FAKULTA STROJNÍ TUL

Diplomová práce

Vliv procesních parametrů na trvanlivost řezného nástroje při frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny

Studijní program: N0715A270015 Materiály a technologie
Autor práce: **Bc. Kryštof Krejčík**
Vedoucí práce: doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.
Katedra obrábění a montáže

Liberec 2024

FAKULTA STROJNÍ TUL

Zadání diplomové práce

Vliv procesních parametrů na trvanlivost řezného nástroje při frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny

Jméno a příjmení:	**Bc. Kryštof Krejčík**
Osobní číslo:	S22000218
Studijní program:	N0715A270015 Materiály a technologie
Zadávající katedra:	Katedra obrábění a montáže
Akademický rok:	2023/2024

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o problematice frézování kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny se zaměřením na materiál nástroje a geometrii, analýzu vlivu opotřebení nástroje a celkovou integritu obrobeného povrchu.
2. Volba obráběného materiálu (kompozitní desky vyztužené uhlíkovými vlákny), řezných nástrojů (fréz) a řezných podmínek bez procesního média.
3. Návrh metodiky experimentů pro frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení získaných výsledků opotřebení řezného nástroje v závislosti na geometrii nástroje a zvolených řezných podmínek.
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. BILÍK, O. Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění. Ostrava: Vysoká škola báňská ? TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80?7078?228?5.
3. CHRISTENSEN, R. M. Mechanics of composite materials: Courier Corporation. Massachusetts: USA, 2012.
4. KOCMAN, 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 vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

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

16. května 2024 Bc. Kryštof Krejčík

Anotace

Diplomová práce se zabývá problematikou vlivů procesních parametrů na kvalitu procesu frézování polymerních materiálů plněných uhlíkovými vlákny.

Hlavním cílem diplomové práce bylo navrhnout a ověřit vliv parametrů řezného nástroje pro frézování polymerních materiálů plněných uhlíkovými vlákny

Práce je složena ze čtyř hlavních částí.

Teoretická část uvádí základní pojmy a uvádí současnou problematiku spojenou s frézováním kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny.

Metodická část této práce se zabývá přípravou a návrhem experimentu a jeho vyhodnocením. Dále poskytuje informace o zkušebních vzorcích, řezných nástrojích a měřících přístrojích.

Experimentální část této práce je věnována provedením experimentu a zpracováním naměřených výsledků.

Poslední část této práce je věnována vyhodnocení a diskuzi výsledků.

Klíčová slova

Frézování, delaminace, kompozitní materiál, uhlíková vlákna, prachové částice

Annotation

The diploma thesis deals with the issue of the influence of process parameters on the quality of the milling process of polymeric materials filled with carbon fibers.

The main goal of the diploma thesis was to design and verify the influence of parameters of cutting tools for milling polymer materials filled with carbon fibers

The work consists of four main parts.

The theoretical part presents the basic concepts and current issues related to the milling of composite materials reinforced with carbon fibers.

The methodological part of this work deals with the preparation and design of the experiment and its evaluation. It also provides information on test samples, cutting tools and measuring instruments.

The experimental part of this work is dedicated to performing the experiment and processing the measured results.

The last part of this is dedicated to the evaluation and discussion of the results.

Keywords

Milling, delamination, composite material, carbon fiber, dust particles

Poděkování

Tímto děkuji vedoucí diplomové práce paní doc. Ing. et Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D. a konzultantům paní doc. Ing. Doře Kroisové, Ph.D. a pánům Ing. Martinu Váňovi a Ing. Tomáši Knápkovi za cené připomínky a rady při vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl také poděkovat mé rodině a mým kamarádům, kteří mě podporovali při všech potížích, ale také se radovali se mnou při všech vítězstvích na téhle nezapomenutelné cestě.

Obsah

1 Úvod 11

2 Teoretická část 13

2.1 Polymerní kompozity s uhlíkovými vlákny 13

2.1.1 Polymerní kompozity vyztužené vlákny 13

2.1.2 Typy matrice 15

2.1.3 Materiály výztuže 15

2.1.4 Využití polymerních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny 16

2.2 Současný stav v oblasti frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny 16

2.2.1 Nástroje pro frézování kompozitních materiálů vyztužené uhlíkovými vlákny 18

2.2.2 Geometrie nástrojů pro obrábění kompozitních materiálů 18

2.2.3 Materiály řezných nástrojů 19

2.2.4 Kvalita obráběného povrchu 20

2.2.5 Opotřebení řezného nástroje 20

2.2.6 Delaminace 21

2.2.7 Prachové částice 22

3 Metodika měření 24

3.1 Kompozitní materiál 24

3.2 Řezné nástroje 25

3.3 Řezné podmínky 27

3.4 Stroj 27

3.5 Odsávací zařízení 28

3.6 Přípravek na upnutí 29

3.7 Měření řezných sil 30

3.8 Měření opotřebení řezného nástroje, velikosti delaminace a škodlivých prachových částic 31

4 Experimentální část 33

4.1 Opotřebení řezného nástroje 33

4.2 Delaminace 36

4.3 Řezné síly 41

4.4 Prachové částice ... 43
5 Diskuze výsledků ... 47
5.1 Opotřebení nástroje ... 47
5.2 Delaminace ... 48
5.3 Řezné síly ... 49
5.4 Prachové částice ... 50
6 Závěr ... 53
Seznam obrázků ... 55
Seznam tabulek ... 56
Seznam grafů ... 57
Seznam použité literatury ... 58

Seznam zkratek

Zkratka	Celý název	Jednotky
FRP	Kompozitní materiál vyztužený vlákny	
CFRR	Kompozitní materiál vyztužený uhlíkovými vlákny	
GFRP	Kompozitní materiál vyztužený skelnými vlákny	
HSS	Rychlořezná ocel	
SK	Slinutý karbid	
PCD	Polykrystalický diamant	
PCBN	Polykrystalický kubický nitrid bóru	
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop	
t	Čas	min
VB	Velikost opotřebení	µm
VB_{krit}	Kritická velikost opotřebení	µm
F_D	Hloubka delaminace	µm
F_{Dkrit}	Kritická hloubka delaminace	µm
r	Rádius	µm
n	Otáčky	ot/min
v_c	Řezná rychlost	m/min
f_z	Posuv na zub	mm
a_p	Hloubka řezu	mm
a_e	Šířka řezu	mm
SW	Software	
F_y	Síla v ose y	N
Tg	Teplota skelného přechodu	°C

1 Úvod

Kvůli čerpání neobnovitelných zdrojů jsou vyvíjeny nové typy materiálů, které mají pomoci se snížením drancování přírodních zdrojů. Díky tomu se, i v oblasti strojírenství, čím dál tím častěji vyskytují kompozitní materiály s různými typy výztuh, které svými vlastnostmi dokáží plně nahradit i konvenční neobnovitelné typy materiálů. Mezi nejčastěji používané patří polymerní materiál vyztužený uhlíkovými vlákny.

Kompozitní materiály se v poslední době staly velmi populárním materiálem. Jejich hlavní výhodou je, že dosahují vysokých pevností i přes jejich nízkou hmotnost a se svými vlastnostmi tak dokáží konkurovat či přímo nahradit i konvenční materiály. Nejvíce rozšířené a používané jsou kompozitní materiály, které jsou vyztuženy uhlíkovými vlákny.

Kompozitní materiály vyztužené uhlíkovými vlákny mají mnoho výhod a množství aplikací. Mohou být obráběny konvenčními i nekonvenčními technologiemi. Momentálně nejrozšířenějším způsobem obrábění pro tento typy materiálů je frézování.

Hlavní problematikou při frézování kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny je anizotropie materiálu. Tento jev způsobuje delaminaci, tavení matrice, uvolňování vláken, ale také zvyšuje opotřebení řezného nástroje.

Předkládaná diplomová práce se zabývá výzkumem problematiky vlivů procesních parametrů na kvalitu procesu frézování polymerních materiálů plněných uhlíkovými vlákny.

Diplomová práce se věnuje výzkumu vlivu procesních parametrů na trvanlivost řezného nástroje, delaminaci, velikost řezných sil a velikost škodlivých prachových částic při frézování kompozitního materiálu vyztuženého uhlíkovými vlákny.

Diplomová práce se dělí na čtyři hlavní části.

Teoretická část diplomové práce se zabývá aktuální problematikou frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny. Charakterizuje polymery s uhlíkovými vlákny a popisuje jejich problematiku spojenou s technologií frézování.

Metodická část práce je zaměřena na návrh a přípravu experimentu. Popisuje použitý materiál, řezné nástroje, použité stroje a měřící přístroje. Dále je zde definován postup vyhodnocení získaných výsledků měření.

Experimentální část této práce se zabývá samotnou realizací navrženého experimentu, zpracováním naměřených výsledků měření a vyvozením závěrů.

Závěr diplomové práce je věnován celkovému shrnutí a diskuzi získaných výsledků z realizovaného experimenttálního měření.

2 Teoretická část

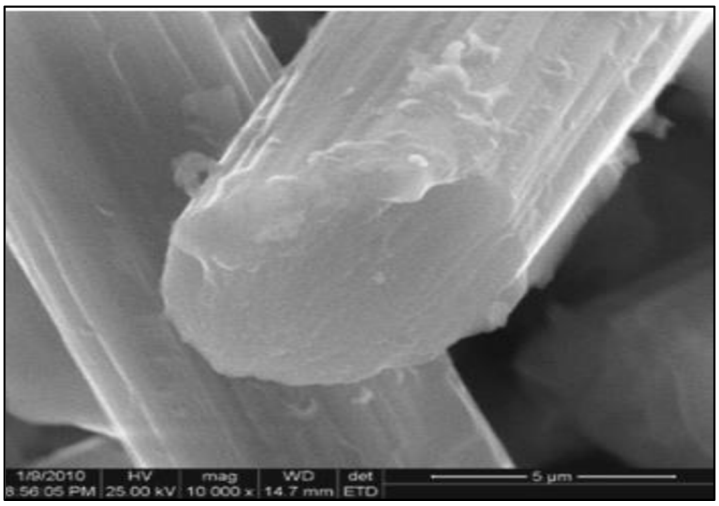
Teoretická část této práce se zabývá poznatky o polymerních materiálech vyztužených uhlíkovými vlákny. Dále obsahuje informace o současném stavu problematiky frézování kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny. Poznatky o kompozitních materiálech vyztužených uhlíkovými vlákny se nachází v podkapitole 2.1 a stav současné problematiky frézování do těchto materiálů se nachází v podkapitole 2.2.

2.1 Polymerní kompozity s uhlíkovými vlákny

Kompozitní materiály z polymeru vyztuženého vlákny jsou heterogenní a anizotropní materiály, které nevykazují plastickou deformaci. Používají se v celé řadě současných aplikací, zejména ve vesmíru a letectví, automobilovém průmyslu, námořní dopravě a výrobě sportovního vybavení. Kompozitní materiály z polymerů vyztužený chuhlíkovými vlákny a polymerů vyztužených skelnými vlákny, kromě jiných materiálů vyztužených vlákny, stále více nahrazují konvenční materiály s jejich vynikající pevností a nízkou měrnou hmotností. Jejich vyrobitelnost v různých kombinací s přizpůsobenými pevnostními vlastnostmi, také jejich vysoká únava, houževnatost a odolnost proti opotřebení při vysokých teplotách a oxidaci činí z těchto materiálů vynikající volbu ve strojírenských aplikacích. [1]

2.1.1 Polymerní kompozity vyztužené vlákny

Polymerní kompozity vyztužené vlákny jsou tvořeny kombinací vláken a polymerní matrice. V kompozitních materiálech vyztužených vlákny si vlákna i matrice zachovávají svou fyzikální a chemickou identitu. Přesto produkují vynikající výkon, kterého nelze dosáhnout, pokud by jedna ze složek jednala samostatně. Polymerní materiály vyztužené vlákny mají mnoho výhod, jako je pevnost v poměru ke hmotnosti (pevnost v podélném tahu/hustota), vysoký modul ke hmotnosti (modul v podélném tahu/hustota), únavová pevnost a také tolerance únavového poškození. Kategorie vláken zahrnují především uhlíková vlákna, skleněná vlákna, borová vlákna a aramidová vlákna. [2]



***Obr. 1** - Uhlíkové vlákno pod SEM mikroskopem [2]*

Obrábění kompozitů se výrazně liší od obrábění kovů, a to navzdory skutečnosti, že u kompozitů se většinou používají nástroje a technologie pro obrábění kovů. Na rozdíl od kovů jsou kompozity nehomogenní a jejich interakce s řezným nástrojem při obrábění je složitý jev, který není dobře pochopen. Obrábění může nepříznivě ovlivnit kvalitu kompozitního dílu kvůli nárůstu během obrábění k defektům, jako je delaminace, praskání, vytahování vláken a hoření.[3]

Vlákna v polymerních materiálech jsou hlavním nosným členem a matrice pomáhá udržet vlákna na správném místě a se správnou orientací, což napomáhá rovnoměrnému přenosu zatížení. [3]

Při porovnávání vlastností kompozitů s monolitickými materiály nemusí být tuhost nebo pevnost kompozitu výrazně odlišná a možná nižší než tuhost nebo pevnost kovu. Ale když se vezme v úvahu specifická pevnost (poměr pevnosti k hmotnosti) a specifická tuhost (poměr tuhosti k hmotnosti), kompozity obecně předčí kovy. Obrovské zlepšení pevnosti a tuhosti udělované materiálu matrice výztužnými vlákny podél jejich směru je zřejmé. Zřejmý je také rozdíl v mechanických vlastnostech podél směru vlákna a příčného směru vlákna. Na rozdíl od silných směrových vlastností jednosměrných kompozitů je možné zaznamenat mírné zlepšení vlastností matrice, které propůjčují náhodně rozmístěná krátká vlákna v lisovací hmotě. [4]

Jednotlivé složky kompozitního materiálu mají rozdílné koeficienty teplotní roztažnosti (uhlíková vlákna mají koeficient délkové roztažnosti téměř nulový), tím pádem vzniká zbytkové napětí a laminát se deformuje. [5]

2.1.2 Typy matrice

Termosetické polymery zůstávají pevné, i když jsou ohřáty a skládají se z hustě zesíťované třídimensionální struktury. Jsou teplem vytvrditelné. Tyto polymery již nelze po vytvrzení dále zpracovávat za zvýšených teplot. Zvýšením teploty neměknou. Dochází pouze k rozpadu vazeb a rozkladu polymeru. Termosety mohou hořet v případě, že nejsou samozhášivé. Pro zamezení hoření polymeru se do něj přidávají tzv. retardéry hoření (chrom případně brom). [6]

Termoplastické polymery sestávají z pružných lineárních molekulárních řetězců, které jsou spletené dohromady a jak napovídá jejich název, měknou při zvýšené teplotě. Jsou teplem tvarovatelné. Mají nízké pevnosti v tahu a moduly pružnosti, ale vysokou poddajnost. Polyéteréterketon (PEEK) a polyamidové matrice jsou mezi termoplasty hojně využívány v leteckém průmyslu kvůli jejich vynikajícím mechanickým vlastnostem a vysoké teplotě skelného přechodu. Maximální užitná teplota pro kompozity vyztužené vlákny je relativně nízká, jak materiál matrice začíná měknout. Při mírném zvýšení teploty dochází k chemické dekompozici nebo degradaci polymeru [1]. Jejich charakteristickou teplotou je teplota skelného přechodu Tg. Při této teplotě ztrácí své pevnostní charakteristiky a stávají se měkkými, tvárnými. Lze je tedy dále zpracovávat za zvýšených teplot tvářením. Při dalším zvyšování teploty dochází k přechodu do viskózního stavu. Materiál se začíná tavit. Teploty skelného přechodu jsou pro většinu termoplastů menší než 200 °C. [7]

2.1.3 Materiály výztuže

Vlákna mají v porovnání s kompaktem z téhož materiálu ve směru délky mnohem větší pevnost, protože jsou nečistoty minimalizovány v důsledku malých průřezů. Moderní technologie jsou schopny zabezpečit různé druhy vláken. Mezi vlákna používaná jako výztuž kompozitů patří uhlíková, skelná, aramidová, boron, čedič, innegra, přírodní vlákna a další. Ve speciálních případech se setkáme i kovovými a keramickými vlákny, jde většinou o případy krátkovláknych kompozitů nebo jako speciální lokální výztuž.

