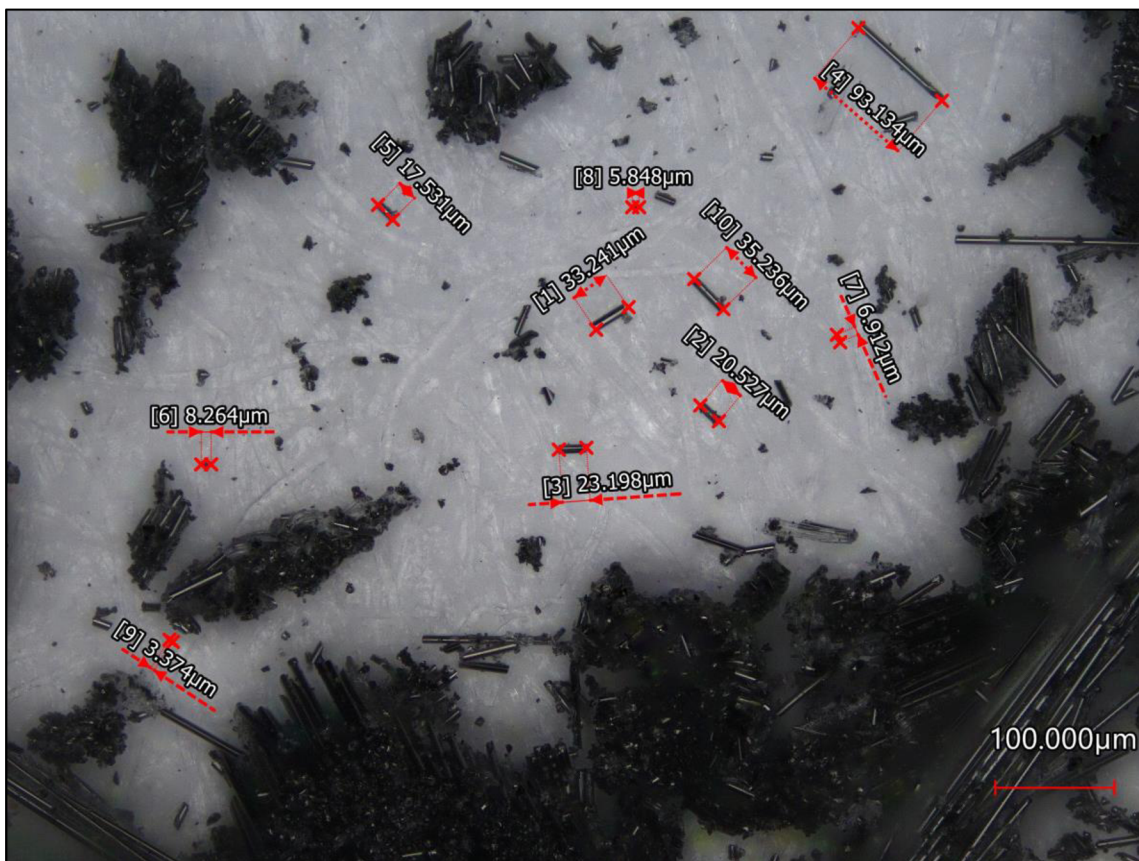
Měření velikosti prachových částic probíhalo na konfokálním mikroskopu s laserovým skenováním Keyence VK-X 1000 Obr. 14. Tento mikroskop disponuje vysokým rozlišením povrchu materiálů s maximálním rozlišením 0,01 nm. Pomocí tohoto mikroskopu probíhalo veškeré měření velikosti prachových částic. Měření probíhalo po každé 5-té vyvrtané díře, po které se sbíraly vzorky prachových částic, Obr. 15. Velikost částic byla měřena pomocí SW VK-Viewer od firmy Keyence.



Obr. 14 – Konfokální mikroskop Keyence VK-X 1000



Obr. 15 - Třísky sesbírání po vyvrtání 20-té díry při řezné rychlosti v_{c1}



Obr. 16 - Detailní měření velikosti prachových částic v SW VK-Viewer

3.8 Sběr prachových částic

K zachycení prachových částic byl použit filtr vyrobený z netkané textilie jejíž parametry jsou uvedeny v Tab. 7. Textilie byla nastříhána na rozměry 150x150 mm a upevněna do hadice odsávacího zařízení pomocí 3D vytištěného přípravku zmíněného v podkapitole 3.6.1.

Tab. 7 - Parametry netkané textilie

Pegatex - PFNonwovens	
Materiál	Pegatex S anitsat
Číslo materiálu	408243
Číslo šarže	TRZ0A13747
Šířka [m]	1000
Délka [m]	0,5
Váha [gsm]	17
Barva	Blue/401

3.9 Vážení filtrů

Hmotnost filtrů, které zachycovaly polétavý prach během vrtání, byla vážena pomocí kontrolní laboratorní váhy T-SCALE Electronics MFG - NHB-1500+, viz. Obr. 17. Jedná se o velice přesnou laboratorní váhu do 1500 g s přesností vážení 0,01 g.

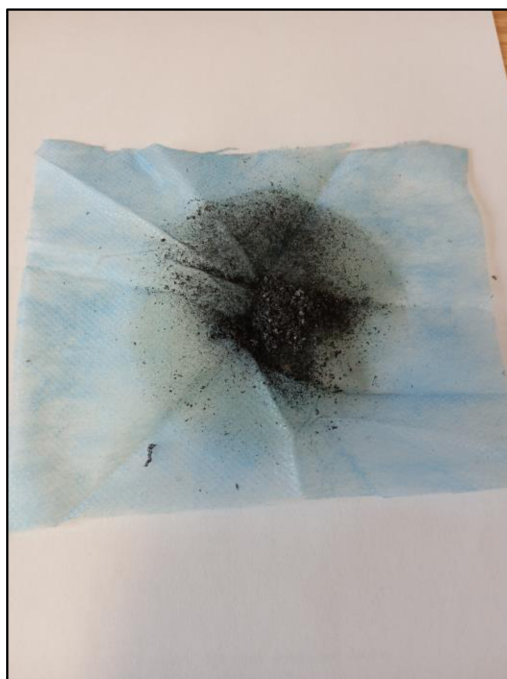
Veškeré technické parametry k laboratorní váze jsou uvedeny v Tab. 8.

Tab. 8 - Parametry váhy T-Scale [10]

Váha T-scale	
Výrobce	T-Scale Electronics MFG
Typ	NHB-1500+
Evidenční číslo	DM81405
Maximální hmotnost [g]	1500
Minimální hmotnost [g]	0,2
Přesnost [g]	0,01



Obr. 17 – Laboratorní váha T-SCALE

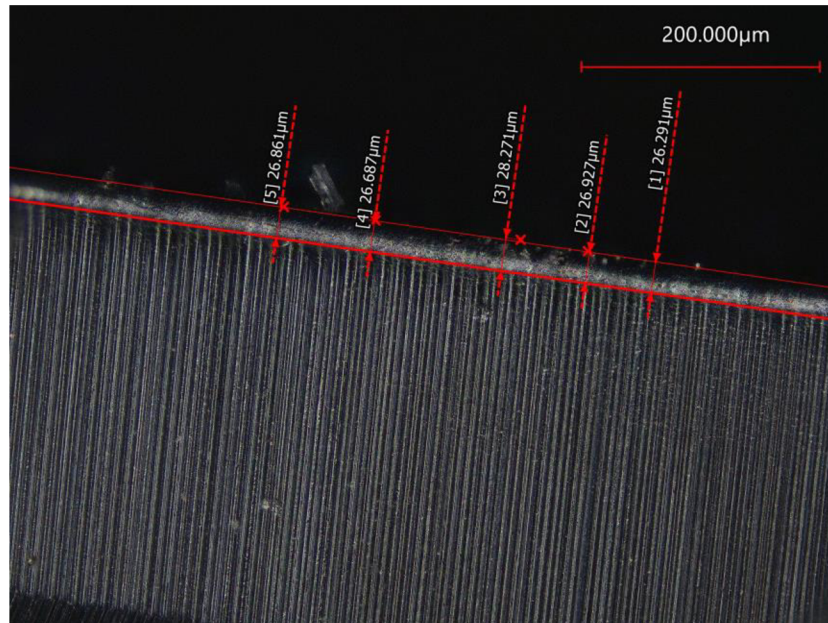


Obr. 18 – Filtr s nasbíranými částicemi

Před operací vrtání byl vždy nejdříve zvážen obráběný materiál, tj.: kompozitní deska a filtr. Následně po vyvrtání 4 děr (po operaci vrtání) bylo opět zrealizováno vážení jak obráběného materiálu, tak i filtru. Porovnávala se hmotnost obráběného materiálu a filtru před a po vrtání. Po zvážení se filtr z netkané textilie uložil do uzavíratelné fólie pro další zkoumání.

3.10 Měření opotřebení řezného nástroje

Měření velikosti opotřebení řezného nástroje probíhalo na konfokálním mikroskopu Keyence VK-X 1000. Hodnoty opotřebení byly změřeny v zobrazovacím programu VK-Viewer. Měření opotřebení probíhalo po vyvrtání poslední díry každým nástrojem.



Obr. 19 - Detail měření opotřebení v SW VK-Viewer

3.11 Postup měření

Jak už bylo řečeno výše, měli jsme pro potřeby experimentu shodné nástroje, pro každý nástroj byla použita jiná řezná rychlost a jeden standardní posuv. Každým nástrojem se vyvrtalo celkem 50 děr. Po každé 5-té vyvrtané díře se sbíraly vzorky prachových částic. Během vrtání těchto kontrolovaných děr bylo odsávání vypnuté. Při vrtání všech zbylých děr se na odsávací zařízení nasadil speciální filtr, který zachycoval vyvrtané částice. Tyto filtry se následně vážily a porovnávaly s celkovým vyvrtaným objemem z obrobku.

Postup byl tedy následující:

- 1. díra-sběr prachových částic bez odsávání,
- 2-4 díra-odsávání běží a sbírá prach na filtr,
- 5. díra-sběr prachových částic bez odsávání,
- cyklus se opakuje až do 50-té vyvrtané díry.

