



Bakalářská práce

Vliv řezných podmínek na delaminaci a opotřebení řezného nástroje při frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Vojtěch Moudrý

Vedoucí práce:

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

Liberec 2024



Zadání bakalářské práce

Vliv řezných podmínek na delaminaci a opotřebení řezného nástroje při frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny

<i>Jméno a příjmení:</i>	Vojtěch Moudrý
<i>Osobní číslo:</i>	S20000082
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra obrábění a montáže
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o frézování kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými a jinými vlákny. Problematika delaminace a opotřebení řezného nástroje se zaměřením na řezné podmínky.
2. Volba vhodných řezných nástrojů (geometrie, materiál nástroje) a řezných podmínek bez procesního média.
3. Návrh metodiky experimentů pro frézování kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny se zaměřením na delaminaci a opotřebení řezného nástroje.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení získaných výsledků v rámci vzniklé delaminace a opotřebení řezného nástroje.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování práce:

Jazyk práce:

tištěná/elektronická

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 2022

Předpokládaný termín odevzdání: 2. dubna 2024

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

L.S.

doc. Ing. et Ing. Štěpánka
Dvořáčková, Ph.D.
vedoucí katedry

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

Předkládaná bakalářská práce se věnuje vlivům řezných podmínek na delaminaci a opotřebení dvou řezných nástrojů s odlišnou geometrií při frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny vyztužených tkaninou keprové vazby s orientací vláken 90°.

V teoretické části jsou shrnuté znalosti o problematice frézování kompozitních materiálů. Další část se zabývá metodikou celého experimentu, kde jsou popsány kompletní informace o nástrojích, vzorcích, měřidlech a metodách měření. Zpracované naměřené hodnoty a podrobně popsané výsledky jsou v experimentální části. Vyhodnocení a shrnutí výsledků měření je uvedeno v diskuzi a závěru práce.

Klíčová slova: frézování, kompozitní materiály s uhlíkovými vlákny, opotřebení, delaminace, řezné podmínky

Abstract

The present bachelor thesis is devoted to the effects of cutting conditions on delamination and wear of two cutting tools with different geometry during milling of carbon fibre reinforced twill weave composite materials with 90° fibre orientation.

The theoretical part summarizes the knowledge on the milling of composite materials. The next section deals with the methodology of the whole experiment, where complete information about tools, samples, gauges and measurement methods are described. The processed measured values and sub-described results are presented in the experimental section. The evaluation and summary of the measurement results are given in the discussion and conclusion of the paper.

Keywords: milling, carbon fiber composites, wear, delamination, cutting conditions

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí bakalářské práce paní doc. Ing. et Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D a konzultantům panu Ing. Martinu Váňovi a panu Ing. Arturovi Knapovi za cenné připomínky a odborné rady při vypracování této bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod	9
2	Teoretická část	10
2.1	Frézování kompozitů	10
2.2	Řezné podmínky	12
2.3	Řezný nástroj	12
2.4	Obráběný materiál	15
2.5	Opotřebení nástroje	16
2.6	Delaminace	18
2.7	Prachové částice	19
3	Metodika	20
3.1	Popis obráběného materiálu	20
3.1.1	Upnutí obráběného materiálu	21
3.2	Popis použitých nástrojů	22
3.2.1	Upnutí použitých nástrojů	23
3.3	Zvolené řezné podmínky	23
3.4	Použitý stroj	24
3.4.1	Odsávací zařízení	25
3.5	Měřicí přístroje popis a použití	26
3.5.1	Měření delaminace	26
3.5.2	Měření opotřebení nástroje	27
3.5.3	Odebírání prachové třísky	28
3.6	Statistické vyhodnocení	28
3.6.1	Hodnocení opotřebení nástroje	28
3.6.2	Hodnocení delaminace	28
3.6.3	Měření třísek a jejich hodnocení	29
4	Experimentální část	30
4.1	Měření opotřebení nástroje	30
4.2	Měření delaminace materiálu	35
4.3	Prachové třísky	43
5	Vyhodnocení a diskuse výsledků	46
6	Závěr	51
	Použitá literatura	53

Seznam zkratek

{PCD}	{polycrystalline diamond}	{-}
{SK}	{slinutý karbid}	{-}
{DLC}	{diamond-like carbon}	{-}
{CNC}	{computer numerical control}	{-}
{C}	{cobalt}	{-}
{WC}	{karbid wolframu}	{-}
{RO}	{řezná ocel}	{-}
{ v_c }	{řezná rychlost}	{m/min}
{ v_f }	{posuv}	{m/min}
{VB}	{opotřební nástroje}	{ μm }
{ VB_{krit} }	{kritické opotřebení nástroje}	{ μm }
{t}	{čas}	{min}
{s}	{dráha}	{m}
{1z}	{jednozubý nástroj}	{-}
{2z}	{dvouzubý nástroj}	{-}
{ γ_0 }	{úhel hřbetu nástroje}	{ $^\circ$ }
{ α_0 }	{úhel čela nástroje}	{ $^\circ$ }

1 Úvod

Kompozity patří mezi moderní materiály dnešní doby. Slovo kompozitní znamená složený z více prvků, přesně takový charakter mají kompozitní materiály. Složením materiálu dohromady ze dvou nebo více prvků s rozdílnými vlastnostmi se dosahuje úplně nového materiálu, který má zcela odlišné vlastnosti nežli materiály, které jsou jeho součástí. Fáze kompozitů se nazývají výztuž a matrice. Kompozitní materiály se vyznačují svojí vysokou pevností, tuhostí, nízkou hmotností a odolností proti korozi. Další vlastností a výhodou těchto materiálů je schopnost snadného vytvoření tvarových dílů bez metody sváření nebo použitím spojovacích dílů. Názorným příkladem takového složeného materiálu s uvedenými vlastnostmi je kompozit s výztuhou uhlíkovými vlákny, která jsou spojena epoxidovou pryskyřicí.

I přesto, že se z kompozitních materiálů dají vytvářet díly finálních podob, tak se u mnohy částí vytvořených z kompozitů setkáme s nutností obrábění. Jednou z hlavních operací obrábění je frézování, to se provádí za účelem dosažení přesných rozměrů, vytvoření tvarových drážek nebo zkosení. Faktem je, že frézování kompozitních dílů není jednoduché. Díky anizotropnímu chování kompozitu s uhlíkovými vlákny vede ke značnému opotřebením řezných nástrojů a povrchovým i hloubkovým poruchám obráběného materiálu jako je například delaminace.

Cíl bakalářské práce je zaměřen na výzkum vlivu řezných podmínek na opotřebením řezného nástroje a delaminaci při nesousledném frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny s tkaninou keprové vazby a orientace vláken 90° .

K dosažení cíle bakalářské práce je nutné nejprve navrhnout vhodné nástroje s různou geometrií a stejným materiálem, připravit frézovací stroje a měřicí zařízení. Stanovení metod řešení a vyhodnocování opotřebením nástroje a delaminace. V neposlední řadě zhodnocení výsledků.

Teoretické znalosti dané problematiky, kterou se tato bakalářská práce zabývá, jsou uvedeny v teoretické části.

2 Teoretická část

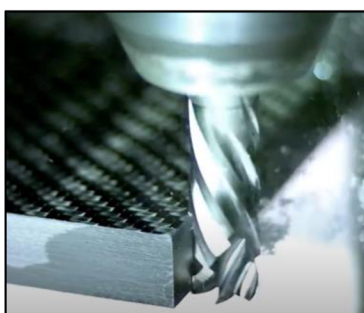
Pod pojmem kompozitní materiál si představujeme moderní a inovativní materiál, který se skládá ze dvou, či více složek. Složky se nazývají fáze a každá se od sebe výrazně liší svými vlastnostmi. Pokud je mezi jednotlivými složkami znatelné rozhraní, potom takový materiál můžeme nazývat kompozit. Největší výhodou kompozitů jsou jejich unikátní vlastnosti, které vznikají složením více složek odlišných chemickými, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Vzniká tak úplně nová struktura, která je odlišná od všech ostatních materiálů. Nízká váha a schopnost tvoření tvarových dílů bez použití svařování je hlavním kladem kompozitů. [1, 2]

2.1 Frézování kompozitů

Výhodou kompozitních materiálů je vytvoření výrobku do požadovaných finálních podob, ovšem i přesto je někdy zapotřebí použití metody obrábění a kompozit obrobít. Kompozitní materiály patří mezi obtížně obrobitelné a to převážně z důvodu své vysoké pevnosti, tvrdosti, anizotropie a nízkému koeficientu tepelné vodivosti. V porovnání s kovovými materiály je obrábění kompozitů složitější a více nákladné. Kompozitní materiály jsou nejčastěji tvořeny z poskládných vláken. Vlákná mají různou orientaci a zajišťují mechanické vlastnosti celého materiálu v různých směrech, kompozit je anizotropní. Anizotropnost zhoršuje schopnost frézování, tupí nástroj a zpomaluje celý proces obrábění. Dalším zásadním problémem, který se u frézování kompozitů vyskytuje, je nízký koeficient tepelné vodivosti uhlíkových vláken. Nejvíce se projevuje v místě řezu, kde vzniká vysoká teplota a díky špatné tepelné vodivosti kompozitu se teplo odvádí pryč pouze skrze nástroj a prostředí. Při dosažení teploty skelného přechodu ztrácí kompozit své vlastnosti, dochází k degradaci matrice a místo tvoření třísek se začíná materiál tavit, což je při dodržení kvality nepřijatelné. Tepelně ovlivněná může být také obrobená plocha obrobku, z důvodu vysoké nasákavosti kompozitních materiálů není vhodné použít chlazení pomocí řezných kapalin. Ovlivňujícím faktorem je zvolení správných řezných podmínek. U těchto materiálů nelze použít takových rychlostí jako u kovových materiálů. Se zvyšující rychlostí roste teplota a protože se teplo neodvádí i přes obrobek docházelo by k nežádoucím vysokým teplotám v místě řezu. [1–3]

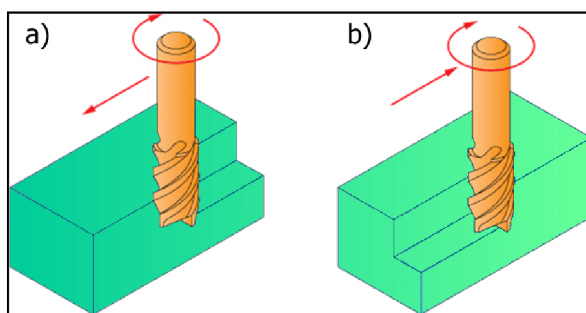
Mezi nejčastější úkony frézování kompozitních dílů patří vytváření děr a drážek dle požadované tolerance a obvodové frézování na danou jakost. K frézování se může využívat více druhů nástrojů, u nejvíce případů se jedná o vícebřité nástroje celistvé se stopkou

a nebo vícebřité nástroje s vyměnitelnými břity. Jednotlivé nástroje jsou navrženy pro danou potřebu, frézy se výrazně liší svojí geometrií, velikostí a použitým materiálem pro metody frézování rovinných a tvarových ploch, frézování drážek, děr a nebo úpravu obvodů desek. Frézovacímu stroji se říká frézka a nástroji fréza. Hlavní řezný pohyb vykonává vždy fréza a jedná se o rotační pohyb. Vedlejší pohyb posuvný a přísuvný většinou koná obrobek, ale ve speciálních případech může i nástroj. Moderní frézky (CNC stroje) využívají víceosých posuvných stolů, práce se tak urychluje. Vícebřité nástroje řezou materiál přerušovaně, chod není plynulý a způsobuje chvění. Proto je výhodné, aby v záběru řezu bylo co nejvíce břitů. Lepší nástroje mají nepravidelně rozložené břity po obvodu nástroje, tím se zamezí periodickému průběhu kmitání a nedochází tak k vibracím. [1, 3–5]



Obr. 1 – Obvodové frézování kompozitní desky [6]

Podle kinematiky dělíme frézování na sousledné a nesousledné. Každá metoda má své výhody a nevýhody. U sousledného frézování (viz Obr. 2a) se nástroj otáčí ve směru posuvu obrobku. Maximální tloušťka třísky vzniká při prvním záběru třísky na obrobek. Výhodou je, že lze použít větší řeznou rychlost, činí se delší životností břitu a menší drsností na obrobené ploše. Nesousledným frézováním (viz Obr. 2b) se materiál odebírá od minimální hodnoty po maximální, tříska se tak během řezání do materiálu zvětšuje dokud není úplně oddělená od obrobku. Zahřátá tříska nijak neinteraguje s obrobenou plochou a nedochází k připékání k matici. Pro frézování kompozitů se doporučuje nesousledné frézování. Nedochází při něm k velkým trhlinám, ani k zásadně velké delaminaci narozdíl od sousledného frézování. Hlavní nevýhodou po nesousledném frézování je drsný povrch obrobené plochy. [2, 4]



Obr. 2 – Rozdělení frézování na sousledné a nesousledné [7]

2.2 Řezné podmínky

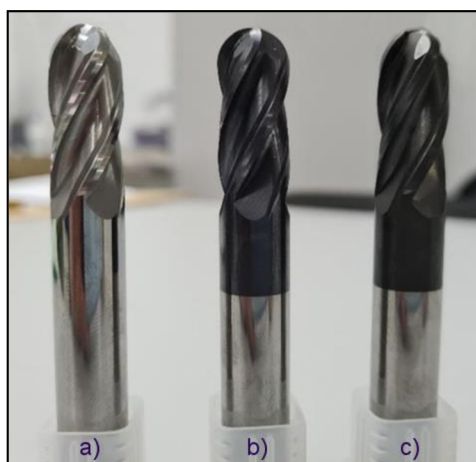
Pro čistý a kvalitní řez je zásadní správné zvolení řezných podmínek. Volba řezných podmínek je úzce spjatá se způsobem frézování, obrobitelností materiálu, jakostí břitu a druhu řezné kapaliny (pokud se vůbec může použít). Nejdůležitějšími parametry jsou rychlost otáčení vřetene a rychlost posuvu. Nastavení řezné rychlosti se udává k největšímu průměru nástroje a je nastavena o $\frac{1}{4}$ nižší nežli u frézování kovových materiálů. Z mezinárodní studie se doporučuje nastavit řeznou rychlost v rozmezí 300 až 600 m/min a posuv 1 až 5 m/min. Pokud je nastavena vysoká řezná rychlost a nízká rychlost posuvu nástroj se rychleji opotřebí a dochází k dalším vznikům problémů jako je tavení matrice a vytahování vláken. K dalšímu opotřebovávání dochází u kompozitů s vícesměrnou orientací výztuže (vláken) nežli u laminátů s jednosměrnou orientací. U jednosměrné skládané výztuže je nástroj během řezu namáhán konzistentně a tolik se netupí. Řezné podmínky se liší s použitím daného nástroje a metody frézování daného kompozitního materiálu, přesné podmínky nejsou stanoveny, bývají doporučeny výrobcem nástrojů. [5, 8]

Obrábění kompozitů s využitím řezných kapalin je nežádoucí. Během obrábění se v kompozitu tvoří prasklinky a delaminační vady, do kterých by se kapalina dostala. Jelikož jsou kompozity smáčivé, mohla by kapalina narušit kompozit a snížit tak jeho funkce např. pevnost. K chlazení během obrábění kompozitů může být použitý stlačený vzduch. [9]