- Uhlíková vlákna - se vyznačují anizotropií vlastností, kdy v podélném směru dokážou přenášet mnohosetkrát větší zatížení, než ve směru kolmém na osu vlákna. Jsou tepelně a elektricky vodivá. Při působení tepla dochází k jejich zkrácení ve směru osy vlákna,

avšak dochází k prodloužení ve směru kolmo na jeho osu. Anizotropie vlastností se tak týká i součinitele délkové teplotní roztažnosti. [6, 7]

- Skelná vlákna - mají rovněž izotropní vlastnosti. Jejich modul pružnosti v tahu je v podélném směru mnohokrát nižší než u uhlíkových vláken, v příčném směru však skelná vlákna co do modulu pružnosti v tahu uhlíková předčí. Vyznačují se větší hustotou (cca o 40 % oproti uhlíkovým vláknům), která zvyšuje při stejném podílu vláknové výztuže hmotnost kompozitu v porovnání s uhlíkovými vlákny. Skelná vlákna mají větší tažnost než uhlíková vlákna. Jsou také výrazně levnější. [6, 7]

- Aramidová vlákna - (patří sem také vlákna s obchodní značkou KEVLAR) mají nejnižší hustotu z uvedených skupin (cca o 20 % než uhlíková vlákna). Jejich vlastnosti jsou stejně jako u uhlíkových vláken silně anizotropní. Při působení tepla se výrazně mění jejich rozměry. Jejich značnou nevýhodou je navlhavost, která se pohybuje kolem 5 %. [6, 7]

2.1.4 Využití polymerních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny

Polymerní materiály vyztužené uhlíkovými vlákny mají ve světě širokou škálu použití. Lze je nalézt v mnoha strojírenských odvětvích, jako je například letecký a vesmírný průmysl, kde se používají pro stavbu odlehčených struktur. Dále se také čím dál častěji nacházejí například v automobilech či ve sportovním vybavení, kde dosahují vysokých kvalit oproti klasickému konvenčnímu vybavení, a sportovci tak mohou podávat kvalitnější výkony.

2.2 Současný stav v oblasti frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny

S nárůstem objemu dílů vyrobených z těchto kompozitů s termoplastickou matricí přirozeně roste i potřeba zvýšit efektivitu jejich zpracování, potažmo obrábění. Současně s řešením efektivity obrábění je třeba věnovat velkou pozornost problému dosažení požadované kvality obrobeného povrchu a dílce, tedy bez defektů, jako je delaminace, nerozřezaná vlákna, vytržení vláken z matrice nebo lokální natavení matice. [8]

Dále je třeba uvažovat o správném nastavení řezných podmínek, které budou mít na obrábění materiálu zásadní vliv. V neposlední řadě je také potřeba uvažovat o nástroji, kterým bude materiál obráběn. Zde se jedná především o počet zubů a geometrii nástroje. Pro tento experiment byly zvoleny nástroje, které jsou popsány v kapitole 3.2.

Problematika následujících kapitol bude zaměřena na frézování kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny.

Obr. 2 *- Frézy pro obrábění kompozitních materiálů s termoplastickou matricí [9]*

Přes velkou podobnost termoplastických a termosetových vláknitých kompozitů je přístup k jejich zpracování odlišný a vyplývá z rozdílných vlastností obou typů matric. Termosetové matrice jsou obvykle křehké, což ovlivňuje tvorbu třísek. V tomto případě jsou třísky velmi jemné, prakticky ve formě prachu. U termosetových matric je změna vlastností s rostoucí teplotou zanedbatelná, na rozdíl od termoplastických matric, kde se mechanické vlastnosti matrice s teplotou značně mění. Po překročení teploty skelného přechodu začne materiál měknout a ztrácet své vlastnosti a při dalším zvyšování teploty taje. Obrábění měkčí matrice s vyšší tažností v termoplastech nevede k tvorbě typicky velmi jemných třísek, ale ke vzniku krátkých třísek ne nepodobných těm, které vznikají při obrábění kovových materiálů a následně malého množství prachových částic z vyztužení vlákny. Při obrábění kompozitů s termoplastickou matricí je kritickým faktorem také tepelný vliv obrobku a obrobeného povrchu. [8]

2.2.1 Nástroje pro frézování kompozitních materiálů vyztužené uhlíkovými vlákny

Volba správného řezného nástroje pro obrábění daného typu kompozitního materiálu s filamentem z uhlíkových vláken je důležitá především z důvodu snížení řezných sil, minimálního výskytu delaminace na obrobené ploše a správného oddělování vláknového filamentu i matrice.

Vývoj řezného nástroje je komplexní úkol, který zahrnuje technologické a ekonomické zhodnocení navržených konstrukcí nástrojů. Řezný nástroj pro kompozitní materiály by měl být nákladově efektivní a poskytovat velmi dobrou kvalitu povrchu. [10]

Vzhledem k nízké schopnosti polymerních matric vést teplo je větší podíl tepla odváděn nástrojem a okolním prostředím než je tomu u kovových materiálů. Z toho důvodu je doporučené volit nástroje s vyšší tepelnou vodivostí, např. ze slinutého karbidu. [11]

2.2.2 Geometrie nástrojů pro obrábění kompozitních materiálů

Pro obrábění kompozitních materiálů je doporučován úhel stoupání šroubovice přibližně 45° a úhel čela mezi 0° až 7°. Příliš malý úhel hřbetu vede k velkému opotřebení na hřbetu. V důsledku malého úhlu hřbetu totiž dochází k velkému tření mezi hřbetem nástroje a obrobenou plochou. Co se poloměru ostří týče, ten by měl být co možná nejmenší v řádech setin mm. Pro skelná a uhlíková vlákna je požadavek na rádius řezné hrany r = 10 až 15 μm. Při větších poloměrech bude více materiálu odcházet pod břit. Vzhledem k povaze obráběného materiálu bude v důsledku velkého poloměru ostří docházet k elasticko-plastické deformaci matrice pod břitem, tím pádem k nárůstu teploty a zároveň místo odřezávání vláken bude docházet k jejich ohýbání a lámání, což vede k poškození obráběného povrchu a rychlejšímu opotřebení nástroje. Na druhou stranu při použití ostré řezné hrany bude docházet k rychlejšímu opotřebení nástroje, které bude způsobené abrazí vláknové výztuže. Opotřebená hrana se pak bude chovat stejně jako velký poloměr ostří. Je nutné tedy použít nástroje s velkou řezivostí, které nepodléhají tak rychle abrazi, protože ostrou hranu na nástroji potřebujeme, požadujeme-li dobrou jakost obrobené plochy. [12]

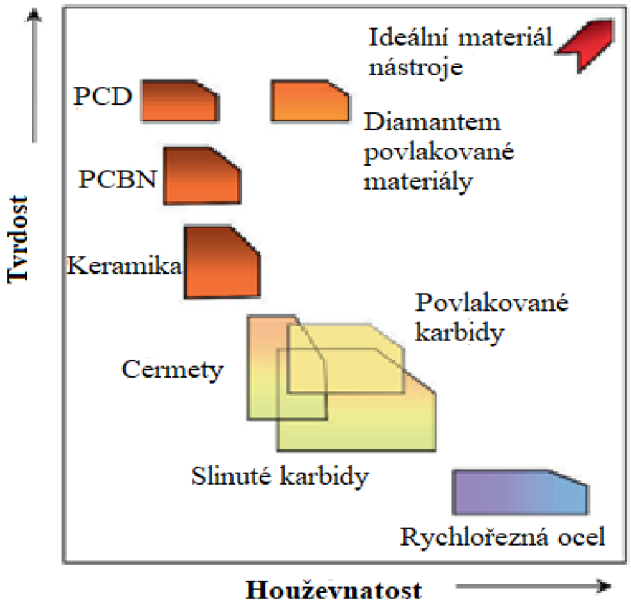
Pro obrábění kompozitních materiálů je doporučován úhel břitu přibližně 75° a úhel čela mezi 0° až 7°. Pro PCD byl pak určen jako nejlepší úhel čela 7°. Příliš malý úhel hřbetu vede k

velkému opotřebení na hřbetu. V důsledku malého úhlu hřbetu totiž dochází k velkému tření mezi hřbetem nástroje a obrobenou plochou. Co se poloměru ostří týče, ten by měl být co možná nejmenší v řádech setin mm. Při větších poloměrech bude více materiálu odcházet pod břit. Vzhledem k povaze obráběného materiálu bude v důsledku velkého poloměru ostří docházet k elasticko-plastické deformaci matrice pod břitem, tím pádem k nárůstu teploty a zároveň místo odřezávání vláken bude docházet k jejich ohýbání a lámání, což vede k poškození obráběného povrchu a rychlejšímu opotřebení nástroje. Na druhou stranu při použití ostré řezné hrany bude docházet k rychlejšímu opotřebení nástroje, které bude způsobené abrazí vláknové výztuže. [4]

2.2.3 Materiály řezných nástrojů

Pro obráběcí aplikace je k dispozici široká škála materiálů řezných nástrojů. Tyto materiály jsou obecně klasifikovány do tří hlavních skupin podle jejich tvrdosti, pevnosti a houževnatosti, jak je znázorněno na obrázku níže, což také ukazuje opačný vztah mezi tvrdostí a houževnatostí. Těmito třemi skupinami jsou rychlořezné oceli (HSS), slinuté karbidy (SK) a keramika/supertvrdé materiály. Každá skupina má své charakteristické mechanické a tepelné vlastnosti, díky čemuž je její použití vhodnější pro určité obráběcí operace. [4]

Graf 1 *- Graf tvrdosti a houževnatosti materiálů používaných při frézování polymerů vyztužených uhlíkovými vlákny [4]*



2.2.4 Kvalita obráběného povrchu

Po opracování je nutné zhodnotit kvalitu povrchu. U kompozitních materiálů, které jsou anizotropní a heterogenní, dochází během obrábění k opotřebení frézy, a tím zvyšování řezných sil.

Kvalitu povrchu u frézování kompozitních materiálů s vlákny ovlivňuje také způsob obrábění, a to zda se jedná o sousledné či nesousledné frézování. Dále také to, zda byla do procesu přivedena procesní kapalina či jiný plyn, kterým lze proces frézování zchladit. U frézování polymerních materiálů s uhlíkovými vlákny je třeba si dávat pozor na teplotu zeskelnění u pryskyřice. Při překročení této teploty dochází k tavení materiálu, a tím dochází k tomu, že se nástroj rychleji opotřebovává a zvětšují se řezné síly, díky kterým se následně zvyšují i teploty.

Kvalita obrábění při frézování a ořezávání je definována povrchovou úpravou a celistvostí povrchu, které zahrnují mechanické a tepelné poškození povrchu a také delaminaci vrchní a nebo spodní vrstvy laminátové struktury. Povrchová úprava je ovlivněna rychlostí posuvu, řeznou rychlostí, poloměrem špičky nástroje a opotřebením nástroje. Drsnost povrchu se obecně zvyšuje se zvýšením rychlosti posuvu. [4]

2.2.5 Opotřebení řezného nástroje

Mechanismy opotřebení nástrojů obrábějících polymerní kompozitní materiály jsou odlišné od mechanismů opotřebení známých z obrábění kovů. U kovů může teplota s rostoucí řeznou rychlostí růst rychle a často se stává hlavní příčinou opotřebení nástrojů. Do takového opotřebení můžeme započítat například chemický otěr či difúzi. U polymerních kompozitních materiálů však teplota neroste tak výrazně a nemůže dosáhnout tak vysokých hodnot, aby mohlo docházet k mechanismům opotřebení nástroje souvisejících s vysokou řeznou rychlostí a potažmo teplotou v řezu. [13]

Nyní bude poznatek zaměřen na problematiku opotřebení v rámci frézování kompozitních materiálů. Opotřebení nástroje se projevuje na výsledném povrchu obrobku. Bylo zjištěno, že řezné síly se během opotřebování nástroje zvyšují. Uhlíková vlákna se vyznačují vysokou tvrdostí a polymery nízkou tepelnou vodivostí, a proto je opotřebení nástroje při obrábění rychlé. Vysoká teplota je soustředěna do malé oblasti na břitu nástroje. Vlivem

vysokých teplot dochází k rychlému a silnému opotřebení povrchu boku frézy, což vede ke krátké době řezání nástroje. To ovlivňuje výsledné rozměrové parametry jako je tvar, rozměrová přesnost a kvalita povrchu.