4 Experimentální část

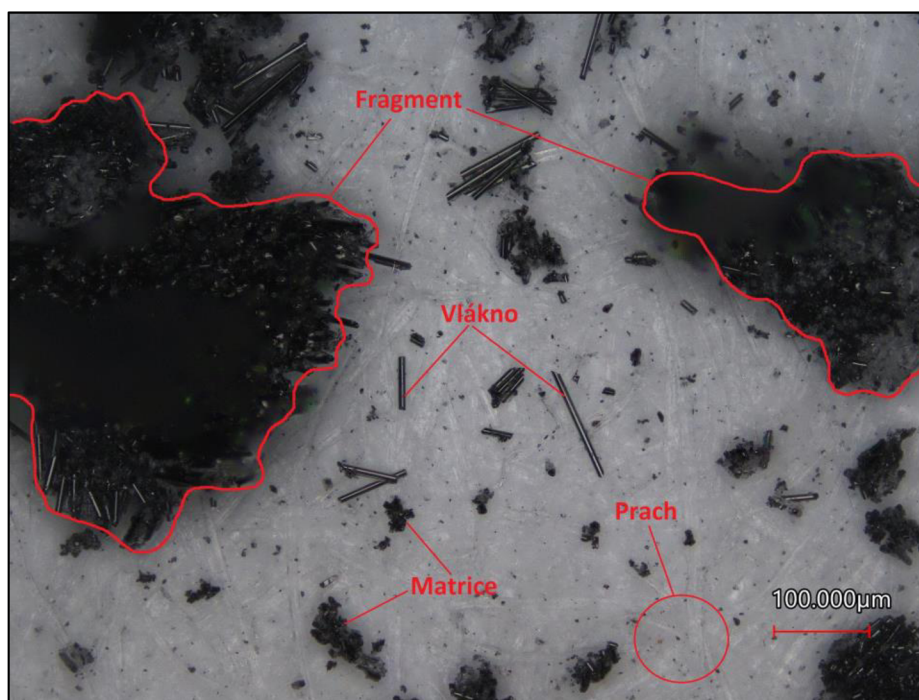
Experimentální část práce se zaměřila na to, jaký mají vliv řezné podmínky na četnost a velikost prachových částic při vrtání do kompozitního materiálu. A dále jaký vliv mají řezné podmínky na četnost zachycených prachových částic na filtru. Podkapitola 4.1 se zabývá analýzou prachových částic, která uvádí, jaké typy částic byly při zkoumání nalezeny, dále uvádí informace o velikosti a četnosti prachových částic. V podkapitole 4.2 je popsáno jaký vliv má změna řezných parametrů na velikost a četnost generovaných prachových částic při obrábění a na četnost zachycených prachových částic na filtru. A v podkapitole 4.3 je řešen vliv opotřebení nástroje na velikost a četnost prachových částic.

4.1 Analýza zachycených prachových částic

Z provedené podrobné analýzy zachycených prachových částic v rámci celého experimentu, byla prokázána přítomnost 4 typů prachových částic:

- 1) jemný prach (směs matrice a vláken) o rozměrech od 1 μm do 5 μm ,
- 2) volná vlákna o rozměrech od 10 μm do 400 μm ,
- 3) kusy matrice o rozměrech od 5 μm do 40 μm ,
- 4) fragmenty (matrice + vlákna) o rozměrech 100 μm do 500 μm .

Jednotlivé typy zachycených prachových částic jsou ukázány na Obr. 20.



Obr. 20 - Typy prachových částic z konfokálního mikroskopu

4.1.1 Velikost a četnost prachových částic

Zkoumáním velikosti prachových částic bylo zjištěno, že velikost částic se pohybovala v rozmezí 1-100 μm pro různé řezné rychlosti a standardní posuv.

V následujících Tab. 9 a 10 jsou uvedeny průměrné hodnoty četnosti jednotlivých velikostí prachových částic pro intervaly vrtaných děr. Částice byly ručně počítané pomocí snímků z konfokálního mikroskopu s laserovým skenováním.

Tab. 9 – Velikost a četnost prachových částic

Díra 1-25			
Řezná rychlost	$v_{c1} = 15 \text{ m/min}$	$v_{c2} = 35 \text{ m/min}$	$v_{c3} = 55 \text{ m/min}$
Velikost částic [μm]	Četnost		
1-5 [μm]	57	104	126
5-10 [μm]	42	41	64
10-20 [μm]	18	21	17
30 [μm]	6	7	7
40 [μm]	4	3	3
50+ [μm]	5	5	8
Díra 25-50			
Velikost částic [μm]	Četnost		
1-5 [μm]	125	155	182
5-10 [μm]	64	63	88
10-20 [μm]	17	23	20
30 [μm]	7	9	7
40 [μm]	4	5	5
50+ [μm]	9	8	8


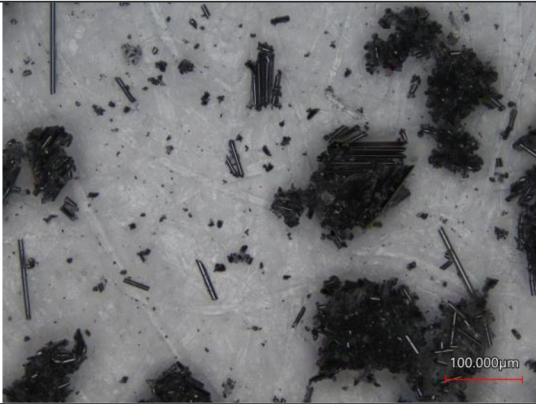

Tab. 10 – Průměrné hodnoty četnosti

Průměrné hodnoty četnosti			
Řezná rychlost	$v_{c1} = 15 \text{ m/min}$	$v_{c2} = 35 \text{ m/min}$	$v_{c3} = 55 \text{ m/min}$
Velikost částic [μm]	Četnost		
1-5 [μm]	90	129	154
5-10 [μm]	53	53	75
10-20 [μm]	17	23	19
30 [μm]	7	8	7
40 [μm]	4	4	4
50+ [μm]	7	6	8

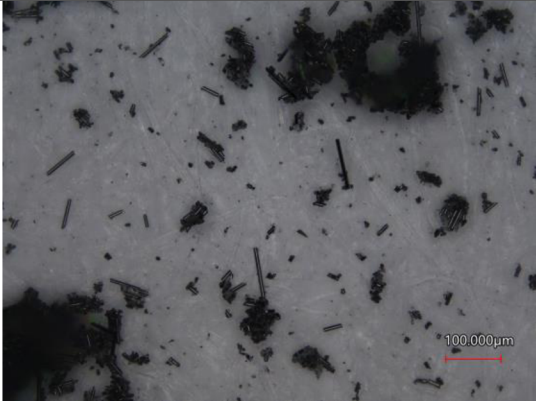
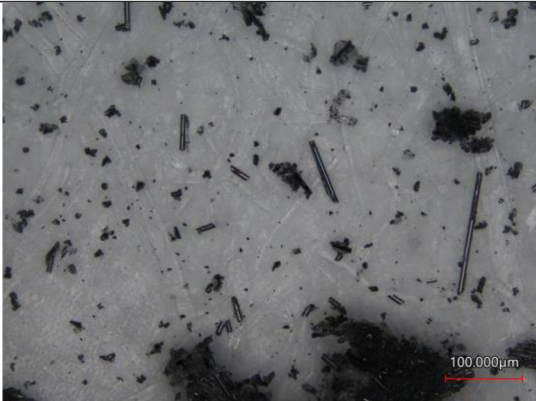
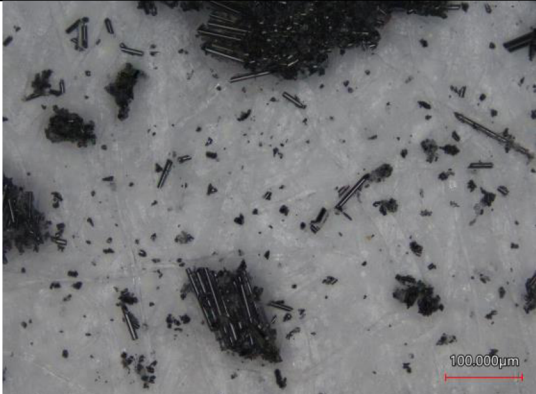
V následujících tabulkách 11, 12 a 13 můžeme vidět snímky, které byly zachyceny na konfokálním mikroskopu pro jednotlivé řezné rychlosti. Při všech řezných rychlostech byly pozorovány všechny 4 typy prachových částic.

Dále jsou v tabulkách uvedeny průměrné velikosti částic s nejistotami měření pro jednotlivé řezné rychlosti a standardní posuv a jejich celková četnost.

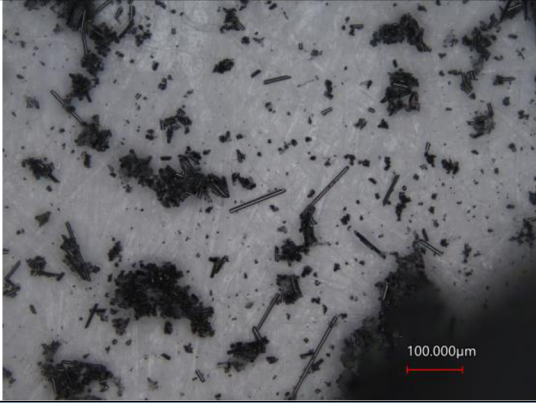
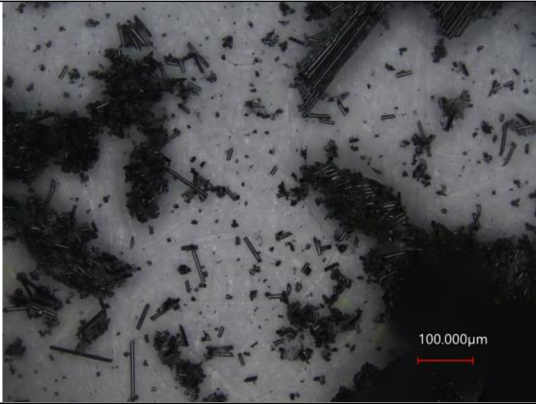
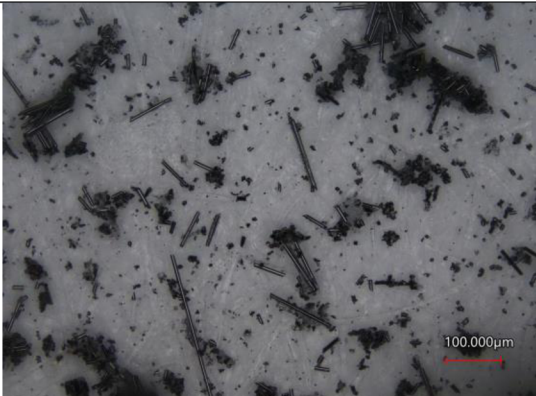
Tab. 11 - Obrázky s velikostmi a četností částic pro vrtané díry 1-50

Díra	1-50
Řezná rychlost	$v_{c1} = 15 \text{ m/min}$
Průměrná velikost \pm nejistota měření [μm]	$9,01 \pm 0,93$
Celkový počet	185
Mikroskop	
Řezná rychlost	$v_{c2} = 35 \text{ m/min}$
Průměrná velikost \pm nejistota měření [μm]	$7,79 \pm 0,57$
Celkový počet	224
Mikroskop	
Řezná rychlost	$v_{c3} = 55 \text{ m/min}$
Průměrná velikost \pm nejistota měření [μm]	$7,30 \pm 0,78$
Celkový počet	266
Mikroskop	