2.3 Řezný nástroj

Nejpoužívanější nástroje pro frézování kompozitů bývají celistvé frézy s více břity, tyto frézy bývají většinou menších průměrů. Jejich tvary a geometrie se liší podle účelu použití. Nejvyužívanější jsou nástroje z polykrystalického diamantu (dále jen PCD) a ze slinutého karbidu (dále jen SK). PCD nástroje vykazují nejlepší vlastnosti při frézování kompozitů, nejlépe odolávají abrazivnímu působení vláken a mají vysoký index tepelné vodivosti. Vyznačují se vysokou tvrdostí až 9000 HV. Umožňují chladný řez za použití vyšších řezných podmínek, nežli u SK. PCD mají vyšší pořizovací cenu, ta je ale ve značné míře vyvážena dlouhou životností nástroje. Nástroje z polykrystalického diamantu se používají spíše pro velkosériové výroby, produktivita se vyznačuje až o 50 až 100% vyšší, nežli při použití nástrojů ze slinutých karbidů. Slinuté karbidy jsou vyráběné pomocí práškové metalurgie, zásadní složkou jsou částice karbidu wolframu (WC) a jsou spojené kovovým pojivem z kobaltu (Co). Nástroje ze slinutých karbidů lze vylepšit povlakováním (Obr. 3). Povlaky zlepšují sice odolnost a životnost nástroje, ale zlepšení není nijak vyjimečné. Pokryvy bývají

z materiálů jako jsou karbidy, nitridy a oxidy, a také z diamantu (DLC). Takové nástroje se z ekonomického hlediska spíše hodí pro malosériovou výrobu. Pro frézování kompozitů je možné použít i nástroje z rychlořezné oceli jako pro obrábění kovových materiálů, jejich trvanlivost však není nijak vyjímečně dlouhá. Rychlořezné oceli (dále jen RO) mají narozdíl například od slinutých karbidů nižší tvrdost, kolem 800 HV, a tak méně odolávají abrazi vláken. Dalším faktorem, který snižuje trvanlivost nástroje z RO je poměrně nízká tepelná vodivost, která je až 3x nižší než u slinutých karbidů. Při frézování kompozitů je zapotřebí odvádět většinu tepla skrze nástroj, RO není schopné vést dostatečné množství tepla z místa řezu a snižuje se tak životnost břitu nástroje. [3, 10, 11]

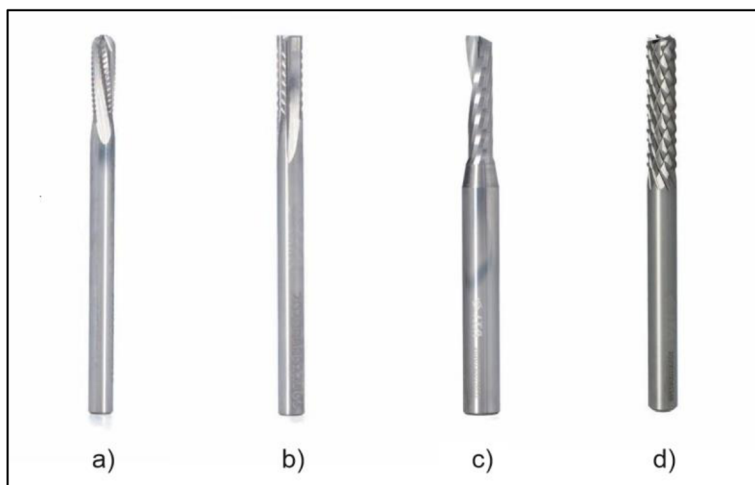


Obr. 3 – Dokončovací frézy s povlakováním a bez povlakování [12]

a) – fréza bez povlaku; b) – fréza s povlakem TiN-AlN-TiAlN; c) – fréza s povlakem CrAlSiN-DLC

Tvary a geometrie nástrojů se navrhují tak, aby se minimalizovalo namáhání v materiálu během obrábění – snížily se řezné síly, nedocházelo k delaminaci a naopak docházelo ke správnému odřezávání kompozitu. U šroubových geometrií se nejčastěji volí stoupání šroubovice 45° . Veliký rádius ostří vede k ohýbání a odlamování vláken, zvyšuje se teplota a drsnost výsledného povrchu není kvalitní. Naostřené břity mají lepší vlastnosti při obrábění, kompozit lépe řezou, tříška se lépe odvádí, ale za to se rychleji otupí – abrazivní otěr. Při obrábění kompozitu je zásadní nastavení úhlu čela frézy, obráběný materiál má jiné mechanické chování pokud je čelo frézy nastaveno pozitivně, negativně a nebo s nulovým úhlem čela. U frézování kompozitů je snaha mít čelo nástroje co nejvíce pozitivní, protože vlákna se snažíme odřezávat a ne ohýbat. Úhel čela při frézování je doporučený volit v intervalu od 0° až 7° . Zvětšování úhlu čela se zlepšuje jakost obrobeneho povrchu. Naopak zmenšováním úhlu čela je materiál spíše vytlačovaný nežli řezaný a má to za následek vznik delaminace [4, 8, 13, 14]

Nástrojů pro frézování kompozitů je spousta variant. Vybírají se podle použití a zvolení práce. Na výběr je z nástrojů s přímými břity (viz Obr. 4b), které bývají levnější, protože jsou jednodušší na výrobu a i následné ostření. Nevýhodou je horší odvádění třísky z místa řezu a dochází k natavování nebo ucpávání. Ucpáním třísek v místě řezu vede k promáčknutí povrchu obráběného materiálu a tím i ke zhoršení jakosti povrchu. Proto se tyto nástroje používají spíše na vnější práce kompozitních dílů. Šroubovitě frézy lépe odvádí třísku a tak jsou spíše určeny pro frézování děr a drážek. Nástroje s jednosměrnou šroubovicí (viz Obr. 4c), se vyznačují čistým řezem a vysokou jakostí povrchu. Záporným jevem šroubovitěho nástroje s jednou drážkou je, že generují sílu v axiálním směru a zvyšují tak delaminaci. Proto byl vytvořen nástroj s dvojitou šroubovicí (viz Obr. 4a), který delaminaci tolik nezpůsobuje. Mezi spirálovité nástroje také zahrnujeme rašplové frézy, které se používají převážně na hrubovací práce. Jejich tělo se skládá z proti sobě ležících šroubovic (viz Obr. 4d). [4, 8, 13, 14]



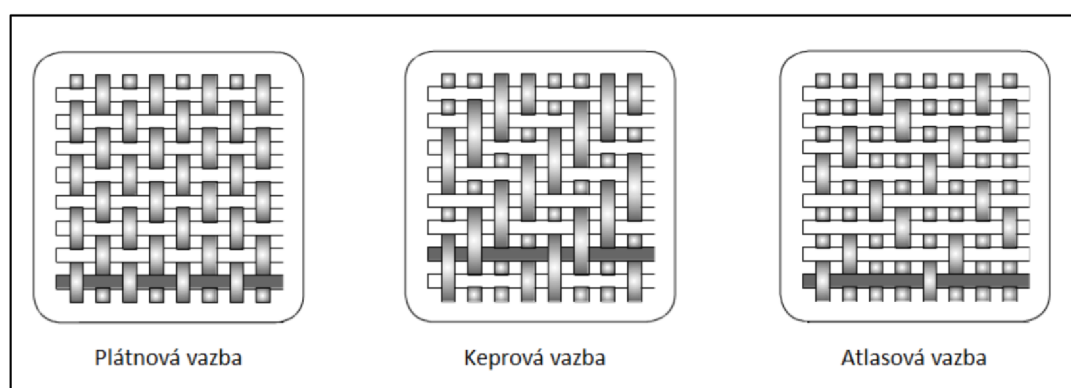
Obr. 4 – Nástroje pro frézování kompozitů [ukázka fréz ITATOOLS]

a) – dvojspirálová fréza; b) – fréza s přímými břity; c) – jednospirálová fréza; d) – rašplová fréza

2.4 Obráběný materiál

V průmyslu značně zastupují velikou pozornost kompozity s vyztuženými uhlíkovými vlákny. Aplikace těchto materiálů je kvůli snadné tvarovatelnosti a výborným materiálovým vlastnostem. Tyto kompozity se vyznačují vysokou pevností, lehkostí, tvrdostí, nízkou tepelnou roztažností i vodivostí, jsou odolné korozi a jsou rozměrově stálé. Uplatnění těchto vývojových materiálů najdeme například u letadel pro snížení provozní hmotnosti a zároveň využití pevnosti materiálu, u kosmických lodí, také u prostředků hromadné dopravy s cílem dosažení větších úspor a snížení energie. Využití kompozitů nalezneme také v lékařství, sportovním průmyslu a ve stavebnictví. [15, 16]

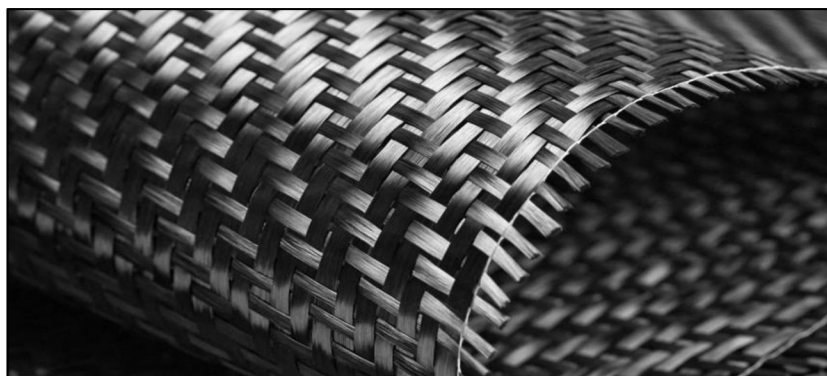
Kompozitní materiály jsou skládané z matrice a výztuže, jsou nehomogenní. Matrice chrání výztuž před porušením a přenáší zátěž z vnějšku na výztuž. Pojivovou maticí u kompozitů s uhlíkovými vlákny bývá většinou epoxidová pryskřice a spojuje výztuž dohromady. Výztužení pomocí uhlíkových vláken, zajišťuje podporu kompozitu. Směr a vazba při skládání vláken jsou odlišně navrženy, tak aby vyhovovaly mechanickým požadavkům aplikace. Kompozitní materiály mají lepší mechanické vlastnosti v podélném směru vláken, mají anizotropní chování. Uhlíková vlákna jsou skládána do určité textilní vazby. Tkanina je výztuž, která má strukturu tkaného textilu, obsahuje mnoho vláken, které jsou do sebe zapletené (viz Obr. 6). Tři druhy vazeb tkaniny jsou plátňová, keprová a atlasová (Obr. 5). Plátňová je vazba s největší pevností, ale nejnižší tvárností do forem. Vazby keprová a atlasová jsou více poddajné tvarování, ale mají menší pevnost (Obr. 7 – keprová vazba). Tkaní kompozitů zvyšuje celkovou pevnost a tuhost výsledného dílu. Výhodou je dobrá manipulace a zjednodušení práce při tvorbě součástí z kompozitů, naopak nevýhodou je vysoká cena. [1, 2, 15]



Obr. 5 – Typy vazeb [9]



Obr. 6 – Řez textilií s keprovou vazbou [17]



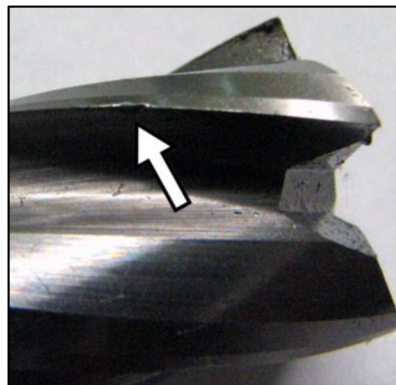
Obr. 7 – Tkanina s keprovou vazbou [18]

Kompozitní materiály vyztužené uhlíkovými vlákny jsou dostupné v různých typech polotovarů, např. v tenkých páskách s jednosměrnými vlákny (roving) nebo v deskách o různých tloušťkách vyztužených tkaninami. Tloušťka desek se odvíjí od počtu použitých vrstev tkaniny. [11]

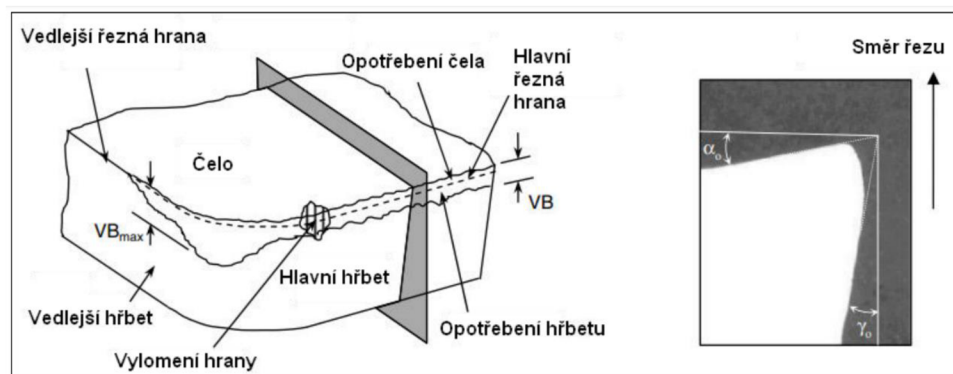
2.5 Opotřebení nástroje

Nástroje určené na obrábění kompozitů se výrazně liší od nástrojů určených pro běžné obrábění kovů. Složitost kompozitních materiálů vyžaduje použití speciálních nástrojů pro zkvalitnění obráběcího procesu a vyhnutí se problémům, které mohou vznikat. Kvůli anizotropním vlastnostem kompozitu a tvrdým vláknům je nástroj velmi namáhaný a rychle se opotřebovává. Opotřebení nástroje vede ke změně geometrie nástroje a změně kvality odstraňování třísek. Nutností pro kvalitní obrobení je použití tvrdých a oteruvzdorných materiálů. Moderní rezné materiály jsou vyrobeny ze slinutých karbidů nebo diamantu. Materiál nástrojů specializovaných na obrábění kompozitů by měl být vybírán tak, aby byl jednak co nejvíce odolný vůči tření, ale také lépe odváděl teplo z místa řezu a aby byl dostatečně pevný pro udržení ostrosti břitu během řezu. Čistý a kvalitní řez je závislý na ostrosti břitu. Pokud se nástroj otupí, přestane správně řezat, začne docházet k ohřívání v místě řezání a také k jevu tzv. delaminace (vysvětleno v 2.6.) [3, 8]

Mechanické a tepelné vlivy při frézování kompozitních materiálů způsobují opotřebení na řezných plochách nástroje. Největší změny po opotřebení nastávají na hlavním ostří na hřbetu nástroje. Opotřebení může vznikat postupně po dobu kdy nástroj pracuje, či náhle. Křehký lom, je příkladem náhlého opotřebení. Nastává při vysokém napětí soustředěném na určité místo břitu, při přítomnosti vad a rázového namáhání dojde k vylomení hrany (Obr. 8). Postupným opotřebováváním se mění hrana na hlavním hřbetu, projevuje se opotřebovanou plochou. Toto opotřebení nastává například při abrazivním opotřebení, kdy úlomky, které vznikají během obrábění odřou ostrou hranu nástroje a dojde tak k obroušení řezné hrany. Velikost opotřebení je hodnoceno velikostí vzniklé opotřebované plochy na hřbetní straně nástroje (VB_{max}). [19, 20]



Obr. 8 – Příklad náhlého opotřebení vylomení hrany na nástroji [20]



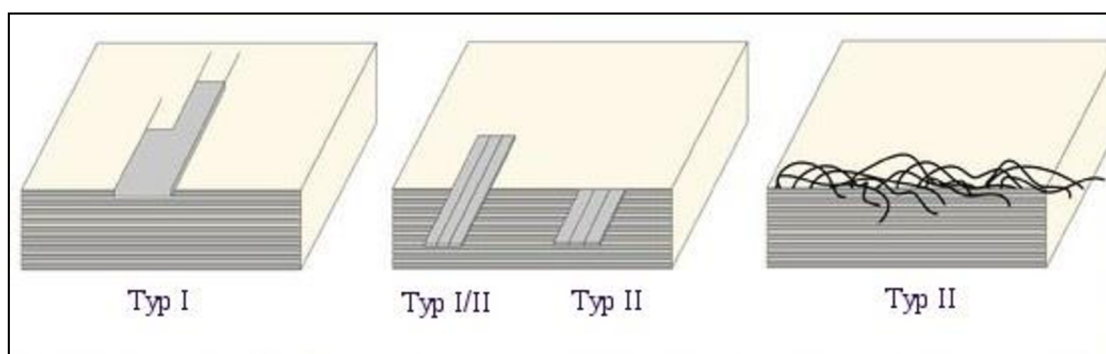
Obr. 9 – Druhy opotřebení nástroje při obrábění a průřez hranou nástroje [21]

VB_{max} – maximální hodnota opotřebení na hřbetu; VB – průměrné opotřebení na hřbetu;
 α_0 – úhel čela nástroje; γ_0 – úhel hřbetu nástroje