Jako hlavní mechanismus opotřebení byl identifikován abrazivní otěr. Ten je způsobený vysokou tvrdostí a pevností vláknové výztuže kompozitu. [12]

Nástroj musí být dostatečně ostrý, s malým poloměrem špičky a velmi pozitivním úhlem čela a hřbetu kvůli odřezávání matrice a výztuže. Kvůli abrazivní výztuži musí být i velmi odolný vůči abrazivnímu otěru. [14]

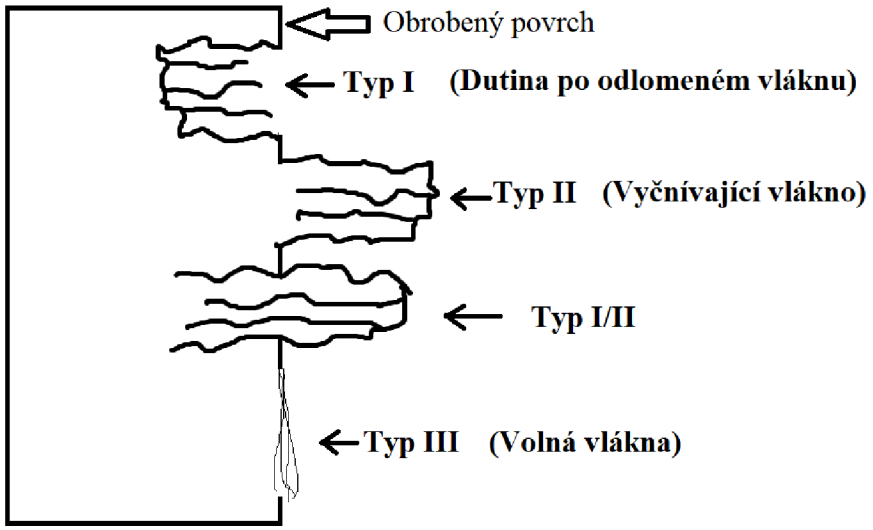
Mechanismy opotřebení nástrojů obrábějících polymerní kompozitní materiály jsou odlišné od mechanismů opotřebení při obrábění kovů. U kovů může teplota s rostoucí řeznou rychlostí růst rychle a často se stává hlavní příčinou opotřebení nástrojů. Do takového opotřebení můžeme započítat například chemický otěr či difúzi. U polymerních kompozitních materiálů však teplota neroste tak výrazně a nemůže dosáhnout tak vysokých hodnot, aby mohlo docházet k mechanismům opotřebení nástroje souvisejících s vysokou řeznou rychlostí a potažmo teplotou v řezu. [11]

2.2.6 Delaminace

Delaminace je nejvíce diskutovaným problémem při obrábění polymerních kompozitů s vláknovou výztuží. Delaminace je odchýlení vrstvy kompozitu od vrstvy přilehlé v důsledku silového působení. [15]

Delaminace je další důležitou vlastností obráběné hrany. Zde je uvažováno kvůli nárůstu složky axiální síly při frézování šroubovitými řeznými nástroji. Axiální síla působí ve směru kolmém na rovinu stohování kompozitního laminátu, a proto může způsobit oddělení vzájemné souhry. Tento efekt je nejvíce pozorován na horních nebo spodních plochách obrobené hrany, protože povrchové vrstvy nejsou podporovány na jedné straně. U konvenčních šroubovicových řezaček působí axiální síla směrem nahoru a nejvíce poškození delaminací bude vidět v horní vrstvě. [4]

V nástroji pro spirálové frézování směrem dolů působí axiální síla směrem dolů a nejvíce poškození bude vidět ve spodní vrstvě. Typ delaminace, ke které dochází během frézování, a četnost jejího výskytu do značné míry závisí na orientaci povrchové vrstvy. Klasifikace typů delaminace je vysvětlena níže. Delaminace typu I popisuje oblasti, kde byla povrchová vlákna přerušena a odstraněna v určité vzdálenosti dovnitř od obrobené hrany. Delaminace typu II se skládá z neřezaných vláken, která vyčnívají ven z obrobené hrany, zatímco delaminace typu I/II je jakousi kombinací obou předchozích typů. Delaminace typu II je způsobena tím, že se vlákna mohou ohnout nebo oddálit od dráhy posouvajícího se nástroje a poté se vrátit zpět do své původní orientace. K tomu může s největší pravděpodobností dojít u vláken ve vrstvě pod povrchovou vrstvou. Delaminace typu III popisuje vlákna, která jsou částečně připojena, nebo praskliny, které jsou rovnoběžné s obrobeným povrchem. [4]



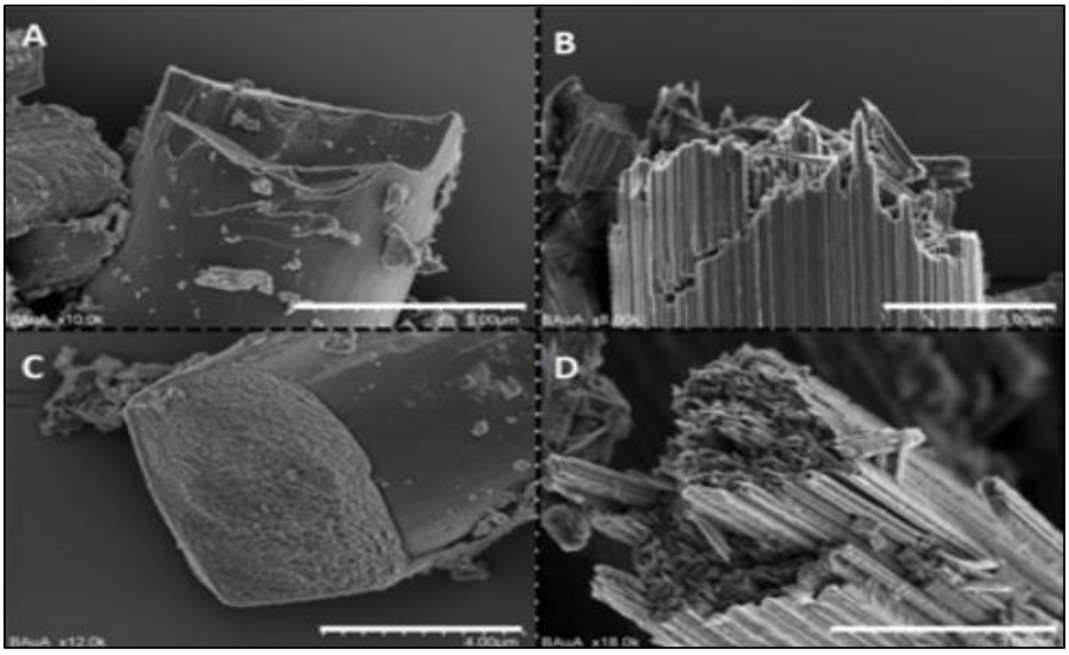
Obr. 3 *- Typy delaminace při frézování*

2.2.7 Prachové částice

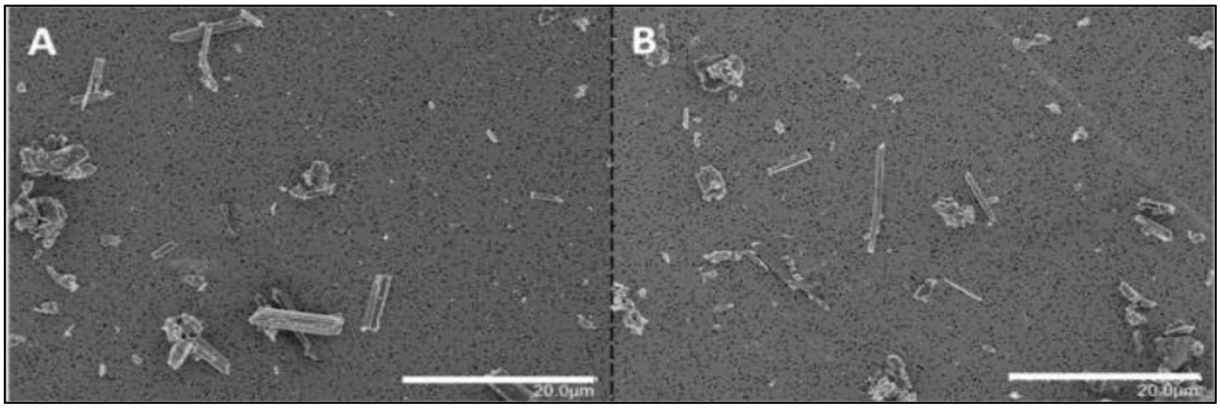
Kromě všech odhalených problémů obrábění kompozitů vede suché obrábění kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny ke vzniku značného množství polétavých prachových částic. Tyto částice mohou být vdechnuty a mohou dokonce proniknout kůží nebo okem, což je přímou příčinou ohrožení zdraví. Prach vznikající při obrábění kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny je navíc škodlivý pro obráběcí stroj. Uhlíková vlákna jsou elektricky vodivá a vzhledem k malé velikosti prachových částic a vláken a jejich schopnosti

dostat se do vzduchu, budou tyto částice pravděpodobně pronikat těsnými prostory mezi součástmi stroje a do ovládací skříně stroje. [8]

Při obrábění kompozitu vznikají prachové částice schopné proniknout do různých částí lidského dýchacího systému. Prachové částice s aerodynamickým průměrem menším než 5 µm jsou opravitelné, zatímco částice menší než 2–3 µm se mohou dostat do alveol a následně do krevního řečiště. Toxikologické studie ukazují nepříznivý účinek dýchatelného kompozitního prachu na pokusná zvířata. Prach vznikající při obrábění kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny často překračuje limit expozice a může mít vliv na lidské zdraví. Prach vznikající při obrábění kompozitů tedy vyžaduje monitorování a řádnou kontrolu prostřednictvím plně funkční techniky sběru prachu. [8]



Obr. 4 *- Uhlíková vlákna po obrábění [17]*



Obr. 5 *- Uhlíkové prachové částice pod konfokálním mikroskopem [17]*

3 Metodika měření

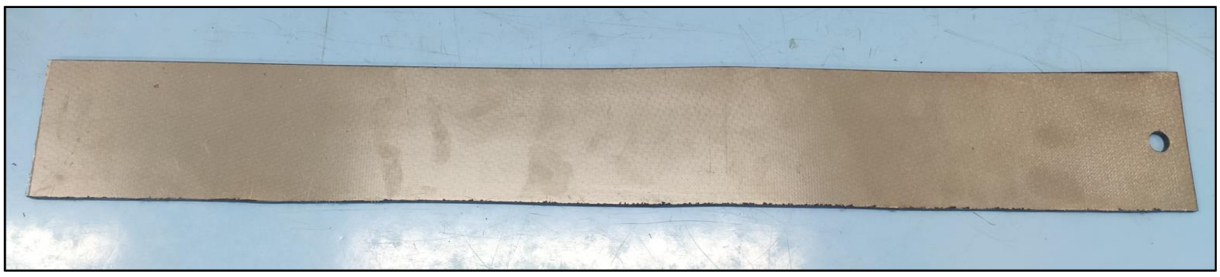
V metodice měření jsou udány všechny informace o realizovaném experimentálním měření od přípravy, provedení až po vyhodnocení výsledků. Obráběný kompozitní materiál je popsán v podkapitole 3.1. Podkapitola 3.2 a 3.3 obsahuje informace a parametry použitých řezných nástrojů. V kapitolách 3.4, 3.5 a 3.6 jsou uvedeny informace o použitém frézovacím stroji, odsávacím zařízení a přípravku na upnutí kompozitního materiálu. Podkapitola 3.7 obsahuje informace o měření řezných sil. Opotřebení řezného nástroje, velikosti delaminace a velikosti škodlivých prachových částic je uvedeno v podkapitole 3.8.

Všechna experimentální měření probíhala v Laboratoři třískových technologií a procesů Katedry obrábění a montáže Techniké univerzity v Liberci.

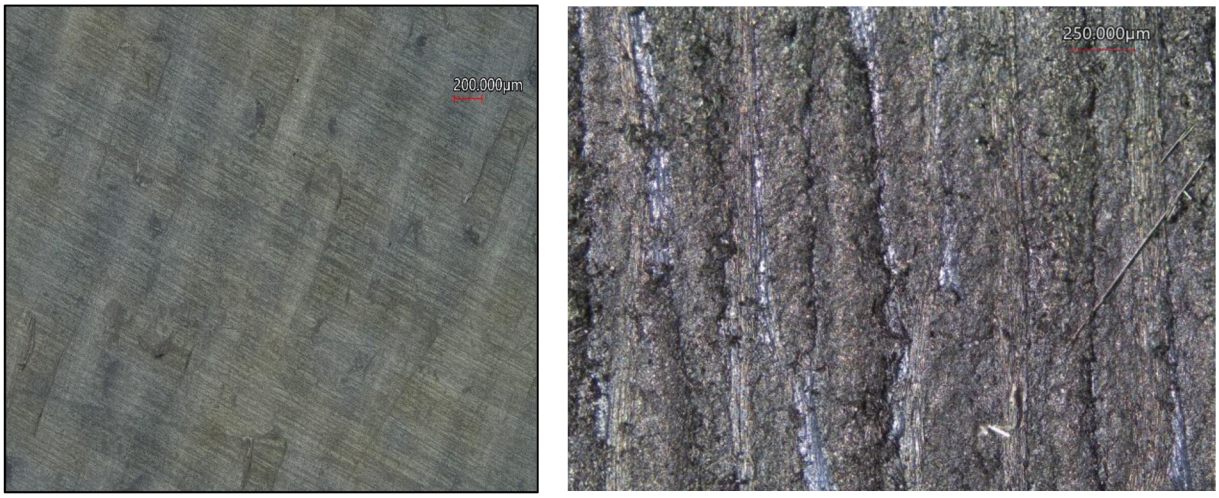
3.1 Kompozitní materiál

Obráběným materiálem byl kompozit s uhlíkovými vlákny. Informace o kompozitním materiálu jsou uvedeny v Tab. 1. Kompozitní materiál poskytla společnost LATECOERE Czech Republic s.r.o., jenž se zabývá výrobou letadel.

Důvodem pro výběr kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny bylo jeho široké využití při výrobě odlehčených konstrukcí zejména v leteckém a vesmírném průmyslu.



***Obr. 6** – Kompozitní deska vyztužená uhlíkovými vlákny*



***Obr. 7** – Detail kompozitní desky vyztužené uhlíkovými vlákny z vrchu (vlevo), detail řezu kompozitní desky vyztužené uhlíkovými vlákny (vpravo)*

***Tab. 1** - Parametry kompozitní desky*

Kompozitní deska s uhlíkovými vlákny		
Parametr	Jednotky	
Šířka	mm	4
Délka	mm	1100
Tloušťka	mm	90
Metoda výroby		Vakuová infuze
Typ vazby	cm	Keprová 2x2

3.2 Řezné nástroje

Řezné nástroje byly monolitní frézy ze slinutého karbidu. Frézy se lišily počtem břitů a byly dodány od výrobce firmy PM-Tech s.r.o. Frézy mají speciální geometrii pro obrábění kompozitních materálů vyztužených uhlíkovými vlákny. Použité frézy byly stopkové o průměru 8 mm.

Údaje o použitých nástrojích jsou uvedeny v tabulce Tab. 2.

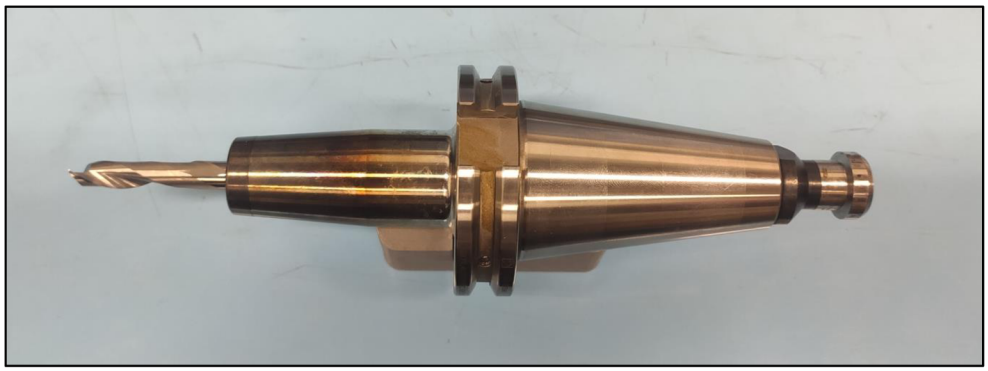
***Tab. 2** – Řezné nástroje*

1-břitý nástroj	2-břitý nástroj	3-břitý nástroj

***Tab. 3** – Tabulka parametrů řezných nástrojů*

Použité řezné nástroje			
Nástroj – Fréza	1	2	3
Výrobce	PM-Tech	PM-Tech	PM-Tech
Mat. nástroje	Tvrdokov	Tvrdokov	Tvrdokov
Průměr nástroje [mm]	8	8	8
Délka břitu [mm]	30	30	30
Počet břitů	1	2	3
Úhel stoupání šroubovice [°]	45	15	15
Úhel břitu [°]	30	45	45
Typ povlaku	Bez povlaku	Bez povlaku	Bez povlaku
Cena [Kč]	671	604	527

Řezné nástroje byly vždy v rámci experimentu upnuty do tepelného upínače (Obr. 8). Tepelné upínače se vyznačují svou štíhlou konstrukcí a malou obvodovou házivostí (3 µm), jenž je výhodné pro přesné obrábění kompozitních materiálů.



