



Bakalářská práce

Vliv změny řezných podmínek na průvodní jevy při frézování kompozitního materiálu na bázi uhlíkových vláken.

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

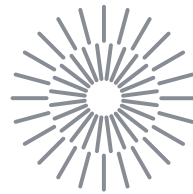
Matěj Pokorný

Vedoucí práce:

Ing. Tomáš Knápek

Katedra obrábění a montáže

Liberec 2024



Zadání bakalářské práce

Vliv změny řezných podmínek na průvodní jevy při frézování kompozitního materiálu na bázi uhlíkových vláken.

Jméno a příjmení:

Matěj Pokorný

Osobní číslo:

S20000207

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Zadávací katedra:

Katedra obrábění a montáže

Akademický rok:

2023/2024

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí poznatků o kompozitních materiálech a jejich obrábění, shrnutí poznatků o technologii frézování, vyhodnocování opotřebených řezných nástrojů, řezných sil a delaminace.
2. Volba vhodných řezných nástrojů a řezných podmínek pro frézování kompozitních materiálů plněných uhlíkovými vlákny.
3. Návrh metodiky prováděných experimentů.
4. Realizace experimentů.
5. Vyhodnocení experimentů. Vyjádření závislostí mezi opotřebením nástroje, řeznými silami, řeznými podmínkami a delaminací. Vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování práce:

tištěná/elektronická

Jazyk práce:

čeština

Seznam odborné literatury:

1. EHRENSTEIN, G. W. Polymerní kompozitní materiály, v ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
2. KOČMAN, K., PROKOP, K. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
3. AHMAD, J. Machining of polymer composites. Boston, MA: Springer US, 2009. ISBN 978-0-387-68619-6.
4. MÁDL, J., JERSÁK, J., HOLEŠOVSKÝ, F., kol. Jakost obráběných povrchů. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 179 s. ISBN 80-7044-539-4.
5. LIDAŘÍK, M. a kol. Epoxidové pryskyřice. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1983. 732 s.

Vedoucí práce:

Ing. Tomáš Knápek

Katedra obrábění a montáže

Datum zadání práce:

2. října 2023

Předpokládaný termín odevzdání: 24. května 2024

L.S.

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

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

Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

Vliv změny řezných podmínek na průvodní jevy při frézování kompozitního materiálu na bázi uhlíkových vláken

Anotace

Tato bakalářská práce měla za cíl prověřit, vlivy změn řezných podmínek na průvodní jevy při frézování kompozitního materiálu na bázi uhlíkových vláken.

Základní informace o obrábění a kompozitních materiálech jsou shrnuty v teoretické části této práce. Včetně nežádoucích jevů, které doprovází tyto materiály při obrábění.

Před samotným experimentem se nachází kapitola s názvem metodika experimentu. Zde jsou uvedeny informace a podmínky, za kterých probíhal samotný experiment.

Výsledky, k nimž se došlo, jsou rozebrány a vyhodnoceny v experimentální části. S následným rozbořem v diskuzi a závěru.

Klíčová slova

frézování, kompozitní materiál, uhlíková vlákna, řezné podmínky, delaminace

Effect of changing cutting conditions on the milling phenomena of carbon fibre composite material

Annotation

The aim of this bachelor thesis was to investigate the effects of changes in cutting conditions on the phenomena occurring during the milling of a carbon fibre composite material.

Basic information about machining and composite materials is summarized in the theoretical part of this thesis, including the undesirable phenomena that accompany these materials during machining.

Before the experiment itself, there is a chapter called 'Methodology of the Experiment.' This chapter provides the information and conditions under which the experiment was conducted.

The results obtained are discussed and evaluated in the experimental section, with subsequent analysis in the discussion and conclusion.

Keywords

milling, composite material, carbon fibre, cutting conditions, delamination

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Tomáši Knápkovi za rady, připomínky a čas, který mi věnoval. A také všem, kteří mi byli nápomocni při realizaci experimentu.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Teoretická část	11
2.1	Frézování	11
2.2	Kompozitní materiály	13
2.3	Uhlíková vlákna.....	13
2.4	Matrice.....	13
2.5	Uspořádání vláken v matrici.....	14
2.6	Obrábění kompozitního materiálu	14
2.7	Vliv orientace vláken na nástroj a třísku	16
2.8	Tvorba třísky v závislosti na orientaci vláken	18
2.9	Optimalizace frézování	20
2.10	Řezné síly při obrábění kompozitního materiálu.....	21
3	Metodika experimentu.....	23
3.1	CNC frézka DMG MORI CMX 600 V	23
3.2	Odsávací a filtrační zařízení POC9.....	24
3.3	Nástroje použité při experimentu.....	25
3.4	Vzorky použité při experimentu	26
3.5	Stanovené podmínky experimentu	27
3.6	Postup měření opotřebení	27
3.7	Postup měření delaminace	28
3.8	Postup měření sil.....	29
4	Realizace experimentu	31
4.1	Opotřebení nástroje.....	31
4.2	Delaminace	36
4.3	Řezné síly.....	43
5	Diskuze	49
6	Závěr.....	52
	Použitá literatura.....	53
	Seznam příloh	55

Seznam zkratek

Zkratka	Popis zkratky	Jednotky
SK	Slinutý karbid	
γ	Úhel čela	[°]
r_β	Poloměr řezné hrany	[mm]
D	Průměr	[mm]
t	Hloubka řezu	[mm]
v_c	Řezná rychlost	[m/min]
F	Výsledná síla	[N]
F_x	Síla působící ve směru x	[N]
F_y	Síla působící ve směru y	[N]
F_z	Síla působící ve směru z	[N]
F_O	Obvodová síla	[N]
F_r	Radiální síla	[N]

1 Úvod

Kompozitní materiály představují jeden z dalších druhů materiálů, které se svými vlastnostmi odlišují od ostatních známých materiálů jako je ocel, litina a další materiály často využívané ve strojírenství. Hlavní znaky kompozitních materiálů jsou hmotnost a pevnost. Díky těmto přednostem se dobře uplatňují v leteckém a kosmickém průmyslu, popřípadě ve vrcholovém sportu. V masovějším použití brání jejich vysoké pořizovací náklady.

Kompozitní materiály se skládají minimálně ze dvou složek: matrice a výstužná vlákna. Tyto dvě složky mají naprosto odlišné vlastnosti. Výstužná vlákna se starají o pevnost a matrice, plní úkol spojení vláken, a tím vytváří heterogenní materiál.

Jako výstužná vlákna se často používají uhlíková, nebo skleněná vlákna, popřípadě přírodní vlákna (např. bambusová vlákna).

Existuje mnoho druhů matic od polymerních matic, což jsou různé termoplasty a reaktoplasty. Také se můžeme setkat s kovovými nebo keramickými maticemi.

Přestože se při výrobě snažíme vyrobit daný díl co nejvíce podobný konečnému dílu, nevyhneme se nutnosti vytvářet do dílu nějaké montážní otvory, ať už se jedná o různé díry, drážky a tak podobně.

Delaminace je nežádoucím jevem, který provází obrábění kompozitních materiálů. Stručně řečeno, jedná se o vlákna, která nebyla odříznuta na hraně materiálu.

Hlavním cílem této bakalářské práce je rozebrat problematiku obrábění kompozitních materiálů. V první části budou popsány poznatky o frézování a výrobě kompozitních materiálů. A následně budou popsány jevy, k nimž dochází při obrábění kompozitních materiálů.

Druhá část bude věnována podrobněji popisu postupu výroby materiálu z uhlíkových vláken a epoxidové pryskyřice až po podmínky experimentu. Ty se zaměřují na vliv řezných podmínek a řezné geometrie při obrábění kompozitního materiálu. Pouze okrajově, bude měřeno opotřebení nástroje po určité době obrábění. Dále bude kladen důraz na velikost delaminace obráběného povrchu. V poslední fázi experimentu bude zjišťována velikost řezných sil působících při obrábění kompozitního materiálu vyrobeného z uhlíkových vláken a epoxidové pryskyřice.

Ve třetí části v kapitole Realizace experimentu budou zaznamenány a vyhodnoceny naměřené hodnoty jednotlivých měření, které budou posléze zakresleny do grafů. S následným porovnáním a zhodnocením jednotlivých dat.

Cílem je porovnat a následně zvolit vhodný nástroj v kombinaci s řeznou rychlostí. V neposlední řadě volit vše tak, aby poškození povrchu výsledného obrobku bylo co nejmenší.

2 Teoretická část

V teoretické části se bude nacházet informace o obrábění, konkrétně frézování. Dále se budeme věnovat tématu kompozitních materiálů, jejich výrobě, druzích atd. Pak se dostaneme k problémům frézování kompozitních materiálů. Následně budeme zkoumat vlivy orientací vláken na obráběný povrch, tvorbu třísky z kompozitního materiálu a naposledy se zaměříme na průběh řezných sil.

2.1 Frézování

Frézování je druh obrábění, při němž koná hlavní pohyb fréza a vedlejší pohyby vykonává obrobek (posuv a přísuv v podélném a příčném směru). Takto se obrábějí rovinné a tvarové plochy. U tvarových ploch má fréza negativní tvar výsledného tvaru. [1]

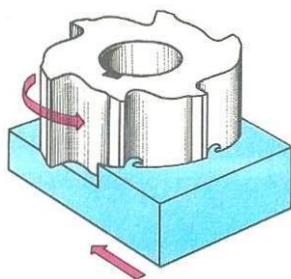
Nástroje pro frézování

Nástroj, jímž se frézuje se jmenuje fréza, která koná rotační pohyb. Většinou se jedná o osově symetrický nástroj, který je po obvodě osazen břity. Fréza může obsahovat jeden břit, ale i několik břitů. Právě díky břitům dochází k úběru materiálu. Nikdy nedojde k tomu, že bude daný zub celou dobu v záběru. Zuby se v záběru pravidelně střídají způsobeným rotačním pohybem frézy. [1]

Způsoby frézování

1) Čelní frézování

Fréza je kolmá na plochu. Primární operace, pro kterou se tento způsob používá, je pro rovinné plochy (Obr. 1). V porovnání s válcovými frézami je efektivnější. [1]



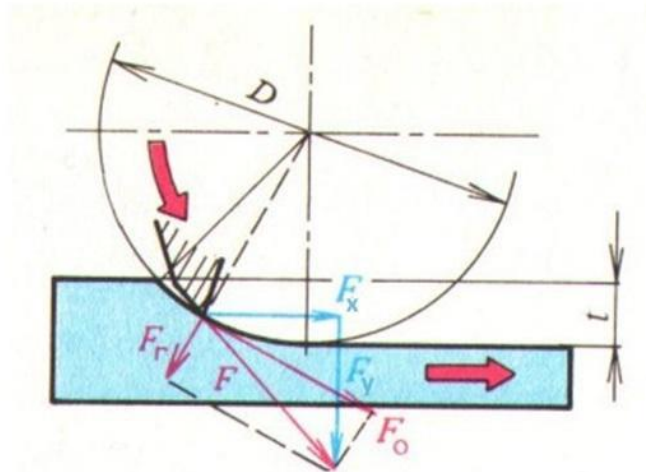
Obr. 1 Čelní frézování [2]

2) Válcové frézování

a) Sousedné

Směr otáčení frézy je shodný se směrem posuvu. Při začátku záběru je tříška maximální a končí na nule. Výsledná síla působí směrem dolů (tj. do stolu) (Obr. 2). Negativem

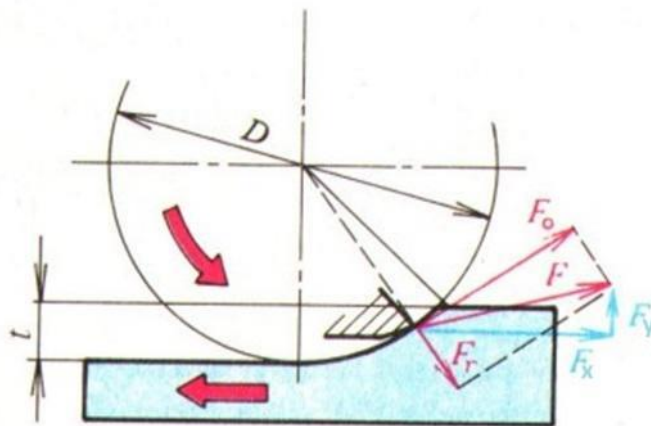
tohoto způsobu je vznik rázů při záběru zubů (lze zmírnit při použití frézy se šikmým ozubením). [1]



Obr. 2 Sousedné frézování [3]

b) Nesousledné

Směr otáčení frézy je opačný se směrem posuvu. Velikost třísky se vyvíjí od nuly po maximální velikost. Síla zde působí opačným směrem, než je tomu při sousledném frézování (směrem vzhůru) (Obr. 3). Nevýhodou je špatný vstup zubu do materiálu (zub klouže po ploše). [1]



Obr. 3 Nesousledné frézování [3]

Druhy fréz

Frézy se dělí podle různých velikostí a tvarů. Mezi základní frézy patří válcové, čelní, kotoučové a tvarové. Popřípadě frézovací hlava, což je fréza větších rozměrů složená z vyměnitelných břitových destiček. [1]

2.2 Kompozitní materiály

Jde o kombinaci dvou a více materiálů. Tyto složky mají odlišné mechanické a chemické vlastnosti. Za přenos napětí a soudržnosti celého materiálu zodpovídá matrice, která může být z epoxidových reaktoplastů a termoplastů. Jako výztuž se dají používat uhlíková, skleněná, nebo přírodní vlákna. [4] Vlákna zlepšují mechanickou a tribologickou vlastnost. [5] Výsledkem této kombinace je získat materiál s výbornými mechanickými vlastnostmi, s nízkou hustotou, odolností proti korozi a levnou výrobou. Tento materiál se hojně využívá v leteckém a kosmickém průmyslu. [6]