2.6 Delaminace

Pojem delaminace materiálu je jednou z hlavních problematik při frézování, ale i u ostatních metod obrábění. Je jedním z nejvíce řešených problémů při obrábění kompozitů vyztužených vlákny. Delaminace ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu, díl který je narušený delaminací je ve výrobě považován za zmetkovitý, což je nežádoucí. Zamezení tohoto problému není jednoduché, má spoustu ovlivňujících hledisek. Vznik delaminace se snižuje se správnou volbou řezných podmínek a vhodnou geometrií nástroje. Obecně je delaminace způsobena překročením silových vazeb držících složky kompozitu pohromadě a dochází k nepřesnému odřezávání vláken, k vytrhávání a jiným vadám obrobeneho povrchu. Velmi záleží na kvalitě a pevnosti spojení vláken a také na použitém pojivu mezi vrstvami. [22–24]

Názorné příklady delaminace se dělí na tři typy poruch povrchu obrobene části kompozitu (Obr. 10). Prvním typem (Typ I) jsou chybějící vlákna po obrábění. Nástroj vniká do materiálu a nástroj tlačí na vrchní vrstvu kompozitu. Tlačení nástroje na vrstvu se vlákna natáhnou, vzniknou trhliny, vlákna popraskají a následně se uvolní. Tímto způsobem dochází k delaminaci Typu I, kdy ve vrchní vrstvě chybí vlákna, povrch je tak znequalitněný a materiál může být narušený. Typ delaminace II se ztotožňuje s vyčnívajícími vlákny z obrobene části. V tomto případě nástroj vniká do materiálu, působícím tlakem na vrstvu se vlákna vyhnou ostří nástroje a nejsou tak správně odříznuta. Toto může být způsobeno špatnou geometrií nástroje (tupé ostří) a nebo špatně zvolenými řeznými podmínkami. Po vysunutí nástroje se tyto části kompozitu vrátí do své původní polohy. Obrobene povrch je znequalitněný vlákny, která přesahují a měla být uříznuta. V případě delaminace Typu I i II vyčnívají vlákna ven a jsou zároveň porušena i ve svrchní vrstvě materiálu. Typ III jsou volná vlákna mající tvar otřepů a která jsou jen z části připojená k obrobene vrstvě. K typu III připojujeme i povrchové praskliny, které mohou při obrábění vzniknout. [14, 25]



Obr. 10 – Typy delaminací [26]

Podle studií inženýra Collingana a profesora Ramulu [27] delaminace Typu I nastává nejčastěji při zvolení obrábění při orientaci vláken 45° a 90° . Pro tuto orientaci vláken se vyskytuje i delaminace Typu I i II. Typ II se nejčastěji objevuje při zvolení 135° . Roztřepení vláken (Typ III) se objevuje při zvolení orientace 0° a 180° .

2.7 Prachové částice

Vznikající třísky u obrábění kompozitů nejsou srovnatelné s třískami při obrábění kovů. Tříska se v případě frézování kompozitů neodřezává do plynulých spirálovitých třisek jako u kovů, ale spíše se odlupuje a to ve formě velmi malých a měkkých částic tvořících prach. Prach obsahuje částice nadrcené pryskyřice a úlomky rozdrčených vláken. Vznikající prach při frézování kompozitů závisí na geometrii nástroje a řezných podmínkách, částice prachu nejsou pravidelně veliké a tvoří se v různém množství. Prach musí být z místa řezu odstráнен odsávacím zařízením. Bez odsávání se prach rozvíří do okolí, což je nežádoucí kvůli zdraví a také technice stroje. Miniaturní částice prachu menší $5\ \mu\text{m}$ jsou nebezpečné pro vdechnutí, mohou se dostat hlouběji do plic. U ještě menších rozměrných částic hrozí riziko vnitknutí až do krevního oběhu skrze plicní sklípky. Elektrostatické částičky prachu mohou zapříčinit například zkrat nebo znečištění manipulačních částí stroje jako jsou lože a jiné posuvné rampy. [2, 28]

3 Metodika

Metodika práce popisuje postup realizace experimentů z pohledu přípravy, provedení a vyhodnocení. Kapitola 3.1 zahrnuje informace o zvoleném materiálu a jeho upnutí. Použité nástroje jsou popsány v 3.2. Zvolení řezných podmínek pro experiment a informace o strojích v 3.4 a 3.5. Postup měření a popis měřících přístrojů, které byly použity pro měření delaminace materiálu a opotřebení nástroje, jsou uvedeny v kapitole 3.6.

Měření experimentu probíhalo v laboratoři Katedry obrábění a montáže v prostorách budovy L na Technické univerzitě v Liberci.

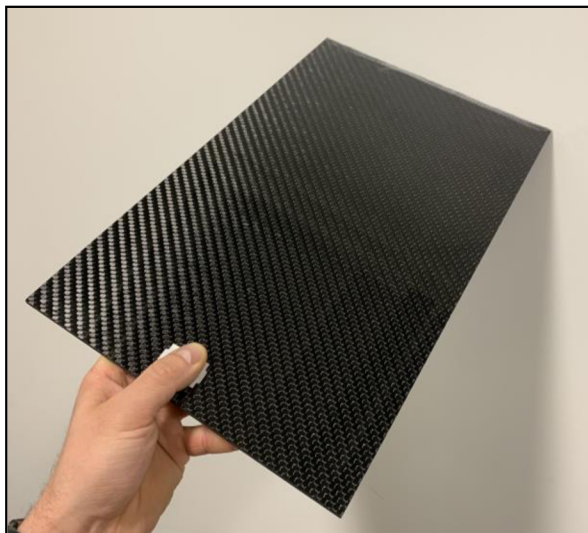
3.1 Popis obráběného materiálu

Vzorky použité pro experimenty byly dvě stejné kompozitní desky vyztužené uhlíkovými vlákny. Každá deska byla poskytnutá k jednomu ze dvou zkoumaných nástrojům (kapitola 3.2). Desky měly tkaninu s keprovou vazbou s orientací vláken 90°. Desky byly již od výrobce nařezány na požadované rozměry (Obr. 11), takže je nebylo nutné nijak před upnutím do stroje upravovat.

Veškeré informace o materiálu každé desky jsou uvedeny v Tab.1 níže.

Tab. 1 – Informace o kompozitní desce

Metoda výroby	vakuová infuze
Délka [mm]	600
Šířka [mm]	250
Tloušťka [mm]	5
Typ vazby	keprová (2x2 cm)
Matrice	epoxidová pryskyřice LG120 (GRM Systems s.r.o.)
Výztuž	CCH600 (Kordkarbon a.s.)
Tužidlo	HG 356 (GRM Systems s.r.o.)
Počet vrstev	5
Gramáž výztuže [g/cm ³]	600



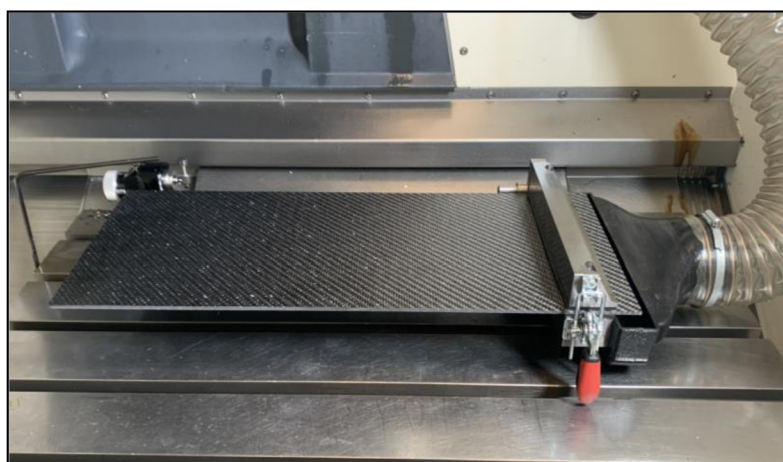
Obr. 11 – Kompozitní deska



Obr. 12 – Řez kompozitní deskou

3.1.1 Upnutí obráběného materiálu

Kompozitní desky byly upnuty do speciálně navrženého a vyrobeného přípravku pro upínání desek s rychloupínacím systémem, který urychloval montáž a demontáž desek u každého měření.



Obr. 13 – Upnutí kompozitní desky do stroje

3.2 Popis použitých nástrojů

Pro plánovaný experiment byly zvoleny 2 nástroje určené pro frézování s odlišnou geometrií. Byly zvolené se záměrem pozorování rozdílů opotřebení a vzniku delaminace mezi jejich odlišnými geometriemi a zároveň použitými stejnými řeznými podmínkami. Oba použité nástroje byly vybrány ze slinutého karbidu bez povlakování, s ohledem na dostupnost a cenu pořízení. Zvolené frézy byly stopkové o průměru 8 mm a pracovní délkou 20 mm.

Prvním použitým nástrojem pro tento experiment byla jedno břitá fréza s přímou geometrií (úhel šroubovice 0°), ozn. 1 – 1z, vyrobena českou firmou Unicut. Břit tohoto nástroje byl velice ostrý a s vysokou odolností proti otěru, což bylo výhodné pro frézování kompozitního materiálu. Geometrie této frézy se dle výrobce hodí především pro obrábění kompozitů s aramidovými vlákny.

Druhý nástroj byla dvoubřitá fréza s úhlem stoupání 45° , ozn. 2 – 2z, od firmy PM-TECH s.r.o. Nástroj měl velmi ostrý břit, s vhodnou geometrií pro frézování kompozitních materiálů. Tento nástroj se dle popisu výrobce vyznačuje svojí ostrostí a minimalizací vyštipování díky své vysoké houževnatosti tvrdokovu. Určení nástroje je pro obrábění hliníku a neželezných kovů

Technické informace a důležité parametry pro experiment jsou zmíněné v Tab. 2.

Tab. 2 – Infomace frézovacích nástrojů

	Označení	Řezný materiál	Povlak	Počet břitů	Úhel šroubovice	Obrázek	Cena
Nástroj 1 - 1z	F6140.8. V8.81.20 .Z1	SK	Bez povlaku	1	Přímý (0°)		700,- Kč
Nástroj 2 - 2z	2ALE- 080-200- S08	SK	Bez povlaku	2	45°		300,- Kč

Z pohledu opotřebení nástroje, se před experimentem očekávalo, že nástroj s jednobřitou geometrií určenou přímo pro obrábění kompozitů, vydrží více nežli nástroj se šroubovicí. U dvoubřitého nástroje s pravotočivou šroubovicí se předpokládalo s viditelně odlišnou delaminací na desce nežli u jednobřitého nástroje.

3.2.1 Upnutí použitých nástrojů

Zvolené nástroje byly upnuty do tepelných upínačů typu SK 40-08-80 DIN 69871 AD/B (Obr. 14). Výhodou těchto upínačů je, že jsou jednoduché a mají poměrně úzkou konstrukci, díky které nedochází ke kolizi s jinými komponentami stroje. Vyznačuje se malou obvodovou házivostí (3 μm), což je výhodné pro přesné obrábění. Cena těchto upínačů není nijak vysoká.

Před upnutím nástroje se upínač rovnoměrně nahřeje, otvor pro nástroj se zvětší, nasune se nástroj a po zchladnutí drží pevně upnutý.



Obr. 14 – Upnuté nástroje

3.3 Zvolené řezné podmínky

Řezné podmínky pro experiment byly zvoleny dle odborné literatury a schopnostem použitého stroje, který byl pro experiment poskytnut. Navržených řezných podmínek pro experiment je více z důvodu porovnání hodnot opotřebení jednotlivých nástrojů a zjištění delaminace desek po frézování. Řezné rychlosti byly zvoleny tři (viz Tab. 3), pro oba nástroje byly tyto rychlosti vyšší, nežli je od výrobce doporučeno používat. Hodnota posuvu byla zvolena konstantní na $v_f = 0,025$ m/min. Boční krok byl nastaven na úběr materiálu o 1 mm. Nástroj vždy obráběl materiál po celé jeho tloušťce metodou odebrání, v případě tohoto experimentu byl přesah nástroje nastaven vždy na 1 mm. Tyto řezné podmínky byly použity u obou nástrojů stejné.

Zvolené řezné podmínky pro oba nástroje jsou uvedeny v tabulce níže, Tab. 3.

Tab. 3 – Řezné podmínky

$v_c = 100 \text{ m/min}$	$v_f = 0,025 \text{ m/min}$
$v_c = 200 \text{ m/min}$	
$v_c = 300 \text{ m/min}$	

Pro tento experiment bylo zvoleno frézování nesousledné, které je doporučováno pro frézování kompozitů. U nesousledného frézování nevzniká tolik delaminace. Frézování probíhalo na kratší straně desky v jednom směru. Pozorování výsledků probíhalo vždy po obrobení 4,75 m šířky desky, to odpovídalo 19ti průjezdům nástroje deskou. Celé měření bylo založeno na pozorování opotřebení nástroje po určité době, kdy byl nástroj z záběru materiálu a pracoval. V případě jednobřitého nástroje ozn. 1 – 1z to znamená, že za 19 průjezdů strávil břit v řezu 1 min., pro dvoubřitý nástroj ozn. 2 – 2z je tato doba na břit poloviční, tedy 30 sek. na jeden břit.

3.4 Použitý stroj

Frézování probíhalo v laboratoři Katedry obrábění a montáže na tříosé vertikální fréze od výrobce DMG MORI typu CMX 600V.

Specifikace stroje jsou popsány v tabulce níže, Tab. 4.

Tab. 4 – Specifikace DMG MORI CMX 600V

Parametr [jednotka]	Hodnota
Šíře stolu [mm]	900
Délka stolu [mm]	560
Maximální zatížení stolu [kg]	600
Maximální otáčky [ot/min]	12000
Maximální výkon vřetene [kW]	13
Řídící systém	Sinumerik Operate 4.8Dsl



Obr. 15 – Frézovací centrum DMG MORI

3.4.1 Odsávací zařízení

Během frézování byly třísky a prachové částice z kompozitní desky odsávány odsávacím zařízením POC9 M1. Všechny technické údaje toho přístroje jsou popsány v tabulce níže, Tab. 5.

Tab. 5 – Specifikace odsávacího zařízení POC9 M1

Parametr [jednotka]	Hodnota
Tlak odsávání [Pa]	900
Odsávané množství vzduchu [m ³ /h]	1200
Výkon elektromotoru [kW]	0,7
Hlučnost [dB]	65
Minimální velikost zachycení částic [μm]	0,3



Obr. 16 – Odsávací zařízení POC9

Odsávání z místa řezu probíhalo pomocí 3D tištěnému nastavci na odsávací trubici.

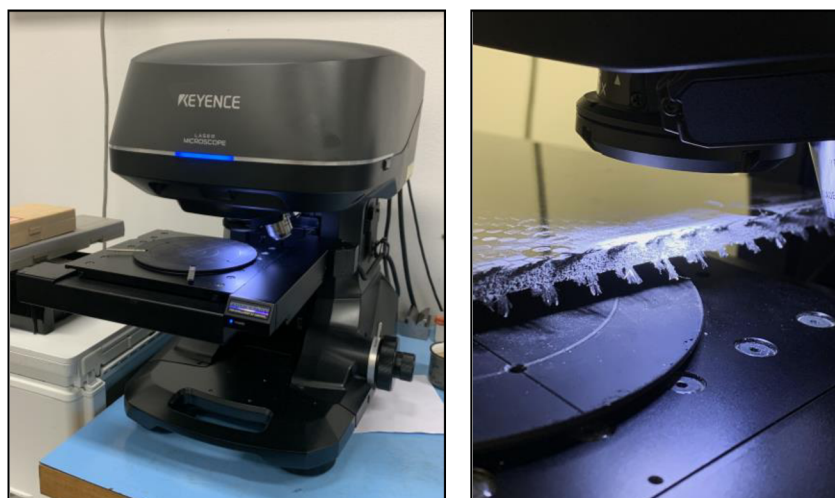


Obr. 17 – Odsávací nástavec 3D tištěný

3.5 Měřicí přístroje popis a použití

3.5.1 Měření delaminace

Velikost delaminace vzniklé na obrobených stranách desky byly měřeny pomocí konfokálního mikroskopu Keyence VK-X1000. Konfokální mikroskop se vyznačuje vysokým rozlišením povrchů materiálů, schopností laserového skenování a jeho maximální rozlišení je 0,01 nm. Na tomto mikroskopu probíhalo měření, pozorování typů delaminací a snímkování všech vzniklých delaminací. Měření probíhalo vždy po zvoleném intervalu, kdy každý nástroj obráběl kratší stranu desky. Na této straně se tvořila delaminace na vrchní a spodní části desky, Měření delaminace probíhalo na 5ti zvolených místech obou obrobených částí desky.