Tab. 12 - Obrázky s velikostmi a četností částic pro vrtané díry 1-25

Díra	1-25
Řezná rychlost	$v_{c1} = 15 \text{ m/min}$
Průměrná velikost \pm nejistota měření [μm]	$9,84 \pm 1,07$
Celkový počet	137
Mikroskop	
Řezná rychlost	$v_{c2} = 35 \text{ m/min}$
Průměrná velikost \pm nejistota měření [μm]	$7,76 \pm 1,10$
Celkový počet	181
Mikroskop	
Řezná rychlost	$v_{c3} = 55 \text{ m/min}$
Průměrná velikost \pm nejistota měření [μm]	$7,57 \pm 1,32$
Celkový počet	224
Mikroskop	

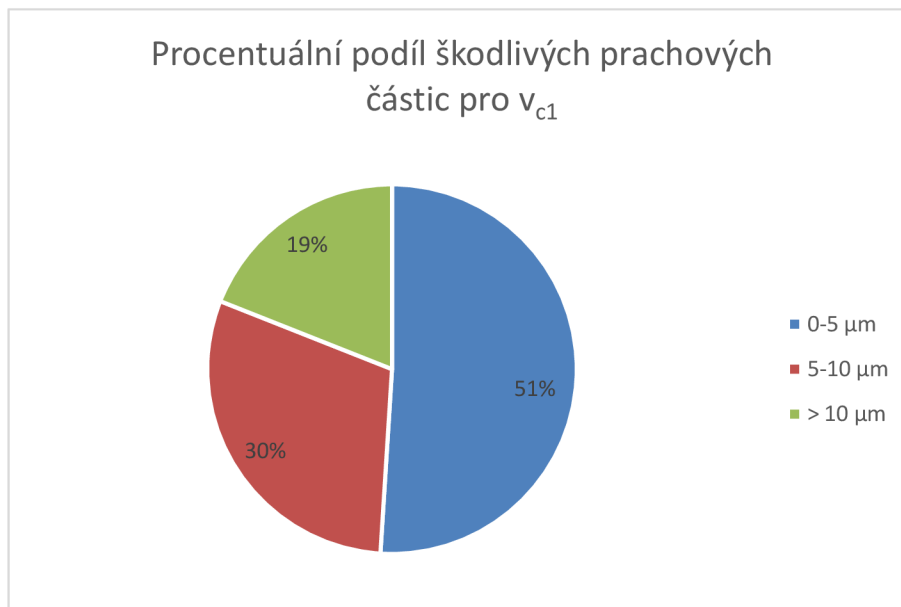
Tab. 13 - Obrázky s velikostmi a četností částic pro vrtané díry 25-50

Díra	25-50
Řzná rychlost	$v_{c1} = 15 \text{ m/min}$
Průměrná velikost ± nejistota měření [μm]	$8,01 \pm 0,69$
Celkový počet	226
Mikroskop	
Řzná rychlost	$v_{c2} = 35 \text{ m/min}$
Průměrná velikost ± nejistota měření [μm]	$7,82 \pm 0,62$
Celkový počet	263
Mikroskop	
Řzná rychlost	$v_{c3} = 55 \text{ m/min}$
Průměrná velikost ± nejistota měření [μm]	$6,98 \pm 1,03$
Celkový počet	308
Mikroskop	

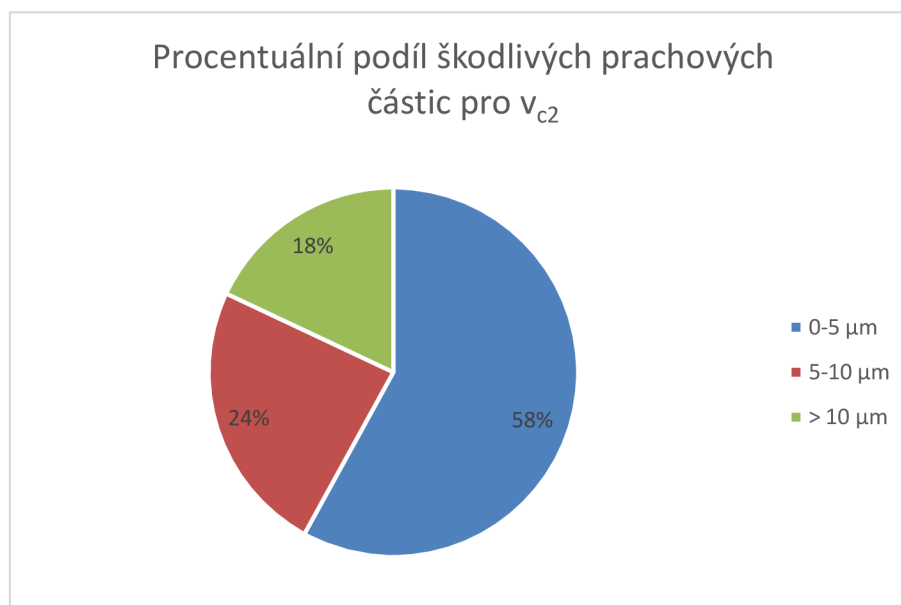
4.1.2 Rozložení prachových částic

Při analýze prachových částic byl sledován procentuální podíl částic, které měly velikost menší než $10\ \mu\text{m}$. Jedná se o limitní hodnotu pro vdechnutí částic, tedy částice, které jsou škodlivé pro zdraví člověka.

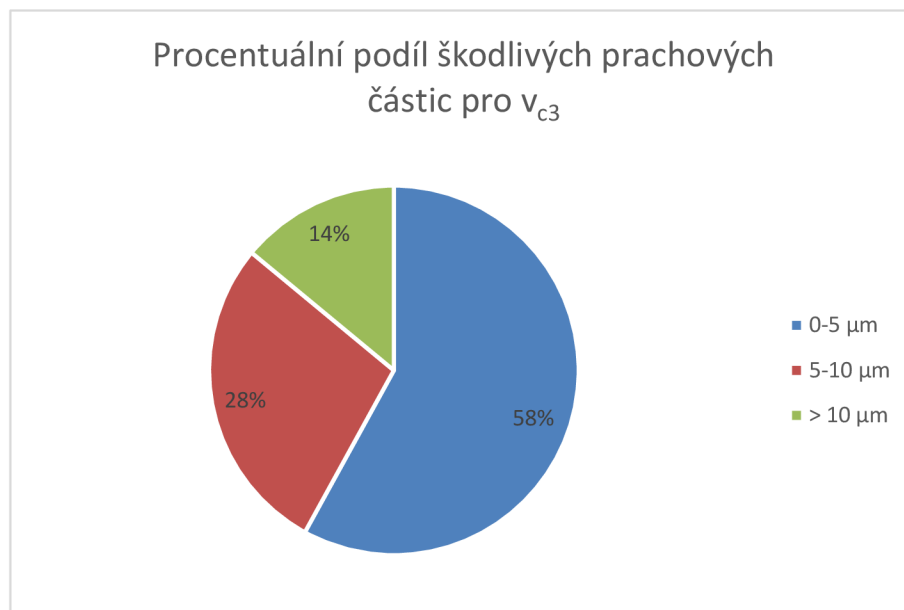
Z nasbíraných prachových částic bylo zjištěno viz Graf. 1, 2, 3, že pro řeznou rychlost v_{c1} byl podíl částic menších než $5\ \mu\text{m}$ 51 %. Pro řeznou rychlost v_{c2} a v_{c3} 58 %.



Graf 1 - Hmotnost prachových částic pro v_{c1}



Graf 2 - Hmotnost prachových částic pro v_{c2}



Graf 3 - Hmotnost prachových částic pro v_{c3}

Z provedené analýzy plyne, že zvýšení řezné rychlosti podporuje zvýšení vzniku množství škodlivých prachových částic o velikosti menší než $5 \mu\text{m}$. Řezné rychlosti $v_{c2} = 35 \text{ m/min}$ a $v_{c3} = 55 \text{ m/min}$ generují více nebezpečných prachových částic tudíž jsou pro zdraví člověka více škodlivé.