***Obr. 8** – Frézovací nástroj v tepelném upínači*

3.3 Řezné podmínky

Pro experimentální část diplomové práce byl zvolen způsob nesousledného frézování. Nesousledné frézování je doporučováno při odrábění kompozitních materiálů vyztužených různými typy vláken, protože nedochází k tak velké delaminaci.

Řezné podmínky použité při experimentální části jsou uvedené v Tab. 4.

***Tab. 4** – Tabulka řezných podmínek*

Řezné podmínky			
	Zkratka		Jednotky
Řezná rychlost	v_c	300	m/min
Posuv na zub	f_z	0,05	mm
Hloubka řezu	a_p	4	mm
Šířka řezu	a_e	1	mm
Otáčky	n	12000	ot/min

3.4 Stroj

Veškeré obráběcí práce byly prováděny na tříosém CNC číslicově řízeném frézovacím centru DMG MORI CMX 600V (Obr. 9). Tento stroj má rám typu C, jenž zvyšuje tuhost v osách X,Y, a také zvýšené zatížení stolu. Frézka obsahuje blokový programovací jazyk ShopMill, který je nainstalovaný ve stroji a ve kterém byl vytvořen program pro obrábění.

Technické parametry frézky jsou uvedeny v Tab. 5.

***Obr. 9** – Frézovací centrum CMX 600V*

***Tab. 5** – Technické parametry Frézovacího centra CMX 600V*

DMG MORI CMX 600V		
Parametr	Jednotka	Hodnota
Pojezd v ose X	mm	600
Pojezd v ose Y	mm	560
Pojezd v ose Z	mm	510
Rychlost posuvu v osách X/Y/Z	mm/min	30 000
Přesnost polohování	mm	0,006
Délka stolu	mm	900
Šíře stolu	mm	560
Maximální zatížení stolu	kg	600
Upínací kužel	ISO	400
Maximální otáčky	ot/min	12 0000
Maximální výkon vřetene	kW	13
Řídící systém	-	Sinumerik Operate 4.8Dsl

3.5 Odsávací zařízení

Při obrábění kompozitního materiálu bylo použito odsávací zařízeni POC9 M1 (Obr. 10), které sloužilo k odsávání škodlivých částic prachu, který vzniká při daném procesu. Odsávací trubice byla zapojena k obráběnému materiálu, kde byl největší výskyt škodlivých částic.

Obr. 10 *– Odsávací zařízení POC9 M1*

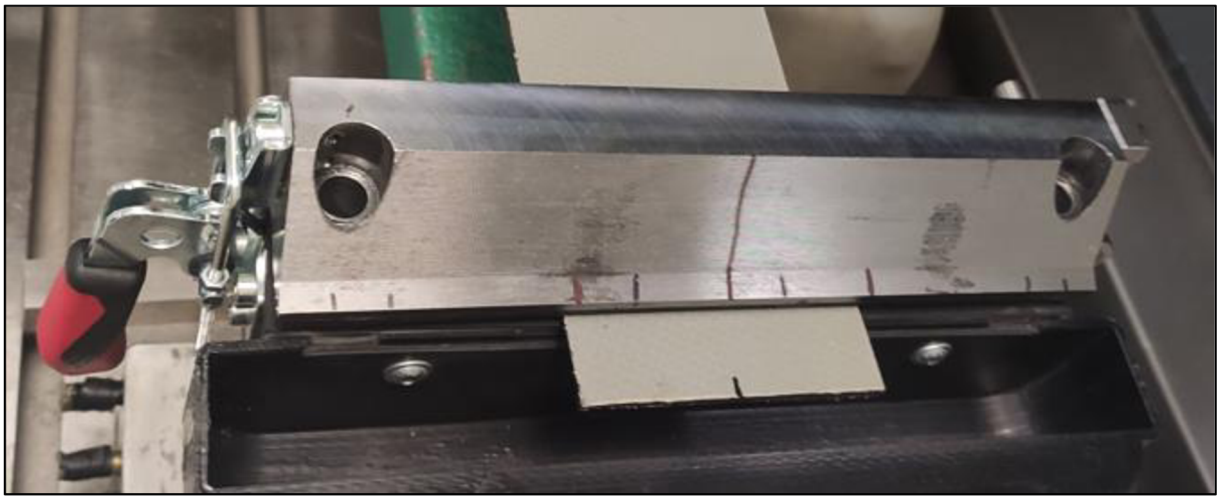
Technické parametry odsávacího zařízení POC9 M1 se nachází v Tab. 6.

Tab. 6 *– Technické parametry odsávacího zařízení POC9 M1*

POC9 M1		
Parametr	Jednotka	Hodnota
Odsávan množství vzduchu	m^3/h	900
Celkový tlak na sání	Pa	1200
Výkon elektromotoru	kW	0,7
Hlučnost	dB	65
Minimální velikost zachycených částic	µm	0,3

3.6 Přípravek na upnutí

K upínání obráběného materiálu ve formě kompozitních desek s uhlíkovými vlákny byl speciálně navržen a vyroben upínací přípravek (Obr. 11). Tento speciální přípravek byl vybaven náfukem a rychloupínací pákou, která zajišťovala opakované a rychlé upínání frézovaného materiálu.



Obr. 11 *– Upínací přípravek*

3.7 Měření řezných sil

Pro měření řezných sil při frézování byl vybrán třísložkový piezoelektrický dynamometr Kistler (Obr. 11). Celá aparatura na měření řezných sil byla složena z dynamometru Kistler, zesilovače náboje a monitoru.

V čase, kdy bylo určeno, že se budou zaznamenávat řezné síly při obrábění, byl spuštěn zesilovač náboje. Na zesilovači byla nastavena frekvence snímání řezných sil $t = 10$ s.

Rázy, které vznikaly při nárazu řezného nástroje do obráběného materiálu, byly zaznamenány dynamometrem Kistler. Signál z dynamometru byl zaslán do zesilovače, který signály převedl do digitální podoby.

Obr. 12 *– Zesilovač náboje (vlevo), Dynamometr Kistler (vpravo)*

Před měřením sil byla vždy realizována kalibrace dynamometru. Ke kalibraci byl použit ruční siloměr Fultron FG-5020 (Obr.13). Ručním siloměrem byl přitlačen na upínací zařízení v osách *x*, *y* i *z*. Po použití siloměru v osách *x*, *y*, *z* byly pomocí softwareu dopočítány konstanty potřebné pro přesné měření řezných sil při obrábění.

Obr. 13 *– Ruční siloměr Fultron FG-5020*

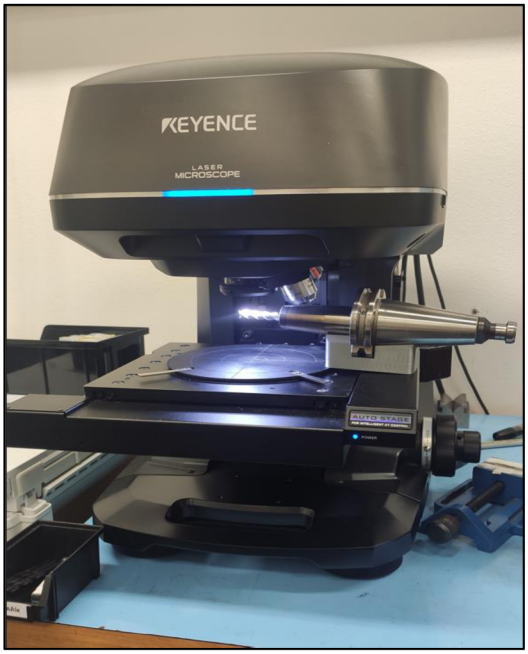
3.8 Měření opotřebení řezného nástroje, velikosti delaminace a škodlivých prachových částic

Konfokální mikroskop Keyence VK-X 1000 s laserovým skenováním (Obr. 14). Mikroskop Keyence disponuje několika programy, jako jsou například skenování povrchů a jeho kontroly. Nejvyšší rozlišení, kterého je na mikroskopu možno dosáhnout je 0,01 nm. Při měření experimentální části byl použit SW VK-Viewer od firmy Keyence. V uvedeném SW byl využíván mód Image observation na zachycení snímků.

Obr. 14 *– Konfokální mikroskop Keyence VK-X 1000*

- Měření opotřebení břitu řezného nástroje

Měření opotřebení břitu nástroje bylo provedeno na počátku operace frézování a poté bylo měřeno každých 5 minut, kdy byla fréza v záběru s obráběným materiálem. Celková doba obrábění kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny byla $t = 35$ min pro každý typ nástroje. Při měření bylo na hřbetu nástroje určeno 5 míst, kde se odebralo 5 měření, ze kterých byla následně dopočítána velikost opotřebení břitu nástroje.



Obr. 15 *– Měření opotřebení na konfokálním mikroskopu Keyence VK-X 1000*

- Měření velikosti delaminace

Měření velikosti delaminace bylo kontrolováno na počátku operace frézování a poté byla delaminace měřena po intervalech $t = 5$ minut, kdy byl nástroj v záběru s obráběnou kompozitní deskou. Velikost delaminace byla na 5ti definovaných místech snímána při zvětšení 10 krát. Z naměřených hodnot delaminace byla následně dopočítána výsledná hodnota velikosti delaminace.

- Měření velikosti škodlivých prachových částic

Měření velikosti škodlivých prachových částic bylo uskutečněno v časech $t = 1$, 10 a 35 min. Škodlivé prachové částice byly odebírány z povrchu nástroje a z povrchu materiálu pomocí filtru. Filtr se škodlivými prachovými částicemi byl vložen pod mikroskop při zvětšení 100 krát. Prachové částice byly změřeny a jejich hodnoty byly následně vyhodnoceny.

4 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce byla zaměřena na výzkum vlivu opotřebení řezného nástroje, při frézování kompozitních desek s uhlíkovými vlákny, a jeho vlivu na velikost delaminace, řezné síly a velikosti škodlivých prachových částic. Pro experiment byly navrženy 3 typy řezných nástrojů s rozdílnou geometrií a stejného materiálového složení a dále jednotné řezné podmínky.

Řezné podmínky, při kterých byly realizovány experimenty, jsou uvedeny v Tab. 4., v podkapitole 3.3.

4.1 Opotřebení řezného nástroje

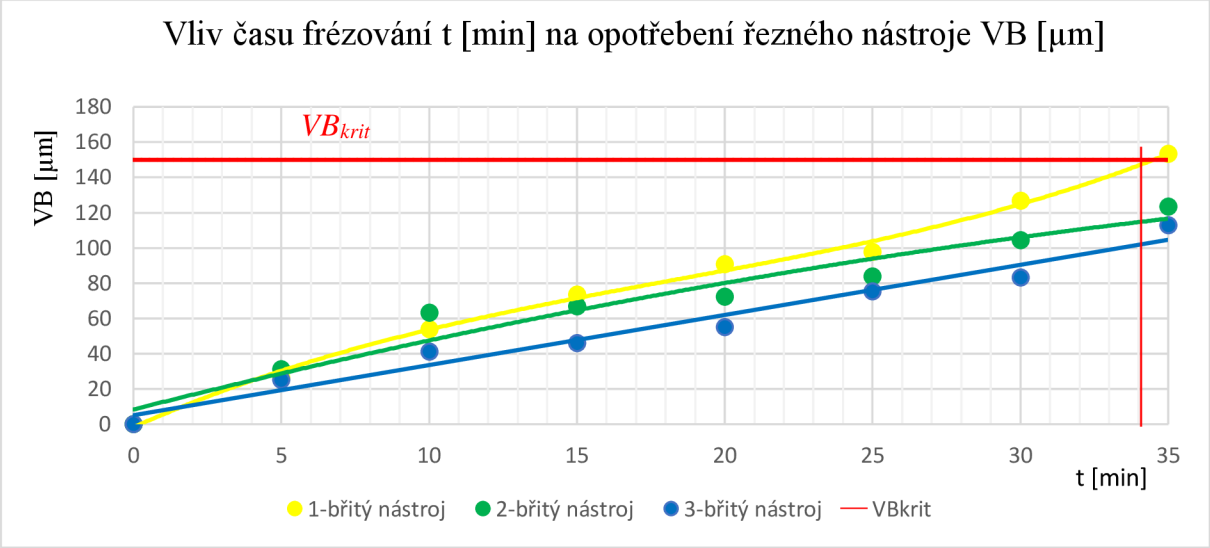
Opotřebení řezného nástroje je jedním z nejdůležitějších faktorů při hodnocení přesnosti při obrábění kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny. Kvalita povrchu přímo souvisí se stavem životnosti nástroje. Proto je důležité znát podrobnější informace o opotřebení z hlediska zajištění efektivity obrábění a kvality povrchu. Nízká tepelná vodivost matricové pryskyřice a vysoce abrazivní povaha uhlíkových vláken jsou hlavními důvody rychlého opotřebení nástroje.

Jako kritérium životnosti řezného nástroje, založené na opotřebení, se jako kritická hodnota použila VB_{krit} = 150 µm, která byla stanovena výrobcem nástroje.

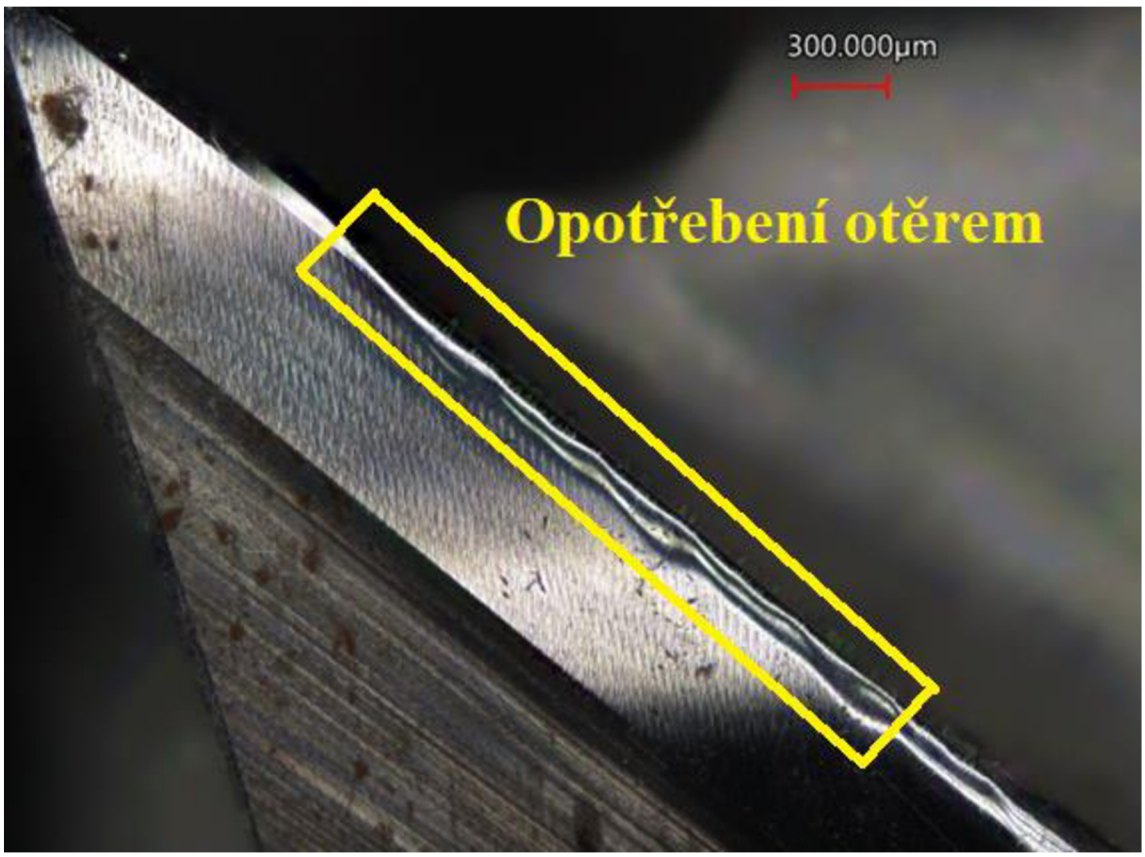
V rámci výzkumu byla zkoumána závislost opotřebení řezného nástroje na čase frézování (Tab. 7). Velikost opotřebení byla zkoumána na hřbetu řezného nástroje.