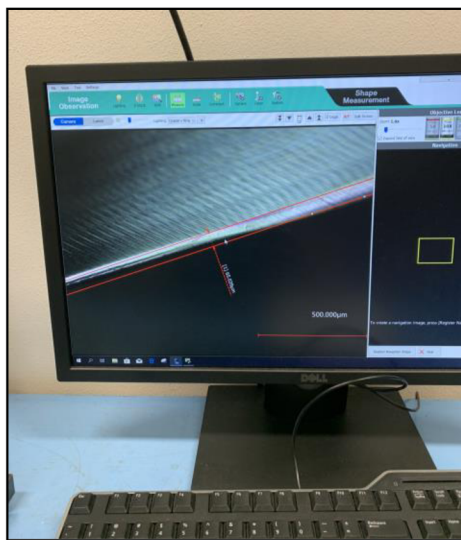


Obr. 18 – Konfokální mikroskop Keyence a měření delaminace pod zvětšením 5x

3.5.2 Měření opotřebení nástroje

Opotřebení nástrojů bylo prováděno také na konfokálním mikroskopu Keyence VK-X 1000. Hodnoty velikostí opotřebení byly vyhodnoceny a změřeny pomocí zobrazovacího programu VK-Viewer propojeného s mikroskopem Keyence. Zobrazování a měření opotřebení probíhalo v zobrazovacím okně programu Image Observation (Obr.19). Měření nástrojů probíhalo vždy po zvoleném intervalu kdy nástroj pracoval. Opotřebení bylo znatelné na hlavním ostří frézy.

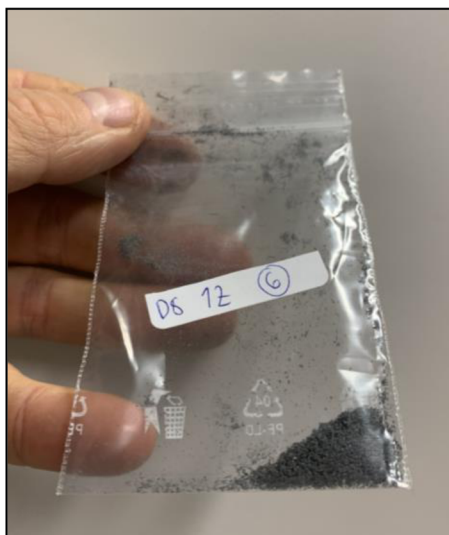
Nástroj pod mikroskopem Keyence a ukázka měření opotřebení nástroje v image observation je na Obr. 19.



Obr. 19 – Nástroj pod mikroskopem Keyence položený na 3D tištěném stojánku a ukázka měření opotřebení nástroje v image observation

3.5.3 Odebírání prachové třísky

Po první a poslední operaci nástroje byly ze vzorku odebrané třísky. Třísky po obrábění byly zkoumány opět pomocí konfokálního mikroskopu Keyence VK-X 1000. Sledovala se velikost prachových částic se změnou řezných podmínek a opotřebení nástroje.



Obr. 20 – Třísky setřené ze vzorku po poslední operaci jednobřitého nástroje

3.6 Statistické vyhodnocení

3.6.1 Hodnocení opotřebení nástroje

Měření opotřebení bylo provedeno vždy na stejném nejvíce opotřebeném místě na hlavním ostří nástroje po každém pracovním cyklu. U dvoubřitého nástroje bylo opotřebení změřeno na obou hlavních ostřích nástroje. Velikost opotřebení na zvoleném místě byla vždy 5x změřena, z naměřených hodnot byl pomocí softwaru Microsoft Excel vypočten aritmetický průměr a příslušná hodnota nejistoty měření dle dokumentu EA – 4/02 M:2013. V MS Excel byly také vytvořené veškeré grafy a tabulky s vyhodnocenými daty.

3.6.2 Hodnocení delaminace

Měření delaminace probíhalo na 5ti zvolených místech vrchní i spodní části desky po každém pracovním cyklu. Z naměřených velikostí delaminace se pomocí Microsoft Excel vypočítal aritmetický průměr a příslušná nejistota měření. Vlivy delaminace na opotřebení jsou znázorněny v grafech a vyhodnocená data jsou uvedena v souhrných tabulkách.

3.6.3 Měření třísek a jejich hodnocení

Třísky byly odebírány po každém prvním a posledním měření obou použitých nástrojů. Měření velikostí třísek bylo provedeno na mikroskopu Keyence VK-X 1000 a to pod zvětšením 50x. Pod mikroskopem byla vždy z množství třísek vybrána ta nejmenší a její velikost byla přeměřena 5x. Vyhodnocená data jsou uváděna jako aritmetický průměr s příslušnou nejistotu měření.

4 Experimentální část

V této části práce je popsáno provedení celého experimentu v rámci řešení bakalářské práce a shrnutí získaných výsledků. V rámci experimentu byla pozorována velikost opotřebení na hlavním ostří dvou nástrojů s odlišnou geometrií a vzniklá delaminace na kompozitních deskách vyztužených uhlíkovými vlákny. Operace frézování probíhala bez procesního média.

4.1 Měření opotřebení nástroje

V této kapitole je shrnutý postup a naměřené hodnoty opotřebení nástrojů včetně diskuse výsledků.

Měření probíhalo vždy po zvoleném časovém cyklu, kdy byl nástroj v záběru. Pro oba nástroje byl jeden cyklus nastavený na 19 pracovních průjezdů deskou. Tento počet průjezdů pro jednobřítý nástroj, ozn. 1 – 1z, znamenal 1 minutu, kdy byl nástroj v záběru – reálně pracoval. Abychom mohli porovnávat opotřebení břitů nástrojů, pak u druhého nástroje, ozn. 2 – 2z, který měl dva břity byla tato doba na břit poloviční, tedy 30 sekund. Každý cyklus 19ti průjezdů trval každému nástroji stejnou dobu, pouze se lišil v době jak dlouho byly jednotlivé břity v záběru. Každý nástroj se testoval a zkoumal tak dlouho, dokud nedosáhl maximální dovolené hodnoty opotřebení $VB_{krit} = 165 \mu\text{m}$. Tato maximální hodnota opotřebení byla před experimentem zvolena jako nejvyšší hranice opotřebení, kterého každý nástroj musel dosáhnout a byla dána výrobcem nástrojů. K experimentu byly zvolené tři řezné rychlosti s konstantně nastaveným posuvem pro oba nástroje. Měření bylo vždy stejné opotřebené místo na ostří nástroje, u dvoubřitého se zkoumala obě hlavní ostří. Velikost opotřebení byla vždy 5x přeměřena pro přesnější výsledky viz podkapitola 3.6.1.

Výsledky obou nástrojů a všech zkoumaných řezných podmínek jsou uvedeny v tabulkách 6 a 7.

Tab. 6 – Shrnující data opotřebení nástroje 1 – 1z s jedním břitem v závislosti na čase

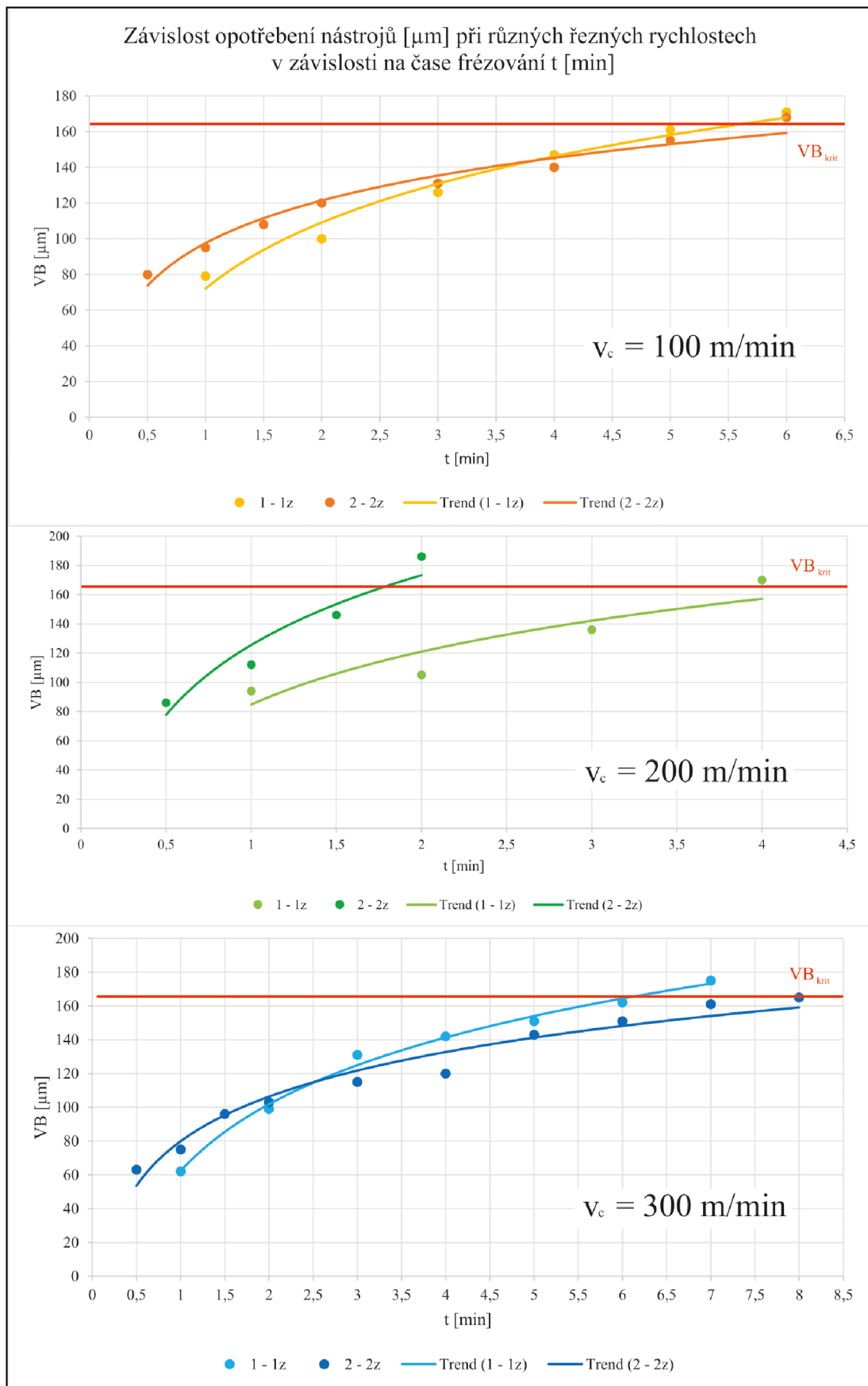
Nástroj 1 - 1Z					
Opotřebení VB [μm] \pm nejistota měření U [μm]					
$v_f = 0,025 \text{ m/min}$					
Měření	Dráha s [m]	čas t [min]	$v_c = 100\text{m/min}$	$v_c = 200\text{m/min}$	$v_c = 300\text{m/min}$
1.	9,5	1	79 \pm 0,90	94 \pm 0,89	62 \pm 0,98
2.	19	2	100 \pm 0,89	105 \pm 0,87	99 \pm 0,91
3.	28,5	3	126 \pm 0,88	136 \pm 0,85	131 \pm 0,87
4.	38	4	147 \pm 0,95	170 \pm 0,99	142 \pm 0,88
5.	47,5	5	161 \pm 0,89	-	151 \pm 0,88
6.	57	6	171 \pm 0,98	-	162 \pm 0,87
7.	66,5	7	-	-	175 \pm 0,90
8.	76	8	-	-	-

Tab. 7 – Shrnující data opotřebení nástroje 2 – 2z se dvěma břity v závislosti na čase

Nástroj 2 - 2Z					
Opotřebení VB [μm] \pm nejistota měření U [μm]					
$v_f = 0,025 \text{ m/min}$					
Měření	Dráha s [m]	Čas t [min]	$v_c = 100\text{m/min}$	$v_c = 200\text{m/min}$	$v_c = 300\text{m/min}$
1.	4,75	0,5	80 \pm 0,90	86 \pm 0,89	63 \pm 0,98
2.	9,5	1	95 \pm 0,88	112 \pm 0,95	75 \pm 0,88
3.	14,25	1,5	108 \pm 0,99	146 \pm 0,99	96 \pm 0,88
4.	19	2	120 \pm 0,91	186 \pm 0,98	103 \pm 0,91
5.	28,5	3	131 \pm 0,90	-	115 \pm 0,90
6.	38	4	140 \pm 0,88	-	120 \pm 0,95
7.	47,5	5	155 \pm 0,85	-	143 \pm 0,96
8.	57	6	168 \pm 0,88	-	151 \pm 0,90
9.	66,5	7	-	-	161 \pm 0,99
10.	76	8	-	-	165 \pm 0,99

Z výsledků je patrné, že opotřebení nástrojů se neustále zvyšovalo s rostoucím časem a dráhou frézování. K naměření největších hodnot opotřebení docházelo vždy při prvním měření nástrojů. Díky velké anizotropii kompozitu byly ostré hrany nástrojů silně namáhány a docházelo ke značnému sražení hran hned při prvním pracovním cyklu na hlavním břitu nástrojů.

Závislosti opotřebení nástrojů na časech, kdy byl nástroj v záběru pro jednotlivé řezné rychlosti jsou zobrazeny v grafu níže (Graf 1).

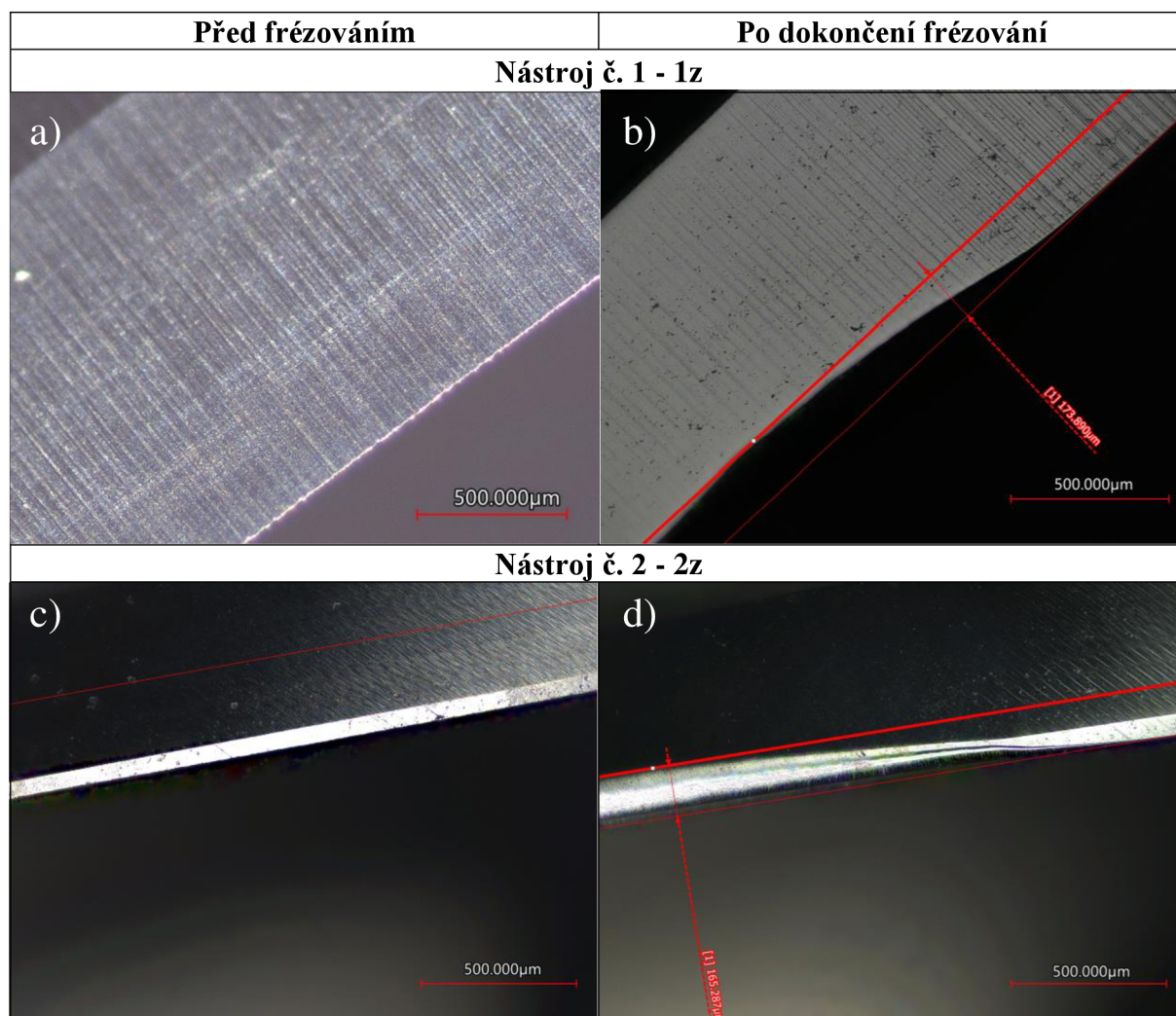


VB – velikost opotřebení; VB_{krit} – maximální přípustné opotřebení; t – čas;
 1 - 1z – jednobřítý nástroj; 2 - 2z – dvoubřítý nástroj