2.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou vlákna obsahující sloučeniny uhlíku. Vyznačují se vysokou pevností a tuhostí, ale naopak nízkou tažností. [4] Průměr vláken se pohybuje okolo 5 μm až 10 μm . [5]

Výroba

Tato vlákna se vyrábí nejčastěji ze tří materiálů. Jde o syntetické a organické suroviny konkrétně PAN vlákna, z celulózy popřípadě ze smoly. Proces, při němž dojde k přeměně suroviny na uhlík, se nazývá karbonizace. Během tohoto procesu dochází ke štěpení všech ostatních prvků kromě uhlíku. Celý tento proces probíhá za nepřítomnosti kyslíku. [4] Během procesu dochází k dalším reakcím. Čistota uhlíku je dána teplotou, na kterou se při tomto procesu dostaneme. Při teplotě 1200 K (926,85°C) získáme uhlík v 90 hm% (hmotnostní procento), oproti tomu při teplotě 1600 K (1326,85°C) můžeme získat více jak 99 hm% uhlíku. [6]

2.4 Matrice

Jako matrice se používají termoplasty, reaktoplasty popřípadě elastomery. [9] Cílem matrice je spojit vlákna, rozložit napětí, zajistit požadovaný tvar a v neposlední řadě ochrana vláken před vlivy okolí. [4, 9] Důležité je použít takovou matici, aby bylo zajištěno úplné smáčení vláken (použití vhodné viskozity matrice) bez vzduchových bublin. [4]

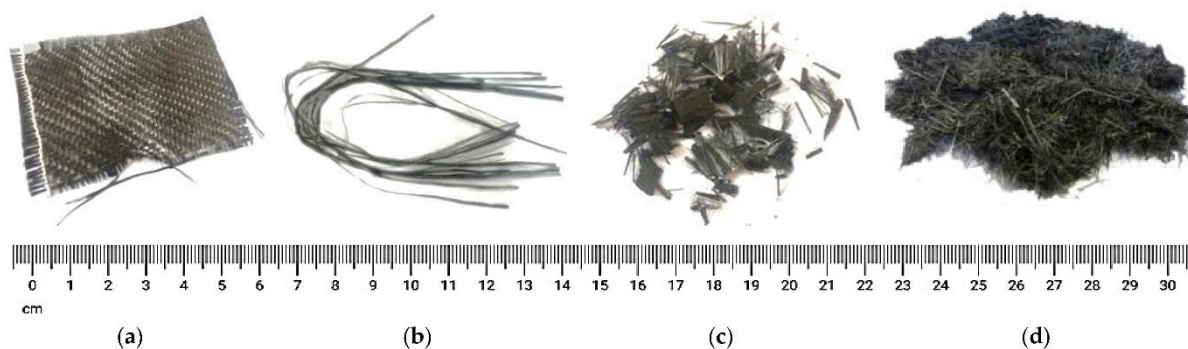
Epoxidová pryskyřice

Epoxidové pryskyřice spadají do kategorie reaktoplastů. Vyznačují se dobrými mechanickými vlastnostmi a vysokou rozměrovou stálostí. [4, 9] Běžně se vyskytují v kapalném stavu, zvlášť pryskyřice a tvrdidlo. Při přípravě je třeba smíchat v daném poměru (epoxidové číslo) pryskyřici a tvrdidlo. K vytvrzení této směsi není potřeba vykonávat žádné speciální kroky. Směs je možné vytvrzovat jak za studena, tak za tepla. [4]

2.5 Uspořádání vláken v matrici

Vlákna se mohou v dílu nacházet v různém tvaru (Obr. 4): [7]

- a) Tkaná rohož
- b) Dlouhý závin
- c) Sekaná
- d) Jemně sekaná



Obr. 4 Druhy uhlíkových vláken [5]

Výroba kompozitních materiálů: [4]

- 1) Příprava pryskyřice
- 2) Prosycení vláken
- 3) Tvarování do požadovaného tvaru
- 4) Vytvrzení
- 5) Opracování

Rozdělení dle zpracování kompozitního materiálu: [4]

- a) Ruční
- b) Částečně automatizované
- c) Zcela automatizované
- d) Kontinuální
- e) Speciální

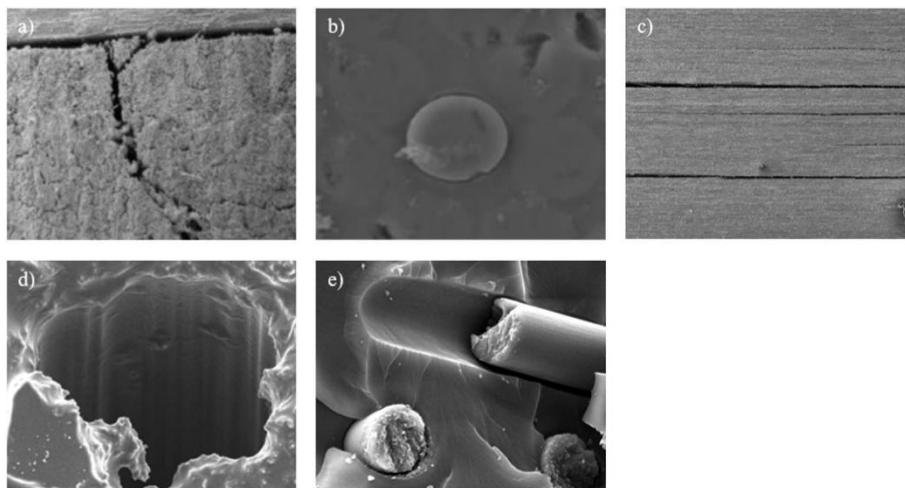
2.6 Obrábění kompozitního materiálu

Výroba dílů z kompozitního materiálu je považována za přesnou. Je zapotřebí tyto díly opracovat. Jedná se o operace, pomocí kterých docílíme rozměrové tolerance, tvorby otvorů pro montáž případně výroby složitých tvarů.[10] Hlavním problémem při obrábění kompozitního materiálu jsou jejich anizotropní a nehomogenní vlastnosti. Tento rozdíl je zcela odlišný oproti běžným kovům. Při obrábění těchto materiálů jsou vlákna (v našem případě uhlíková vlákna) těžko odstranitelná z důvodů vysoké pevnosti a abrazivní mechanické vlastnosti. Nevýhodou matrice je její křehkost, a proto snadno praská. Ačkoliv se většina kompozitních materiálů vyrábí z laminování pregregů (pryskyřice a výztuž) v makroměřítku. Často dochází k mezivrstevovému lomu. To zapříčiní slabá pevnost vazby a vede k závažným poškozením při obrábění. Jmenovitě se jedná o vytržení vláken, oddělování, ořepy a

delaminace. [11] Další nepříznivou vlastností těchto materiálů je špatná tepelná vodivost. Pro zabránění těchto nežádoucích jevů a vlastností je zapotřebí úprava některých parametrů jako jsou: řezné podmínky a geometrie nástroje. [5]

Nežádoucí jevy provázející obrábění

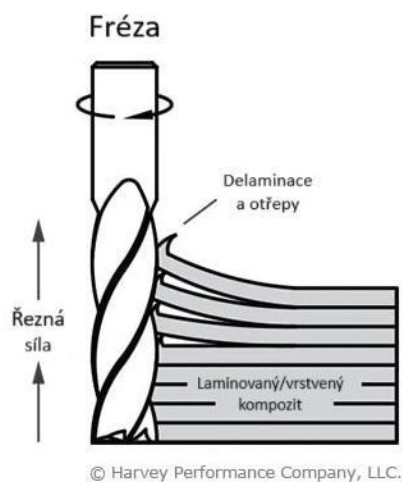
Nejčastějším poškozením provázející obrábění kompozitního materiálu je delaminace, vytržení vláken, neodříznutí vláken, mikrotrhliny, nevhodná drsnost povrchu a vypálení matrice (Obr 5). Těchto jevů se ve většině případů dá vyvarovat úpravou geometrie nástroje. Popřípadě úpravou parametrů ovlivňující řeznou rychlost, rychlost posuvu a hloubku řezu. [10]



Obr. 5 Typy přetržení kompozitu a) praskání matrice, b) odlepení vláken matrice, c) delaminace, d) vytahování vláken, e) praskání vláken [12]

Delaminace

Tento jev se nejčastěji objevuje v kompozitních materiálech. Je vyvolána v důsledku výrobních vad, následnými úpravami (frézování, vrtání), nebo při působení provozních vlivů. Mezi provozní vlivy patří rázové a tepelné zatížení, nebo únava materiálu. [13] Delaminaci způsobuje oddělení vrstev laminátu. To se projeví u horní nebo u spodní hrany (Obr. 6). [10]



Obr. 6 Schéma znázorňující delaminaci [14]

Určování obrobitelnosti kompozitních materiálů se provádí především analýzou těchto bodů. [10]

- a) Řezné síly působící na nástroj a na laminovaná vrstvy
- b) Řezné momenty
- c) Drsnost obrobeného povrchu
- d) Delaminace vrstev
- e) Vlastnosti neodebraných vláken
- f) Opotřebení nástroje

Chlazení při obrábění

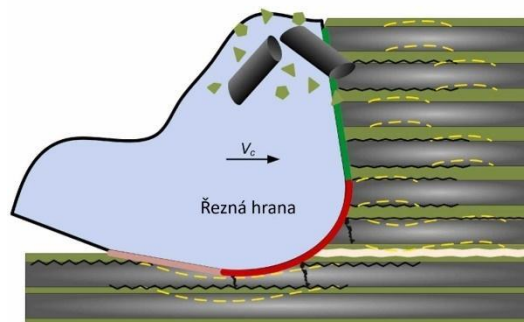
Při kontaktu nástroje s kompozitním materiálem dochází ke zvýšení teploty. To následně změní mechanické vlastnosti a strukturu materiálu. Zvýšení teploty může vést k tepelnému prasknutí a delaminaci. Vzhledem k velkému obsahu uhlíkových vláken běžně dochází k adhezi mezi nástrojem a obrobkem. [15] I když primárně má chladicí kapalina odvádět teplo, tak přináší i jiné výhody, jako je snížení opotřebení nástroje, a tím zvýšení jeho životnosti. Rovněž snižuje tření mezi nástrojem a obrobkem, zmenšuje řezné síly a zlepšuje výsledný povrch. [16] Ačkoliv chlazení pozitivně ovlivňuje proces obrábění, v praxi se nepoužívá, protože absorbuje vodu obsaženou v chladivu. Kompozitní materiály jsou nepříznivě ovlivňovány vlhkostí: hlavně matrice. To se projevuje zhoršením mechanických vlastností obrobku. Jinak se chová matrice z termoplastu a jinak z epoxidové pryskyřice. Epoxidová pryskyřice se stává měkčí a zhoršuje adhezi mezi vlákny. [17]

2.7 Vliv orientace vláken na nástroj a třísku

Na toto téma bylo provedeno mnoho studií, numerických simulací a hlavně experimentů. Bylo dospěno k závěru, že opotřebení nástroje i tvorba třísky závisí na orientaci vláken v kompozitním materiálu. Většina těchto studií, experimentů a simulací se zaměřuje na vlákna pod úhly 0° , 45° , 90° a 135° . [11]

Orientace vláken pod úhlem 0°

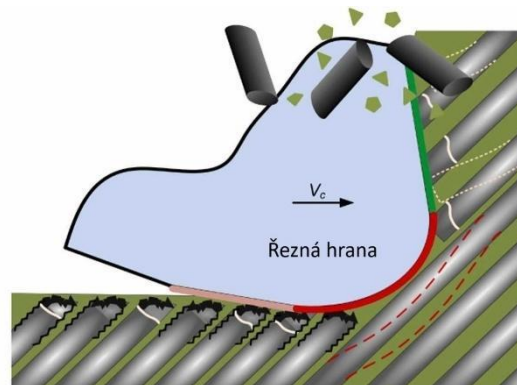
Při experimentu docházelo při tomto úhlu k nejmenšímu opotřebení nástroje ve všech zkoumaných úhlech. Je to vysvětleno tím, že dochází k minimálním interakcím mezi břitem a uhlíkovými vlákny. Interakce je zde minimalizována pružením, popřípadě odskakováním obnažených vláken (Obr. 7). [18]



Obr. 7 Úběr materiálu při 0° [16]

Orientace vláken pod úhlem 45°

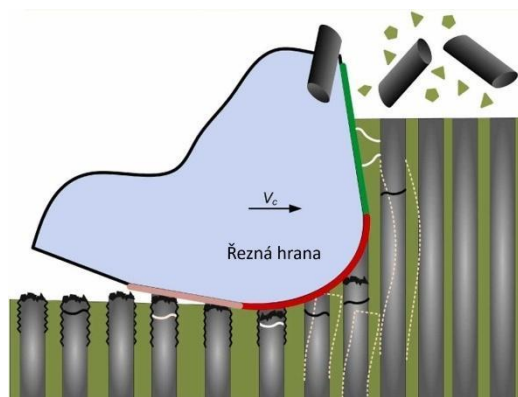
Zde byla vyzorována vyšší frekvence výskytu obnažených vláken o větší velikosti, než tomu bylo při 0°, taktéž působí proti směru řezu. Tím docházelo k většímu opotřebení hřbetu nástroje. Délka obnažených vláken dosahovala délky 6 μm (Obr. 8). [18]