Tab. 7 *– Tabulka velikosti opotřebení VB na době trvání řezného procesu při frézování;* v_c *= 300 m/min,* fz *=0,05 mm*

Nástroj	1-břitý nástroj	2-břitý nástroj	3-břitý nástroj
Čas [min]	Velikost opotřebení VB [µm] ± nejistota měření U [µm]		
t = 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
t = 5	26,50 ± 0,96	31,22 ± 0,95	25,06 ± 0,89
t = 10	53,99 ± 0,98	63,23 ± 0,93	41,09 ± 0,95
t = 15	73,65 ± 0,99	66,98 ± 0,95	45,95 ± 0,95
t = 20	90,68 ± 1,05	72,51 ± 0,94	55,17 ± 0,99
t = 25	97,72 ± 1,35	83,92 ± 0,98	75,35 ± 1,03
t = 30	126,91 ± 2,04	104,46 ± 1,45	83,39 ± 1,12
t = 35	153,31 ± 2,35	123,61 ± 2,05	112,96 ± 1,85



Graf 2 *– Graf průběh času frézování t v závislosti na opotřebení řezného nástroje VB; v_c = 300 m/min, f_z =0,05 mm*



Obr. 16 *– Opotřebení otěrem na řezném nástroj se 3 břity, t = 35 min*

Ze získaných výsledků, které jsou uvedeny v Tab. 7 a graficky zpřehledněných v Grafu 2, lze vypozorovat následující:

Opotřebení nástroje *VB* [µm] u všech použitých nástrojů s rozdílným počtem břitů se s rostoucí dobou frézování zvyšovalo. Nástroj s 1 břitem se rychleji opotřebovával, než ostatní typy nástrojů a bylo u něj naměřeno překročení kritické hodnoty VB_{krit} = 150 µm při čase t = 34 min. U ostatních nástrojů bylo také zpozorováno opotřebení, ale nárůst opotřebení měl tendenci pozvolnou a nebylo dosaženo kritické hodnoty opotřebení ani po 35 min frézování.

Při výzkumu bylo prokázáno, že na velikost opotřebení řezného nástroje má vliv počet břitů, jak ukazuje Graf 2. Nástroj se 3 břity byl vyhodnocen jako nejvhodnější nástroj pro obrábění kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny, a to z hlediska nízké velikosti opotřebení řezného nástroje. Velikost opotřebení nástroje se 3 břity byla *VB* = 112,96 ± 1,85 µm po čase t = 35 min a byla nejmenší ze všech měřených nástrojů. Největší opotřebení se vyskytlo u nástroje s 1 břitem. Hodnota opotřebení řezného nástroje byla *VB* = 153,31 ± 2,35 µm v čase t = 35 min a při řezné rychlosti v_c = 300 m/min.

Dále bylo pozorováno, že řezné nástroje (Obr. 16) byly v rámci procesu frézování nejvíce opotřebovány abrazivními uhlíkovými vlákny. Na všech nástrojích se vyskytovalo opotřebení otěrem z uhlíkových vláken, ke kterému docházelo v blízkosti zóny poloměru ostří. Uhlíková vlákna, která se při obrábění otírala o hřbet nástroje, fungovala jako leštící mechanismus. Výsledkem tohoto jevu bylo to, že vznikla leštěná a lesklá oblast na opotřebeném nástroji.

Z Tab. 7. je možné vyčíst, že u nástrojů se 2 a 3 břity, opotřebení řezného nástroje vykazovalo minimální nárůst opotřebení řezného nástroje v časech t = 10, 15 a 20 min. Na rozdíl od frézy s 1 břitem, kde bylo pozorováno skokové zvětšení opotřebení řezného nástroje. Z měření vyplývá, že u nástrojů s více břity docházelo k samoostření řezného nástroje.

Z vyhodnocených výsledků bylo zpozorováno, že při obrábění kompozitního materiálu vyztuženého uhlíkovými vlákny docházelo k opotřebování řezného nástroje otěrem. Opotřebení otěrem se nacházelo u všech typů použitých nástrojů.

Opotřebení byl měřeno na hřbetu nástroje a největšího opotřebení dosáhl nástroj s 1 břitem, který také dosáhl kritické hodnoty opotřebení VB_{krit} v čase $t = 34$ min. Naopak nejmenší opotřebení bylo naměřeno u nástroje se 3 břity. Z měření plyne, že nástroj s větším počtem břitů je vhodnější pro obrábění kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny.

4.2 Delaminace

Delaminace je u jednosměrných a vícesměrných laminátových kompozitů silně závislá na složce řezné síly kolmé k rovině vrstev kompozitního materiálu. Při frézování, např. ořezávání hran šroubovitými nástroji, je delaminace způsobena tahovou axiální složkou řezné síly, v závislosti na opotřebení nástroje. Řezná síla může vést k riziku šíření interlaminární trhliny ve vrchní vrstvě. Po vytvoření delaminace v horních vrstvách během procesu řezání jsou vlákna ohnuta směrem ven a odkloněna pryč z roviny laminace. V důsledku toho dochází k napětí mezi vrstvami laminátů, což následně způsobuje oddělování vrstev.

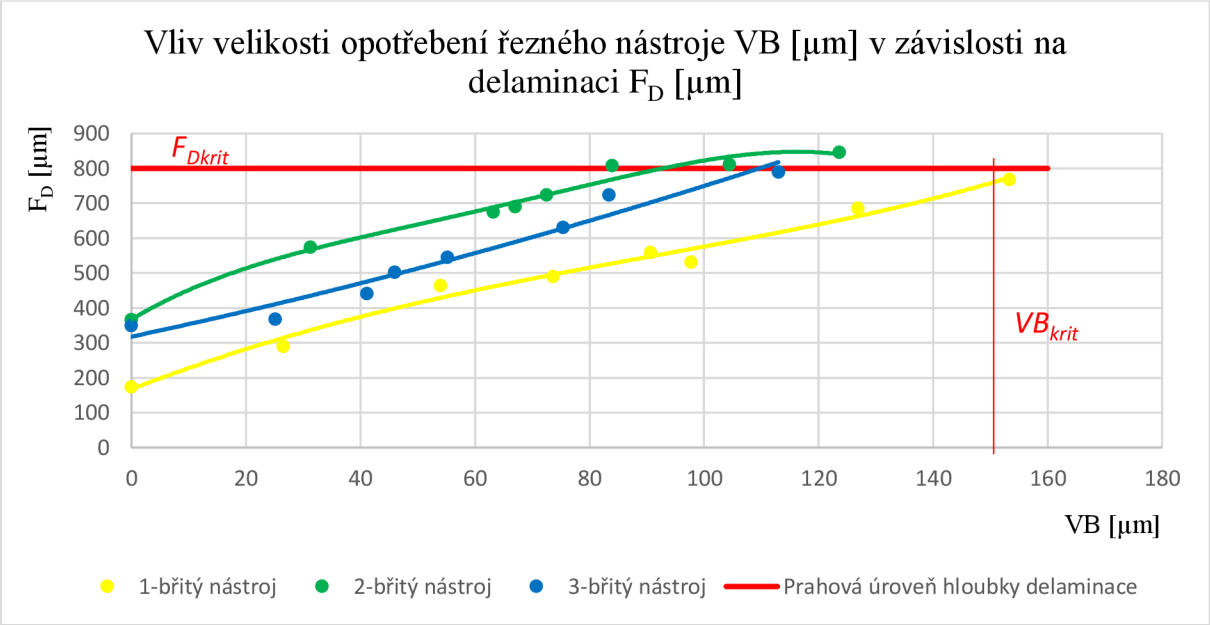
Pro kritérium založené na delaminaci tzn. faktor delaminace F_D, bylo potřeba definovat kritickou úroveň hloubky delaminace pro jednotné typy delaminace. Neexistuje průmyslový standard pro přijatelné úrovně delaminace. Na základě zkušeností ze spolupráce s průmyslovou praxí a firmou LATECOERE Czech Republic s.r.o. bylo dohodnuto, že bude tolerována kritická hloubka delaminace F_{Dkrit} = 800 µm pro typ delaminace I/II, který se vyskytoval v obráběném materiálu.

V rámci experimentální části byl zkoumán vliv delaminace vůči velikosti opotřebení řezného nástroje při procesu obrébění.

Tab. 8 *– Tabulka velikosti delaminace v závislosti na velikosti opotřebení VB; v_c = 300 m/min, fz =0,05 mm*

Nástroj	1-břitý nástroj	2-břitý nástroj	3-břitý nástroj
Čas [min]	Velikost delaminace [µm] Velikost opotřebení VB [µm] ± nejistota měření U [µm]		
t = 0	173,11 ± 0,96 0 ± 0	365,72 ± 0,92 0 ± 0	348,90 ± 0,95 0 ± 0
t = 5	290,81 ± 0,99 26,50 ± 0,96	574,213 ± 0,88 31,22 ± 0,95	368,10 ± 0,93 25,06 ± 0,89
t = 10	464,59 ± 0,97 53,99 ± 0,98	674,02 ± 1,05 63,23 ± 0,93	440,55 ± 0,97 41,09 ± 0,95
t = 15	490,6 ± 0,98	689,49 ± 1,1	502,02 ± 1,03

	73,65 ± 0,99	66,98 ± 0,95	45,95 ± 0,95
t = 20	558,36 ± 0,89 90,68 ± 1,05	723,85 ± 0,97 72,51 ± 0,94	545,05 ± 0,96 55,17 ± 0,99
t = 25	530,43 ± 0,96 97,72 ± 1,35	808,02 ± 0,94 83,92 ± 0,98	630,27 ± 1,1 75,35 ± 1,03
t = 30	685,41 ± 1,06 126,91 ± 2,04	810,93 ± 1,25 104,46 ± 1,45	723,76 ± 1,28 83,39 ± 1,12
t = 35	767,77 ± 1,27 153,31 ± 2,35	845,92 ± 1,55 123,61 ± 2,05	788,93 ± 1,48 112,96 ± 1,85



Graf 3 – *Graf průběhu velikosti opotřebení řezného nástroje VB v závislosti na velikosti delaminace F_D; v_c = 300 m/min, f_z =0,05 mm*

Ze získaných výsledků, které jsou uvedeny v Tab. 8 a graficky vyzobrazených v Grafu 3, lze vypozorovat následující:

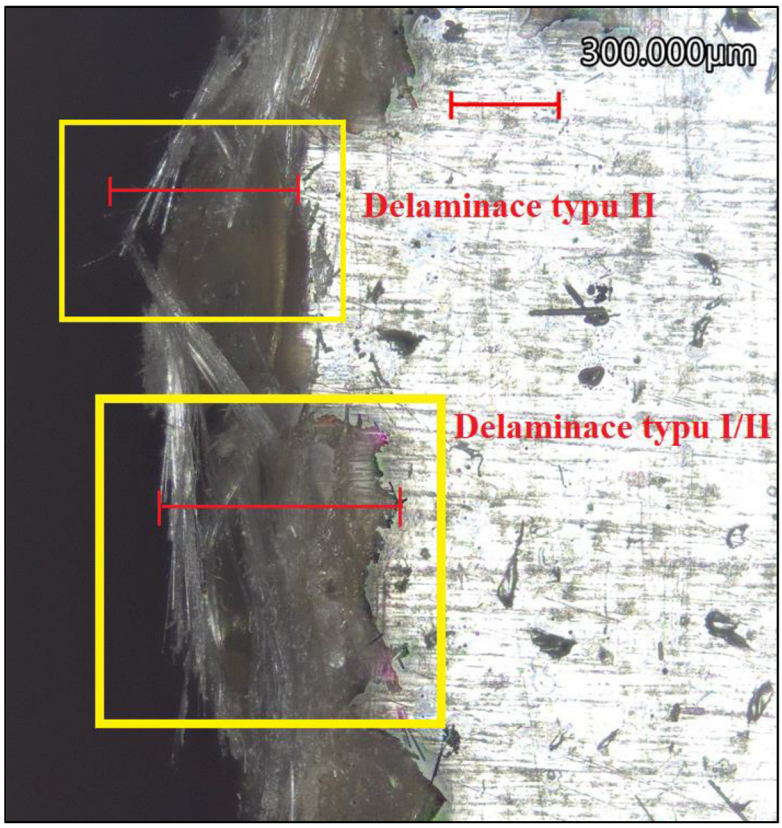
Delaminace se lišila svým typem a velikostí v závislosti na geometrii nástroje a rozsahu opotřebení. Hloubka delaminace rostla se zvýšením opotřebením řezného nástroje. Zvýšení opotřebení řezného nástroje otěrem podporovalo zvýšení velikosti delaminace a tepelné poškození materiálu.

Bylo pozorováno, že v průběhu obrábění se měnil typ delaminace v závislosti na změně opotřebení řezného nástroje.

V Tab. 9. je vidět, že u nástroje s 1 břitem došlo ke změně typu delaminace z typu II. na typ I/II. Ke změně došlo v čase t = 20 min. Velikost delaminace u nástroje s 1 břitem v závislosti na opotřebení dosahovala rozměru od 173,11 ± 0,96 do 767,77 ± 1,27 µm. Nástroj s 1 břitem dosáhl nejmenší delaminace i při překročení kritické hodnoty opotřebení VB_{krit} = 150 µm.

Dále bylo zjištěno, že také u nástroje se 2 břity docházelo k delaminaci kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny. I u tohoto nástroje bylo zjištěno, že se měnil typ delaminace z typu II. na typ I/II (Obr. 17) při opotřebovávání řezného nástroje. Ke změně u tohoto nástroje došlo již při čase t = 15 min. Nástroj se 2 břity přesáhl kritickou úroveň hloubky delaminace F_{Dkrit} při čase t = 25 min, kdy velikost delaminace byla F_D = 808,02 ± 0,94 µm při opotřebení 83,92 ± 0,98 µm. Hodnota konečné delaminace byla F_D = 845,92 ± 1,55 µm při velikosti opotřebení řezného nástroje VB = 123,61 ± 2,05 µm v čase t = 35 min.

Při výzkumu bylo zjištěno, že nástroj se 3 břity téměř dosáhl hodnoty prahové úrovně hloubky delaminace F_{Dkrit} = 800 µm v čase t = 35 min. Velikost delaminace byla pro nástroj se 3 břity byla F_D = 788,93 ± 1,48 µm při velikosti opotřebení řezného nástroje VB = 112,96 ± 1,85 µm.