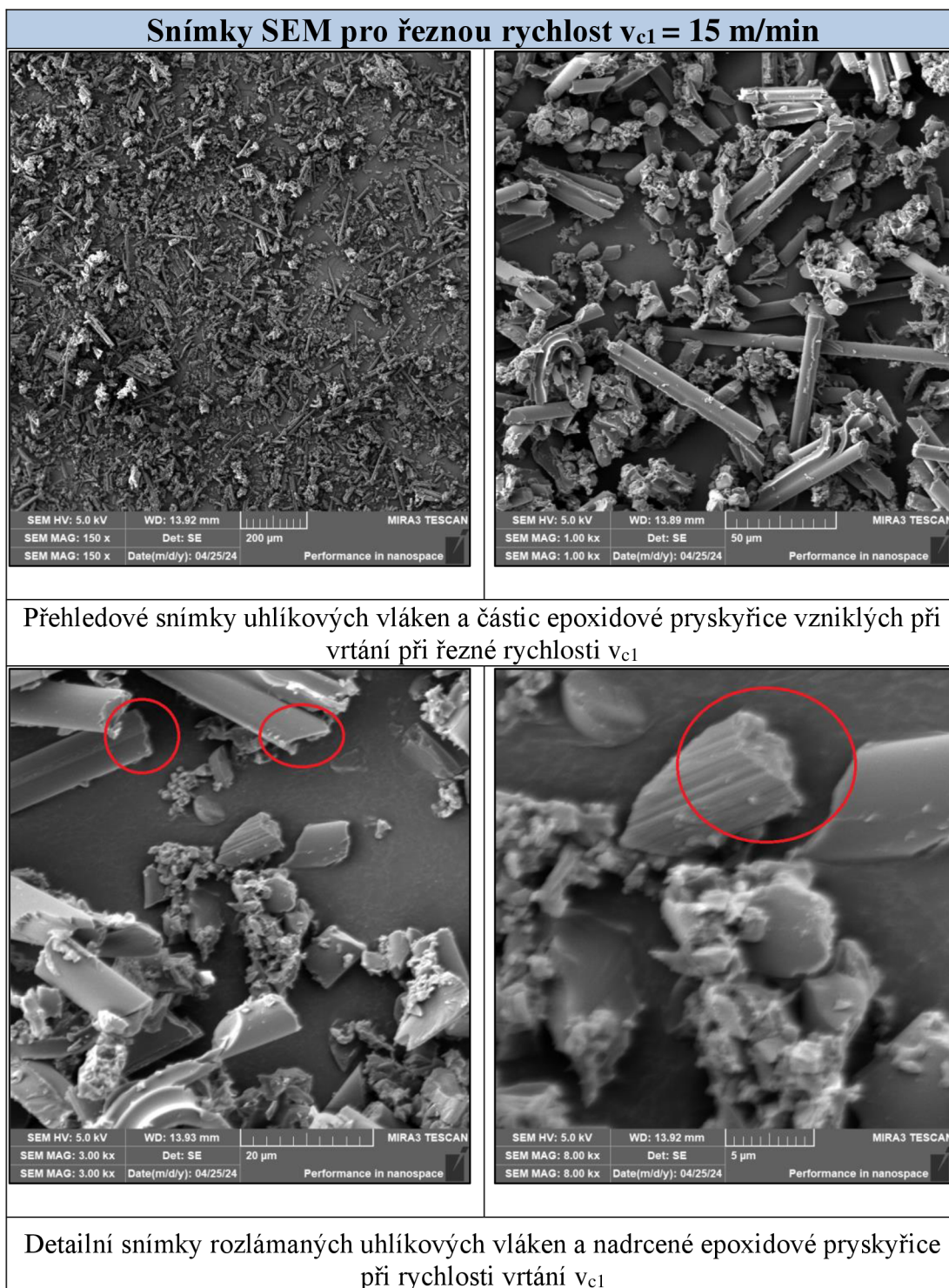
4.1.3 SEM analýza prachových částic

Z analýzy na rastrovacím elektronovém mikroskopu (SEM) uvedené v Tab. 14, 15 a 16 bylo zjištěno, že se uhlíková vlákna lámala pod úhlem nebo kolmo k podélné ose vláken. Nebyly patrné podélné lomy vláken.

Vlákna měla průměr $5 \mu\text{m}$ a jejich délka se pohybovala v rozmezí jednotek až desítek mikrometrů. Uhlíková vlákna se odštípávala na svých koncích, tím vznikaly nejmenší prachové částice.

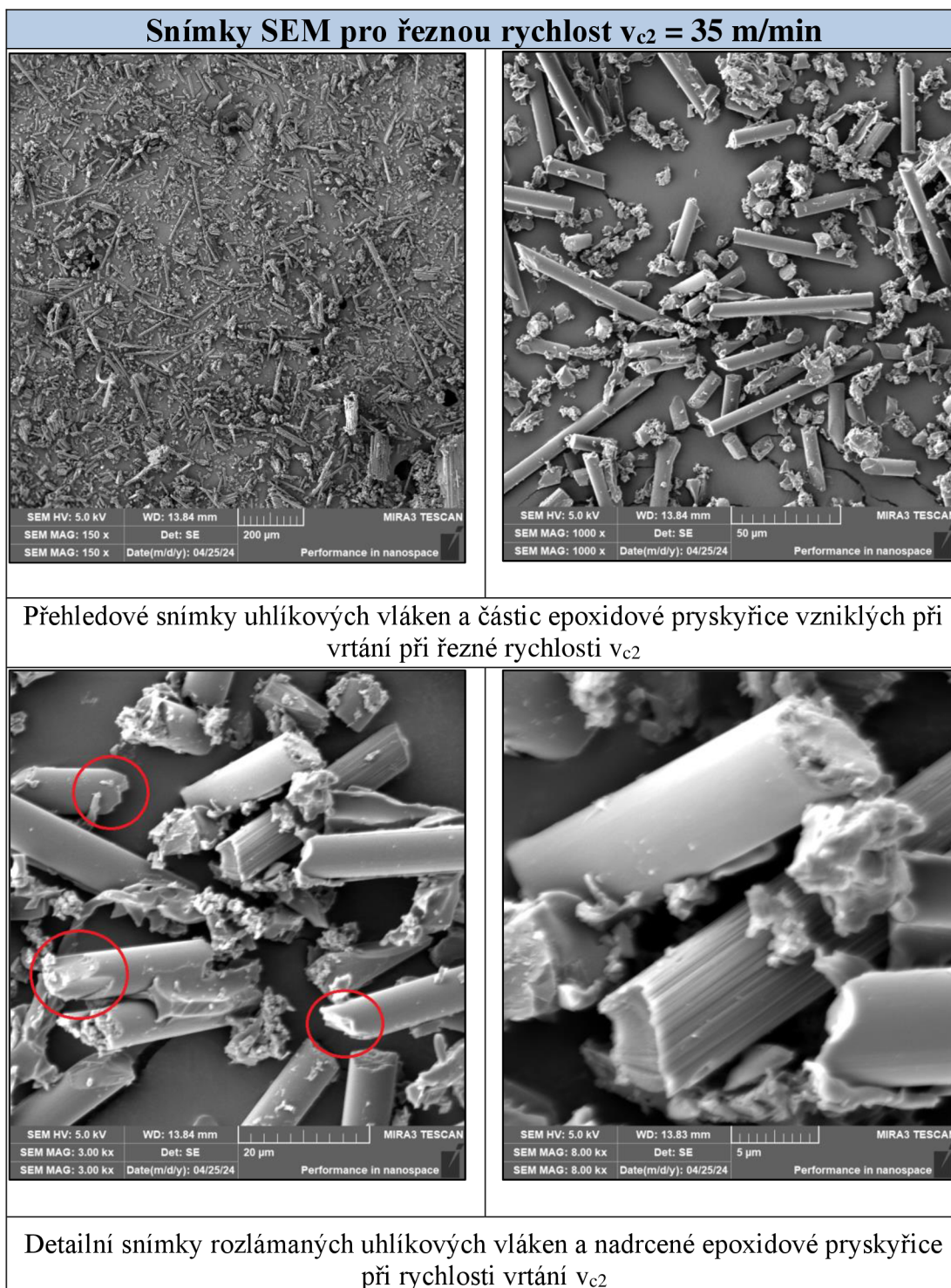
Analýza na SEM také potvrdila výskyt 4 typů prachových částic – velké fragmenty vláken a pryskyřice, kusy matrice, volná vlákna různých velikostí a jemný prach který vznikl odštípnutím z konců vláken.

Tab. 14 - Snímky SEM pro řeznou rychlost v_{c1}



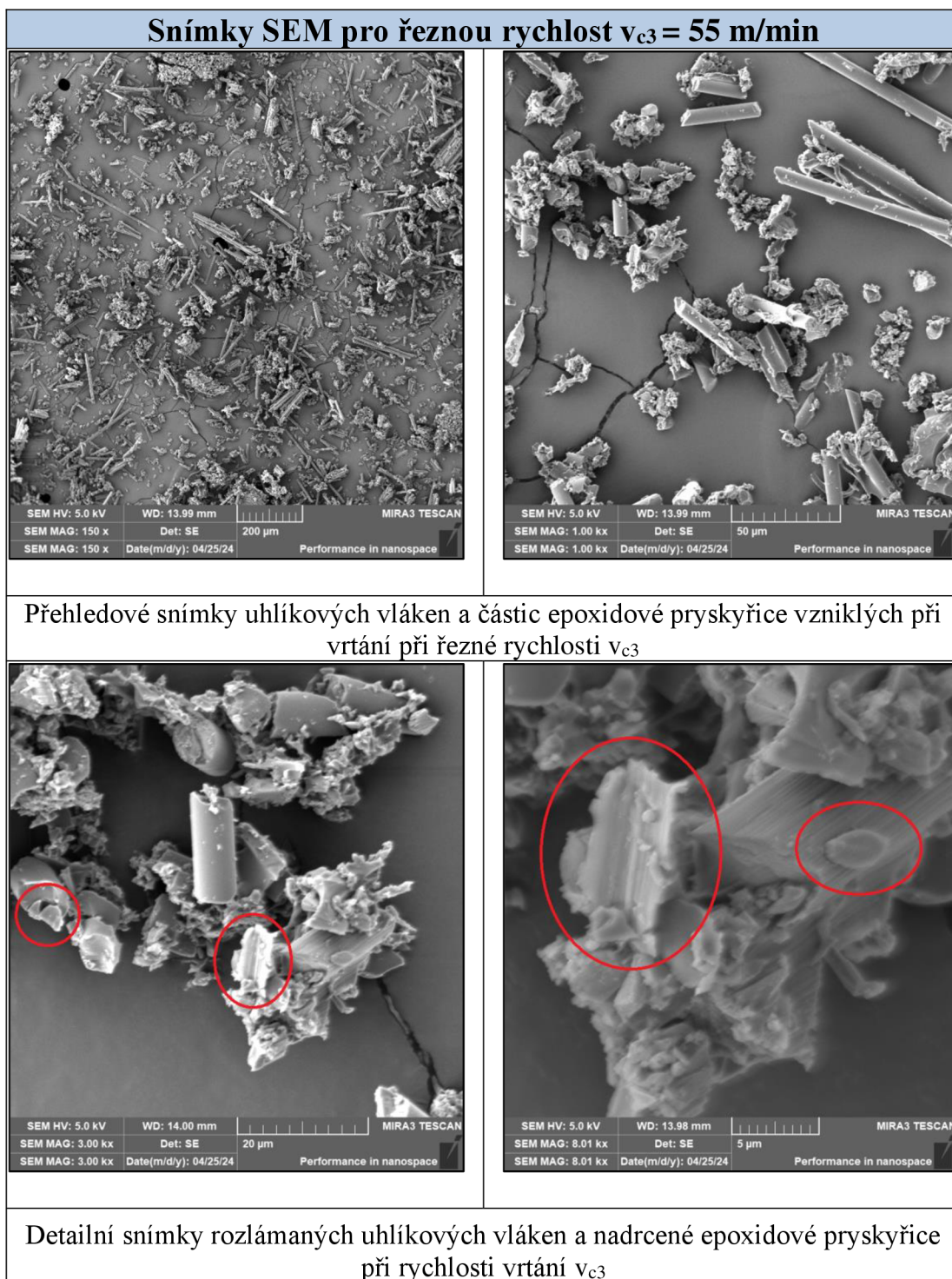
Na snímcích k řezné rychlosti $v_{c1} = 15$ m/min, uvedené v Tab. 14 je vidět, že se uhlíková vlákna lámala pod úhlem nebo kolmo k podélné ose vláken. Nejsou patrné podélné lomy vláken. Velikost vláken se pohybuje v rozmezí jednotek až desítek mikrometrů. Lom vláken není ostrý.