U nástroje jednobřitého, ozn. 1 – 1z, docházelo k značnému opotřebení už po prvním frézování. Opotřebení na ostří bylo viditelné i bez optických zařízení a pod mikroskopem se velmi snadno rozpoznávalo a měřilo. Při výběru tohoto nástroje se očekávalo (3.2), že nástroj s jedním břitem bude mít dlouhou životnost, protože je přímo od výrobce určený na frézování kompozitních materiálů. Na druhou stranu doporučená řezná rychlost pro tento nástroj výrobcem je $v_c = 45$ m/min. V případě tohoto experimentu byl tedy nástroj 1 – 1z vystaven extrémním řezným rychlostem. Největších skoků opotřebení za vcelku krátkou dobu v řezu došlo při zvolení řezných podmínek $v_c = 200$ m/min a $v_f = 0,025$ m/min. Hodnota opotřebení nástroje hned při prvním měření stoupla na $VB = 94$ μm a po dalších třech minutových intervalech přesáhl nástroj maximálního dovoleného opotřebení. Nejmenší nárůst opotřebení při prvním měření byl zaznamenán u řezných podmínek $v_c = 300$ m/min a $v_f = 0,025$ m/min. Při těchto podmínkách u nástroje docházelo k rychlejšímu opotřebení ostří a při překročení hranice opotřebení $VB = 136 \pm 0,85$ μm se nástroj začal opotřebovávat pozvolněji.

Druhý dvoubřitý nástroj, ozn. 2 – 2z, překvapil svojí výdrží a malými skoky mezi jednotlivými opotřebeními. Nástup prvního a nejmenšího opotřebení byl naměřen u řezných podmínek $v_c = 300$ m/min, $v_f = 0,025$ m/min s hodnotou $VB = 63 \pm 0,98$ μm . Nejlepších výsledků v poměru opotřebení a doby práce měl nástroj při $v_c = 300$ m/min a $v_f = 0,025$ m/min, kdy se nástroj opotřebovával o téměř pravidelnou hodnotu a VB_{krit} přesáhl až po 10té min.

Tab. 8 – 10x zvětšené detaily nástrojů před a po opotřebení na mikroskopu Keyence



U dvoubřitého nástroje, ozn. 2 – 2z, bylo během měření sledováno vysoké opotřebení v podobě hladkého povrchu. Takové opotřebení vzniká z důvodu vysokého abrazivního otěru. Mezi pracující nástroj a obráběný materiál se dostávají prachové třísky uhlíkových vláken, ty se zde opírají o řeznou hranu frézy a fungují jako leštící médium. Třísky leští hřbet nástroje a výsledkem je vyleštěná hladká oblast vyskytující se nad ostřím (Tab. 8d).

4.2 Měření delaminace materiálu

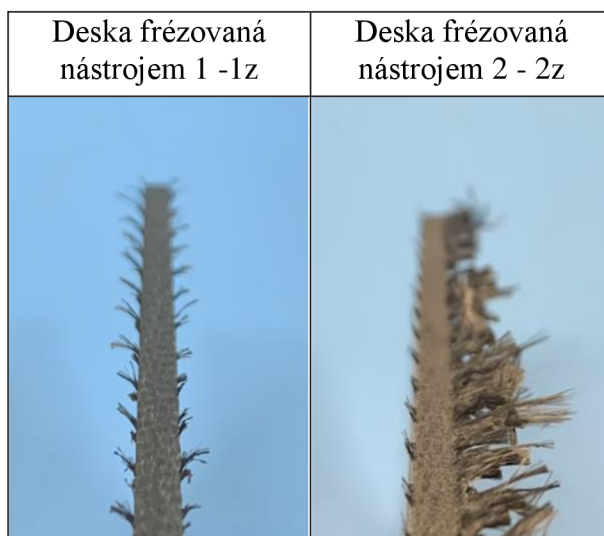
Druhá část experimentu se zabývá vznikající delaminací na frézované kompozitní desce vyztužené uhlíkovými vlákny. Parametry desky jsou popsány v metodice (3.1). Všechna měření delaminace probíhala po daném pracovním cyklu, kdy nástroj frézoval desku. Po každém pracovním cyklu se měřila velikost delaminace na 5ti různých místech po délkách obou hran desky, kde se delaminace vyskytovala - vrchní a spodní hraně. Delaminace na deskách se měřila dokud nástroj nedosáhl maximální přípustné hodnoty opotřebení (VB_{krit}). Z každých 5ti zaznamenaných velikostí delaminace byl vypočten aritmetický průměr a určena hodnota nejistoty měření, dle podkapitoly 3.6.2.

Volba nástrojů s odlišnou geometrií byla za účelem pozorování rozdílů jednak opotřebovávání hlavního ostří nástrojů, ale také s cílem dosažení značných rozdílů ve tvořící se delaminaci. V kapitole 4.1 bylo popsáno opotřebení nástrojů. Vznik delaminace u kompozitních desek úzce souvisí s vhodně zvolenou geometrií a opotřebením nástroje. U ostré a vhodně zvolené nástroje pro frézování kompozitů je výskyt delaminace méně pravděpodobný. Pravděpodobnost vznikající a zvětšující delaminace tedy roste s mírou opotřebením nástroje. Už u výběru nástrojů se očekávalo, že se delaminace bude vizuálně lišit. U jednobřitého nástroje s přímou geometrií, ozn. 1 - 1z, se vyskytovala situace ortogonálního řezu. Při této specifické metodě řezu je frézování provedeno kolmo na povrch materiálu. Výhodami této metody frézování je převážně minimalizace delaminace, tím se zlepšuje integrita a pevnost materiálu. Delaminace také vznikala téměř pravidelně na obou stranách desky (Tab. 9). Další výhodou v čem vyniká řezání materiálu pod pravým úhlem je lepší kvalita povrchu. Z Tab. 9 je viditelné, že obrobená plocha jednuzubým nástrojem, ozn. 1 – 1z, je hladší, čistší a esteticky hezčí. Ortogonální řez se také vyznačuje snižováním opotřebení nástroje, to bylo popsáno ve 4.1.

V případě nástroje 2 – 2z) probíhalo frézování kompresní frézou. Kompresní frézou probíhá frézování tak, že materiál z kompozitní desky je tlačěn směrem ke stopce. V případě desky byla vlákna na spodní straně desky vtlačována do desky a na vrchní straně desky byla vlákna vytahována směrem ven z desky. Vtlačovaná vlákna do desky byla ve většině případů z největší části odříznuta a vznikala vcelku malá delaminace. Za to vlákna tlačena ven už měla menší šanci být uříznuta a tak vznikala velká delaminace. Povrch po frézování není už tak čistě obrobený jako tomu bylo v případě nástroje 1 – 1z (Tab. 9). Mezi obráběným povrchem a pracujícím nástrojem se objevovala vlákna, která byla tlačena ze spodní vrstvy desky. Ta se

sice dokázala z větší části odříznout, ale zároveň znemožnila dosažení kvalitního obrobeného povrchu.

Tab. 9 – Způsoby vznikání delaminace na deskách obráběných různými nástroji



Velikost delaminace se také měnila se změnou řezných podmínek. Všechny ze třech zvolených řezných rychlostí se projevovaly jak na míře opotřebení nástroje, tak i velikosti a tvarů delaminace. Velikosti delaminací vznikajících u jednotlivých nástrojů za jednotlivých řezných podmínek jsou vypracovány v tabulkách níže.

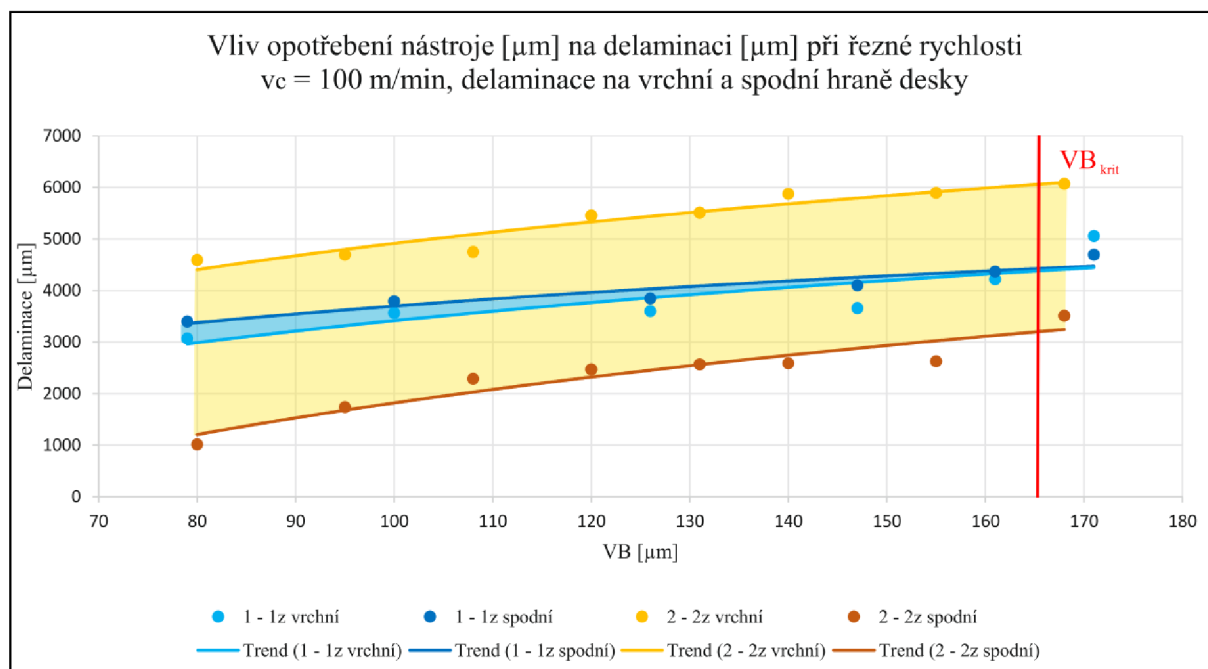
Tab. 10 – Tabulka hodnot delaminace v závislosti na opotřebení nástroje 1 – 1z

Nástroj 1 - 1Z	Měření	Dráha s [m]	Opotřebení nástroje [μm] ± nejistota měření U [μm]	Delaminace vrchní hrany [μm] ± nejistota měření U [μm]	Delaminace spodní hrany [μm] ± nejistota měření U [μm]
100 m/min	1.	9,5	79 ± 0,91	3070 ± 0,87	3397 ± 0,91
	2.	19	100 ± 0,90	3563 ± 0,95	3790 ± 0,99
	3.	28,5	126 ± 0,95	3600 ± 0,99	3850 ± 0,90
	4.	38	147 ± 0,85	3661 ± 0,85	4103 ± 0,85
	5.	47,5	161 ± 0,91	4217 ± 0,87	4370 ± 0,99
	6.	57	171 ± 0,86	5060 ± 0,95	4697 ± 0,86
200 m/min	1.	9,5	94 ± 0,87	2713 ± 0,90	3670 ± 0,99
	2.	19	105 ± 0,90	2780 ± 0,91	4383 ± 0,91
	3.	28,5	136 ± 0,91	3683 ± 0,91	4456 ± 0,91
	4.	38	170 ± 0,99	4477 ± 0,99	4693 ± 0,87
300 m/min	1.	9,5	62 ± 0,99	2110 ± 0,85	1517 ± 0,91
	2.	19	99 ± 0,91	3240 ± 0,86	2680 ± 0,99
	3.	28,5	131 ± 0,85	3313 ± 0,91	2816 ± 0,99
	4.	38	142 ± 0,87	3886 ± 0,99	2976 ± 0,85
	5.	47,5	151 ± 0,95	4160 ± 0,99	3043 ± 0,95
	6.	57	162 ± 0,86	5570 ± 0,87	5767 ± 0,89
	7.	66,5	175 ± 0,86	5797 ± 0,85	5933 ± 0,91

Tab. 11 – Tabulka hodnot delaminace v závislosti na opotřebení nástroje 2 – 2z

Nástroj 2 - 2Z	Měření	Dráha s [m]	Opotřebení nástroje [μm] \pm nejistota měření U [μm]	Delaminace vrchní hrany [μm] \pm nejistota měření U [μm]	Delaminace spodní hrany [μm] \pm nejistota měření U [μm]
100 m/min	1.	4,75	80 \pm 0,90	4590 \pm 0,91	1017 \pm 0,95
	2.	9,5	95 \pm 0,89	4693 \pm 0,95	1736 \pm 0,89
	3.	14,25	108 \pm 0,90	4750 \pm 0,87	2287 \pm 0,99
	4.	19	120 \pm 0,91	5466 \pm 0,99	2470 \pm 0,91
	5.	28,5	131 \pm 0,91	5510 \pm 0,90	2570 \pm 0,87
	6.	38	140 \pm 0,88	5876 \pm 0,91	2587 \pm 0,85
	7.	47,5	155 \pm 0,91	5893 \pm 0,86	2627 \pm 0,86
	8.	57	168 \pm 0,87	6073 \pm 0,89	3510 \pm 0,91
200 m/min	1.	4,75	86 \pm 0,85	4211 \pm 0,90	2306 \pm 0,85
	2.	9,5	112 \pm 0,89	4696 \pm 0,99	2966 \pm 0,90
	3.	14,25	146 \pm 0,99	5052 \pm 0,88	2937 \pm 0,88
	4.	19	186 \pm 0,87	5112 \pm 0,88	2963 \pm 0,99
300 m/min	1.	4,75	63 \pm 0,99	4363 \pm 0,89	837 \pm 0,91
	2.	9,5	75 \pm 0,91	4146 \pm 0,90	1110 \pm 0,88
	3.	14,25	96 \pm 0,89	6330 \pm 0,91	1167 \pm 0,99
	4.	19	103 \pm 0,85	6576 \pm 0,85	1781 \pm 0,89
	5.	28,5	115 \pm 0,95	6810 \pm 0,86	1953 \pm 0,91
	6.	38	120 \pm 0,90	7578 \pm 0,99	3782 \pm 0,85
	7.	47,5	143 \pm 0,99	8653 \pm 0,91	3987 \pm 0,89
	8.	57	151 \pm 0,91	9650 \pm 0,87	3970 \pm 0,95
	9.	66,5	161 \pm 0,86	9847 \pm 0,87	4307 \pm 0,90
	10.	76	165 \pm 0,87	9943 \pm 0,88	5767 \pm 0,90

Z výše uvedených hodnot lze tvrdit, že se zvyšujícím se opotřebením rostla velikost delaminace. Vyhodnocení jednotlivých vznikajících delaminací ve vztahu s opotřebením nástrojů a s řeznými podmínkami je uvedeno v grafickém zobrazení níže. V každém grafu jsou porovnávány velikosti delaminací obou nástrojů za použití stejných řezných podmínek. Graf obsahuje data jak delaminace na vrchní, tak i spodní hraně desky. Barevné oblasti jsou v grafech pouze za účelem přehlednosti, spojují vždy vrchní a spodní křivky trendů sledovaného nástroje. Ke každému grafu jsou přiloženy obrázky dokumentující vznikající delaminaci vzhledově. Vyobrazeny jsou delaminace během prvních a posledních měření. Voleny byly vždy taková měření, kdy se hodnoty opotřebením obou nástrojů podobaly a to z důvodu adekvátního porovnávání rozdílů.