Obr. 8 Úběr materiálu při 45° [16]

Orientace vláken pod úhlem 90°

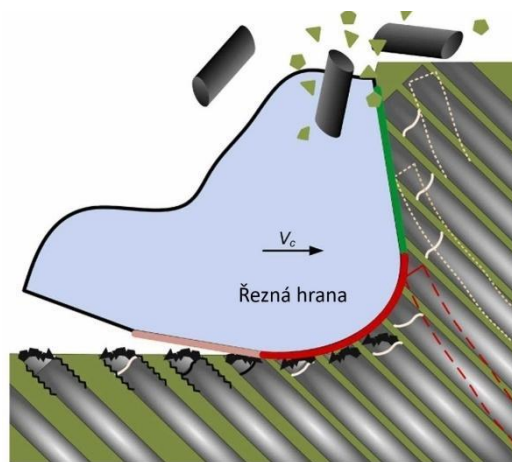
Vlákna pod úhlem 90° nejvíce opotřebovávala břit, což má přímou souvislost opět s interakcí uhlíkových vláken. Tato skutečnost negativně ovlivnila opotřebení poloměru břitu. Nejvíce byla poškozená plocha hřbetu (Obr. 9). [18]



Obr. 9 Úběr materiálu při 90° [16]

Orientace vláken pod úhlem 135°

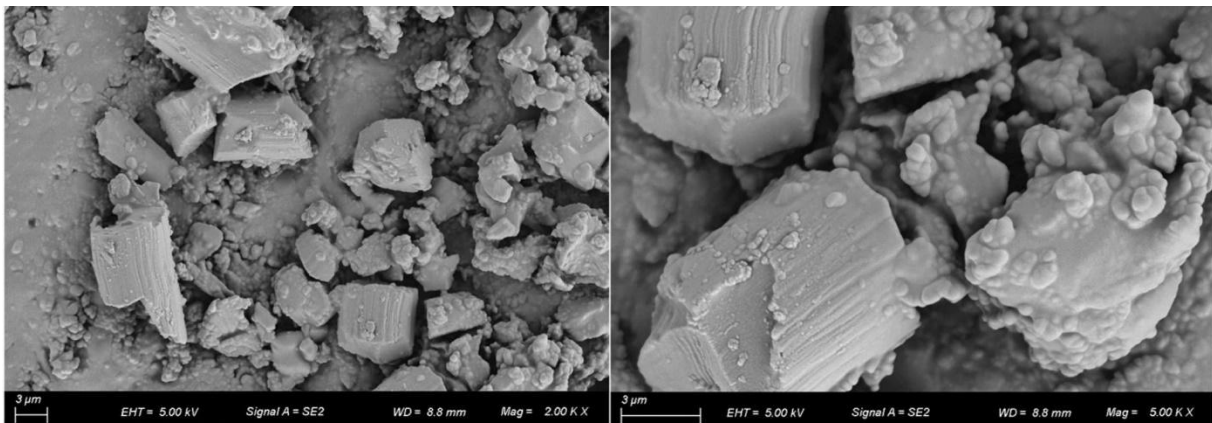
Zde dochází ve velké míře k vytrhování vláken, a to způsobuje, že se tříška utváří prasknutím. To se projeví snížením interakce s materiálem a nástrojem. V porovnání s úhly 45° a 90° bylo vyzorováno menší opotřebení řezného nástroje. Stejně tak docházelo k opotřebení boků nástroje, jen ne v takové míře jako u již zmíněných úhlech (Obr. 10). [18]



Obr. 10 Úběr materiálu při 135° [16]

2.8 Tvorba třísky v závislosti na orientaci vláken

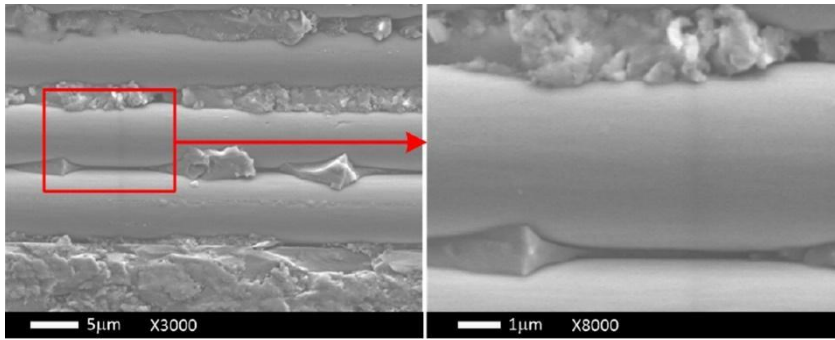
Při zjišťování těchto poznatků o tvorbě třísek, bylo zjištěno, že při obrábění materiálu za sucha, vznikaly dva druhy třísek. Celé obrábění bylo zkoumáno pomocí mikroskopické morfologie. První druh třísky byly krátké úlomky vlákna. Druhý druh třísky byla zrnitá pryskyřicová matrice. Při 5000x zvětšení vyplynulo, že k úběru materiálu docházelo k ulamování vláken. Nikoli k plastické deformaci vláken a řezání matrice (Obr. 11). [16]



Obr. 11 Mikrosnímky třísky při frézování za sucha [16]

Orientace vláken pod úhlem 0°

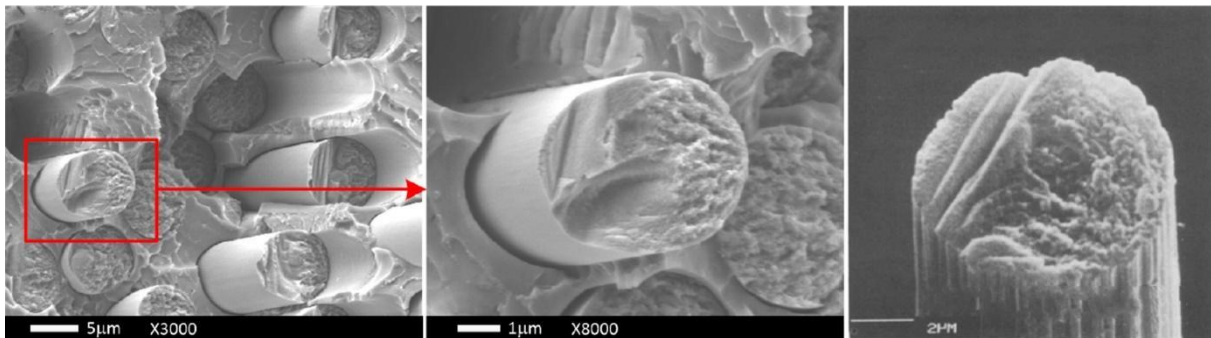
Čelo nástroje působí na vlákna tak, že je podélně stlačuje. V důsledku toho se mírně ohne a odloupne od matrice. V důsledku působení boční síly na řeznou hranu v oblasti hrotu, dochází k radiálnímu lomu uhlíkových vláken (Obr. 12). Kontakt vláken s nástrojem vyvolává deformaci. Nástroj se v této fázi chová tak, že se na daném materiálu neudrží a odskakuje. [16]



Obr. 12 Oddělení vláken od matrice [19]

Orientace vláken pod úhlem 45°

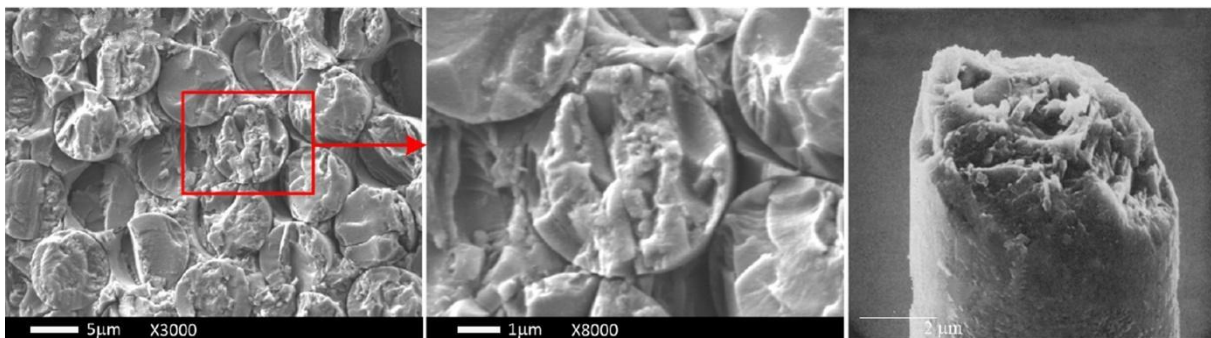
Při této orientaci dochází k překročení radiální meze pevnosti na řezné hraně. Působení tlakového a smykového zatížení má za následek zlomení vláken. Taktéž zde dochází ke vzniku mezifázových trhlin (Obr. 13). Tyto trhliny vznikají tak, že horní část vláken se oddělí podél čela nástroje a spodní část je namáhaná ohybem. [16]



Obr. 13 Lom vláken vyvolaný ohybem [19]

Orientace vláken pod úhlem 90°

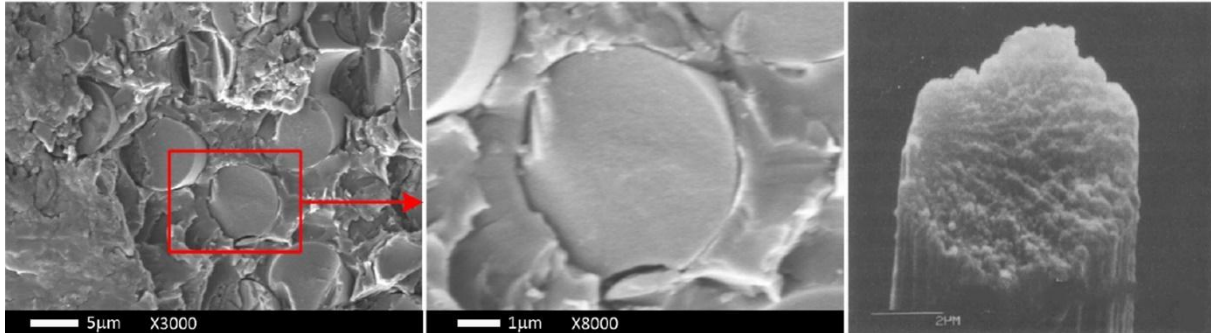
V tomto případě jsou vlákna namáhaná bočním tlakem. Jelikož máme informace, že radiální pevnost uhlíkových vláken je větší než pevnost axiální (Obr. 14). V tomto případě je deformace ohybem méně pravděpodobná z důvodu malé lomové plochy. Povrch po obrábění dosahuje nízké hodnoty drsnosti. [16]



Obr. 14 Lom vláken vyvolaný smykem [19]

Orientace vláken pod úhlem 135°

Zde je hlavní příčinou lomu vlákna převážně ohybová deformace, která je provázená třením vláken po čele nástroje. To zapříčiní silné vytržení vláken a oddělení v podpovrchové části kompozitu, čímž nelze určit, kde dojde k lomu vlákna (Obr 15). Je vyzorována vysoká drsnost povrchu. Nedochází zde k odskoku nástroje, velikost tření není tak velká. [16]



Obr. 15 Lom vláken vyvolaný tlakem [19]

2.9 Optimalizace frézování

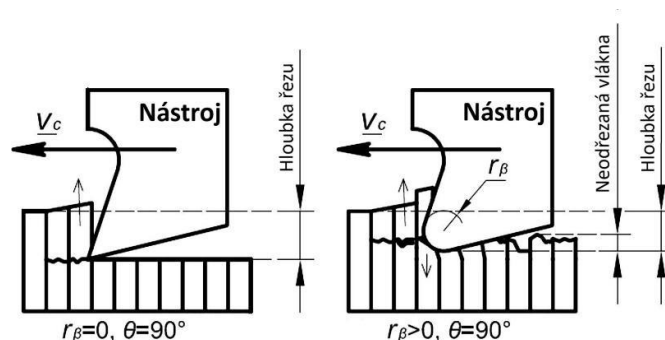
Tato kapitola se zaměřuje na úpravu nástroje a rezných podmínek, ale i na schopnost eliminovat nežádoucí jevy, které provází obrábění. [20]

Optimalizace rezných podmínek

Formou studií a experimentů bylo zjištěno: zlepšení a zmenšení poškození povrchu lze docílit optimalizací parametrů. Konkrétně se jednalo o parametry otáček vřetene a současně snížení rychlosti posuvu. Ovšem tyto parametry úplně dobře nezabránilly odstranění delaminace a prasklinám materiálu. [20]

Optimalizace nástroje

Určování těchto parametrů je zjišťováno převážně experimentální metodou. Tyto optimalizace mají ovšem omezené použití, například závisí na úhlu obráběných vláken. Například změnou úhlu čela a úhlu hřbetu lze potlačit poškození povrchu materiálu. Zmenšení poloměru rezné hrany též vede k potlačení poškození povrchu materiálu (Obr. 13). Jako poslední zmíněný úhel je úhel šroubovice, touto optimalizací je možné dosáhnou zmenšení drsnosti povrchu, ale zároveň roste poškození povrchu. [20]