Tab. 15 - Snímky SEM pro řeznou rychlost v_{c2}



Na snímcích k řezné rychlosti $v_{c2} = 35$ m/min, uvedené v Tab. 15 je vidět, že se uhlíková vlákna opět lámala pod úhlem nebo kolmo k podélné ose vláken. Nejsou patrné podélné lomy vláken. Velikost vláken se pohybuje v rozmezí jednotek až desítek mikrometrů. Ze snímků je vidět, že uhlíková vlákna se odštipávají na svých koncích. Tyto odštipnuté části vláken tvoří největší množství malých částic.

Tab. 16 - Snímky SEM pro řeznou rychlost v_{c3}



Na snímcích k řezné rychlosti $v_{c3} = 55$ m/min, uvedené v Tab. 16 je vidět, že se uhlíková vlákna opět lámala pod úhlem nebo kolmo k podélné ose vláken. Nejsou patrné podélné lomy vláken. Velikost nalámaných vláken se pohybuje v rozmezí jednotek až desítek mikrometrů. Lom vláken není ostrý. Na snímcích jsou vidět malé části odložené z vláken.

4.2 Vliv řezné rychlosti na velikost a četnost prachových částic

Jak bylo uvedeno v podkapitole 2.6, řezné parametry mohou velmi silně ovlivňovat velikost a celkovou četnost prachových částic vzniklých při vrtání. Z toho důvodu byl také experiment zaměřen na vliv řezné rychlosti a na velikost a četnost prachových částic.

4.2.1 Vliv řezné rychlosti na velikost a četnost prachových částic (bez odsávání)

Z výsledků v Tab. 17 a 18 a z grafického znázornění v Grafu 4 je patrné, že při zvyšující se řezné rychlosti v_c se velikost prachových částic zmenšovala, a četnost vznikajících prachových částic naopak rostla.

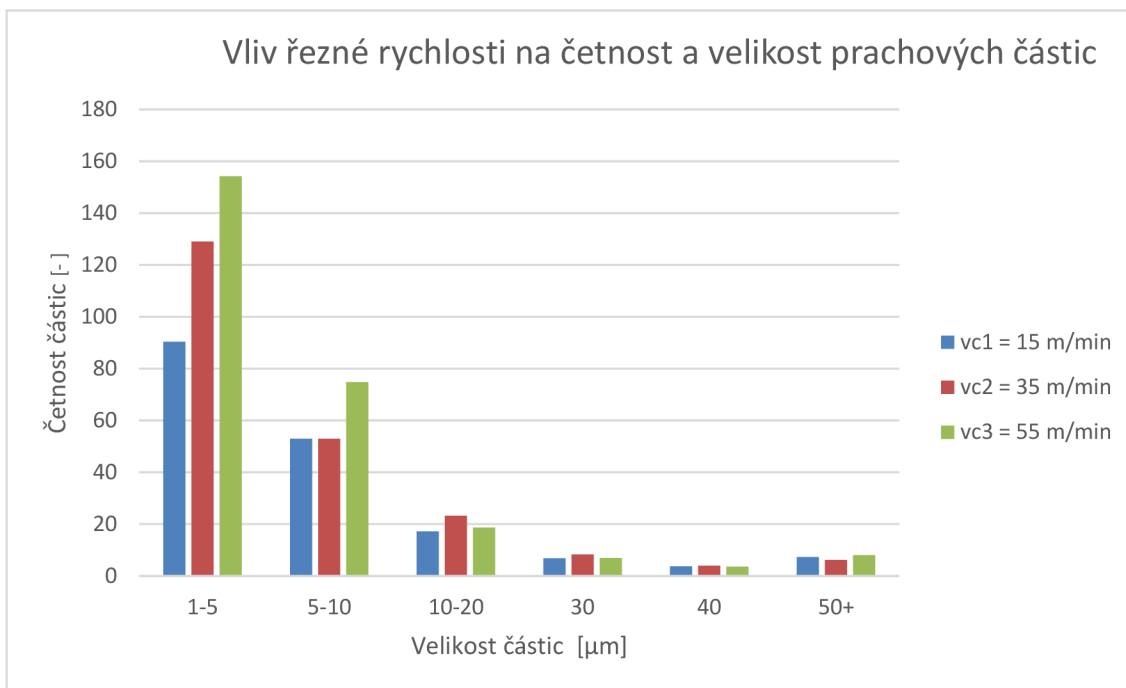
Největší množství generovaných třísek nejmenší velikosti vznikalo při řezné rychlosti $v_{c3} = 55$ m/min. Naopak nejmenší množství částic vznikalo při řezné rychlosti $v_{c1} = 15$ m/min. Zároveň při nejvyšší řezné rychlosti v_{c3} byla průměrná velikost prachových částic 7,30 μm , zatímco při nejmenší řezné rychlosti v_{c1} byla průměrná velikost prachových částic 9,01 μm .

Tab. 17 - Četnost jednotlivých velikostí prachových částic

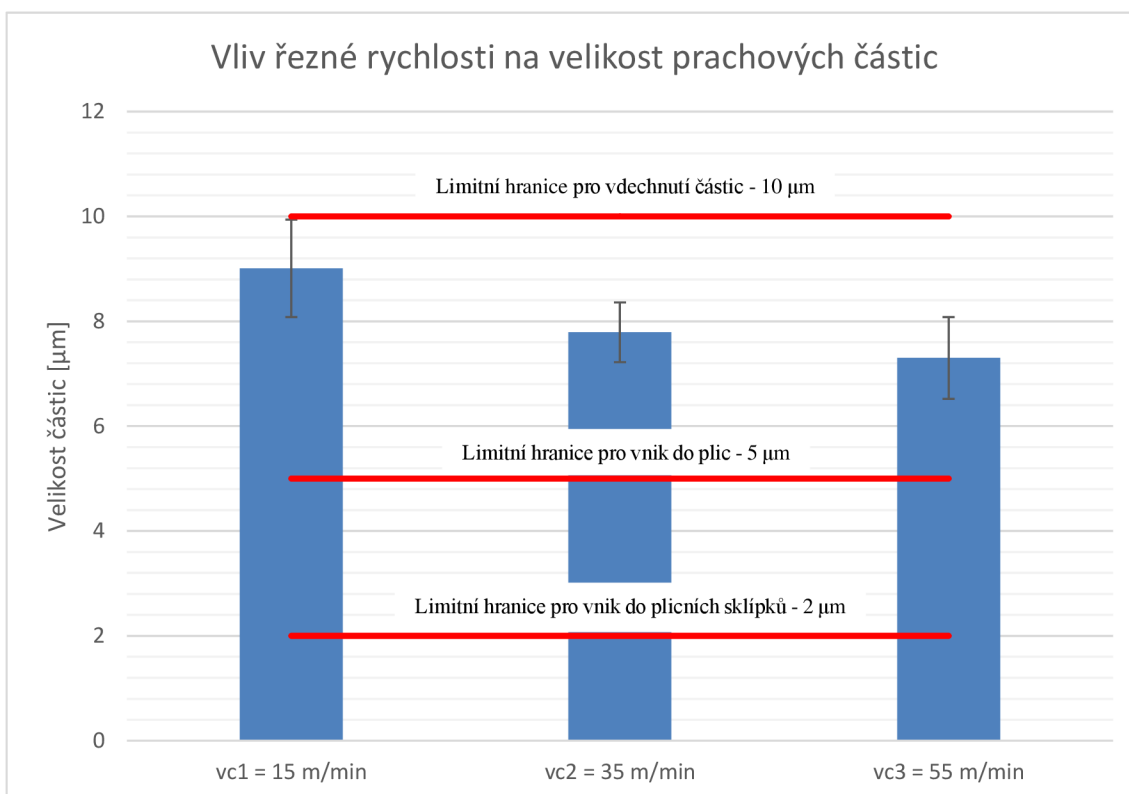
Řezná rychlost	Velikost částic [μm]	1-5	5-10	10-20	30	40	50+
$v_{c1} = 15$ m/min	Četnost	90	53	17	7	4	7
$v_{c2} = 35$ m/min		129	53	23	8	4	6
$v_{c3} = 55$ m/min		154	75	19	7	4	8

Tab. 18 - Průměrná velikost a četnost prachových částic

Řezná rychlost	Průměrná velikost částic \pm nejistota měření [μm]	Četnost částic
$v_{c1} = 15$ m/min	9,01 \pm 0,93	178
$v_{c2} = 35$ m/min	7,79 \pm 0,57	224
$v_{c3} = 55$ m/min	7,30 \pm 0,78	266



Graf 4 - Vliv řezné rychlosti na četnost a velikost prachových částic



Graf 5 – Vliv řezné rychlosti na velikost prachových částic

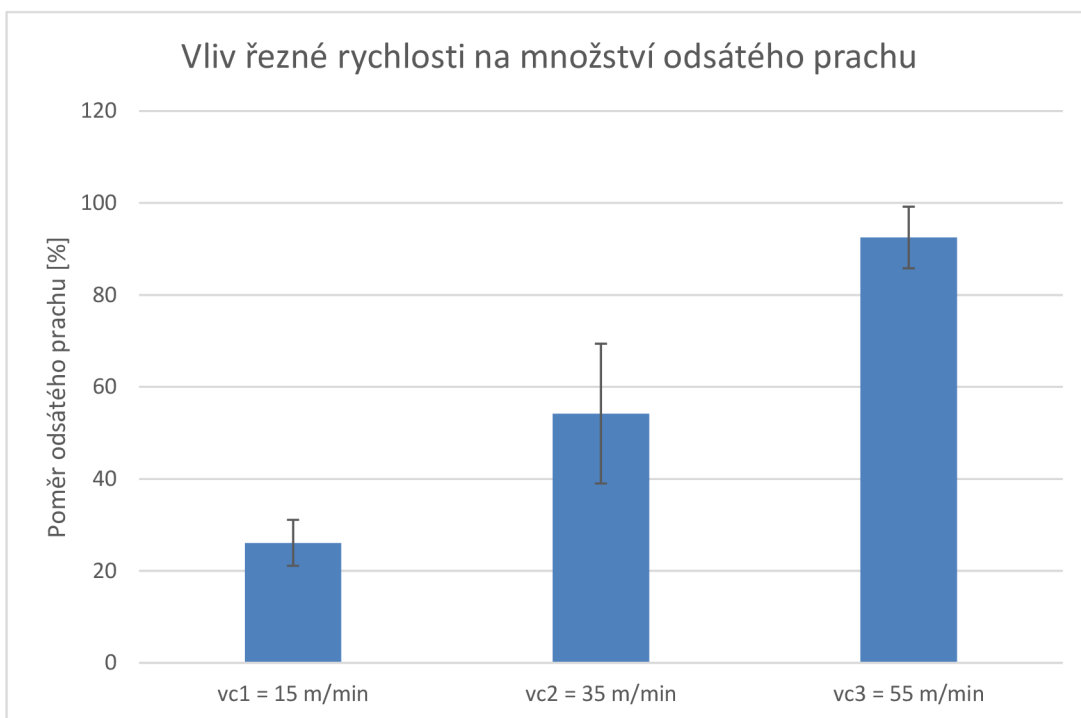
Z Tab. 17 a 18 a dále pak z Grafu 4 a 5 je vidět, že velikost a četnost prachových částic je významně ovlivněna velikostí řezné rychlosti. Se zvyšující se řeznou rychlostí v_c docházelo k tvorbě menších prachových částic a rostla jejich četnost.