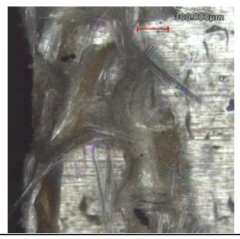
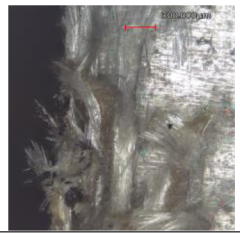
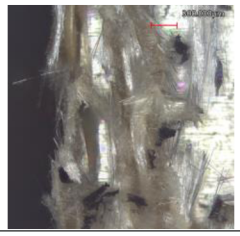
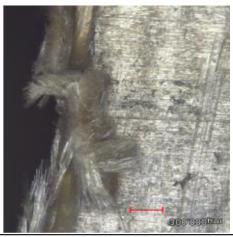
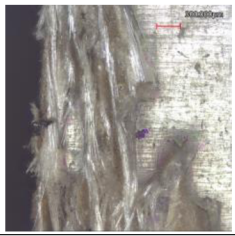
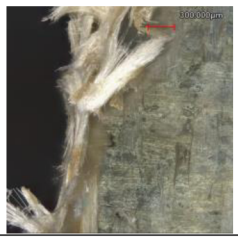
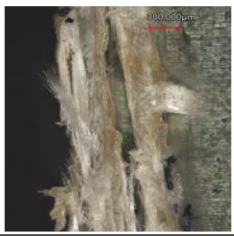
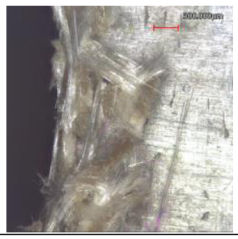
***Obr. 17** – Typy delaminace v čase t = 30 min*

V průběhu výzkumu bylo pozorováno, že s rostoucím opotřebením řezného nástroje se řezný mechanismus výrazně mění tak, že vlákna vyčnívají z povrchu. To naznačuje, že došlo k významnému zpětnému odpružení tam, kde není ostrý břit (řezná hrana) schopen přestřihnout vlákna. Místo toho jsou vlákna zastrčena pod řeznou hranu a při průchodu zubu pruží zpět, namísto typického procesu stříhání, ke kterému dochází u břitů s vysokou ostrostí řezné hrany.

Při výzkumu bylo pozorováno, že jakmile byla překročena kritická hloubka poškození, vlákna se ohýbají a vyhýbají se ostří nástroje, aniž by byla řezána. Tento přechod od pouhé delaminace k vyčnívajícím neřezaným vláknům podél frézované hrany koreluje se skutečnou řeznou silou a je ovlivněn skutečnou tloušťkou třísky, která se mění s úhlem řezu. Tato skutečnost byla potvrzena i dle teorie Hintze a Hartmanna [18] a shoduje se s výsledky v této diplomové práci.

Z naměřených výsledků lze říct, že nástroj s větším stoupáním šroubovice a menším úhlem břitu (nástroj s 1 břitem) dosáhl menší delaminace, než ostatní typy nástrojů. Nejméně vhodným nástrojem se prokázala být fréza se 2 břity. Fréza přesáhla kritickou úroveň hloubky delaminace F_{Dkrit} již v čase t = 25 min. Z tohoto důvodu není vhodné používat frézu se 2 břity pro aplikace, kde je potřeba minimální velikost delaminace. Při obrábění kompozitní desky s uhlíkovými vlákny se u každého z použitých nástrojů vyskytl typ delaminace II a I/II.

Tab. 9 *– Tabulka delaminace pro použité typy nástrojů*

	Delaminace		
Čas	1-břitý nástroj	2-břitý nástroj	3-břitý nástroj
5 min			
10 min			
15 min			
20 min			
25 min			
30 min			
35 min			

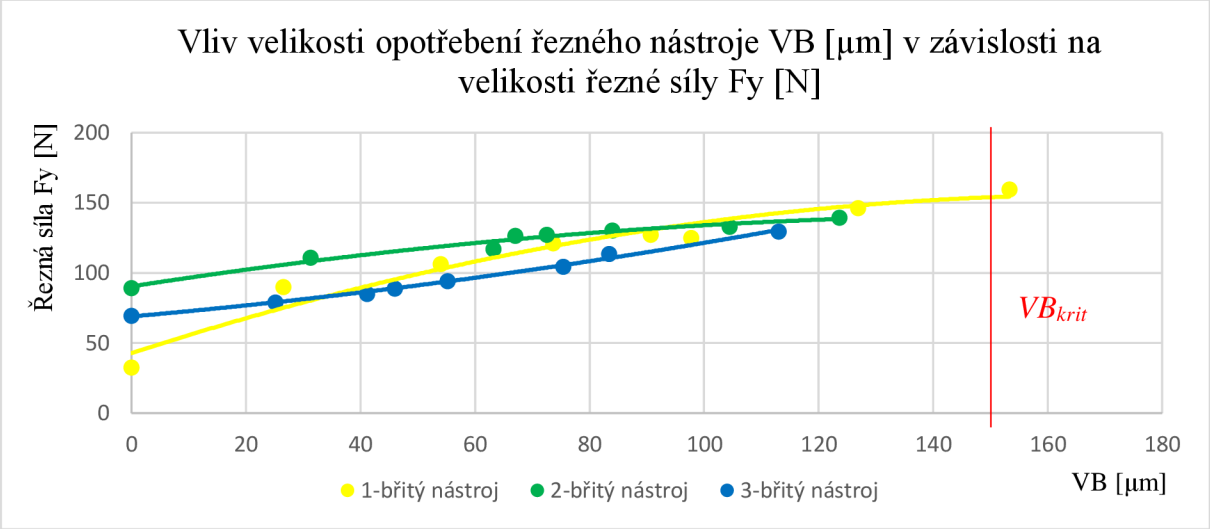
4.3 Řezné síly

Řezné síly jsou důležitou fyzikální veličinou při řezném procesu. Velikost řezných sil přímo ovlivňuje kvalitu celkového procesu. Řezné síly souvisí s mnoha faktory, jako jsou řezné parametry, obráběný materiál a řezný nástroj. Současně je měření řezných sil relativně snadné. Proto je nutné stanovit vztah mezi řeznými silami a řeznými parametry, aby bylo možné ovládat vady, které vznikají při obrábění prostřednictvím řezných sil.

V průběhu výzkumu byla sledována velikost posuvové řezné síly *Fy* vůči velikosti opotřebení řezného nástroje *VB*. V průběhu obrábění se měnila geometrie řezného nástroje a tím pádem docházelo k nárůstu řezných sil.

Tab. 10 *– Tabulka velikosti řezné síly F_y v závislosti na velikosti opotřebení řezného nástroje VB; v_c = 30 m/min, fz =0,05 mm*

Nástroj	1-břitý nástroj	2-břitý nástroj	3-břitý nástroj
Čas [min]	Velikost posuvové řezné síly Fy [N] Velikost opotřebení VB [µm] ± nejistota měření U [µm]		
t = 0	32,6 ± 0,48 0 ± 0	89,4 ± 0,91 0 ± 0	69,6 ± 0,68 0 ± 0
t = 5	90 ± 0,92 26,50 ± 0,96	111 ± 0,98 31,22 ± 0,95	78,8 ± 0,81 25,06 ± 0,89
t = 10	106,2 ± 0,97 53,99 ± 0,98	117 ± 0,95 63,23 ± 0,93	85 ± 0,86 41,09 ± 0,95
t = 15	121 ± 0,98 73,65 ± 0,99	126,6 ± 1,07 66,98 ± 0,95	88,8 ± 0,94 45,95 ± 0,95
t = 20	127,4 ± 0,94 90,68 ± 1,05	127,2 ± 0,96 72,51 ± 0,94	94,2 ± 0,90 55,17 ± 0,99
t = 25	124,8 ± 0,99 97,72 ± 1,35	130,4 ± 0,99 83,92 ± 0,98	104,6 ± 1,02 75,35 ± 1,03
t = 30	146,4 ± 0,96 126,91 ± 2,04	133 ± 0,98 104,46 ± 1,45	113,4 ± 0,93 83,39 ± 1,12
t = 35	159,6 ± 0,94 153,31 ± 2,35	139,6 ± 1,12 123,61 ± 2,05	129,6 ± 1,05 112,96 ± 1,85



Graf 4 *– Graf velikosti opotřebení řezného nástroje VB v závislosti na velikosti řezné síly Fy;* v_c *= 300 m/min,* f_z *=0,05 mm*

Ze získaných výsledků, které jsou uvedeny v Tab. 10 a graficky vyzobrazených v Grafu 4, lze vypozorovat následující:

Bylo prokázáno, že řezné síly se zvyšovaly s velikostí opotřebení řezného nástroje. Důvodem zvyšování řezných sil byla změna geometrie řezného nástroje, a to především zmenšení úhlu hřbetu. V důsledku toho se zvýšily řezné síly.

Bylo pozorováno, že nejvyšších řezných sil dosáhl nástroj s 1 břitem. Velikost řezných sil byla Fy = 159,6 ± 0,94 N při opotřebení řezného nástroje VB = 153,31 ± 2,35 a v čase t = 35 min. Naproti tomu nástroje s nižším opotřebením řezného nástroje, jako byly nástroje se 2 a 3 břity. Tyto nástroje dosáhly výrazně nižších řezných sil. Nejmenší řezné síly byly naměřeny u nástroje se 3 břity.

Při výzkumu bylo prokázáno, že kvůli řezným silám a abrazivní povaze uhlíkových vláken dochází k vylamování materiálu v nástroji a tím se zrychluje opotřebení nástroje, tudíž dochází ke zvýšení řezné síly a drsnosti povrchu v důsledku snížení ostrosti nástroje. Navíc, ačkoliv lze dosáhnout vyšší odolnosti proti opotřebení povlakem, je potřeba brát v úvahu to, že povlak zvětšuje poloměr břitu, což následně vede ke zvýšení frézovacích sil. V důsledku vysoké tvrdosti vláken je řezná síla hlavním důvodem opotřebení nástroje při obrábění kompozitních materiálů.

V rámci výzkumu bylo dokázáno, že opotřebení nástroje je významně ovlivněno řeznými parametry používanými při procesu frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny. Obrábění vysokou řeznou rychlostí je obecným trendem za účelem zvýšení účinnosti, přesnosti a kvality kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny, jakož i snížení nákladů a doby obrábění. Řezná rychlost je hlavním parametrem ovlivňujícím opotřebení nástroje. Se zvyšující se řeznou rychlostí se výrazně zvyšuje opotřebení nástroje.

Z naměřených hodnot vyplývá, že pro obrábění kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny je nejvhodnější nástroj se 3 břity, u kterého bylo prokázáno, že dosahuje nejmenších řezných sil. Nejméně vhodným nástrojem z pohledu velikosti řezných sil byla fréza s 1 břitem, která měla nejmenší úhel břitu, ale s narůstajícím opotřebením a zvětšujícím se poloměrem břitu nástroje, dosáhl nástroj nejvyšších řezných sil.

4.4 Prachové částice

Při frézování kompozitních materiálů vznikají škodlivé prachové částice. Tyto částice se pak dostávají do vzduchu a mohou negativně ovlivnit lidské zdraví či způsobit poškození stroje. Prachové částice menší než 10 mikrometrů jsou velice nebezpečné, jelikož se mohou vdechnutím dostat do dýchacího ústrojí, kde mohou způsobit vážné zdravotní problémy. Minimalizování kontaktu s těmito částicemi můžeme docílit použitím ochranných pomůcek (roušky, rukavice atd.) či odsávacího zařízení viz Obr.10. Prachové částice se objevují v různé podobě. Mohou být ve formě jemných prachových částic, což je směs matrice a malých vláken, dále ve formě volných vláken nebo tzv. fragmentů, což jsou shluky vláken.

V rámci výzkumu byla pozorována změna velikosti škodlivých prachových částic v závislosti na opotřebení řezného nástroje. Při výzkumu bylo pozorováno, zda velikost nejmenších naměřených prachových částic překročí hranici, kdy budou prachové částice menší než 9 μm a mohou být vdechnuty a způsobit zdravotní potíže. Dále bylo zkoumáno, za jakých podmínek bylo dosaženo nejmenších škodlivých prachových částic.

Pro analýzu velikosti prachových částic byly použity vzorky škodlivých prachových částic odebraných z:

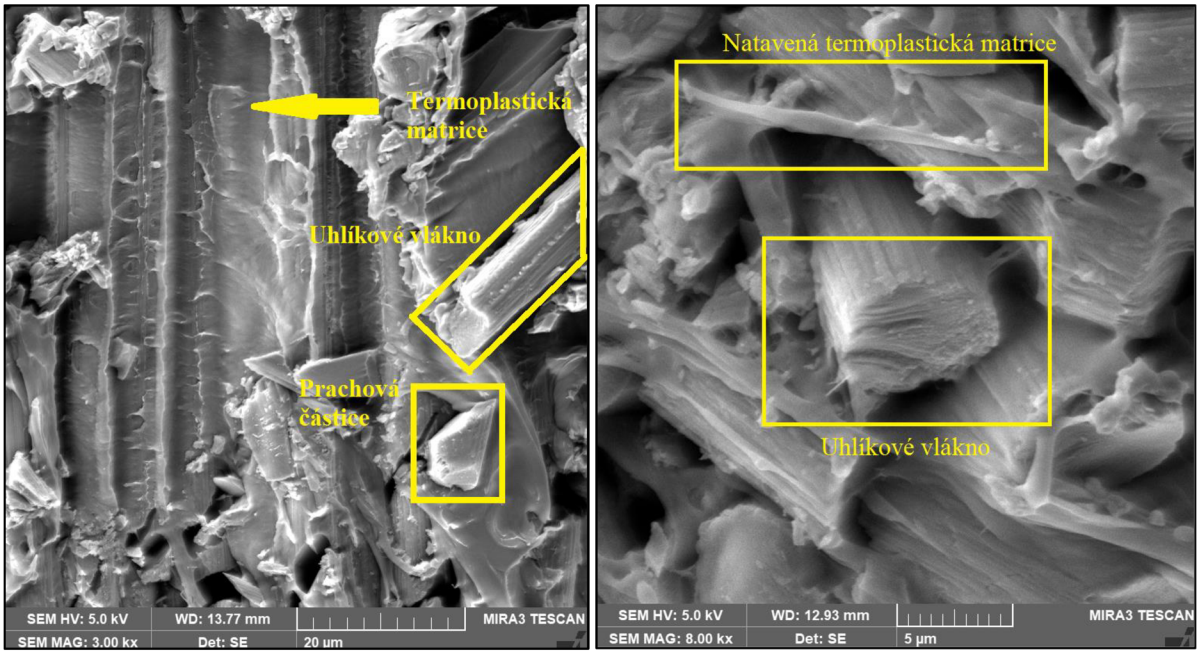
- nástroje
- filtru
- obráběné kompozitní desky

V rámci výzkumu byla zkoumána závislost velikosti prachových částic na čase frézování (Tab. 11).