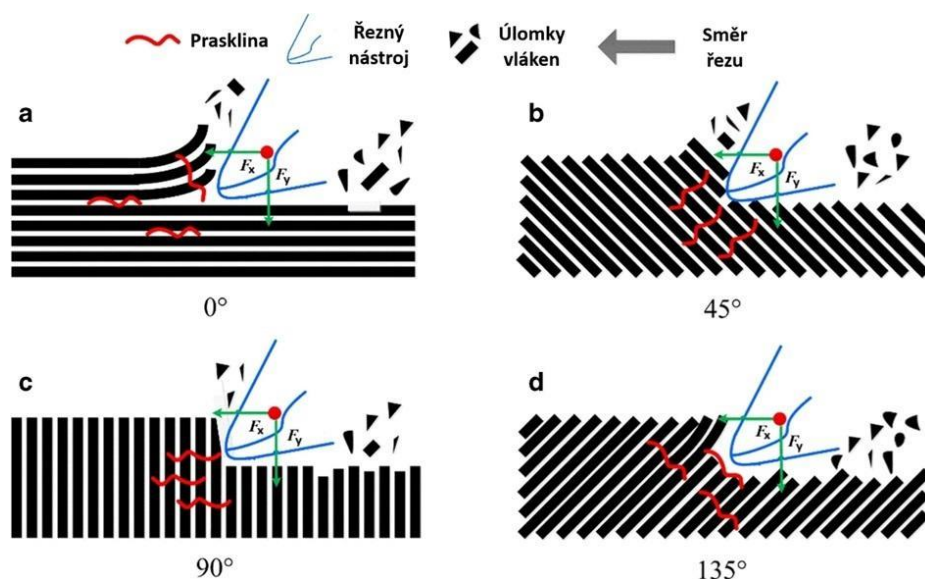
Obr. 16 Geometrický model mechanismů odvodu třísek [8]

Další optimalizace jsou vybrány tak, aby vedly k pozitivnímu odebrání kompozitního materiálu. Bylo zjištěno, že použití vícebřité frézy a současně snížení hloubky a šířky řezu, pozitivně ovlivnilo zlepšení vlastností obráběného povrchu. Tohoto efektu je docíleno, díky tomu, že se nástroj skládá z velkého množství mikrořezných hran. Zlepšení bylo pozorováno u ořepů a trhlin. Těchto jevů se však úplně nezabýváme, jelikož jsou vyvolávány ohybovou deformací vláken mimo rovinu řezu. [20]

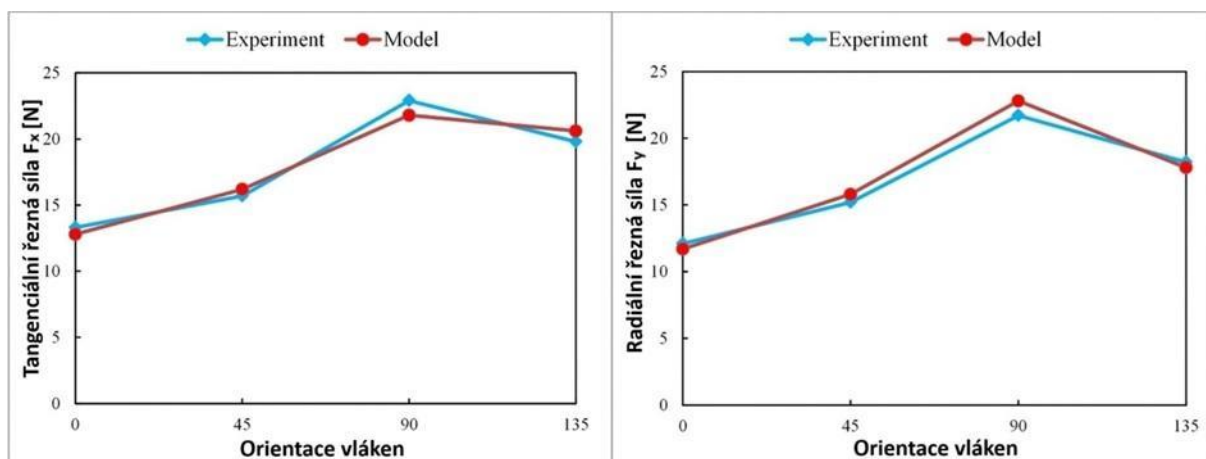
2.10 Řezné síly při obrábění kompozitního materiálu

Největší řezné síly při obrábění kompozitního materiálu dosahujeme při úhlu vláken 90° , to už neplatí o axiální síle. Naopak u malých sil dosahujeme při úhlech vláken 0° a 45° . To je způsobeno tím, že jsou vlákna stlačena pod úhlem 0° a namáhaným tahem při 45° . U úhlu 135° nastává pravý opak toho, co nastalo při úhlu 45° . Vlákná jsou stlačena podle směru vláken (Obr. 17). [18]

Při zjišťování složky řezné síly F_x a složky řezné síly F_y byla provedena simulace a následně experiment. Chyba mezi těmito dvěma řeznými silami byla menší než 5 %. Hodnoty byly zapsány do grafu (Obr. 18). Z toho jsou patrné hodnoty, které se nejdříve zvyšovaly až dosáhly zlomové hodnoty úhlu 90° a začaly klesat. Dále velmi záleželo na zvolení řezných parametrů jako je posuv na zub, radiální hloubka řezu a otáčky vřetená. [21]



Obr. 17 Mechanismus úběru materiálu [18]



Obr. 18 výsledků modelu a experimentu [21]

3 Metodika experimentu

Hlavním úkolem této práce je zjistit vlivy při změně řezných podmínek na průvodní jevy při frézování kompozitního materiálu na bázi uhlíkových vláken. V kapitolách budou podrobně rozebrány přístroje, které byly použity při experimentu. Dále nástroje a postup výroby vzorků. Měření probíhalo v kampusu Technické univerzity v Liberci, v budově L, v laboratoři katedry obrábění a montáže.

3.1 CNC frézka DMG MORI CMX 600 V

Pro obráběcí operace této bakalářské práce bylo zvoleno obráběcí centrum DMG MORI CMX 600 V, na němž byly provedeny veškeré obráběcí operace, které bylo třeba provést v experimentální části.



Obr. 19 DMG MORI CMX 600 V [22]

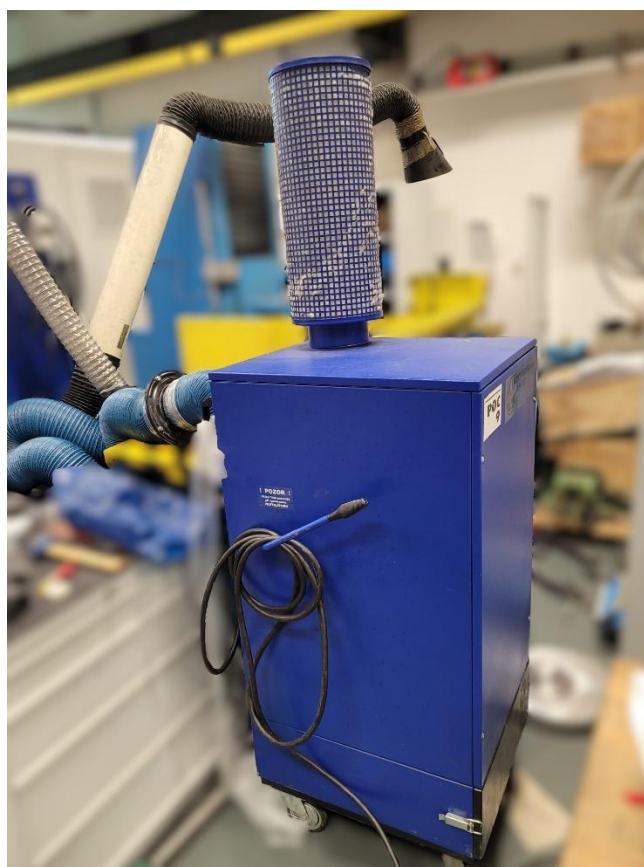
Tab. 1 Technické parametry CNC frézky DMG MORI CMX 600 V

Typ stroje	Obráběcí centrum vertikální
Výrobce	DMG MORI
Typ	CMX 600 V
Technické parametry vřetene	
Max. otáčky vřetene [ot./min]	12 000
Výkon (40/100 % DC) [kW]	13/9
Max. točivý moment (40/100 % DC) [Nm]	83/57
Velikost pracovní plochy	
Posuv v ose X [mm]	600
Posuv v ose Y [mm]	560
Posuv v ose Z [mm]	510
Rychloposuv [m/min]	30/30/30
Technické parametry stolu	
Pracovní plocha stolu [mm]	900 × 560
Nosnost stolu [kg]	600

Informace o nástroji	
Rozhraní nástroje	SK40/BT40*/CAT40*
Kapacita pro uložení nástrojů	30 (60*)
Rozměry stroje	
Šířka × hloubka × výška stroje [m]	1,990 × 2,757 × 2,935
Hmotnost zařízení [kg]	5 000

3.2 Odsávací a filtrační zařízení POC9

Pro zamezení rozptylu prachových částic vznikajících při obrábění kompozitních materiálů bylo zapotřebí použít odsávací a filtrační zařízení POC9, které se přivedlo do obráběcího zařízení.



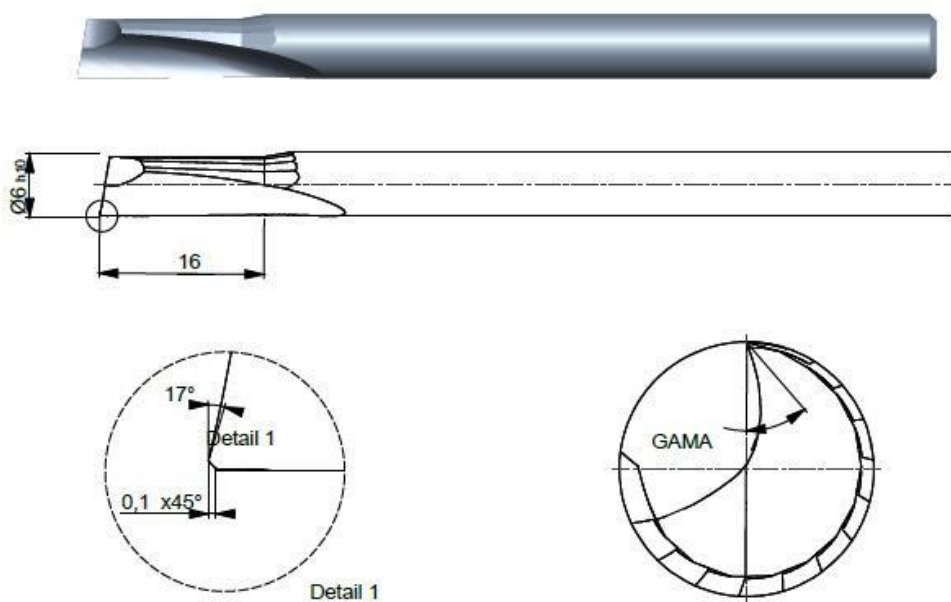
Obr. 20 Odsávací zařízení

Tab. 2 Technické parametry Odsávacího zařízení POC9 [Štítek]

Typ stroje	Odsávací a filtrační zařízení
Typ	POC9
Technické parametry	
Celkový tlak na sání [Pa]	1200
Množství odsávaného vzduch [m ³ /h]	900
Příkon elektromotoru [kW]	0,75
Otáčky elektromotoru [1/min]	2840
Hlučnost [dB]	65
Rozměry stroje	
Šířka × výška × hloubka [m]	0,6 × 1,4 × 0,75
Hmotnost zařízení [kg]	100

3.3 Nástroje použité při experimentu

Jako nástroj byly zvoleny tři jednozubé nástroje. Nástroje nelze na první pohled od sebe rozlišit. Po bližším zkoumání si lze všimnout rozdílů v úhlu čela, který nabývá hodnot 20°, 30° a 40°. [Tab. 4] Jako nástroje byly zvoleny jednozubé nástroje ve třech modifikacích. Bez speciálních úprav (materiál, povlak).



Obr. 21 Obráběcí nástroj

Tab. 5 Vlastnosti použitého řezného nástroje

	Varianta I.	Varianta II.	Varianta III.
Název výkres	F6140.6.V6.81.16.Z1	F6140.6V6.81.16.Z1	F6140.6V6.81.16.Z1
Číslo Varianty	UC-59546 TUL	UC-59547 TUL	UC-59548 TUL
Úhel gama [°]	40	30	20
Materiál	SK	SK	SK
Povlak	Bez povlaku	Bez povlaku	Bez povlaku
Doporučené řezné podmínky			
Řezná rychlost [m/min]	150	150	150
Posuv na zub [mm]	0,05	0,05	0,05
Otáčky [1/min]	7955	7955	7955
Rychlost posuvu [mm/min]	398	398	398

3.4 Vzorky použité při experimentu

Vzorky, obráběné desky byly vytvořeny spojením matrice a uhlíkových vláken. Vyráběny byly metodou vakuové infuze.

Matrice

Jako matrice byla použita dvousložková pryskyřice. První složkou byla epoxidová pryskyřice LG120 od firmy GRM Systems s.r.o.. Druhou složkou, což je tvrdidlo, bylo HG 356 od totožné firmy.

Uhlíková vlákna

Výztuž z uhlíkových vláken byla ve formě tkaniny s keprovou vazbou. Konkrétně se jedná o tkaninu TDS CCA 600 24K. Přímou určenou pro použití s epoxidovou pryskyřicí. Obsahující v jednom pramenu 24 000 vláken ve vazbě 2/2 a s plošnou hustotou 600 g/m².



Obr. 22 Obráběný materiál

3.5 Stanovené podmínky experimentu

Podmínky experimentu budou stanoveny tak, že budeme obrábět dvěma řeznými rychlostmi 150 m/min a 200 m/min. Nástroj bude kontrolován každou 1 minutu bříty v řezu. Celkově bude provedeno 10 kontrolních měření. Při nich bude měřeno opotřebení nástroje, delaminace na vrchní a spodní straně materiálu. V neposlední řadě budou měřené složky řezných sil. Tento postup proběhne u všech tří nástrojů.