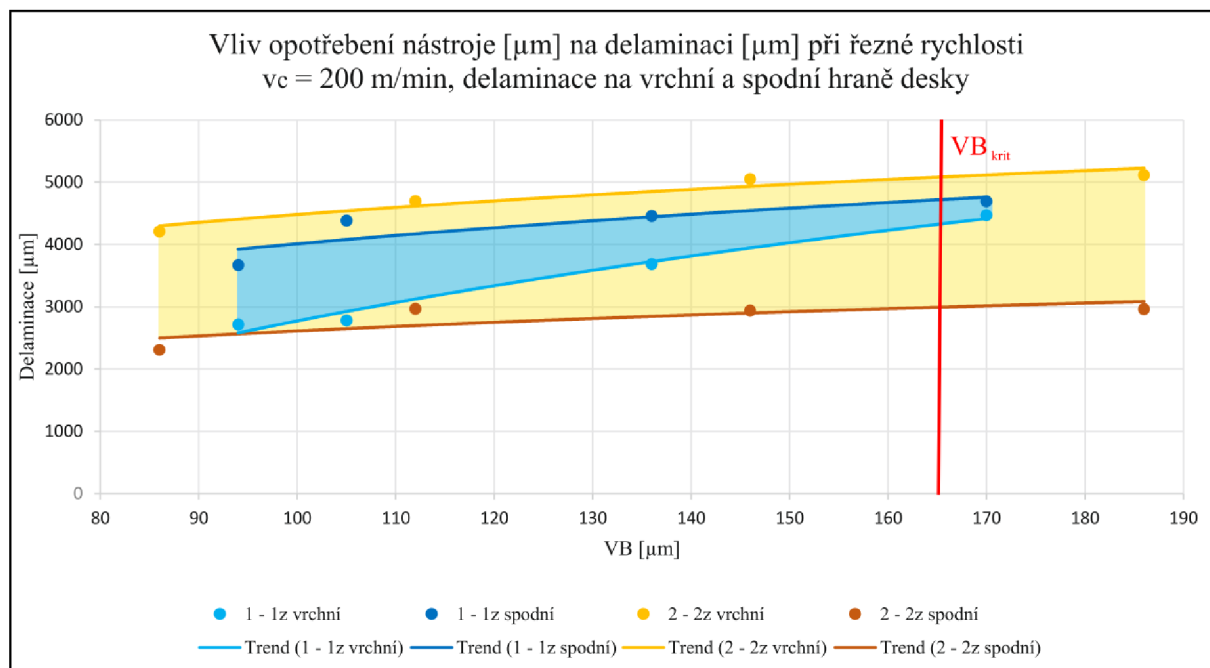
Graf. 2 – Vývoj velikostí delaminací na hranách desky vlivem opotřebení nástrojů za použití řezné rychlosti $v_c = 100 \text{ m/min}$

Tab. 12 – Vzhledové srovnání delaminací prvního a druhého nástroje za použití řezné rychlosti $v_c = 100 \text{ m/min}$ během počátečního a posledního měření

100 m/min	Vrchní hrana	Spodní hrana	100 m/min	Vrchní hrana	Spodní hrana
Nástroj	Delaminace po dráze 9,5 m (VB nástroje: 79 μm)		Nástroj	Delaminace po dráze 57 m (VB nástroje: 171 μm)	
1 - 1z			1 - 1z		
Nástroj	Delaminace po dráze 4,75 m (VB nástroje: 80 μm)		Nástroj	Delaminace po dráze 57 m (VB nástroje: 168 μm)	
2 - 2z			2 - 2z		

V případě jednozubového nástroje, ozn. 1 – 1z, se hodnoty delaminací příliš nezvětšují s mírou opotřebení nástroje. Velikosti delaminací na vrchní a spodní straně jsou téměř stejně velké a po každém měření se zvětšovaly o podobnou hodnotu. Delaminace byla u vláken kolmých na řezný směr posuvu nástroje, tyto vlákna dělala nástroji největší problém odříznutí. Největší velikost delaminace byla naměřena $5060 \pm 0,95 \mu\text{m}$ při maximálním dosažení opotřebení nástroje $VB = 171 \pm 0,98 \mu\text{m}$. U druhého nástroje, ozn. 2 – 2z, se naopak velikosti na vrchní a spodní straně velmi lišily. Na spodní straně byla vlákna vtačována do materiálu a byla nástrojem z největší míry odříznuta. Nejlepší výsledek delaminace při této řezné

rychlosti je $4590 \pm 0,91$ mm na straně vrchní a při stejném měření $1017 \pm 0,95$ mm na spodní straně. Při této řezné rychlosti dosáhovaly velikostí delaminací na spodní hraně dobrých výsledků. Bylo vysledováno, že na neodříznutých vláknech na vrchní straně se zachytávala vlákna odříznutá. Ta nejpravděpodobněji pocházela ze spodní vrstvy odkud byla čelem šroubovice nástroje odvedena do vrchní části obrobku a zachytila se o vlákna, která ještě držela.

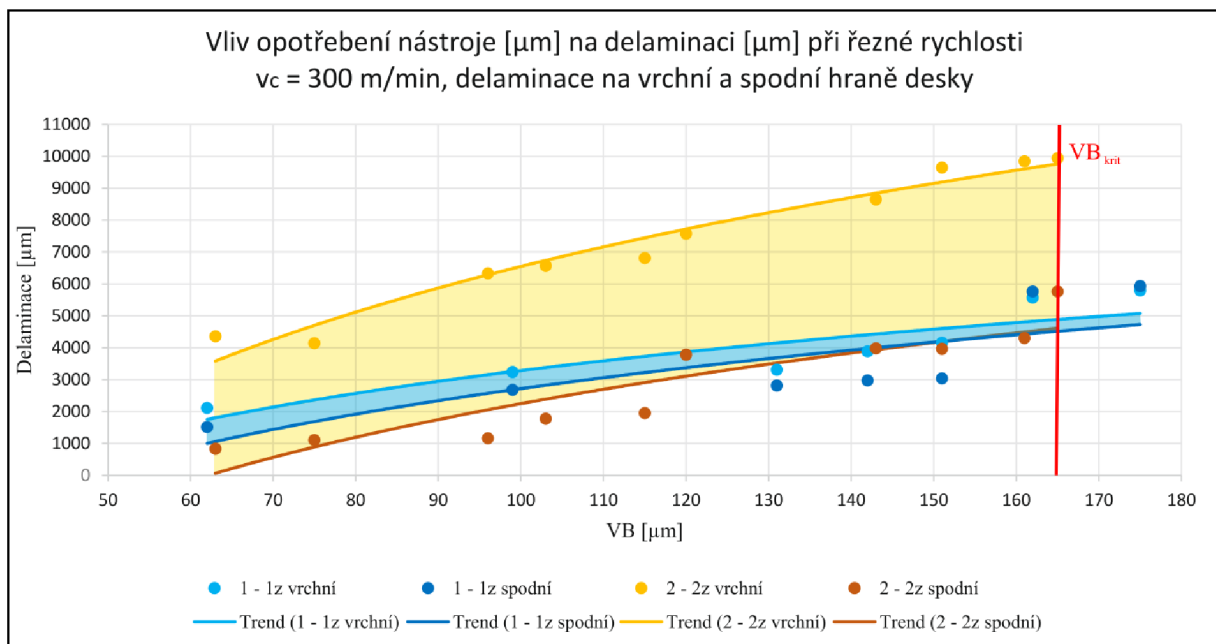


Graf. 3 – Vývoj velikostí delaminací na hranách desky vlivem opotřebení nástrojů za použití řezné rychlosti $v_c = 200$ m/min

Tab. 13 – Vzhledové srovnání delaminací prvního a druhého nástroje za použití řezné rychlosti $v_c = 200$ m/min během počátečního a posledního měření









200 m/min	Vrchní hrana	Spodní hrana	200 m/min	Vrchní hrana	Spodní hrana
Nástroj	Delaminace po dráze 19 m (VB nástroje: 94 µm)		Nástroj	Delaminace po dráze 38 m (VB nástroje: 170 µm)	
1 - 1z			1 - 1z		
Nástroj	Delaminace po dráze 9,5 m (VB nástroje: 86 µm)		Nástroj	Delaminace po dráze 19 m (VB nástroje: 186 µm)	
2 - 2z			2 - 2z		

Při nastavení řezné rychlosti na $v_c = 200$ m/min byla delaminace měřena pouze 4x, opotřebení nástroje při řezné rychlosti bylo velice znatelné a nástroj brzy dosáhl maximální dovolené velikosti opotřebení (VB_{krit}). Dlouhá vytažená vlákna z materiálu byla značně velká už při prvním měření. Při velkém prvním opotřebení jednobřitého nástroje, ozn. 1 – 1z, vyskočila delaminace na hodnotu $2713 \pm 0,90$ μm na vrchní a $3670 \pm 0,99$ μm na spodní hraně. Toto jsou nejvyšší hodnoty prvního měření delaminace při řezné rychlosti $v_c = 100$ m/min. V postupně zvyšujícím se opotřebení rostla i delaminace. Docházelo opět k ortogonálnímu řezání a delaminace vznikala v podobě vytažených nedostatečně odříznutých vláken z povrchových vrstev kompozitu. U druhého nástroje, ozn. 2 – 2z, opotřebení rostlo rapidně, ale výsledky delaminace se zvyšovaly jen minimálně. Z pohledu opotřebení nástroje by tyto řezné podmínky byly jako zcela nevyhovující, ale z pohledu obrobeného materiálu vyšly tyto výsledky jako nejlepší a předvídatelné. Nejvyšší hodnoty $5112 \pm 0,88$ μm na vrchní a $2963 \pm 0,99$ μm na spodní hraně desky.




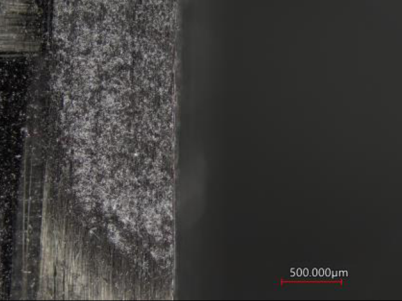
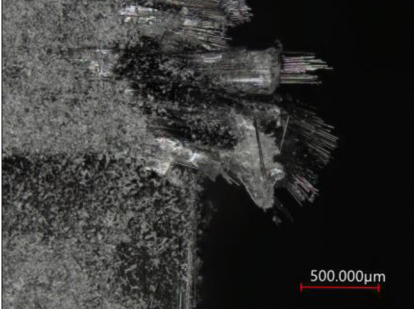
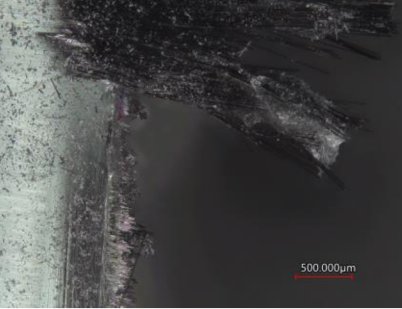
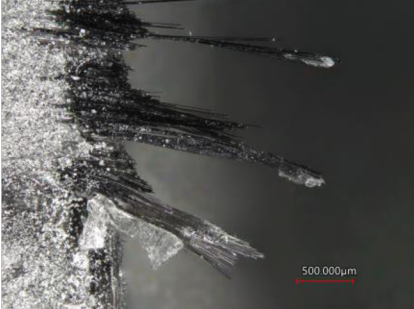

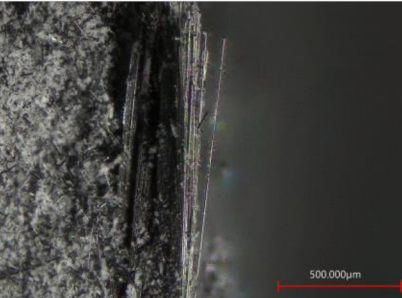
Graf. 4 – Vývoj velikostí delaminací na hranách desky vlivem opotřebení nástrojů za použití řezné rychlosti $v_c = 300$ m/min

Tab. 14 – Vzhledové srovnání delaminací prvního a druhého nástroje za použití řezné rychlosti $v_c = 300 \text{ m/min}$ během počátečního a posledního měření

300 m/min	Vrchní hrana	Spodní hrana	300 m/min	Vrchní hrana	Spodní hrana
Nástroj	Delaminace po dráze 9,5 m (VB nástroje: 62 μm)		Nástroj	Delaminace po dráze 66,5 m (VB nástroje: 175 μm)	
1 - 1z			1 - 1z		
Nástroj	Delaminace po dráze 4,75 m (VB nástroje: 63 μm)		Nástroj	Delaminace po dráze 76 m (VB nástroje: 165 μm)	
2 - 2z			2 - 2z		

Řezná rychlost $v_c = 300 \text{ m/min}$ vynikala nízkými hodnotami opotřebení při prvních měřeních. První hodnota opotřebení jednobřitého nástroje, ozn. 1 – 1z, byla $VB = 62 \pm 0,98 \mu\text{m}$ a velikosti delaminace na vrchní hraně $2110 \pm 0,85 \mu\text{m}$ a $1517 \pm 0,91 \mu\text{m}$ na spodní. Nástroj měl při těchto řezných podmínkách nejdelší životnost a až do hodnoty $VB = 151 \pm 0,90 \mu\text{m}$ a obrobených 66,5 m desky delaminace nedosáhla hodnoty větší $5000 \mu\text{m}$. Maximální velikost delaminace byla naměřena na spodní hraně desky při maximálním opotřebení $VB = 175 \pm 0,90 \mu\text{m}$ a to $5933 \pm 0,91 \mu\text{m}$, tato hodnota je považována za nejvyšší hodnotu naměřenou u jednozubého nástroje. Řezná rychlost $v_c = 300 \text{ m/min}$ u dvoubřitého nástroje, ozn. 2 – 2z, vykazovala také pozvolné opotřebovávání a dlouhou životnost, ale delaminace se strmě zvětšovala. Nejmenší delaminace ze všech měření se objevila na spodní hraně desky při prvním měření a opotřebení $VB = 63 \pm 0,98 \mu\text{m}$. Spojením nastavené rychlosti a ostré zvolené geometrie se dosáhlo nejmenší delaminace a nejkvalitnějšího obrobení na spodní hraně. Za to povrch a delaminace na vrchní hraně už dobré výsledky nevykazovaly. Nástroj byl schopný uříznout většinu vláken na spodní hraně, ty ale při transportu šroubovicí směrem k vrchní hraně poškodila povrch, ten byl na omak hrubší a vytažená vlákna na vrchní části měřila $4363 \pm 0,89 \mu\text{m}$. Při dosažení $VB_{krit} = 165 \mu\text{m}$ byly hodnoty delaminace extrémní, vrchní hrana $9943 \pm 0,88 \mu\text{m}$ a $5767 \pm 0,90 \mu\text{m}$ na spodní hraně.