Tab. 11 *– Tabulka velikosti prachových částic v závislosti na čase obrábění, v_c = 300 m/min, f_z =0,05 mm*

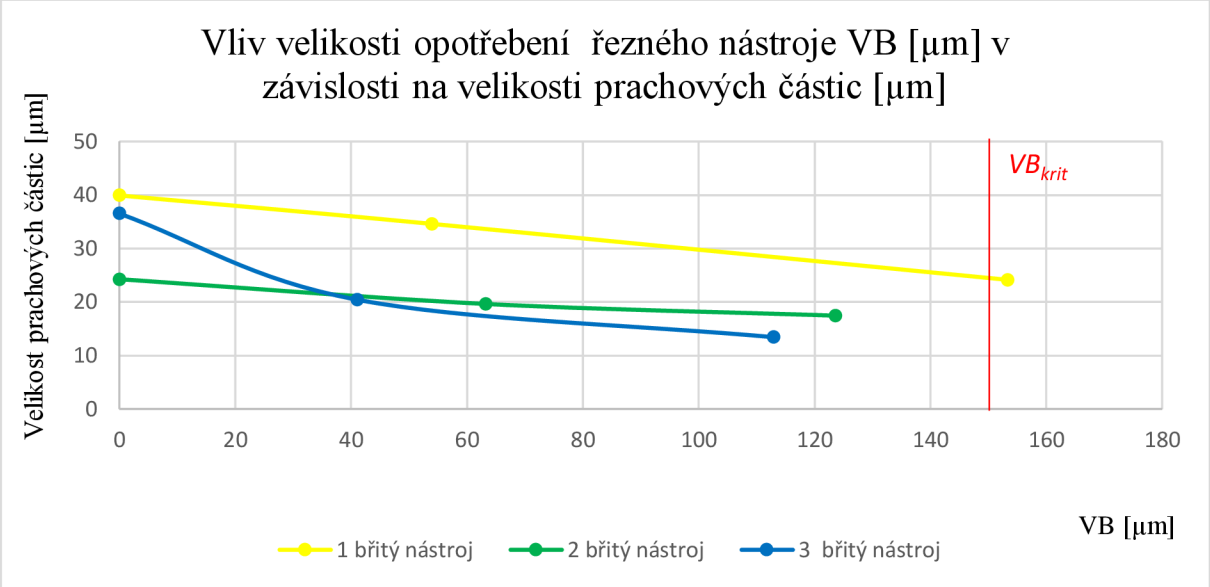
Nástroj	1-břitý nástroj	2-břitý nástroj	3-břitý nástroj
Čas [min]	Velikost prachových částic [µm] ± nejistota měření U [µm]		
t = 1	39,92 ± 0,53	24,25 ± 0,40	36,52 ± 0,38
t = 10	34,59 ± 0,45	19,63 ± 0,38	20,41 ± 0,40
t = 35	24,14 ± 0,35	17,44 ± 0,36	13,41 ± 0,32

Při výzkumu bylo pozorováno, že při frézování byla termoplastická matrice tavena, jak je vidět na Obr. 18 (vlevo). Kvůli vysoké adhezi matrice nedocházelo k uvolňování prachových částic do vzduchu po obrobení materiálu, jak lze pozorovat na Obr. 18 (vpravo). Díky tomuto byly prachové částice zachytávány na velkých kusech materiálu a nedocházelo k úniku velkého množství škodlivých prachových částic.



Obr. 18 *– Uhlíková vlákna a prachové částice v termoplastické matrici z SEM mikroskopu*

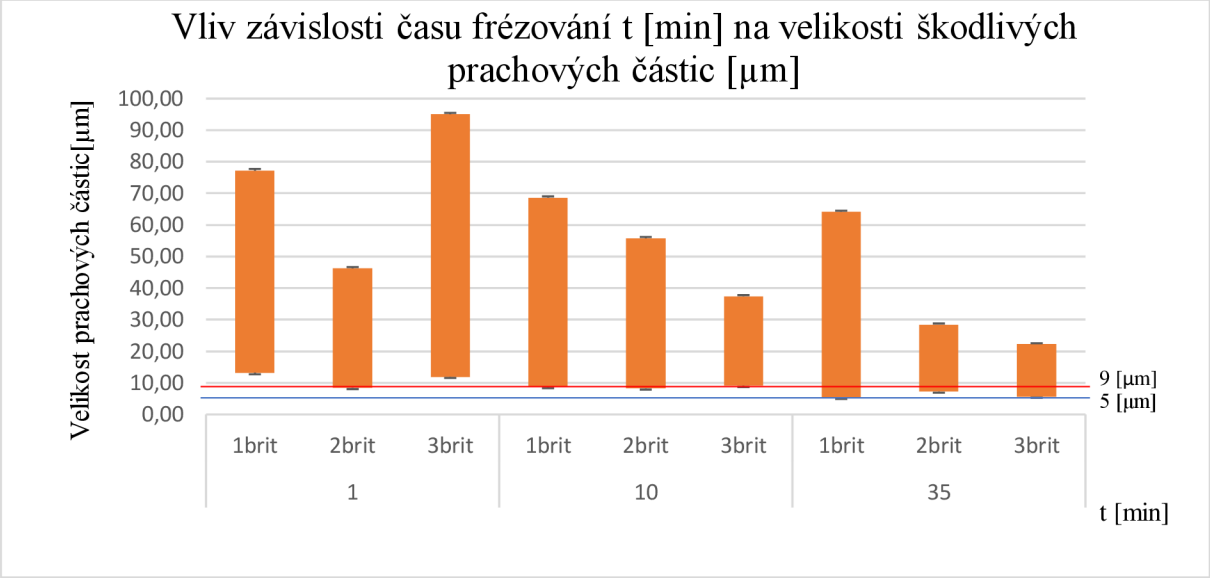
Rastrovací elektronový mikroskop (SEM) Tescan Mira 3. Snímky byly v rámci experimentu pořízeny Doc. Ing. Dorou Kroisovou, Ph.D., z Technické univerzity v Liberci, Fakulty strojní, Katedry materiálu.



Graf 5 *- Graf závislosti velikosti opotřebení řezného nástroje VB v závislosti na velikosti prachových částic;* v_c *= 300 m/min,* f_z *=0,05 mm*

Velikost škodlivých prachových částic byla výrazně ovlivněna typem řezného nástroje a velikostí opotřebení. Největší velikost prachových částic byla naměřena u nástroje se 1 břitem v čase t = 1 min, kdy velikost prachových částic byla 95,07 ± 1,24 µm. Nejmenší naměřené prachové částice byly nalezeny v čase t = 35 min u nástroje se 3 břity. Velikost těchto částic byla 5,13 ± 0,37 µm.

Bylo prokázáno, že částice s aerodynamickým průměrem v rozmezí mezi 10 – 9 µm se mohou dostat do očí nebo mohou být vdechnuty. Částice o velikosti 9 – 5 µm se mohou dostat do horních cest dýchacích a částice o rozměrech 2 – 5 µm se mohou dostat až do průdušnice a plic. V Grafu 6. je možné pozorovat, že částice větší než 9 µm, které se mohou dostat do očí, se při obrábění vyskytují jen v časech t = 1 min u nástroje s 1 břitem a u nástroje se 3 břity v časech t = 1 a 10 min. Částice menší jak 9 µm se vyskytovaly nejčastěji, a to u všech typů nástrojů. Nejvíce škodlivé částice se vyskytovaly v časech t = 35 min, a to u nástroje se 3 břity a o velikosti 5,13 ± 0,37 µm a také u nástroje s 1 břitem o velikosti 5,26 ± 0,41 µm. Tyto částice se mohou dostat do dýchacích cest a jsou zdraví škodlivé.



Graf 6 *– Graf závislosti času frézování na velikosti škodlivých prachových částic pro všechny typy použitých nástrojů při časech obrábění;* v_c *= 300 m/min,* f_z *=0,05 mm*

Bylo prokázáno, že opotřebení řezného nástroje a jeho geometrie výrazně ovlivnilo velikost a tvar škodlivých prachových částic. Při zvětšujícím opotřebení řezné hrany *VB* se zmenšovala velikost škodlivých prachových částic. Při procesu frézování v počátcích obrábění docházelo k procesu stříhání, kdy ještě měl nástroj původní geometrii bez opotřebení. Při změně geometrie řezného nástroje a při otupování řezné hrany, následně začalo docházet místo procesu stříhání uhlíkových vláken k lámání a drcení uhlíkových vláken. To mělo za následek zmenšování škodlivých prachových částic.

Z provedených měření vyplývá, že nástroj s 1 břitem produkoval největší škodlivé částice, tedy dosáhl nejlepších výsledků z hlediska velikosti prachových částic i při překročení kritické hodnoty opotřebení řezného nástroje VB_{krit}. Oproti tomu nástroj se 3 břity vytvářel nejmenší, a tedy i nejškodlivější prachové částice při nejmenším opotřebení řezného nástroje *VB*.

5 Diskuze výsledků

Hlavním cílem výzkumu bylo navrhnout a zjistit, jaké procesní parametry by byly nejvhodnější pro frézování kompozitních materiálů na bázi termoplastu vyztuženého uhlíkovými vlákny, používaném v leteckém průmyslu.

Problematika zabývající se teoretickou stránkou frézování kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny byla popsána v teoretické části diplomové práce v kapitole 2.

K dosažení výsledků byla vytvořena celková metodika pro obrábění kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny. Poté byla vytvořena metodika na měření opotřebení řezného nástroje, velikost delaminace, velikost řezných sil a k určení velikosti škodlivých prachových částic.

5.1 Opotřebení nástroje

Opotřebení řezného nástroje bylo kontrolováno na hřbetu frézy. Před obráběním byla jako limitní hodnota stanovena kritická hodnota opotřebení VB_{krit} = 150 µm.

Největšího opotřebení při obrábění dosáhl nástroj s 1 břitem a nejmenším úhlem břitu. Opotřebení břitu překročilo kritickou hodnotu opotřebení nástroje v čase t = 34 min. Konečná hodnota opotřebení hřbetu v čase t = 35 min byla u 1 břitého nástroje VB = 153,31 ± 2,35 µm.

Nejmenší opotřebení bylo naměřeno na nástroji se 3 břity. Hodnota opotřebení hřbetu byla VB = 112,96 ± 1,85 µm v čase obrábění t = 35 min.

Na všech opotřebených nástrojích bylo pozorováno opotřebení otěrem, které měnilo geometrii nástroje.

Velké opotřebení řezného nástroje je hlavním problémem v rámci kvality obrobeného povrchu při obrábění kompozitního materiálu. V důsledku silného opotřebení nástroje vlivem abrazivních vláken dochází k otupení ostří, což následně vede k vysokému poškození obrobených povrchů.

Kvalita povrchu přímo souvisí se stavem životnosti nástroje. Proto je důležité znát podrobnější informace o opotřebení z hlediska zajištění efektivity obrábění a kvality povrchu. Nízká tepelná vodivost matricové pryskyřice a vysoce abrazivní povaha uhlíkových vláken jsou hlavními důvody rychlého opotřebení nástroje.

Při frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny jsou okrajovými podmínkami pro výběr nejvhodnějšího nástroje jeho mechanické (velká abrazivnost uhlíkových vláken) a tepelné vlastnosti (tepelné namáhání v důsledku nedostatečných tepelných charakteristik plastové matrice).

5.2 Delaminace

V průběhu výzkumu byl zkoumán vliv velikosti opotřebení řezného nástroje na vznik a typ delaminace na povrchu kompozitního materiálu vyztuženého uhlíkovými vlákny. Delaminace měla největší vliv na kvalitu obrobeného povrchu materiálu. Poškození delaminací během obrábění kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny je důležitým mechanismem ovlivňujícím výkon daného výrobku. Před procesem frézování musela být stanovena prahová hloubka delaminace F_{Dkrit} = 800 µm pro typ delaminace I/II.

Při výzkumu bylo zjištěno, že největší delaminace bylo dosaženo při použití nástroje se 2 břity. Tento nástroj překročil kritickou hloubku delaminace F_{Dkrit} = 800 µm pro typ delaminace I/II v čase t = 25 min. Po dokončení operace frézování velikost delaminace v čase t = 35 min dosáhla hodnot F_D = 845,92 ± 1,55 µm.

Nejmenší delaminace byla u mástroje s 1 břitem, který měl zároveň nejmenší úhel břitu z použitých nástrojů. I přes největší opotřebení břitu byla naměřena nejmenší delaminace. Velikost delaminace u nástroje s 1 břitem dosahovala hodnot F_D =767,77 ± 1,27 µm v čase t = 35 min.

V průběhu výzkumu bylo pozorováno, že se při zvyšujícím se opotřebení řezného nástroje změnil typ delaminace z typu II na typ delaminace I/II. Důvodem změny byla změna velikosti poloměru břitu. Při počátečních fázích frézování docházelo ke střihu uhlíkových vláken pomocí ostrého břitu nástroje. Po opotřebení břitu se zvětšil rádius na břitu a místo

stříhání uhlíkových vláken docházelo k ohýbání a lámání vláken. Ohýbaná uhlíková vlákna se při průchodu zvětšeného břitu dostávala pod břit a zůstávala nalepená na roztavené matrici.

Poruchy materiálu, ke kterým dochází před řezem, jsou způsobeny delaminací, lomem matrice nebo poruchou rozhraní vlákno-matrice. Udržování malých vertikálních sil je důležitým faktorem kvůli problému delaminace. Delaminace na obrobených površích může vést k vyřazení součástí a je známo, že delaminace úzce souvisí s opotřebením nástroje. Delaminace je hlavní výrobní chybou při obrábění polymerů vyztužených vlákny. V souvislosti s frézováním kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny je delaminace obecně uznávána jako poškození vrchních vrstev laminátu. Odštěpování a vyčnívající vlákna jsou znaky delaminace.

5.3 Řezné síly

Řezné síly jsou důležitou fyzikální veličinou při řezném procesu. Velikost řezných sil přímo ovlivňuje kvalitu celkového procesu. Řezné síly souvisí s mnoha faktory, jako jsou řezné parametry, materiál obrobku a nástroj. Současně je měření řezných sil relativně snadné. Proto je nutné stanovit vztah mezi řeznými silami a řeznými parametry, aby bylo možné ovládat vady, které vznikají při obrábění prostřednictvím řezných sil.

Největší řezná síla byla naměřena při obráběním nástroje s 1 břitem. Největší řezná síla byla naměřena při překročení kritického opotřebení nástroje VB_{krit} v čase t = 35 min. Největší naměřená řezná síla byla Fy = 159,6 ± 0,94 N.

Při výzkumu bylo prokázáno, že nejnižších řezných sil dosáhl nástroj se 3 břity. Tento nástroj měl nejmenší velikost opotřebení břitu nástroje a díky tomu i nejmenší řezné síly z použitých nástrojů. Velikost řezné síly u nástroje se 3 břity byla Fy = 129,6 ± 1,05 N.

Abrazivní charakter výztuže způsobuje vysokou míru opotřebení nástroje a následně opotřebení nástroje způsobuje vysokou řeznou sílu.

Kvůli řezným silám a abrazivní povaze uhlíkových vláken dochází k vylamování materiálu v nástroji, a tím se zrychluje opotřebení nástroje, tudíž dochází ke zvýšení řezné síly a drsnosti povrchu v důsledku snížení ostrosti nástroje.

5.4 Prachové částice

Výzkum se také zabýval vlivem velikosti opotřebení řezného nástroje na vznik a velikost škodlivých prachových částic, které vznikaly při procesu frézování. Při výzkumu byly nalezeny škodlivé prachové částice, které byly menší než 5 μm. Tyto částice se mohou dostat do horních cest dýchacích či průdušnice. Dále byly nalezeny škodlivé prachové částice, které dosahovaly rozměrů okolo 9 μm. Částice o těchto rozměrech se mohou dostat do dýchacích cest a způsobit újmu na zdraví.