3.6 Postup měření opotřebení

Měření bude probíhat v několika krocích. Nejprve nástroj vyjme z obráběcího centra podle kritérií v kapitoly 3.5 a umístíme na stůl mikroskopu. Protože mikroskop je spojený se stolním počítačem, tak jeho pohyby budou ovládány pomocí softwaru v počítači. Úkonem bude zaostřit hřbet nástroje a vytvořit snímek. Na snímku budou provedena daná měření. To proběhne tak, že proložíme přímkou na konci původního hřbetu a od této přímky naměříme hodnotu aktuálního konce hřbetu. Poté zapíšeme hodnoty do tabulky pro následné vyhodnocení.

3D laserový skenovací mikroskop KEYENCE VK-X1000

K měření opotřebení hřbetu nástroje a delaminace byl zvolen laserový mikroskop KEYENCE VK-X1000. Jde o bezkontaktní měření. K měření můžeme využít tři druhy skenování jmenovitě: laserově konfokální, s proměnlivě ohniskovou vzdáleností a interferometrii bílého světla. Pracovní plocha, s kterou pracuje je 50 × 50 mm. Dosahuje přesnosti měření 0,01 nanometrů, též je vybaven automatickým zaostřením.



Obr. 23 KEYENCE VK-X1000

Tab. 3 Technické parametry KEENCE VK-X1000

Typ stroje	3D Laserový skenovací mikroskop
Výrobce	KEYENCE
Typ	VK-X1000
Technické parametry	
Celkové zvětšení	28800×
Pole obrázku [μm]	11 až 7398
Počet snímků za sekundu [Hz]	4 až 125 , 7900
Princip měření	
Optická soustava	Štěrbínový konfokální optický systém, proměnlivost ohniska
Prvek pro příjem světla	16bitové snímání: fotonásobič, barevný snímač CMOS s vysokým rozlišením
Metoda skenování	Automatické nastavení horní/dolní meze, rychlé nastavení intenzity laserového světla (AAGII), automatická detekce a opětovné skenování v případě špatného odrazu (dvojitě skenování)
Měření výšky	
Rozlišení displeje [nm]	0,5
Dynamický rozsah [bit]	16
Rozsah pořizování dat výšky	0,7 milionu kroků
Přesnost [μm]	0,2 + L / 100 nebo lepší
Měření šířky	
Rozlišení displeje [nm]	1
Přesnost [%]	± 2
Konfigurace objektů v XY	
Ruční: Rozsah pohybu [mm]	70 × 70
Automatická: Rozsah pohybu [mm]	100 × 100
Laserový zdroj světla pro měření	
Vlnová délka [nm]	404 (Fialový polovodičový laser)
Maximální výstupní výkon [mW]	1
Laserová třída	Laserové zařízení třídy 2 (DIN EN60825-1)

3.7 Postup měření delaminace

Měření delaminace proběhne odebráním materiálu (desky) z obráběcího centra. Poté bude položen na pracovní desku mikroskopu. Informace o mikroskopu jsou popsány v kapitole 3.6. Zaostríme na část s výskytem vláken pod úhlem 0° . Tento proces proběhne v softwaru v počítači. Po uložení záznamu snímku z mikroskopu, budou na snímku naměřeny velikosti přesahujících vláken od řezné hrany a následně nalezneme část s vlákny pod úhlem 90° . Opět bude proveden záznam a měření. Tento proces bude opakován ještě jednou, a to ze spodní části

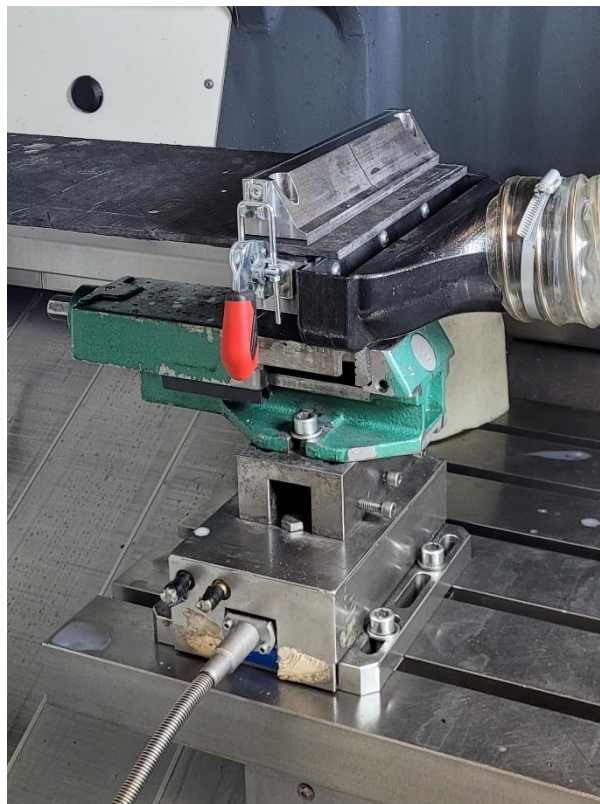
desky. Výstupními daty budou velikosti přesahujících vláken pod úhly 0° a 90° na vrchní a spodní straně obráběné desky. Tato data budou následně zpracována v další části práce.

3.8 Postup měření sil

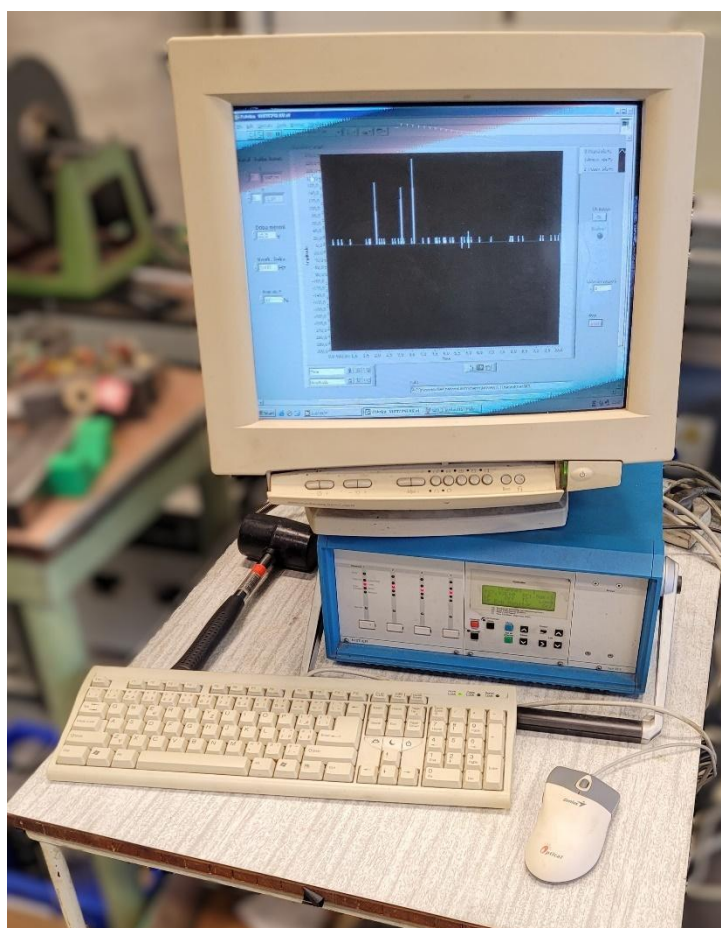
Měření sil bude provedeno souběžně s obráběním, a to za podmínek, které jsou popsány v kapitole 3.5. Během celého procesu obrábění je prováděn záznam sil (F_x , F_y , F_z), jež jsou zapisovány do grafu (Obr. 25). Tento graf bude posléze uložen za účelem vyhodnocení.

Dynamometr KISTLER 9265 B

Pro měření velikosti sil (F_x , F_y , F_z), které působí při obrábění bude vybrán dynamometr KISTLER 9265B. Ten se připevňuje na stůl obráběcího centra DMG MORI CMX 600 V a na KISTLER 9265 B se upevní svěrák pro upnutí materiálu (Obr. 24). Signál se přenáší do zesilovače a poté do stolního počítače, kde je vykreslen do grafu (Obr. 25). Tento dynamometr k měření využívá piezoelektrické senzory. Ty při deformaci vytvářejí elektrický náboj. Ten je následně převeden na velikost zatížení.



Obr. 24 KISTLER 9265 B připevněný v DMG MORI CMX 600 V



Obr. 25 Počítač s programem pro měření sil

Tab. 4 Technické parametry KISTLER 9265 B

Typ stroje	Dynamometr
Výrobce	KISTLER
Typ	9265 B
Technické parametry	
Rozsah (Fx, Fy) [kN]	-15 ... 15
Rozsah (Fz) [kN]	0 ... 30
Kalibrovaný dílčí rozsah (Fx, Fy) [kN]	0 ... 1,5
Kalibrovaný dílčí rozsah (Fz) [kN]	0 ... 3
Přetížení (Fx, Fy) [kN]	-20/20
Přetížení (Fz) [kN]	-12/40
Limitní hodnoty [N]	<0,01
Citlivost (Fx, Fy) [pC/N]	≈ -8
Citlivost (Fz) [pC/N]	≈ -3,7
Linearita, v celém rozsahu [%FSO]	≤ ±0,5
Hystereze, v celém rozsahu [%FSO]	≤ 0,5
Tuhost (cx, cy) [kN/μm]	≈ 0,8
Tuhost (cz) [kN/μm]	≈ 2

4 Realizace experimentu

Tato kapitola je zaměřena na vyhodnocení naměřených hodnot. Jejich shrnutí je zapsáno do tabulek a zaznamenáno do grafů. Data jsou řazena podle nástroje, následně pak podle řezné rychlosti.

4.1 Opotřebení nástroje

První měření, které bylo měřeno je opotřebení nástroje. Postup měření je popsán v kapitole 3.6. V tabulce bude možné nalézt průměrnou hodnotu ze tří měření a její odchylku.

Nástroj s úhlem gama 20°

Při řezné rychlosti 150 m/min

Tab. 6 Opotřebení nástroje s úhlem gama 20°, při řezné rychlosti 150 m/min

Čas [min]	Výsledná hodnota [μm]
1	61 ± 4,6
2	72,5 ± 19,5
3	87 ± 0,3
4	90,6 ± 3,1
5	97,4 ± 10,8
6	106,7 ± 7,6
7	114,8 ± 4,8
8	119,3 ± 16,9
9	130,7 ± 10,3
10	145,2 ± 6

Při řezné rychlosti 200 m/min

Tab. 7 Opotřebení nástroje s úhlem gama 20°, při řezné rychlosti 200 m/min

Čas [min]	Výsledná hodnota [μm]
1	162,8 ± 8
2	175,2 ± 13,7
3	189,1 ± 2,8
4	203,9 ± 15,4
5	207,3 ± 7,3
6	213,4 ± 9,2
7	221,8 ± 8,6
8	230,2 ± 4,8
9	235,2 ± 8,1
10	240,7 ± 8,3

Nástroj s úhlem gama 30°

Při řezné rychlosti 150 m/min

Tab. 8 Opotřebení nástroje s úhlem 30°, při řezné rychlosti 150 m/min

Čas [min]	Výsledná hodnota [μm]
1	61,6 ± 2,8
2	77,9 ± 3,3
3	68,5 ± 12,7
4	88,5 ± 5,9
5	81,8 ± 10
6	84,6 ± 16,8
7	106,2 ± 7
8	98,6 ± 4,8
9	133,9 ± 11,3
10	144,3 ± 4,3

Při řezné rychlosti 200 m/min

Tab. 9 Opotřebení nástroje s úhlem 30°, při řezné rychlosti 200 m/min

Čas [min]	Výsledná hodnota [μm]
1	157,7 ± 7,5
2	172,9 ± 10,3
3	185,9 ± 13,5
4	200,5 ± 18,3
5	208,8 ± 10,1
6	214,8 ± 12,8
7	222,3 ± 5,7
8	229,6 ± 5,2
9	238,3 ± 6,6
10	243,6 ± 8,7