Tab. 15 – Typy delaminací na kompozitních deskách

Nástroj 1 – 1z	Nástroj 2 – 2z
<p>a) Oblast bez delaminace $v_c = 300$ m/min, (VB nástroje 62 μm)</p>	<p>b) Oblast bez delaminace $v_c = 300$ m/min, (VB nástroje 63 μm)</p>
	
<p>c) Delaminace Typu I i II $v_c = 200$ m/min, (VB nástroje 136 μm)</p>	<p>d) Delaminace Typu I i II $v_c = 200$ m/min, (VB nástroje 146 μm)</p>
	
<p>e) Delaminace Typu II $v_c = 100$ m/min, (VB nástroje 79 μm)</p>	<p>f) Delaminace Typu II $v_c = 100$ m/min, (VB nástroje 80 μm)</p>
	
<p>g) Delaminace Typu III</p>	<p>h) Delaminace Typu III $v_c = 100$ m/min, (VB nástroje 168 μm)</p>
<p style="text-align: center;">-</p>	

Během experimentu byly vysledovány tři typy objevujících se delaminací. Nejvýraznější delaminace se tvořila v oblasti vláken kolmých k orientaci posuvu nástroje. Nejvíce častým typem delaminace u jednobřitého nástroje, ozn. 1 – 1z, byl Typ I i II. Vlákna vyčnívající z materiálu byly výrazně delší, nežli uvolněná vlákna ze svrchní vrstvy kompozitu. Vlákna porušená ve svrchní vrstvě mohou být zapříčiněna vlivem tepelně ovlivněného materiálu po frézování. Matrice se vlivem tepla roztavila a vlákna, která měla držet u sebe povolila a ty se uvolnila. Vlákna, která vyčnívala z materiálu byla zahnutá ve směru posouvajícího nástroje. Typ delaminace I i II se objevoval jak na vrchní, tak i spodní hraně desky. Jen ve vyjimečných případech se u tohoto nástroje objevovala volná odříznutá vlákna. U dvoubřitého nástroje, ozn. 2 – 2z, byla ve většině případech delaminace Typu I i II. A to jak na spodní, tak i na vrchní hraně. Na vrchní hraně byla delaminace větší, na vyčnívajících vláknech z materiálu se zachytávaly kusy volných odříznutých vláken. Při frézování s otupeným nástrojem se začal vyskytovat i Typ III a to v oblasti kompozitu, kde byla vlákna rovnoběžná s posouvajícím se nástrojem. Vlákna ulpívala z obrobeného povrchu a narušovala integritu obrobeného povrchu. V tomto případě byl obrobený povrch značně nekvalitní.

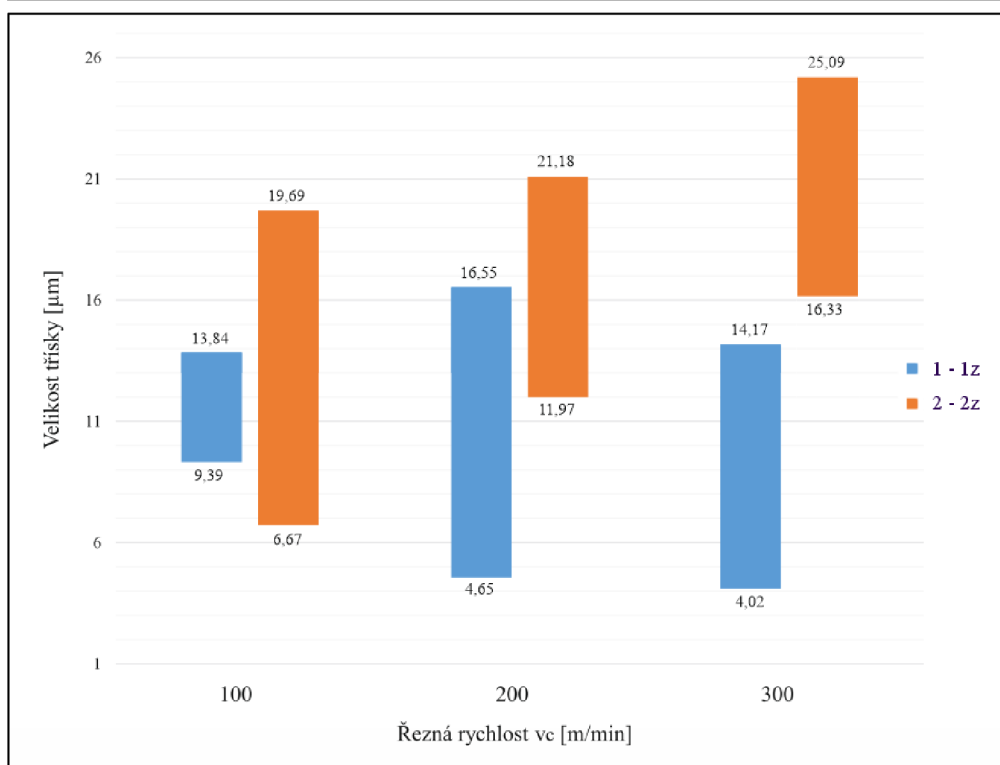
4.3 Prachové třísky

Při frézování byly odebírány třísky vždy po prvním a posledním pracovním intervalu. Třísky byly odebírány z blízkého okolí místa řezu. Sbírání třísek bylo z důvodu dalších experimentů.

Z pozorování vznikajících třísek se dá odvodit závislost mezi velikostí třísek a opotřebením nástroje. Při frézování neopotřebeným nástrojem vznikaly třísky větší a skládaly se z částí odříznutých vláken a úlomky epoxidové pryskyřice. Množství třísek se zvyšovalo s opotřebením nástroje. Vlákna i matrice byly nadrcené na malé kusy, smíchané mezi sebou, vytvářející odpadní prach. Ze snímků v Tab. 17 z mikroskopu Keyence VK-X 1000 lze vyvodit, že během frézování opotřebenými nástroji vznikají menší částice a hrozí větší nebezpečí vdechnutí prachových částic. Tento jev byl pozorován jak u jednobřitého, tak dvoubřitého nástroje. Naměřené velikosti třísek jsou uvedené v Tab. 15. Červeně jsou označeny nejmenší hodnoty naměřené při nejmenším prvním a největším posledním opotřebením obou řezných nástrojů.

Tab. 16 – Tabulka velikostí třísek po prvním a posledním opotřebení každého nástroje při různých řezných rychlostech

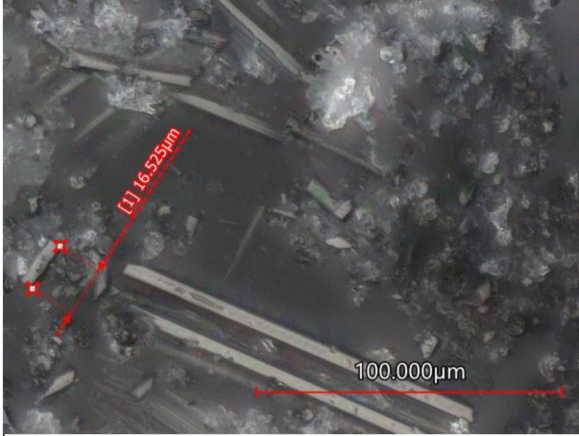

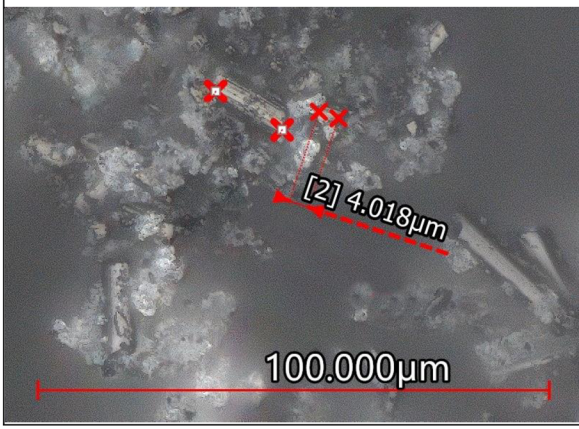

Řezná rychlost [m/min]	Nástroj	Velikost třísky [μm] při (opotřebení VB [μm])		Nástroj	Velikost třísky [μm] při (opotřebení VB [μm])	
100	1 - 1z	13,84 \pm 0,99	(VB = 79)	2 - 2z	19,69 \pm 0,97	(VB = 80)
		9,39 \pm 0,97	(VB = 171)		6,67 \pm 0,85	(VB = 168)
200	1 - 1z	16,55 \pm 0,89	(VB = 94)	2 - 2z	21,18 \pm 0,90	(VB = 86)
		4,65 \pm 0,99	(VB = 170)		11,97 \pm 0,98	(VB = 186)
300	1 - 1z	14,17 \pm 0,99	(VB = 62)	2 - 2z	25,09 \pm 0,99	(VB = 63)
		4,02 \pm 0,95	(VB = 175)		16,33 \pm 0,89	(VB = 165)



Graf 5 – Grafické znázornění velikostí třísek po prvním a posledním opotřebení obou nástrojů při řezných rychlostech

Z dat v tabulce a zobrazeného grafu plyne, že při frézování opotřebovaným jednobřítým nástrojem, ozn. 1 – 1z, při nastavených řezných rychlostech $v_c = 200$ m/min a $v_c = 300$ m/min vznikaly třísky menší 5 μm , které lze považovat jako zdraví škodlivé při jejich vdechnutí. U dvoubřitého nástroje, ozn. 2 – 2z, se v případě řezných rychlostí $v_c = 200$ m/min a $v_c = 300$ m/min velikosti třísek i při nejvyšším opotřebení nástroje nacházely nad hodnotou 10 μm , což představuje zachování bezpečí při manipulaci s třískami. Nejmenší velikost třísky 4,02 \pm 0,95 μm byla naměřena u nástroje 1 – 1z při řezné rychlosti $v_c = 300$ m/min, opotřebení nástroje 175 μm (Tab. 17).

Tab. 17 – Tabulka s mikroskopickými (50x zvětšenými) snímky třísek pořízených při nejmenším a největším opotřebení obou řezných nástrojů

Nástroj 1 – 1z	Nástroj 2 – 2z
<p>Nejmenší naměřená velikost při nejnižším opotřebení $VB = 94 \mu\text{m}$, $v_c = 300 \text{ m/min}$</p> 	<p>Nejmenší naměřená velikost při nejnižším opotřebení $VB = 63 \mu\text{m}$, $v_c = 300 \text{ m/min}$</p> 
<p>Nejmenší naměřená velikost při nejvyšším opotřebení $VB = 175 \mu\text{m}$, $v_c = 300 \text{ m/min}$</p> 	<p>Nejmenší naměřená velikost při nejvyšším opotřebení $VB = 168 \mu\text{m}$, $v_c = 100 \text{ m/min}$</p> 

5 Vyhodnocení a diskuse výsledků

Cílem předkládané bakalářské práce byl výzkum vlivu řezných podmínek na delaminaci a opotřebení řezného nástroje při frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny s tkaninou keprové vazby a orientace vláken 90°.

K realizaci experimentu byly nezbytné teoretické znalosti k problematice frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny, které jsou shrnuty v teoretické části v kapitole 2.

Před samotným experimentem byly zvolené vhodné nástroje s různou geometrií, bylo nutné navrhnout veškeré strojní a měřicí zařízení, dále vytvořit metody měření a vyhodnocení pro opotřebení nástroje a velikosti delaminace. To vše je zahrnuto v Metodice experimentální části v kapitole 3.

Realizovaný výzkum je obsažen v kapitole 4 s názvem Experimentální část, společně s dosaženými výsledky.

Z realizovaného experimentálního měření lze shrnout následující:

- **Opotřebení nástroje**

Opotřebení nástrojů bylo hodnoceno pomocí mikro snímků pořízených pomocí konfokálního mikroskopu Keyence VK-X 1000. Popis zvolených nástrojů pro experiment je v podkapitole 3.2, určené řezné podmínky jsou uvedeny v 3.3. Princip měření opotřebení je popsán v 3.5.2. Vyhodnocení všech naměřených dat bylo provedeno v programu Microsoft Excel.

Z experimentu lze vyvodit, že opotřebení VB [μm] obou zkoumaných nástrojů se zvyšovalo s rostoucím časem frézování. Postupem času rostly hodnoty opotřebení na hlavním hřbetu a ostří obou nástrojů.

Dále lze potvrdit fakt, že největších hodnot opotřebení nastávalo vždy po prvním cyklu, kdy jednotlivé nástroje pracovaly a to při všech třech zvolených řezných rychlostech.

U dvoubřitého nástroje se šroubovitou geometrií byla během měření vyzorována hladká a lesklá oblast vyskytující se nad ostřím na hlavním hřbetu nástroje. Tato oblast vznikala abrazivním otěrem částic uhlíkových vláken. Během procesu frézování se třísky dostávaly mezi nástroj a obráběný materiál, zde působily jako leštící mechanismus a výsledkem je opotřebovaná lesklá oblast.

- **Delaminace**

Veškeré informace o zvoleném zkoumaném vzorku jsou uvedeny v podkapitole 3.1. Řezné podmínky určené pro tento experiment jsou uvedeny v 3.3. Popsaný princip měření a sledování delaminace na kompozitní desce s uhlíkovými vlákny je popsáno v 3.5.1. Delaminace byla měřena pokaždém cyklu kdy nástroj pracoval a byla zkoumána dokud každý nástroj nedosáhl maximálního dovoleného opotřebení VB_{krit} .

Z experimentů provedených v podkapitole 4.2 lze jednoznačně vyvodit, že velikost delaminace roste s mírou opotřebení obou zkoumaných nástrojů. U obou nástrojů se delaminace vyskytovala jak na vrchní, tak spodní části desky.

Pozorovány byly rozdíly mezi delaminací vznikající na desce frézované jednobřítým a dvoubřítým nástrojem. U jednobřitého nástroje, ozn. 1 – 1z, se velikosti delaminací na vrchní a spodní hraně desky příliš nelišily. Tento fakt je odůvoditelný přítomností ortogonálního řezání, které se vyskytuje u nástrojů s přímou geometrií. U dvoubřitého nástroje, ozn. 2 – 2z, se delaminace naopak na vrchní a spodní hraně velmi lišila. Šroubovitý nástroj na spodní části zatlačoval vlákna do kompozitní desky a na vrchní hraně zase vytlačoval vlákna ven z desky, tomuto jevu vzniká u kompresních fréz, čímž jsou právě šroubovité nástroje.

Z pohledu kvality obrobeného povrchu desky byly jednoznačně lepší výsledky u nástroje s jedním břitem, ozn. 1 – 1z. Povrch byl hladký, bez vad nebo volných vláken. U dvoubřitého nástroje, ozn. 2 – 2z, byl povrch znequalitněn třením už rozdrčených vláken, které nástroj během frézování posouval šroubovicí od spodní do vrchní části desky a třel nimi o obrobený povrch. Povrch byl hrubý a při větších opotřebení nástroje obsahoval i delaminaci Typu III.

Sledováno bylo také ohýbání vláken směrem nahoru z materiálu na vrchní hraně desky u dvoubřitého nástroje, ozn. 2 – 2z. Komprese od šroubovice vytlačovala vlákna ven od místa řezu a vlákna se tak ohýbala.

U obou nástrojů a všech řezných rychlostech se ve většině případů objevovala delaminace Typy I i II, s tím, že vlákna vyčnívající byla delší nežli vlákna porušená ve vrchní vrstvě desky. Vylamování vláken ve vrchní vrstvě může být důsledkem tepelně poškozeného materiálu matrice, která již neudržela vlákna pohromadě. U nižších hodnot opotřebení se objevovala i samotná delaminace Typu II. U velkých opotřebení nástroje 2 – 2z se na povrchu obrobené části desky objevovala delaminace Typu III.

- **Vliv řezné rychlosti na opotřebení**

Při řezných rychlostech $v_c = 100$ m/min a $v_c = 300$ m/min docházelo k minimálním opotřebením po prvních měřeních u obou nástrojů.

Řezná rychlost $v_c = 200$ m/min se jevila jako nevhodně zvolená pro tuto problematiku frézování. Opotřebení řezného nástroje při této rychlosti se prudce zvětšovalo a již po čtyřech pracovních cyklech došlo u obou nástrojů k dosažení maximální povolené hodnoty opotřebení VB_{krit} . Životnost nástroje při této rychlosti byla velmi krátká.

Z pohledu délky životnosti opotřebení obstála jako nejlepší řezná rychlost $v_c = 300$ m/min. Při takto nastavené řezné rychlosti vznikala nejmenší první hodnota opotřebení a nástroj obrobil největší množství z kompozitní desky nežli opotřebení dosáhlo maximálního dovoleného opotřebení VB_{krit} . U jednobřitého nástroje, ozn. 1 – 1z, se jednalo o 66,5 metrů frézování kompozitní desky s uhlíkovými vlákny při dosažené míry opotřebení $VB = 175 \pm 0,86$ μm . Dvoubřítý nástroj, ozn. 2 – 2z, obrobil 76 metrů desky s naměřeným opotřebením $VB = 165 \pm 0,87$ μm .

- **Vliv řezné rychlosti na delaminaci**

Vznikající delaminace je nejvíce závislá na opotřebením nástroje, který materiál obrábí. Řezné podmínky mají tedy největší vliv opotřebením nástroje a posléze na delaminaci.