4.2.2 Vliv řezné rychlosti na četnost zachycených prachových částic na filtru (při odsávání)

Další část experimentu byla zaměřena na vliv řezné rychlosti na četnost zachycených prachových částic ve filtru. Jak bylo řečeno v kapitole 3, bylo prováděno vážení prachových částic zachycených na filtru odsávacího zařízení a vážení obráběného materiálu, z těchto hodnot se pak vypočítaly procentuální poměry, které jsou zapsány v Tab. 19.

Tab. 19 - Poměr zachycených prachových částic na filtru

Řezný rychlost	$v_{c1} = 15 \text{ m/min}$	$v_{c2} = 35 \text{ m/min}$	$v_{c3} = 55 \text{ m/min}$
Díry	Odsátý/odvrtaný prach [%]		
1-4	28,2	24,5	93,1
6-9	19	31,1	100
11-14	17,6	30,4	100,5
16-19	34,5	59,5	92,8
21-24	19,7	60,5	99,5
26-29	36,5	62,9	96,4
31-34	21,8	78,8	75,7
36-39	31,3	70	81,9
41-44	25,4	45,7	84,6
46-49	27,4	79	100,5



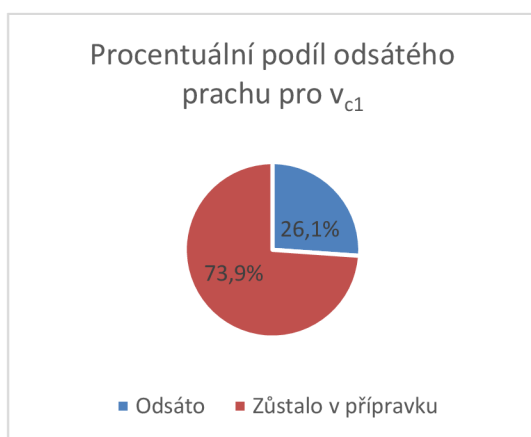
Graf 6 - Vliv řezné rychlosti na množství odsátého prachu

Ze získaných hodnot v Tab. 20 a Grafu 7, 8 a 9 je patrné, že se zvyšující se řeznou rychlostí roste velice znatelně efektivita odsávacího zařízení. Při nejmenší řezné rychlosti $v_{c1} = 15$ m/min byl průměrný poměr odsátého prachu pouhých 26,1 %, zbytek třísek zůstal zachycen v přípravku nebo na desce stroje, popřípadě byl rozptýlen do vzduchu. Oproti tomu při nejvyšší řezné rychlosti $v_{c3} = 55$ m/min byl průměrný poměr odsátého prachu až 92,5 % to je rozdíl až 66,4 %.

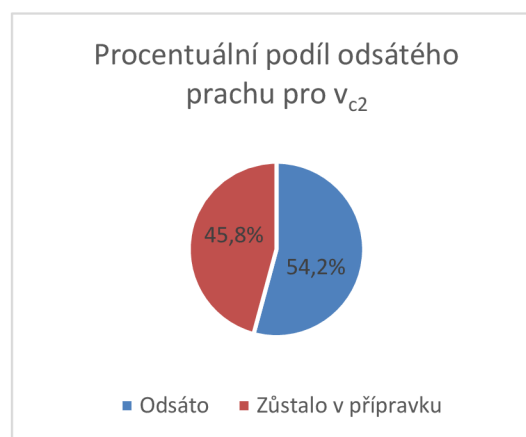
K tomuto jevu dochází nejspíše proto, že při vyšší řezné rychlosti se nástroj otáčí tak rychle, že jsou třísky rozptylovány do vzduchu, tím pádem je může odsávací systém lépe odsát, zatím co při malé řezné rychlosti třísky spíše padají do přípravku a nejsou tolik rozptylovány do okolí.

Tab. 20 - Průměrný odsátý/odvrtaný prach

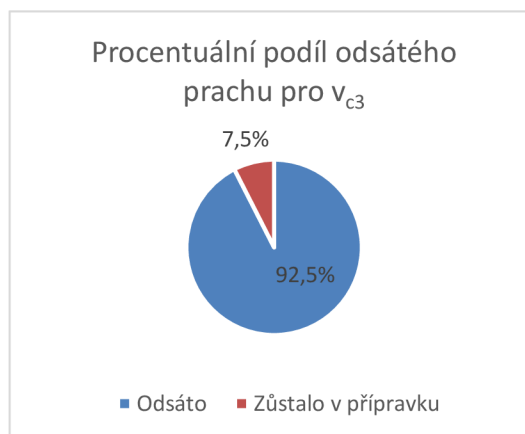
Řezný rychlost	$v_{c1} = 15$ m/min	$v_{c2} = 35$ m/min	$v_{c3} = 55$ m/min
Průměrný odsátý/odvrtaný prach \pm nejistota měření [%]	26,1 \pm 5,0	54,2 \pm 15,2	92,5 \pm 6,7



Graf 7 - Procentuální podíl odsátého prachu pro v_{c1}



Graf 8 - Procentuální podíl odsátého prachu pro v_{c2}



Graf 9 - Procentuální podíl odsátého prachu pro v_{c3}

4.3 Vliv opotřebení řezného nástroje na četnost prachových částic

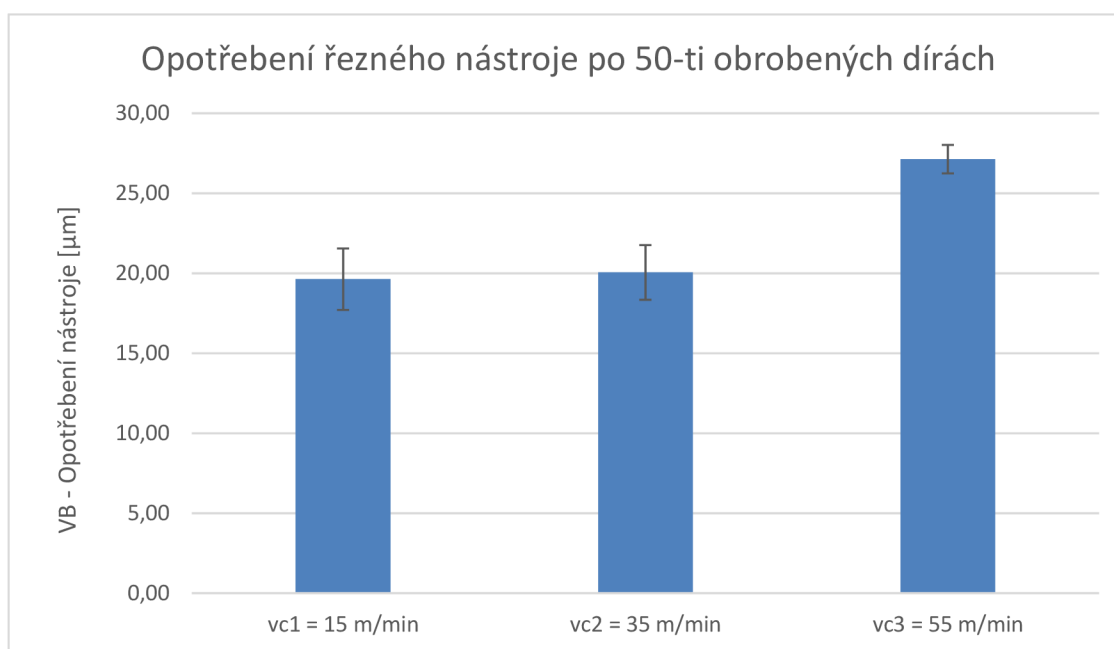
Jak již bylo řečeno v kapitole 2.6, na tvorbu škodlivých prachových částic má také výrazný vliv opotřebení nástroje. Z toho důvodu se experiment bakalářské práce zaměřil i na opotřebení řezného nástroje na hřbetu a jeho vliv na množství generovaných škodlivých prachových částic.

4.3.1 Opotřebení řezného nástroje

Opotřebení řezného nástroje bylo zkoumáno na základě množství počtu vrtaných děr. Hodnoty opotřebení řezného nástroje byly měřeny po 50-ti vrtaných dírách uvedených v Tab. 21 a graficky znázorněny v Grafu 10. Z Grafu vyplívá, že se zvyšující se řeznou rychlostí rostla i hodnota opotřebení řezného nástroje.

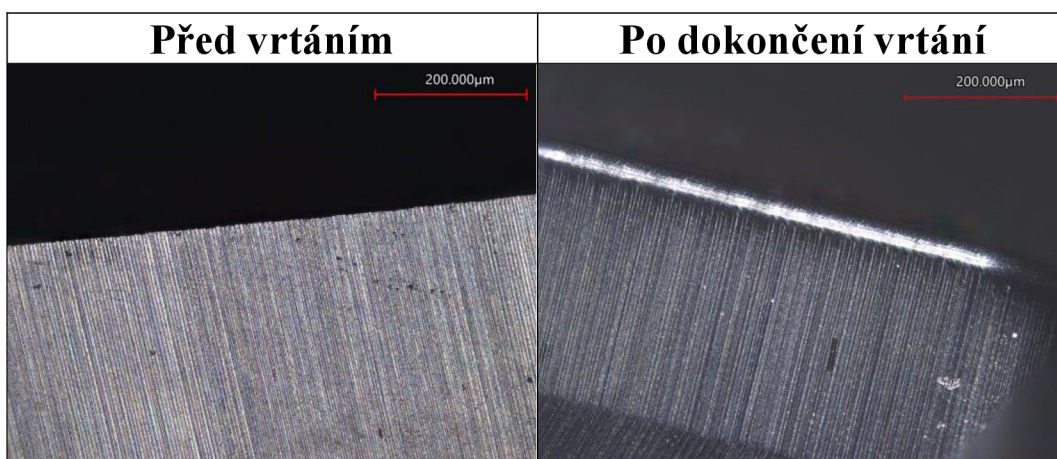
Tab. 21 - Opotřebení řezného nástroje

Řezná rychlost	VB-Opotřebení nástroje \pm nejistota měření [μm]
$v_{c1} = 15 \text{ m/min}$	$19,63 \pm 1,92$
$v_{c2} = 35 \text{ m/min}$	$20,05 \pm 1,71$
$v_{c3} = 55 \text{ m/min}$	$27,13 \pm 0,89$



Graf 10 - Opotřebení řezného nástroje

Tab. 22 - Detail nástrojů před a po opotřebení z mikroskopu Keyence



V Tab. 22 jsou vidět snímky opotřebení nástroje pořízené na konfokálním mikroskopu Keyence. Během měření bylo sledováno opotřebení řezného nástroje na hřbetu v podobě hladkého povrchu. Tento druh opotřebení vznikl z důvodu vysokého abrazivního otěru způsobeného uhlíkovými vlákny, která působila na nástroj jako leštící médium. Třísky leštily hřbet řezného nástroje a výsledkem je hladká zaoblená oblast vyskytující se nad ostřím.