Nástroj s úhlem gama 40°

Při řezné rychlosti 150 m/min

Tab. 10 Opotřebení nástroje s úhlem 40°, při řezné rychlosti 150 m/min

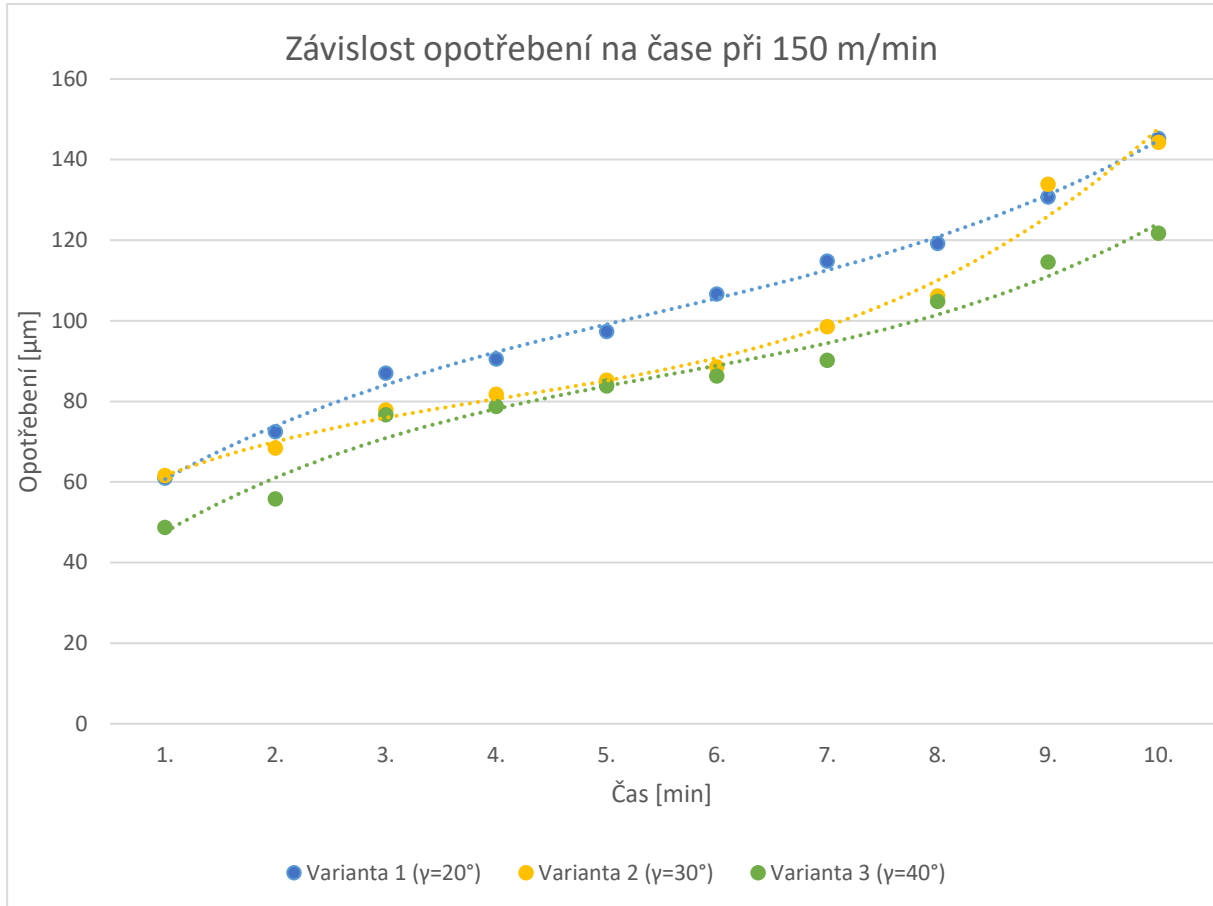
Čas [min]	Výsledná hodnota [μm]
1	48,7 ± 4,9
2	55,8 ± 5,4
3	78,7 ± 9,9
4	76,7 ± 5,3
5	86,3 ± 6
6	83,9 ± 2,5
7	90,2 ± 0,5
8	104,9 ± 2,7
9	114,6 ± 17
10	121,7 ± 6,4

Při řezné rychlosti 200 m/min

Tab. 11 Opotřebení nástroje s úhlem 40°, při řezné rychlosti 200 m/min

Čas [min]	Výsledná hodnota [μm]
1	132,2 ± 9,1
2	145,4 ± 5,8
3	156,9 ± 3,2
4	164,6 ± 7,8
5	174 ± 6,3
6	182,7 ± 4,7
7	191,1 ± 8,4
8	197,4 ± 5,8
9	204,6 ± 9,9
10	210,1 ± 10,2

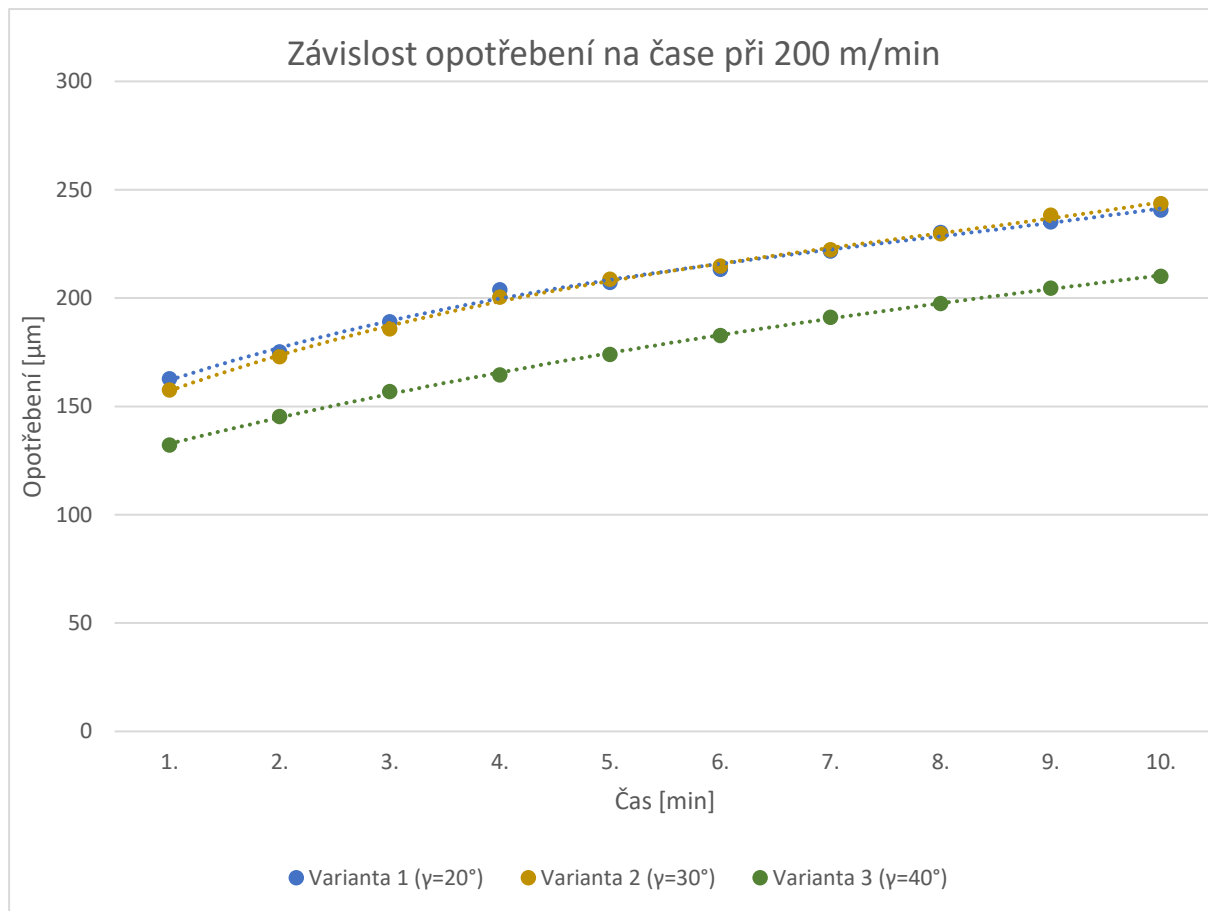
Graf opotřebení při řezné rychlosti 150 m/min



Obr. 26 Graf závislosti opotřebení na čase při 150 m/min

V prvním grafu (Obr. 26) je znázorněná závislost opotřebení na čase při řezné rychlosti 150 m/min. Hodnoty jsou proloženy křivkou polynomem třetího stupně. Je zde zřejmá podobnost průběhu u nástroje s úhlem $\gamma=20^\circ$ a nástrojem s úhlem $\gamma=40^\circ$ jen posunuté o větší počáteční opotřebení. Tyto hodnoty od nástroje s úhlem $\gamma=20^\circ$ se řadí mezi největší hodnoty. Tou úplně nejvyšší je hodnota 145,2 μm od nástroje s úhlem $\gamma=20^\circ$. Nejmenší hodnotu opotřebení zaznamenal poslední měřený nástroj s úhlem $\gamma=40^\circ$ s hodnotou 121,7 μm .

Graf opotřebení při řezné rychlosti 200 m/min



Obr. 27 Graf závislosti opotřebení na čase při 200 m/min

Při řezné rychlosti 200 m/min z grafu (Obr. 27) vyplívá shodný průběh opotřebení, ten je pouze jen odsazený. Opět jako v prvním grafu jsou body proloženy polynomem třetího stupně. Výsledek je podobný jako byl u řezné rychlosti 150 m/min. Největší opotřebení bylo změřeno u nástroje s úhlem $\gamma=30^\circ$, které se zastavilo na hodnotě 243,6 μm . Nejlépe se, stejně jako v předchozím případě, vyvíjel nástroj s úhlem $\gamma=40^\circ$ s opotřebením 210,1 μm .

Souhrn

Porovnáním výsledků měření vyplývá, že velikost opotřebení je vyšší u všech nástrojů obráběných řeznou rychlostí 200 m/min. Pokud se zaměříme na křivky, které vznikly proložením bodů, je možné pozorovat různé průběhy. U řezné rychlosti 150 m/min mají křivky trend stoupat, kdežto při řezné rychlosti 200 m/min mají trend zpomalovat.

4.2 Delaminace

Druhé měření je zaměřeno na vyhodnocení naměřených hodnot delaminace. Měření probíhalo podle kapitoly 3.7. Vstupem byly tři naměřené hodnoty, ze kterých bude vypočítán průměr a odchylka. Delaminace byla měřena na čtyřech místech. První byla vrchní hrana desky, zde byly naměřeny hodnoty pod úhlem vláken 0° a 90° . Zbývá dvě měření byla na spodní hraně desky taktéž pod úhly vláken 0° a 90° .

Nástroj s úhlem gama 20°

Při řezné rychlosti 150 m/min

Tab. 12 Delaminace u nástroje s úhlem gama 20° , při řezné rychlosti 150 m/min

Čas [min]	Vrchní hrana		Spodní hrana	
	Úhel vláken 0° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 90° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 0° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 90° Výsledná hodnota [μm]
1.	111,2 ± 77,2	2497,7 ± 2289,2	86,2 ± 31,7	1360,3 ± 1104,3
2.	260,5 ± 133,5	1746,4 ± 1126,2	90,5 ± 26	1873 ± 406,4
3.	205,7 ± 20,4	1100,2 ± 138,6	269,1 ± 256	2736,2 ± 1669,1
4.	176,8 ± 84,5	949,5 ± 430,7	248,1 ± 130,9	2302,7 ± 2098,1
5.	248,7 ± 204,5	1669,5 ± 1106	237,9 ± 140,5	1892,5 ± 1002,5
6.	227,1 ± 156	1629,1 ± 746,5	312,2 ± 80,2	2986,3 ± 1325,3
7.	272,3 ± 258,9	2456,8 ± 1019,3	184,1 ± 158,1	1877,5 ± 1062,5
8.	150,7 ± 39,7	2522,3 ± 905,7	220,8 ± 127,9	3475 ± 732
9.	128,1 ± 106,7	1139 ± 393,3	193,8 ± 138,5	3271,7 ± 531,2
10.	303,5 ± 77,9	1830,9 ± 1296,3	142,1 ± 97,8	1928 ± 1493,9

Při řezné rychlosti 200 m/min

Tab. 13 Delaminace u nástroje s úhlem gama 20° , při řezné rychlosti 200 m/min

Čas [min]	Vrchní hrana		Spodní hrana	
	Úhel vláken 0° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 90° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 0° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 90° Výsledná hodnota [μm]
1.	124,9 ± 49,5	1509,4 ± 1144,3	111,9 ± 34,5	1145,3 ± 229,5
2.	110,9 ± 39,6	1524,1 ± 373,7	205,7 ± 148,6	1330,5 ± 750,3
3.	316,5 ± 35,3	1459,7 ± 816,5	73,2 ± 54,2	1086,2 ± 830,1
4.	150,7 ± 108,6	1308,9 ± 443,6	99 ± 50,5	1342,4 ± 237,6
5.	207,8 ± 79,7	1904,3 ± 1289,6	162,6 ± 90,4	1728,7 ± 1072,9
6.	310,1 ± 204,5	662,4 ± 109,1	232,5 ± 160,8	1020,6 ± 272,4
7.	190,5 ± 164,1	982,9 ± 118,4	165,8 ± 15	2319,6 ± 1923,3
8.	63,6 ± 63,2	2049,1 ± 962,2	159,4 ± 73,9	1590,1 ± 1198,1
9.	163,6 ± 66,9	2134,5 ± 1285,1	201,3 ± 101,3	2238 ± 1966,5
10.	173,3 ± 65,5	666,3 ± 635,3	132,4 ± 64,6	885,9 ± 175,8

Nástroj s úhlem gama 30°

Při řezné rychlosti 150 m/min

Tab. 14 Delaminace u nástroje s úhlem 30°, při řezné rychlosti 150 m/min

Čas [min]	Vrchní hrana		Spodní hrana	
	Úhel vláken 0° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 90° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 0° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 90° Výsledná hodnota [μm]
1.	84 ± 33,7	1572,7 ± 773,7	108,7 ± 78,7	1236,1 ± 955,5
2.	220,7 ± 120,1	929,3 ± 796,5	151,8 ± 128,8	1924 ± 1793
3.	87,3 ± 73,8	2427,4 ± 910,3	156,3 ± 76,9	1658,5 ± 587,3
4.	180,9 ± 25,8	1768,5 ± 1164,5	215,4 ± 74,9	1765,5 ± 1270,6
5.	193,8 ± 86,4	2084,2 ± 865,6	237,9 ± 162,1	2917,9 ± 1917,2
6.	267 ± 143,9	1742,6 ± 686,4	220,7 ± 176,1	2037,6 ± 1874,5
7.	260,5 ± 138,5	1065,8 ± 873,9	185,2 ± 65,2	1736,4 ± 1429,7
8.	185,1 ± 103,2	2401,2 ± 1854,7	177,7 ± 10,2	2297,1 ± 1588,6
9.	314,3 ± 268,7	2355,6 ± 1262,4	149,6 ± 42,5	1892,4 ± 1474,3
10.	124,9 ± 81,8	2504 ± 1698,7	151,8 ± 137,5	2596,4 ± 2148,9