Delaminace vznikala při všech nastavených řezných rychlostech a značná byla už při prvních měřeních opotřebením nástrojů. Vyšší hodnoty delaminace byly pozorovány při zvyšování řezné rychlosti. Se zvyšující řeznou rychlostí rostlo množství tepla vyprodukovaného v místě frézování. Při vysokých teplotách mohlo dojít k zvýšenému tření mezi nástrojem a materiálem. Tření mohlo způsobit lokální zvýšení teploty, což vedlo k tání pryskyřice a deformaci vláken. Tento fakt mohl vytvářet podmínky pro vznik větší delaminace.

Mezi řeznými rychlostmi $v_c = 100$ m/min a $v_c = 300$ m/min byl znatelný rozdíl velikosti porušení vláken ve vrchním povrchu desky. To mohlo být způsobené rozdílným tepelným ovlivněním materiálu v oblasti místa řezu. Kdy při zvyšující teplotě se více tavila matrice a povolovala vlákna ve vrstvě.

U vyšších řezných rychlostí docházelo k většímu vizuálnímu ohybu vyčnívajících vláken ve směru posuvu nástroje. A to hlavně u jednobřitého nástroje, ozn. 1 – 1z, na vrchní hraně kompozitní desky.

Při zvyšující se řezné rychlosti se na vyčnívajících vláknech na vrchní hraně desky u obrábění dvoubřitou frézou, ozn. 2 – 2z, objevovalo větší množství volných odříznutých kusů vláken. Tato vlákna pocházela ze spodní vrstvy kompozitu a způsobovala zhoršení kvality povrchu obrobene části desky. Kvalita povrchu se zhoršovala se zvyšující řeznou rychlostí.



- **Vznik třísek**

Z experimentálních měření je zřejmé, že se velikosti třísek zmenšovaly s rostoucím opotřebením nástrojů. U jednobřitého nástroje, ozn. 1 – 1z, vznikala tříska menší 5 μm, což může být zdraví nebezpečné. V případě dvoubřitého nástroje, ozn. 2 – 2z, vznikaly větší 5 μm s nejmenší naměřenou velikostí třísky $6,67 \pm 0,90 \mu\text{m}$ při opotřebení nástroje $VB = 168 \mu\text{m} \pm 0,97 \mu\text{m}$ a řezné rychlosti $v_c = 100 \text{ m/min}$.

- **Ekonomické zhodnocení**

V následující tabulce (Tab. 18) jsou výsledky měření porovnávány s cenou pořízení jednotlivých nástrojů. Uvedeny jsou všechny použité řezné rychlosti, maximální opotřebenění nástrojů, velikosti delaminací na vrchních a spodních hranách desek, velikost třísek a pořizovací cena nástrojů.

Tab. 18 – Ekonomické zhodnocení parametrů nástroje a výsledných hodnot opotřebenění a delaminace v závislosti na pořizovací ceně

Celkové ekonomické vyhodnocení								
Nástroj	Řezná rychlost v_c [m/min]	Obrobená dráha [m]	Opotřebenění [μm] při dosažení VBkrit [μm]	Velikost delaminace [μm] při dosažení VBkrit [μm] nástroje		Velikost třísky [μm]	Obrázek	Cena [Kč]
				Vrchní hrana	Spodní hrana			
1 - 1z	100	57	$171 \pm 0,86$	$5060 \pm 0,95$	$4697 \pm 0,86$	$9,39 \pm 0,97$		700,-
	200	38	$170 \pm 0,99$	$4477 \pm 0,99$	$4693 \pm 0,87$	$4,65 \pm 0,99$		
	300	66,5	$175 \pm 0,86$	$5797 \pm 0,85$	$5933 \pm 0,91$	$4,02 \pm 0,95$		
2 - 2z	100	57	$168 \pm 0,87$	$6073 \pm 0,89$	$3510 \pm 0,91$	$6,67 \pm 0,85$		300,-
	200	19	$186 \pm 0,87$	$5112 \pm 0,88$	$2963 \pm 0,99$	$11,97 \pm 0,98$		
	300	76	$165 \pm 0,87$	$9943 \pm 0,88$	$5767 \pm 0,90$	$16,33 \pm 0,89$		

Z provedených experimentů se nedá úplně zřetelně zvolit nejlepší nástroj s nejlepšími řeznými podmínkami. Pokud bychom vybírali nástroj, který bude dosahovat nejdelší životnosti bez ohledu na cenu pořizování a velikosti delaminace, je to nástroj označený 2 – 2z s nastavenou řeznou rychlostí $v_c = 300 \text{ m/min}$. Při výběru nástroje, který dosáhne nejlepších výsledků co nejnížší delaminace a délky obrobené dráhy kompozitní desky by byl zvolen nástroj označovaný 1 – 1z s řeznou rychlostí $v_c = 100 \text{ m/min}$. Tento nástroj má sice slušné výsledky co se týče vzniku delaminace a obrobené dráhy, ale za to má vysokou pořizovací cenu. Optimální

variantou volenou s ohledem na nejdelší životnost, nejnižší možnou vznikající delaminaci, cenu pořízení a i tvorby bezpečné velikosti třísky vychází nástroj označovaný 2 – 2z s řeznou rychlostí $v_c = 300$ m/min. Pokud bychom tento nástroj pořídili dvakrát a každý nástroj použili pouze do opotřebení $VB = 120$ μm , tak by výsledné delaminace na obou hranách desky byly výrazně nižší a dráha by při použití obou nástrojů byla v součtu stejná, jako u nástroje 1 – 1z, tedy 57 m. Přitom cenově by pořízení těchto dvou nástrojů bylo stále výhodnější. Nástroj 2 – 2z se projevuje lepšími vlastnostmi i z pohledu tvorby třísky (zobrazeno v Tab. 18), kdy u tohoto nástroje nevznikají třísky menší 5 μm , které jsou zdraví nebezpečné. Nástroj označený 2 – 2z se tedy jeví jako výhodnější pro co nejkvalitnější provedení této problematiky a to přesto, že je určen spíše pro frézování hliníkových materiálů.

6 Závěr

Předložená bakalářská práce zpracovaná na téma „Vliv řezných podmínek na delaminaci a opotřebení řezného nástroje při frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny“, přispívá k rozšíření poznatků při frézování těchto materiálů.

Cílem této práce byl výzkum vlivu řezných podmínek na opotřebení řezného nástroje a vznik velikosti delaminace při nesousledném frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny s tkaninou keprové vazby s orientací vláken 90°.

Pro realizaci experimentů byly navrženy řezné podmínky dle doporučení výrobce a dle mezinárodní literatury. Zvoleny byly 3 řezné rychlosti a to: $v_c = 100$ m/min, $v_c = 200$ m/min, $v_c = 300$ m/min a posuv $v_f = 0,025$ m/min.

Pro porovnávání rozdílů v opotřebení a ve vznikající delaminaci byly zvoleny 2 nástroje s odlišnou geometrií, ale ze stejného materiálu. První nástroj byla jednobřítá fréza ze slinutého karbidu s přímou geometrií, ozn. 1 – 1z a druhým nástrojem byla dvoubřítá fréza se šroubovicí ze slinutého karbidu, ozn. 2 – 2z. Veškeré specifikace nástrojů jsou shrnuty v podkapitole 3.2.

Použité stroje, měřicí přístroje a metody jsou popsány v kapitole 3 s názvem Metodika experimentální části.

Nejdůležitější poznatky v rámci bakalářské práce jsou:

- Řezné podmínky mají významný vliv na opotřebení nástroje a vznik velikosti delaminace při nesousledném frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny.
- Řezný nástroj, s označením 1 – 1Z (jednobřítá fréza ze slinutého karbidu), dosáhl nejlepších výsledků při navržené řezné rychlosti $v_c = 100$ m/min a posuvu $v_f = 0,025$ m/min. Při těchto zvolených řezných podmínkách měl daný nástroj maximální opotřebení $VB = 171 \pm 0,86$ μm při obrobených 57 m kompozitní desky s uhlíkovými vlákny. Opotřebení nástroje bylo otěrem, který vznikl z důvodu odříznutých vláken působících jako leštící mechanismus mezi nástrojem a obráběným materiálem. Velikost delaminace při tomto opotřebení byla na vrchní hraně $5060 \pm 0,95$ μm a na spodní hraně desky $4697 \pm 0,86$ μm . Nejmenší naměřená velikost třísky byla $9,39 \pm 0,97$ μm , tato velikost třísky není zdraví nebezpečná. Pořizovací cena nástroje byla 700,- Kč.

- Řezný nástroj, s označením 2 – 2Z (dvoubřítá fréza ze slinutého karbidu), dosáhl nejlepších výsledků při navržené řezné rychlosti $v_c = 300$ m/min a posuvu $v_f = 0,025$ m/min. Při těchto zvolených řezných podmínkách měl daný nástroj maximální opotřebení $VB = 165 \pm 0,87$ μm při obrobených 76 m kompozitní desky s uhlíkovými vlákny. Opotřebení nástroje bylo otěrem, který vznikl z důvodu odříznutých vláken působících jako leštící mechanismus mezi nástrojem a obráběným materiálem. Velikost delaminace při tomto opotřebení byla na vrchní hraně $9943 \pm 0,88$ μm a na spodní hraně desky $5767 \pm 0,90$ μm . Nejmenší naměřená velikost třísky byla $16,33 \pm 0,89$ μm , tato velikost třísky není zdraví nebezpečná. Pořizovací cena nástroje byla 300,- Kč.
- Řezná rychlost $v_c = 200$ m/min se u obou řezných nástrojů projevila jako nejméně vhodná pro zvolenou problematiku frézování kompozitní desky s uhlíkovými vlákny.

Z výše uvedeného plyne, že nejvhodnější nástroj použitý pro danou problematiku řešení bakalářské práce je dvoubřítá fréza ze slinutého karbidu, ozn. 2 – 2Z, která dosahuje při zvolených řezných podmínkách z pohledu obrobené dráhy, velikosti třísky a cenového zařízení lepších výsledků.

Použitá literatura

- [1] MARTÉNEK, Libor. Řezné síly při frézování vláknově vyztužených kompozitů. *VUT Brno* [online]. 2009. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/12696/final-thesis.pdf?sequence=-1>
- [2] KROUPA, Tomáš. Obrábění kompozitních materiálů [online]. 2014. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/15058/1/DP_kveten23.5_zaloha.pdf
- [3] KNÁPEK, Tomáš. Stanovení vhodných řezných podmínek pro frézování kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny z hlediska řezného nástroje a obráběného materiálu. 2020.
- [4] SCHORNÍK, Václav. Frézování rovinných ploch a drážek při obrábění kompozitního materiálu [online]. 2013. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/9325>
- [5] WANG, Haijin, Jie SUN, Jianfeng LI, Laixiao LU a Nan LI. Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, 82, 1517–1525.
- [6] *YG-1 CFRP Compression Router for Composite Materials* [online]. 24. únor 2023 [vid. 2023-12-08]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=ZMFrQTyBfvM>
- [7] PINKOWSKI, Grzegorz, Waldemar SZYMAŃSKI a Tomasz NOSOWSKI. Analyses of surface roughness in selected wood species after machining on a CNC woodworking centre. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW Forestry and Wood Technology*. 2012, 79, 164–169.
- [8] KNAP, Artur. Problematika vrtání do kompozitních materiálů [online]. 2020. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/server/api/core/bitstreams/732977ee-9ca8-4536-9527-c994a1226e30/content>
- [9] PILČÍK, Přemysl. Studium kompozitů s akrylátovou matricí [online]. 2012. Dostupné z: <https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/21584>
- [10] ING. JAN SEDLÁČEK. Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů | MM Průmyslové spektrum. *www.mmspektrum.com* [online]. [vid. 2023-12-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-kompozitnich-materialu>
- [11] P, Kolář, Mašek P, Zeman P a Vrabec M. Vývoj nástrojů pro obrábění vláknových kompozitů s termoplastickou matricí [online]. 2015 [vid. 2023-12-01]. ISSN 1801-9315 (online). Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/87418>
- [12] GRIGORIEV, Sergey N., Marina A. VOLOSOVA, Sergey V. FEDOROV, Mars S. MIGRANOV, Mikhail MOSYANOV, Andrey GUSEV a Anna A. OKUNKOVA. The Effectiveness of Diamond-like Carbon a-C:H:Si Coatings in Increasing the Cutting Capability of Radius End Mills When Machining Heat-Resistant Nickel Alloys. *Coatings* [online]. 2022, 12(2), 206. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:10.3390/coatings12020206
- [13] Frézy na kompozity. *Stopkové Frézy - nástroje pro obrábění dřeva, DTD, LTD, HPL a plastů* [online]. [vid. 2023-11-13]. Dostupné z: <https://www.stopkovefrezy.cz/blog/frezynakompozity>

- [14] BC. MARTIN VÁŇA. *Studium integrity povrchu při frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny* [online]. 2023. Dostupné z: [file:///D:/Nov%C3%A1%20slo%C5%BEka%20\(2\)/DP_Vana.pdf](file:///D:/Nov%C3%A1%20slo%C5%BEka%20(2)/DP_Vana.pdf)
- [15] GEIER, Norbert, Jinyang XU, Dániel István POÓR, Jan Hendrik DEGE a J Paulo DAVIM. A review on advanced cutting tools and technologies for edge trimming of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2023, 266, 111037. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2023.111037
- [16] MIKULA, Martin a Karel NĚMEC. Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken. *Brno: Vysoké učení technické [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php*. 2012.
- [17] MORÁVEK, David. Jméno a příjmení: Osobní číslo: Studijní program: Zadávající katedra: Akademický rok: [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/server/api/core/bitstreams/ad927160-36b9-4049-a7f6-8e161afcdc54/content>
- [18] How Durable and Reliable Is CFRP? *NitPro Composites* [online]. [vid. 2023-12-04]. Dostupné z: <https://www.nitprocomposites.com/blog/how-durable-and-reliable-is-cfrp>
- [19] ABRAHAM, Martin. Technologické aspekty opotřebení řezného nástroje [online]. 2008. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30290550.pdf>
- [20] LAUZIER, Jacob. *How to Identify and Reduce Tool Wear to Improve Quality* [online]. [vid. 2023-12-06]. Dostupné z: <https://www.machinemetrics.com/blog/tool-wear>
- [21] KNÁPEK, Tomáš. Stanovení vhodných řezných podmínek pro frézování kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny z hlediska řezného nástroje a obráběného materiálu [online]. 2020. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/160761>
- [22] WANG, Gong-Dong, Stephen Kirwa MELLY, Nan LI, Tian PENG a Yingchi LI. Research on milling strategies to reduce delamination damage during machining of holes in CFRP/Ti stack. *Composite Structures*. 2018, 200, 679–688. ISSN 0263-8223.
- [23] SAFRI, Syafiqah Nur Azrie Bt, MTH SULTAN a Mohammad JAWAID. Damage analysis of glass fiber reinforced composites. In: *Durability and life prediction in biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites* [online]. B.m.: Elsevier, 2019, s. 133–147. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081022900000076>
- [24] MELODY XIONG. *What is the Best Cutting Tools for Composite Materials?* [online]. [vid. 2023-11-13]. Dostupné z: <https://www.ukocarbide.com/blog/what-is-the-best-cutting-tools-for-composite-materials/>
- [25] SHEIKH-AHMAD, Jamal a AH SHAHID. Effect of edge trimming on failure stress of carbon fibre polymer composites. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. 2013, 13(2–3), 331–347. ISSN 1748-5711.
- [26] GAO, Teng, Y B ZHANG, Chang LI, Yiqi WANG, Yun CHEN, Qinglong AN, Song ZHANG, Hao Nan LI, Huajun CAO, Hafiz ALI, Zongming ZHOU a Shubham SHARMA. Fiber-reinforced composites in milling and grinding: machining bottlenecks and advanced

strategies. *Frontiers of Mechanical Engineering* [online]. 2022, 17. Dostupné z: doi:10.1007/s11465-022-0680-8

[27] COLLIGAN, K. a M. RAMULU. The effect of edge trimming on composite surface plies. *Manufacturing Review*. 1992, 5, 274–283.

[28] 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. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014, 66, 142–154. ISSN 1359-835X.