4.3.2 Vliv opotřebení řezného nástroje na četnost generovaných škodlivých prachových částic

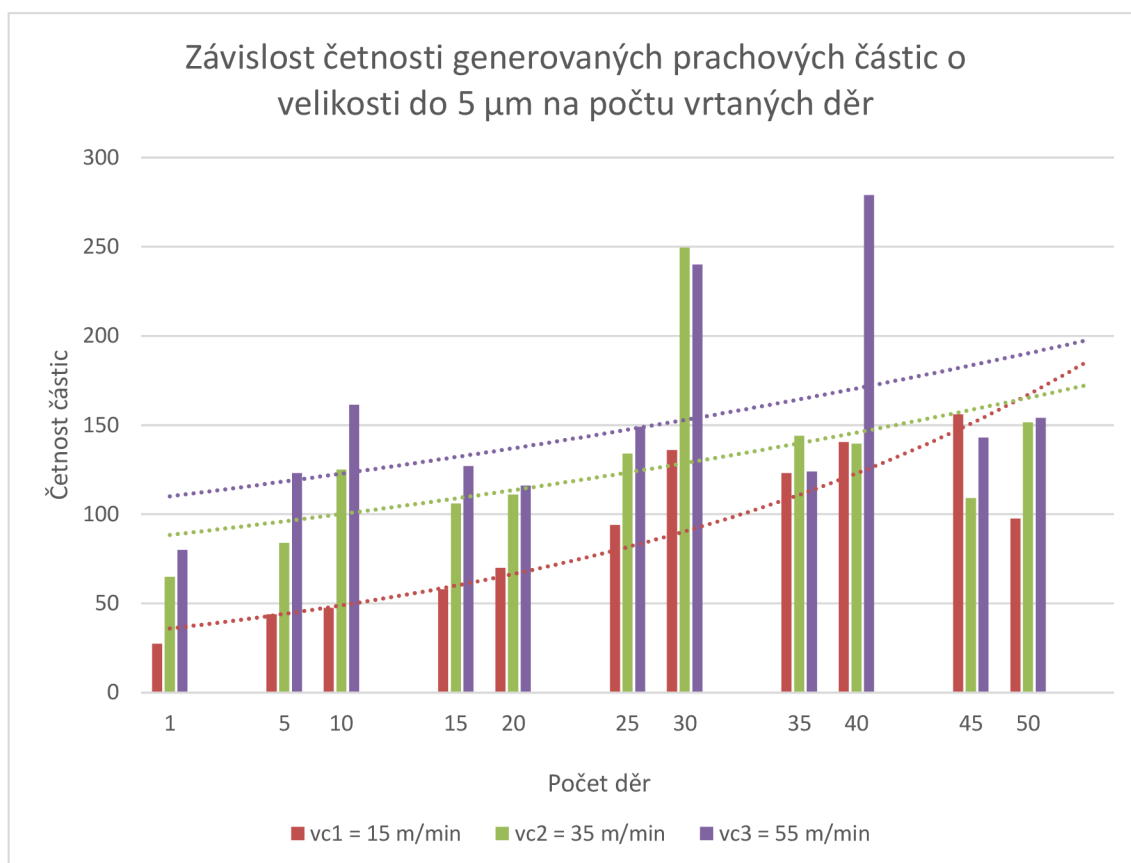
Z grafického vyjádření v Grafu 11 a Tab. 23 je zřejmé, že s přibývajícím počtem vyvrtaných děr, tedy se zvyšujícím se opotřebením nástroje, se zvyšovala i četnost generovaných škodlivých prachových částic o velikosti do 5 μm .

Při vrtání neopotřebeným (novým) nástrojem vznikaly třísky větší než 5 μm . Ty obsahovaly části odříznutých vláken grafitu a úlomky epoxidové pryskyřice.

S opotřebením nástroje se zvyšovala četnost tvořených třísek a jejich velikost klesala pod 5 μm . Matrice i vlákna byla rozdrcena na malinké kousky, které se spolu promíchaly a vytvářely jemnější prach, který je nebezpečný pro lidské zdraví.

Tab. 23 - Četnost prachových částic do 5 μm po 1. a 50-té vrtané díře

Řezná rychlost	Díra	1	50
$v_{c1} = 15 \text{ m/min}$	Četnost	28	98
$v_{c2} = 35 \text{ m/min}$		65	152
$v_{c3} = 55 \text{ m/min}$		80	154



Graf 11 - Četnost škodlivých částic v závislosti na opotřebení nástroje

Bylo prokázáno, že opotřebení řezného nástroje mělo vliv na četnost nebezpečných prachových částic. Zatímco nový neopotřebovaný nástroj vlákna spíše řezal, opotřebovaná hrana nástroje vlákna ohýbala, lámala a drtila na jemnější prach, který je velice nebezpečný pro lidské zdraví.

5 Vyhodnocení a diskuse výsledků

Předkládaná bakalářská práce se věnovala problematice vzniku prachových částic při vrtání kompozitního materiálu s vyztužujícími uhlíkovými vlákny a jejich vliv na zdraví člověka. Cílem práce bylo zjistit, jaký vliv mají řezné podmínky na množství a velikost vznikajících prachových částic.

Veškeré informace, které byly potřeba k pochopení dané problematiky a k následnému dosažení plánovaného cíle jsou uvedeny v kapitole 2 Teoretická část. Tato část se zabývá přehledem znalostí o problematice vrtání do kompozitních materiálů, tj. jaký vliv mají řezné parametry na tvorbu prachových částic a jaký vliv mají prachové částice na zdraví člověka.

Dále bylo nutné navrhnout vhodnou metodiku experimentu, která obsahovala volbu vhodných řezných podmínek, volbu vhodného řezného nástroje a veškerého strojního a měřicího zařízení pro realizovaný výzkum. Tyto informace jsou zahrnuty v kapitole 3 Metodika.

Samotný realizovaný experiment je obsažen v kapitole 4 Experimentální část. V této části práce jsou obsaženy veškeré dosažené výsledky výzkumu.

Z experimentálního výzkumu plynou následující závěry:

5.1 Analýza zachycených prachových částic

Provedená podrobná analýza na zachycené prachové částice v rámci celého experimentu prokázala přítomnost 4 typů prachových částic:

1. Jemný prach (směs matrice a vláken) o rozměrech od 1 μm do 5 μm ,
2. volná vlákna o rozměrech od 10 μm do 400 μm ,
3. kusy matrice o rozměrech od 5 μm do 40 μm ,
4. fragmenty nepravidelného tvaru (matrice s vlákny) o rozměrech od 100 μm do 500 μm .

5.2 Rozložení prachových částic

Dále analýza distribuce velikosti prachových částic ukázala, že:

Uhlíková vlákna se lámala pod úhlem nebo kolmo k podélné ose vláken.

- Pro řeznou rychlost $v_{c1} = 15 \text{ m/min}$ byla distribuce velikosti částic:
 - 19 % prachových částic mělo rozměr větší než $10 \mu\text{m}$,
 - 30 % prachových částic mělo rozměr mezi $5 - 10 \mu\text{m}$,
 - 51 % prachových částic mělo rozměr menší než $5 \mu\text{m}$.
- Pro řeznou rychlost $v_{c2} = 35 \text{ m/min}$ byla distribuce velikosti částic:
 - 18 % prachových částic mělo rozměr větší než $10 \mu\text{m}$,
 - 24 % prachových částic mělo rozměr mezi $5 - 10 \mu\text{m}$,
 - 58 % prachových částic mělo rozměr menší než $5 \mu\text{m}$.
- Pro řeznou rychlost $v_{c3} = 55 \text{ m/min}$ byla distribuce velikosti částic:
 - 14 % prachových částic mělo rozměr větší než $10 \mu\text{m}$,
 - 28 % prachových částic mělo rozměr mezi $5 - 10 \mu\text{m}$,
 - 58 % prachových částic mělo rozměr menší než $5 \mu\text{m}$.

SEM analýza odhalila, že nebyly patrné podélné lomy vláken a lom vláken nebyl ostrý. Dále bylo zjištěno, že uhlíková vlákna se odštípávala na svých koncích. Tyto odštípnuté části vláken tvoří největší množství malých částic, které jsou velmi nebezpečná pro zdraví člověka.

5.3 Vliv řezné rychlosti na velikost a četnost prachových částic

- Velikost a četnost prachových částic pro řeznou rychlost $v_{c1} = 15 \text{ m/min}$:
 - Průměrná velikost částic byla $9,01 \pm 0,93 \mu\text{m}$.
 - Průměrná četnost částic byla 178.
 - Četnost škodlivých prachových částic menších než $5 \mu\text{m}$ byla 90.
- Velikost a četnost prachových částic pro řeznou rychlost $v_{c2} = 35 \text{ m/min}$:
 - Průměrná velikost částic byla $7,79 \pm 0,57 \mu\text{m}$.
 - Průměrná četnost částic byla 224.
 - Četnost škodlivých prachových částic menších než $5 \mu\text{m}$ byla 129.
- Velikost a četnost prachových částic pro řeznou rychlost $v_{c3} = 55 \text{ m/min}$:
 - Průměrná velikost částic byla $7,30 \pm 0,78 \mu\text{m}$.

- Průměrná četnost částic byla 266.
- Četnost škodlivých prachových částic menších než 5 μm byla 154.

Bylo prokázáno, že se zvyšující se řeznou rychlostí se zmenšovala průměrná velikost prachových částic a zvyšovala se jejich četnost. Dále bylo zjištěno, že rostla četnost škodlivých prachových částic pod 5 μm . Prachové částice menší než 5 μm vznikaly odštípnutím z konců uhlíkových vláken. Dané konstatování je ve shodě s publikacemi od NGUYEN-DINHA a kol. a HADDADA a kol. [10, 15] ve kterých bylo dosaženo téměř shodného výsledku.