Při řezné rychlosti 200 m/min

Tab. 15 Delaminace u nástroje s úhlem 30°, při řezné rychlosti 200 m/min

Čas [min]	Vrchní hrana		Spodní hrana	
	Úhel vláken 0° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 90° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 0° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 90° Výsledná hodnota [μm]
1.	115,2 ± 60	1148,5 ± 752	173,3 ± 117,2	1063,6 ± 565,7
2.	161,5 ± 74,7	1008,6 ± 673,2	196 ± 97,8	1507,3 ± 600,7
3.	178,7 ± 107,2	1639,3 ± 1275,1	145,3 ± 101,9	1320,8 ± 1693,7
4.	141 ± 89	1496,2 ± 975	165,8 ± 22,9	1279,3 ± 668,4
5.	161,5 ± 49,1	1121,6 ± 44,6	160,5 ± 118,6	1116,2 ± 755,2
6.	126 ± 54,3	1598 ± 788,2	117,4 ± 59,2	1141,2 ± 964,8
7.	156,1 ± 84,4	1869,6 ± 822,5	116,3 ± 67,3	1455,4 ± 1016,5
8.	175,5 ± 85,7	879,8 ± 612	188,4 ± 73,8	2959,1 ± 658,6
9.	403,6 ± 295,9	2118,4 ± 1498,9	206,7 ± 85,7	1537 ± 513,4
10.	237,7 ± 114,7	1679,9 ± 977,8	127,5 ± 71,5	1643,9 ± 1395

Nástroj s úhlem gama 40°

Při řezné rychlosti 150 m/min

Tab. 16 Delaminace u nástroje s úhlem 40°, při řezné rychlosti 150 m/min

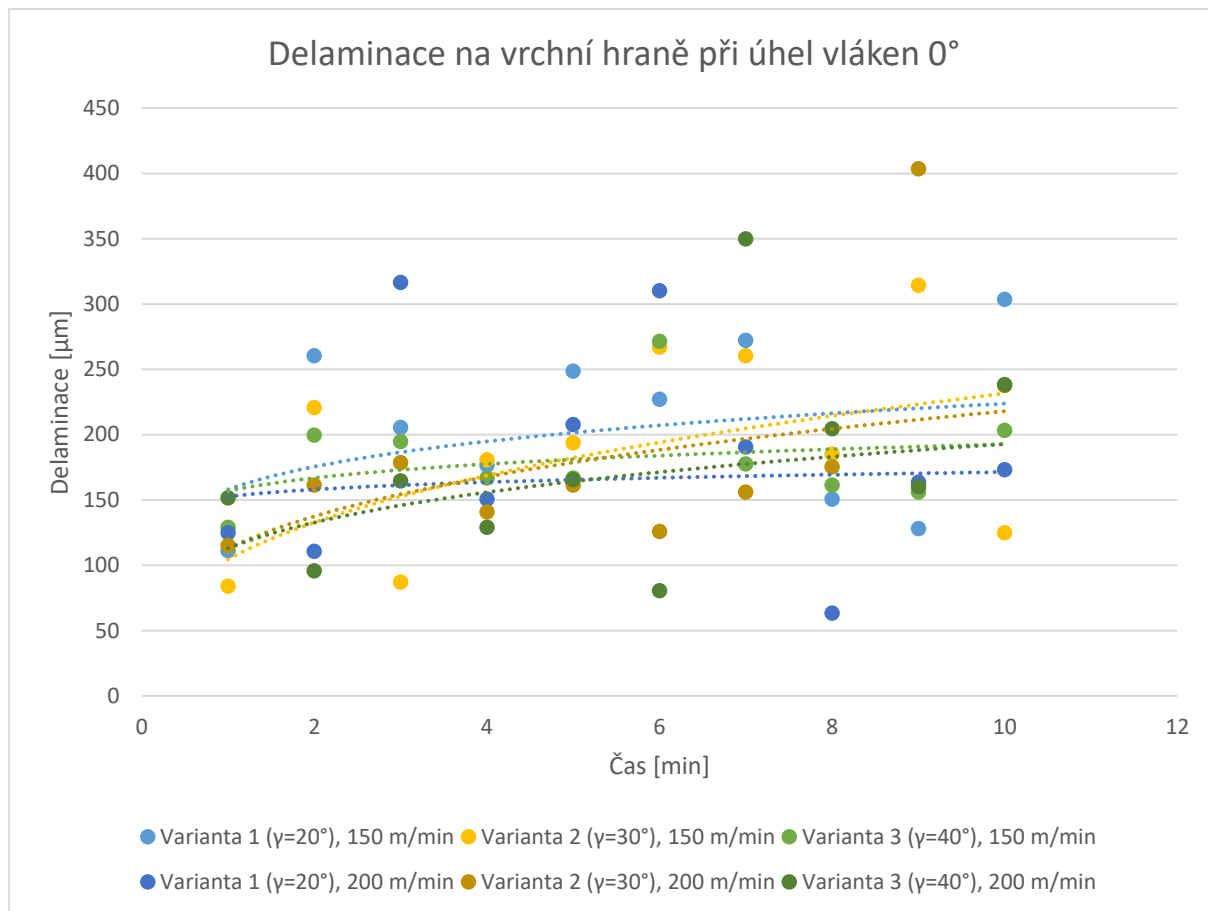
Čas [min]	Vrchní hrana		Spodní hrana	
	Úhel vláken 0° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 90° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 0° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 90° Výsledná hodnota [μm]
1.	129,2 ± 39,1	1924,1 ± 1043	240 ± 83,5	1119,9 ± 309,7
2.	199,8 ± 78,6	1479,3 ± 1031,2	157,5 ± 102,5	1151,1 ± 930,1
3.	194,9 ± 183	2195,9 ± 822,3	161,5 ± 93,7	2017,4 ± 712,7
4.	166,9 ± 108,2	1419 ± 662,3	242,2 ± 207,1	2461,8 ± 627,3
5.	166,9 ± 71,1	1671,6 ± 894,9	185,1 ± 93	2805,5 ± 1913,8
6.	271,4 ± 212,4	2400 ± 708,6	119,6 ± 73	1402,6 ± 492,3
7.	177,7 ± 125,7	1678,7 ± 1288,4	232,5 ± 77,2	2540,6 ± 1200
8.	161,5 ± 125,4	2302,6 ± 1224,5	278,8 ± 232,4	2986,9 ± 2541,2
9.	156,1 ± 31,6	1996,8 ± 524,5	191,6 ± 28,3	1967,7 ± 894,2
10.	203,4 ± 127	2242,7 ± 1986,8	161,5 ± 122,6	2543,2 ± 2031,3

Při řezné rychlosti 200 m/min

Tab. 17 Delaminace u nástroje s úhlem 40°, při řezné rychlosti 200 m/min

Čas [min]	Vrchní hrana		Spodní hrana	
	Úhel vláken 0° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 90° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 0° Výsledná hodnota [μm]	Úhel vláken 90° Výsledná hodnota [μm]
1.	151,8 ± 125,5	1460 ± 869,1	90,4 ± 42,9	1415,6 ± 966,1
2.	95,8 ± 45,1	1903,2 ± 771	95,8 ± 15,1	826,8 ± 286,5
3.	164,7 ± 75,6	1606,9 ± 623,1	195,9 ± 73,4	2461,8 ± 1971,6
4.	129,2 ± 103	1968 ± 156,1	372,5 ± 182,4	2043,1 ± 1259
5.	165,8 ± 89,2	1583,4 ± 960,2	253 ± 89,1	2793,4 ± 1383,4
6.	80,7 ± 52,8	2437,6 ± 1867,3	176,5 ± 91,8	1235,9 ± 799,6
7.	349,9 ± 152,2	1742,6 ± 1517,9	150,7 ± 98,4	2250,9 ± 1353,1
8.	204,5 ± 107,6	2502,1 ± 2139,9	223,7 ± 161,4	1814,1 ± 1396,9
9.	160,3 ± 124,7	1688,1 ± 407,4	174,4 ± 72,7	2392,9 ± 1140,6
10.	238,4 ± 171,4	1744 ± 1173,3	152,5 ± 112,9	904,1 ± 465,8

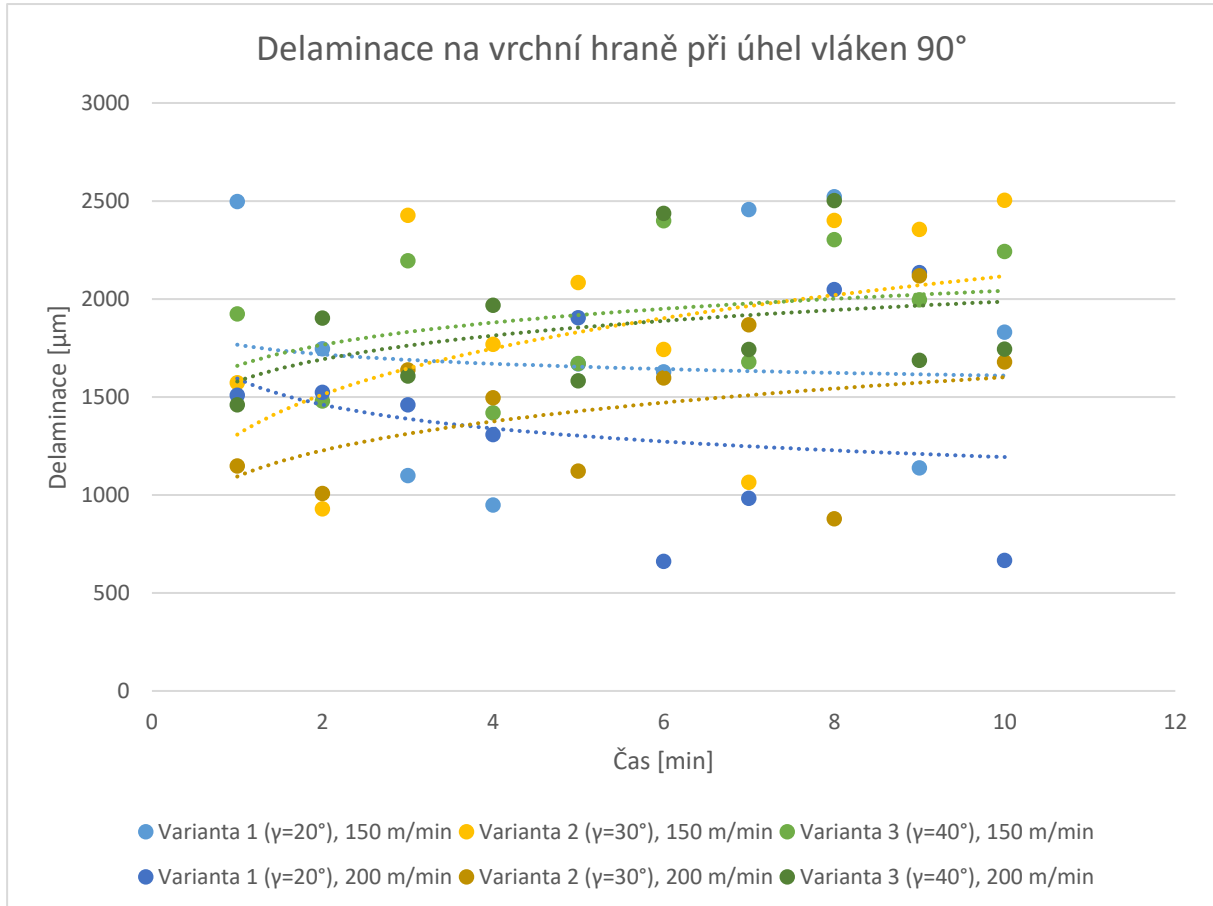
Graf delaminace na vrchní hraně při úhlu vláken 0°



Obr. 28 Graf delaminace na vrchní hraně při úhlu vláken 0°

Velikost nejdelšího neodřízlého vlákna při úhlu vláken 0° na vrchní hraně desky byla změřena při devátém měření u nástroje s úhlem $\gamma = 30^\circ$, konkrétně jde o hodnotu 403,6 μm . Opakem této hodnoty je velikost nejmenšího neodřízlého vlákna, které je 63,6 μm . Konkrétně se jedná o nástroj s úhlem $\gamma = 20^\circ$ při řezné rychlosti 200 m/min. U řezné rychlosti 150 m/min byla maximální hodnota rovna 314,3 μm u nástroje s úhlem $\gamma = 30^\circ$. Minimální hodnotu zaznamenal tentýž nástroj, který zaznamenal i nejvyšší hodnotu konkrétně 84 μm . Zde platí tvrzení, čím větší řezná rychlost, tím větší delaminace.