V průběhu výzkumu bylo pozorováno, že se velikost škodlivých prachových částic zmenšovala společně s rostoucím opotřebením řezného nástroje.

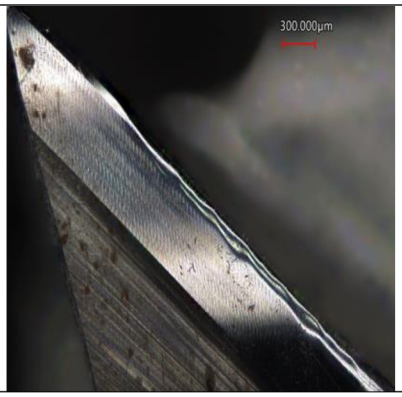
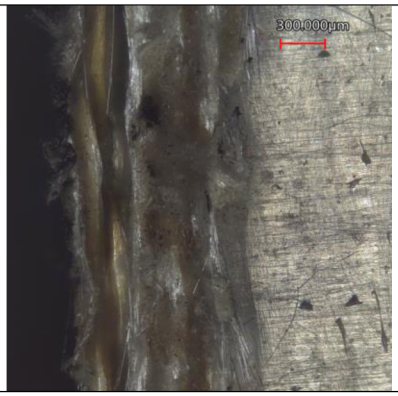
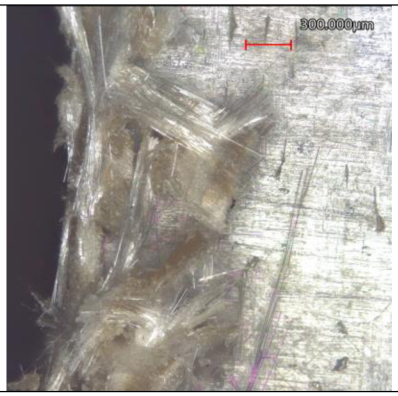
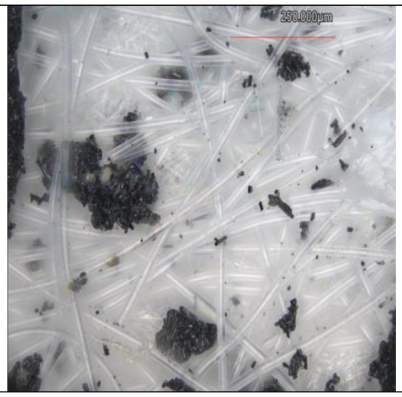
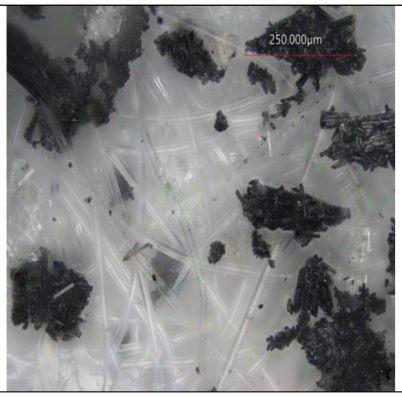
Nejškodlivější prachové částice byly naměřeny u nástroje se 3 břity v čase t = 35 min. Velikost nejmenší naměřené částice byla 5,13 ± 0,37 μm. Průměrná velikost, která byla u nástroje se 3 břity byla v čase t = 35 min byla 13,41 ± 0,32 μm při opotřebení řezného nástroje VB = 112,96 ± 1,85 μm.

Z naměřených hodnot můžeme prokázat, že největší prachové částice byly naměřeny u nástroje s 1 břitem a s úhlem břitu 30 °. Velikost prachových částic u tohoto nástroje v čase t = 35 min byla 24,14 ± 0,35 μm.

Při výzkumu bylo prokázáno, že vliv opotřebení řezného nástroje má negativní vliv na velikost škodlivých prachových částic, jenž jsou produkovány při frézování kompozitního materiálu vyztuženého uhlíkovými vlákny. Změna geometrie řezného nástroje způsobila změnu při oddělování třísky po obrobení materiálu. V počátku obrábění, kdy byla původní geometrie nástroje, docházelo k procesu stříhání uhlíkových vláken a vlákna byla oddělena od matrice v pravidelných velikostech. Při změně geometrie řezného nástroje došlo k zvětšení poloměru břitu. Geometrie břitu neumožňovala nástroji uhlíková vlákna řezat, ale vlákna byla vytlačována pod břit a drcena v procesu frézování. Tento proces způsobil zvětšení delaminace, díky kterému nebyl nástroj schopen vyčnívající vlákna z matrice odstřihnout, a při lámání vláken se do vzduchu dostaly malé škodlivé částice.

Při výzkumu bylo prokázáno, že se v průběhu obrábění uvolňují škodlivé prachové částice do okolí, a proto je nutné se chránit, aby nedošlo k poškození zdraví pracovníka.

***Tab. 12** – Tabulka výsledků*

	Nejhorší naměřený výsledek	Nejlepší naměřený výsledek
Opotřebení [µm]	153,31 ± 2,35	112,96 ± 1,85
		
Delaminace [µm]	845,92 ± 1,55	767,77 ± 1,27
		
Řezné síly [N]	159,6 ± 0,94	129,6 ± 1,05
Prachové částice [µm]	13,41 ± 0,32	24,14 ± 0,35
		

V Tab. 12 se nachází shrnutí nejlepších a nejhorších zaznamenaných výsledků naměřených při výzkumu frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny. Při výzkumu bylo zkoumáno opotřebení řezného nástroje, velikost delaminace, řezné síly a velikost prachových částic. Jako nejvhodnější nástroj pro obrábění kompozitních materiálů

s uhlíkovými vlákny se ukázala fréza se 3 břity a úhlem břitu 45°, která dosáhla nejvhodnějších výsledků.

6 Závěr

Předkládaná diplomová práce zpracovává téma "Vliv procesních parametrů na trvanlivost řezného nástroje při frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny".

Diplomová práce se věnuje výzkumu vlivu procesních parametrů na trvanlivost řezného nástroje, delaminaci, velikost řezných sil a velikost škodlivých prachových částic při frézování kompozitního materiálu vyztuženého uhlíkovými vlákny s keprovou vazbou 2x2.

Diplomová práce byla rozdělena do tří hlavních částí.

V teoretické části (kapitola 2) se pojednává o současné problematice frézování kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny.

V další části (kapitola 3) je popsána metodika experimentu, která zmiňuje postup provedených experimentů, popis použitých strojů, nástrojů, přístrojů, měřících zařízení a popis obráběného materiálu.

Experimentální část (kapitola 4) se zabývá realizací samotného experimentu. V této kapitole jsou zpracovány a vyhodnoceny získané poznatky z měření.

Z rozsáhlého souboru naměřených hodnot a výsledků lze vyvodit následující poznatky:

1. opotřebení řezného nástroje má podstatný vliv na velikost delaminace, velikost řezných sil a na vznik škodlivých prachových částic vznikajících při procesu frézování,
2. z povrchové topografie nástrojů bylo prokázáno, že u všech použitých nástrojů docházelo k opotřebení otěrem na hřbetu nástroje,
3. opotřebení řezného nástroje má významný vliv na velikost delaminace,
4. nejvíce se vyskytovala delaminace typu I/II,
5. s rostoucím opotřebením řezného nástroje se zvyšovaly řezné síly,
6. s rostoucím opotřebením řezného nástroje se snižovala velikost prachových částic
7. byla překročena limitní hranice prachových částic o velikosti 5 µm pro vstup do plic

Díky předem stanovené kritické velikosti opotřebení (VBkrit = 150 μm) a předem stanovené limitní hodnoty průměrné velikosti delaminace (F_{Dkrit} = 800 μm) lze pro frézování kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny doporučit pouze řežný nástroj se 3 břity. Při výzkumu se objevovaly prachové částice menší než 10 μm, které mohou být vdechnuty a způsobit zdravotní komplikace. Pro obrábění kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny je doporučeno používat ochrané pomůcky a odsávací zařizení.

Seznam obrázků

***Obr. 1** - Uhlíkové vlákno pod SEM mikroskopem [2]* 14

***Obr. 2** - Frézy pro obrábění kompozitních materiálů s termoplastickou matricí [9]* 17

***Obr. 3** - Typy delaminace při frézování* 22

***Obr. 4** - Uhlíková vlákna po obrábění [17]* 23

***Obr. 5** - Uhlíkové prachové částice pod konfokálním mikroskopem [17]* 23

***Obr. 6** – Kompozitní deska vyztužená uhlíkovými vlákny* 24

***Obr. 7** – Detail kompozitní desky vyztužené uhlíkovými vlákny z vrchu (vlevo), detail řezu kompozitní desky vyztužené uhlíkovými vlákny (vpravo)* 25

***Obr. 8** – Frézovací nástroj v tepelném upínači* 27

***Obr. 9** – Frézovací centrum CMX 600V* 28

***Obr. 10** – Odsávací zařízení POC9 M1* 29

***Obr. 11** – Upínací přípravek* 30

***Obr. 12** – Zesilovač náboje (vlevo), Dynamometr Kistler (vpravo)* 30

***Obr. 13** – Ruční siloměr Fultron FG-5020* 31

***Obr. 14** – Konfokální mikroskop Keyence VK-X 1000* 31

***Obr. 15** – Měření opotřebení na konfokálním mikroskopu Keyence VK-X 1000* 32

***Obr. 16** – Opotřebení otěrem na řezném nástroj se 3 břity, t = 35 min* 34

***Obr. 17** – Typy delaminace v čase t = 30 min* 38

***Obr. 18** – Uhlíková vlákna a prachové částice v termoplastické matrici z SEM mikroskopu* 44

Seznam tabulek

Tab. 1 *- Parametry kompozitní desky* 25

Tab. 2 *– Řezné nástroje* 26

Tab. 3 *– Tabulka parametrů řezných nástrojů* 26

Tab. 4 *– Tabulka řezných podmínek* 27

Tab. 5 *– Technické parametry Frézovacího centra CMX 600V* 28

Tab. 6 *– Technické parametry odsávacího zařízení POC9 M1* 29

Tab. 7 *– Tabulka velikosti opotřebení VB na době trvání řezného procesu při frézování;* v_c *= 300 m/min, fz =0,05 mm* 33

Tab. 8 *– Tabulka velikosti delaminace v závislosti na velikosti opotřebení VB;* v_c *= 300 m/min, fz =0,05 mm* 36

Tab. 9 *– Tabulka delaminace pro použité typy nástrojů* 40

Tab. 10 *– Tabulka velikosti řezné síly* F_y *v závislosti na velikosti opotřebení řezného nástroje VB;* v_c *= 30 m/min, fz =0,05 mm* 41

Tab. 11 *– Tabulka velikosti prachových částic v závislosti na čase obrábění,* v_c *= 300 m/min,* f_z *=0,05 mm* 44

Tab. 12 *– Tabulka výsledků* 51

Seznam grafů

Graf 1 *- Graf tvrdosti a houževnatosti materiálů používaných při frézování polymerů vyztužených uhlíkovými vlákny [4]* 19

Graf 2 *– Graf průběh času frézování t v závislosti na opotřebení řezného nástroje VB;* v_c *= 300 m/min,* f_z *=0,05 mm* 34

Graf 3 *– Graf průběhu velikosti opotřebení řezného nástroje VB v závislosti na velikosti delaminace* F_D*;* v_c *= 300 m/min,* f_z *=0,05 mm* 37

Graf 4 *– Graf velikosti opotřebení řezného nástroje VB v závislosti na velikosti řezné síly Fy;* v_c *= 300 m/min,* f_z *=0,05 mm*..... 42

Graf 5 *- Graf závislosti velikosti opotřebení řezného nástroje VB v závislosti na velikosti prachových částic;* v_c *= 300 m/min,* f_z *=0,05 mm* 45

Graf 6 *– Graf závislosti času frézování na velikosti škodlivých prachových částic pro všechny typy použitých nástrojů při časech obrábění;* v_c *= 300 m/min,* f_z *=0,05 mm* 46

Použitá literatura

[1] KARATAŞ, MA a H GÖKKAYA. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials [online]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914717302040

[2] SHYHA, Islam a Dehong HUO, ed. Advances im machining of composite materials: conventional and non-conventional processes. Cham: Springer, 2021. Engineering materials. ISBN 978-3-030-71437-6.

[3] HEGDE, Sharun a B SATISH SHENOY. Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance [online]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785319330445

[4] SHEIKH-AHMAD, Jamal Y. Machining of polymer composites. New York ; London: Springer, 2009. ISBN 978-0-387-35539-9.

[5] VRBKA, Jan. Mechanika kompozitů. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biome-chaniky FSI VUT v Brně, 2008.

[6] PETERS, Stan T. a Stanley T. PETERS, ed. Handbook of composites. 2. ed. London Weinheim: Chapman & Hall, 1998. ISBN 978-0-412-54020-2.

[7] MAŠEK, Petr. Frézování kompozitních materiálů s termoplastickou matricí. PhD Thesis. Czech Technical University. 2019. Dostupné z: http://hdl.handle.net/10467/82082

[8] CFRP or Carbon Fiber Reinforced Plastics. Online. Alformet.com. 2022. Dostupné z: https://www.alformet.com/composite/frp/cfrp. [cit. 2023-11-19].

[9] Efektivní frézování kompozitů s termoplastickou matricí. Online. Mmspektrum.com. 2013. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/efektivni-frezovani-kompozitu-s-termoplastickou-matrici. [cit. 2023-11-22]. nedatováno.

[10] KOLAR, petr; MASEK, petr a ZEMAN, pavel. MILLING TOOLS FOR CUTTING OF FIBER-REINFORCED PLASTIC. Online. 2014. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/81565/Kolar_Masek_Zeman__MILLING_TOOLS_FOR_CUTTING_OF_FIBERREINFORCED_PLASTIC__%282014%29_PUBV_223335.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [cit. 2024-03-06].

[11] VÁŇA, Martin. Studium integrity povrchu při frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny Online. Diplomová práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní. 2023. Dostupné z: https://theses.cz/id/way77y/. [cit. 2024-03-25].

[12] SZVAJKA, K. a T. TRZEPIECIŃSI. Effect of tool material on tool wear and delamination during machining of particleboard. Online. Journal of Wood Science, (2016), roč. LXII. pp. 305-315. Dostupné z: http://dx.doi.org/10.1007/s10086-016-1555-6

[13] PACAT, O., R. RENTSCH a E. BRINKSMEIER. Influence of milling process parameters on the surface integrity of CFRP. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012. 2012.

[14] DAVIM, J. Paulo, ed. Machining composite materials. London : Hoboken, NJ: ISTE ; Wiley, 2010. ISBN 978-1-84821-170-4.

[15] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.

[16] COLLIGAN, K. a M. RAMULU. Delamination in surface plies of graphite/epoxy caused by the edge trimming process. Washington: PED-CP.49/MD-Vol.27, Processing and manufacturing of composite materials - ASME, 1991

[17] KEHREN, Dominic; SIMONOW, Barbara a BAGER, Daphne. Release of Respirable Fibrous Dust from Carbon Fibers Due to Splitting along the Fiber Axis. Online. 2019. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/335486405_Release_of_Respirable_Fibrous_Dust_from_Carbon_Fibers_Due_to_Splitting_along_the_Fiber_Axis. [cit. 2023-12-06].

[18] HINTZE, Wolfgang; HARTMANN, Dirk. Modeling of delamination during milling of unidirectional CFRP. *Procedia Cirp*, 2013, 8: 444-449.