5.4 Vliv řezných parametrů na množství zachycených prachových částic na filtru

- Procentuální podíl odsátého prachu pro $v_{c1} = 15 \text{ m/min}$ byl $26,1 \pm 5,0 \%$.
- Procentuální podíl odsátého prachu pro $v_{c2} = 35 \text{ m/min}$ byl $54,2 \pm 15,2 \%$.
- Procentuální podíl odsátého prachu pro $v_{c3} = 55 \text{ m/min}$ byl $92,5 \pm 6,7 \%$.

Bylo zjištěno, že se zvyšující se řeznou rychlostí rostl procentuální podíl odsátého prachu. K tomu mohlo docházet z důvodu, že se tvořily drobnější prachové částice, které byly při vyšší řezné rychlosti vlivem otáčejícího se nástroje více rozptýlovány do okolí. Zatímco větší a těžší částice při nižší rychlosti spíše padaly k zemi (desce stroje), jelikož se nástroj neotáčel tak rychle aby částice vířil ve vzduchu.

5.5 Vliv opotřebení nástroje na tvorbu prachových částic

5.5.1 Opotřebení řezného nástroje

- Po vyvrtání 50-ti děr při řezné rychlosti $v_{c1} = 15 \text{ m/min}$ byla naměřená hodnota opotřebení nástroje $19,63 \pm 1,92 \mu\text{m}$
- Po vyvrtání 50-ti děr při řezné rychlosti $v_{c2} = 35 \text{ m/min}$ byla naměřená hodnota opotřebení nástroje $20,05 \pm 1,71 \mu\text{m}$
- Po vyvrtání 50-ti děr při řezné rychlosti $v_{c3} = 55 \text{ m/min}$ byla naměřená hodnota opotřebení nástroje $27,13 \pm 0,89 \mu\text{m}$

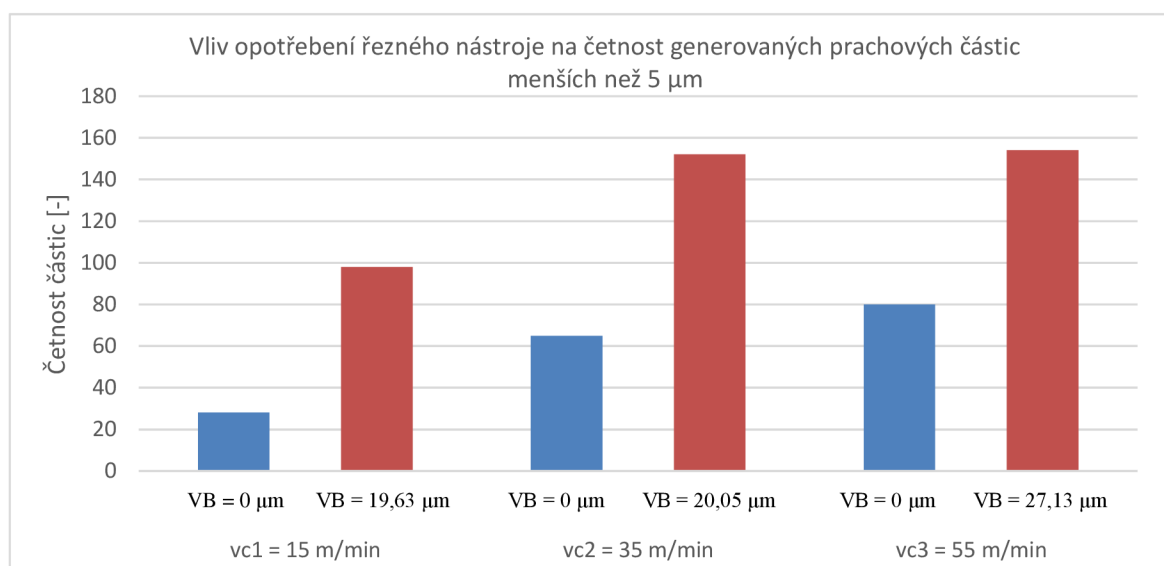
Z výsledku měření vyplívá, že se zvyšující se řeznou rychlostí roste hodnota opotřebení řezného nástroje.

5.5.2 Vliv opotřebení řezného nástroje na četnost generovaných škodlivých prachových částic

Četnost prachových částic menších než $5 \mu\text{m}$ při opotřebení řezného nástroje:

- Pro řeznou rychlost $v_{c1} = 15 \text{ m/min}$
 - Po 1. vyvrtané díře, tedy s nulovým opotřebením nástroje, byla naměřena hodnota četnosti prachových částic 28.
 - Po 50-té vyvrtané díře, tedy s opotřebením nástroje $19,63 \mu\text{m}$, byla naměřena hodnota četnosti prachových částic 98.
- Pro řeznou rychlost $v_{c2} = 35 \text{ m/min}$
 - Po 1. vyvrtané díře, tedy s nulovým opotřebením nástroje, byla naměřena hodnota četnosti prachových částic 65.
 - Po 50-té vyvrtané díře, tedy s opotřebením nástroje $20,05 \mu\text{m}$, byla naměřena hodnota četnosti prachových částic 152.
- Pro řeznou rychlost $v_{c3} = 55 \text{ m/min}$
 - Po 1. vyvrtané díře, tedy s nulovým opotřebením nástroje, byla naměřena hodnota četnosti prachových částic 80.
 - Po 50-té vyvrtané díře, tedy s opotřebením nástroje $27,13 \mu\text{m}$, byla naměřena hodnota četnosti prachových částic 154.

Bylo prokázáno, že se zvyšující se hodnotou opotřebení (s rostoucím počtem vyvrtaných děr), roste i četnost nejmenších prachových částic s velikostí do $5 \mu\text{m}$. Tento jev je nežádoucí vzhledem ke škodlivosti malých prachových částic na lidské zdraví.



Graf 12 - Vliv opotřebení řezného nástroje na četnost generovaných prachových částic menších než $5 \mu\text{m}$

6 Závěr

Předložená bakalářská práce zpracovaná na téma „Ochrana zdraví a bezpečnost při vrtání kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny“ přispívá k rozšíření poznatků o vzniku škodlivých prachových částic při vrtání kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny.

Cílem této práce bylo zkoumání tvorby prachových částic při vrtání kompozitního materiálu a vliv řezných podmínek na velikost a množství prachových částic.

Z provedeného rozsáhlého měření a získaných výsledků lze vyvodit následující poznatky:

- 1) prachové částice byly ve formě jemného prachu (směs matrice a vláken), volných vláken o různých rozměrech, drobných kusů matrice a fragmentů nepravidelného tvaru (matrice s vlákny),
- 2) vyztužující vlákna se lámala pod úhlem nebo kolmo k podélné ose vláken a nebyly patrné podélné lomy vláken,
- 3) pro řeznou rychlost $v_{c1} = 15$ m/min byl podíl škodlivých prachových částic menších než $5 \mu\text{m}$ 51 % a pro řeznou rychlost $v_{c2} = 35$ m/min a $v_{c3} = 55$ m/min to bylo 58 % v obou případech,
- 4) zvýšení řezné rychlosti podporuje zvýšení četnosti vznikajících škodlivých prachových částic. Naopak snížení řezné rychlosti vede ke snížení četnosti vznikajících škodlivých prachových částic,
- 5) při vyšší řezné rychlosti roste efektivita odsávacího zařízení,
- 6) opotřebení řezného nástroje a jeho geometrie významně ovlivňuje velikost a množství prachových částic,
- 7) řezný nástroj, který je neopotřeбенý (ostrý), generuje výrazně menší množství škodlivých prachových částic menších než $5 \mu\text{m}$ oproti opotřeбенému nástroji, který škodlivých prachových částic generuje podstatně více.

Na základě provedených experimentů jsou stanovena následující doporučení:

- 1) Během obrábění kompozitních dílů s uhlíkovými vlákny používat masky k ochraně dýchacích cest, ochranné brýle, rukavice a ochranný oděv,
- 2) používat vhodný odsávací systém který bude schopen zachytit co největší množství prachových částic.

Použitá literatura

[1] RAMULU, M. a John KRAMLICH. Machining of fiber reinforced composites: Review of environmental and health effects. *Int. J. Environ. Conscious Des. Manuf.*, roč. 11 (2004), s. 1–19.

[2] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů* [online]. Vysoké učení technické v Brně - VUT Brno, 2008. 89 s.

[3] CHE, Demeng; Ishan SAXENA; Peidong HAN; Ping GUO a Kornel EHMANN. Machining of Carbon Fiber Reinforced Plastics/Polymers: A Literature Review. online. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, roč. 136 (2014), s. 034001.

[4] ASMATULU, Eylem; Abdullah ALONAYNI a Mohammed ALAMIR. Safety concerns in composite manufacturing and machining. In: *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites XII*. online. 22. 3. 2018.

[5] SEDLÁČEK, Jan. *Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů | MM Průmyslové spektrum*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-kompozitnich-materialu>. [citováno 2024-05-10].

[6] HUMÁR, Anton. Technologie obrábění – 2. část. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2004 [online]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-2cast.pdf

[7] PLÁNIČKA, František. *PKD nástroje pro efektivní obrábění kompozitů | MM Průmyslové spektrum*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pkd-nastroje-pro-efektivni-obrabeni-kompozitu>. [citováno 2024-05-10].

[8] NEJMAN, Dominik. Studie vhodných řezných nástrojů pro vrtání do kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny. Liberec, 2018. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní

[9] *Způsobená částicemi v ovzduší | MALINA – Safety s.r.o. – velkoobchod se svařovací technikou*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://www.malina-safety.cz/zdravotni-ri-zika/zpusobena-casticemi-v-ovzdusi/>. [citováno 2024-05-10].

[10] NGUYEN-DINH, Ngoc, et al. New tool for reduction of harmful particulate dispersion and to improve machining quality when trimming carbon/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 131: 105806.

[11] VÁŇA, Martin. Studium integrity povrchu při frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny. Liberec, 2023. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní

[12] *DuoKomp (V6010)vrták na kompozitové díly* | UniCut s.r.o. Webové sídlo. Dostupné z: <https://www.unicut.cz/stopkove-frezy-ze-slinuteho-karbidu/duokomp-v6010-br-vrtak-na-kompozitove-desky>. [citováno 2024-05-10].

[13] KNAP, Artur. Problematika vrtání do kompozitních materiálů. Liberec, 2020. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní

[14] *Přesná váha T-SCALE NHB-1500+* | Hepnar.cz. Webové sídlo. Dostupné z: <https://www.hepnar.cz/presna-vaha-t-scale-nhb-1500-p1155>. [citováno 2024-05-10].

[15] HADDAD, Madjid; Redouane ZITOUNE; Florent EYMA a Bruno CASTANIE. Study of the surface defects and dust generated during trimming of CFRP: Influence of tool geometry, machining parameters and cutting speed range. online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, roč. 66 (2014), s. 142–154.