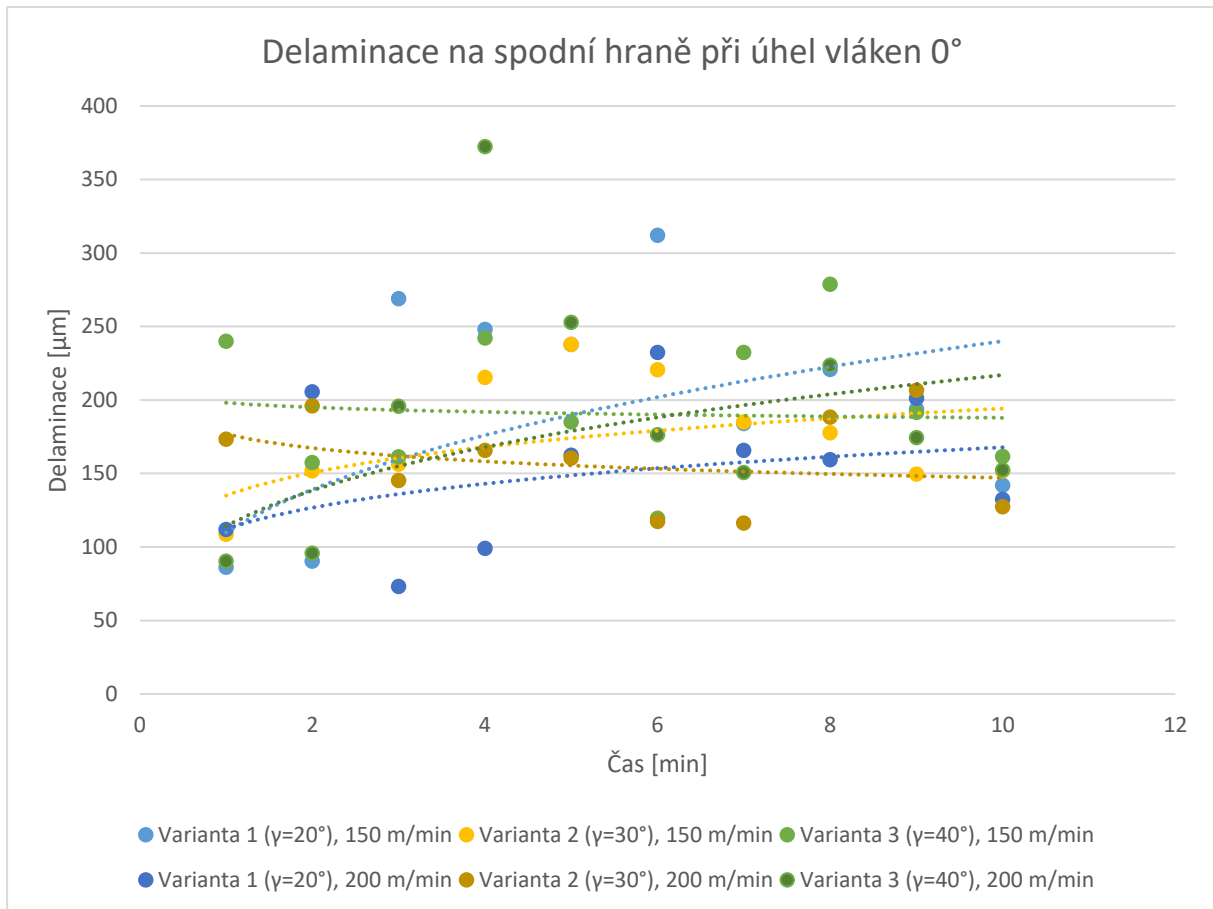
Graf delaminace na vrchní hraně při úhlu vláken 90°



Obr. 29 Graf delaminace na vrchní hraně při úhlu vláken 90°

Hodnoty, které byly naměřeny pod úhlem 90°. Při řezné rychlosti 200 m/min je maximum 2502,1 μm , a to nástrojem s úhlem gama 40°. Tento nástroj zaznamenal i druhou nejvyšší hodnotu. Dolní hodnota za výše uvedených podmínek byla 662,4 μm u této hodnoty a je dosažena nástrojem s úhlem gama 20°. U řezné rychlosti 150 m/min se vrcholem stala hodnota 2522,3 μm od nástroje s úhlem gama 20°. Minimum je hodnota 929,3 μm při druhém měření nástrojem s úhlem gama 30°.

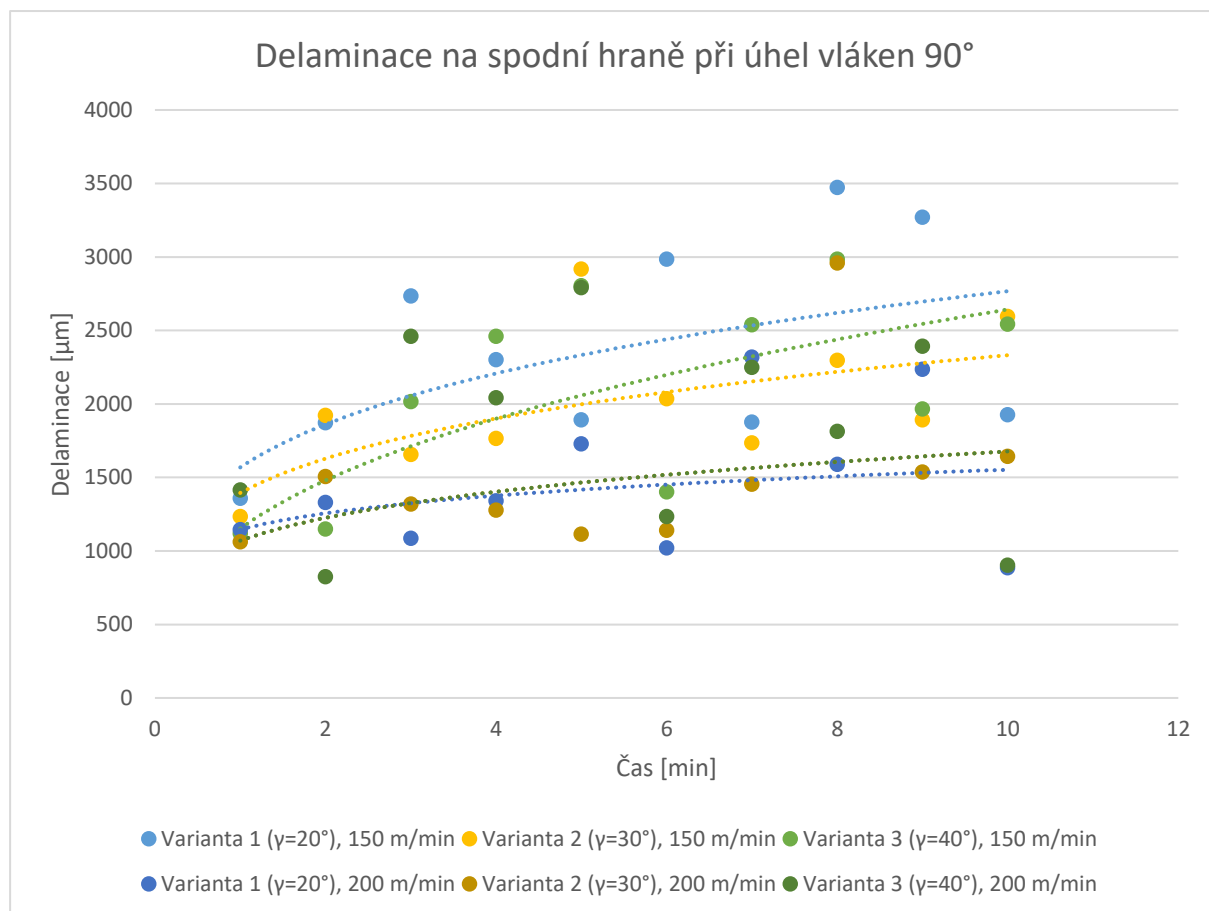
Graf delaminace na spodní hraně při úhlu vláken 0°



Obr. 30 Graf delaminace na spodní hraně při úhlu vláken 0°

Na spodní části desky (obráběného materiálu) za působení řezné rychlosti 200 m/min a úhlem vláken 0°. V tomto případě vystoupala hodnota v porovnání s ostatními na 372,5 μm. Tato hodnota patří nástroji s úhlem gama 40°. Naopak nejnižší hodnota je 73,2 μm od nástroje s úhlem gama 20°. S výsledkem řezné rychlosti 150 m/min je maximální hodnota u nástroje s úhlem gama 40°. Přesněji jde o hodnotu 278,8 μm. Protipólem k tomu je hodnota 86,2 μm od nástroje s úhlem gama 20°.

Graf delaminace na spodní hraně při úhlu vláken 90°



Obr. 31 Graf delaminace na spodní hraně při úhlu vláken 90°

Poslední měření delaminace, a to na spodní hraně při úhlu vláken 90°. Při řezné rychlosti 200 m/min. Hodnota, která dosáhla nejvýše je 2959,1 μm u nástroje s úhlem gama 30°. Na opačném konci se nachází hodnota 826,8 μm , která spadá pod nástroj s úhlem gama 40°. U nižší řezné rychlosti jsou hodnoty následující: Maximum je u nástroje s úhlem gama 20° s hodnotou 3475 μm . Tento nástroj má také druhou nejvyšší hodnotu. Další nejnižší hodnota přísluší nástroji s úhlem gama 40°, konkrétně 1119,9 μm .

Souhrn

Toto měření delaminace je třeba rozdělit na dva výsledky, a to podle úhlu, pod kterým se nacházela vlákna při obrábění. Vlákna pod úhlem 0° vykazovala při porovnání s vlákny pod úhlem 90° několikanásobně menší délku neodřízých vláken, a to jak při 150 m/min, tak i při 200 m/min.

4.3 Řezné síly

Z posledního měření máme hodnoty sil. Měření probíhalo podle kapitoly 3.8. Toto měření je odlišné od předešlých v tom, že je zde vstupem šest naměřených hodnot, ze kterých je opět spočítaná průměrná hodnota a odchylka.

Nástroj s úhlem gama 20°

Při řezné rychlosti 150 m/min

Tab. 18 Síly u nástroje s úhlem gama 20°, při řezné rychlosti 150 m/min

	Síla Fx	Síla Fy	Síla Fz
Čas [min]	Výsledná hodnota [N]	Výsledná hodnota [N]	Výsledná hodnota [N]
1.	52,8 ± 3,6	187,3 ± 8,6	76,8 ± 4,6
2.	87,4 ± 4,2	258,3 ± 11,9	94,1 ± 3,7
3.	110,3 ± 2,7	262,8 ± 2,4	100,3 ± 2,8
4.	103,8 ± 2,7	228 ± 7,6	102,6 ± 2,1
5.	123,7 ± 4,1	261,7 ± 5	125,8 ± 2,2
6.	111,9 ± 1,8	205,3 ± 4,4	70,8 ± 6,5
7.	122,8 ± 2,8	223,2 ± 5,1	72,6 ± 2,3
8.	137,4 ± 6,7	219,6 ± 4,8	90,4 ± 5
9.	155,9 ± 7,7	254,3 ± 1,5	126,8 ± 4,6
10.	144 ± 5,6	275,1 ± 11,2	92,3 ± 12,9

Při řezné rychlosti 200 m/min

Tab. 19 Síly u nástroje s úhlem gama 20°, při řezné rychlosti 200 m/min

	Síla Fx	Síla Fy	Síla Fz
Čas [min]	Výsledná hodnota [N]	Výsledná hodnota [N]	Výsledná hodnota [N]
1.	94,3 ± 5	60,6 ± 3,6	55,4 ± 1,7
2.	150,4 ± 4,3	90,8 ± 7,5	77,4 ± 1,3
3.	207,5 ± 6,6	108,1 ± 15,1	114,9 ± 22
4.	167,6 ± 4,3	132 ± 9,3	92,3 ± 1,8
5.	157,2 ± 1,3	141,3 ± 11,6	88,6 ± 10,4
6.	156,3 ± 2,8	156,7 ± 4,6	107,5 ± 2,8
7.	170,1 ± 19,2	132,8 ± 7,8	104,8 ± 17,4
8.	203 ± 4,8	168,9 ± 6,1	115,8 ± 11,6
9.	223,3 ± 14,4	190 ± 5,2	124,5 ± 14,6
10.	253,7 ± 4	238,6 ± 10,6	209,7 ± 14,1

Nástroj s úhlem gama 30°

Při řezné rychlosti 150 m/min

Tab. 20 Síly u nástroje s úhlem 30°, při řezné rychlosti 150 m/min

	Síla Fx	Síla Fy	Síla Fz
Čas [min]	Výsledná hodnota [N]	Výsledná hodnota [N]	Výsledná hodnota [N]
1.	48,9 ± 1,1	121,5 ± 5	63,7 ± 3,4
2.	76,8 ± 1,3	203,3 ± 8,8	90,8 ± 1,7
3.	90,3 ± 4	190,2 ± 5,1	93,7 ± 1
4.	107,2 ± 2,9	225,5 ± 7,6	101,5 ± 1
5.	117 ± 1,6	244 ± 2	99,7 ± 4
6.	130,3 ± 6,5	212,1 ± 2,8	108,3 ± 2,1
7.	143,8 ± 2,9	232,2 ± 4	123,2 ± 0,8
8.	152,8 ± 8,3	209,5 ± 3,5	115,9 ± 11
9.	142,7 ± 6,4	209,7 ± 3,3	116,3 ± 7
10.	162 ± 17	189,8 ± 16,2	105,3 ± 15

Při řezné rychlosti 200 m/min

Tab. 21 Síly u nástroje s úhlem 30°, při řezné rychlosti 200 m/min

	Síla Fx	Síla Fy	Síla Fz
Čas [min]	Výsledná hodnota [N]	Výsledná hodnota [N]	Výsledná hodnota [N]
1.	106,8 ± 1,8	63,4 ± 1,3	62,8 ± 6,1
2.	159,9 ± 3,4	83,1 ± 11,4	83,9 ± 7,2
3.	199,9 ± 4,9	108,9 ± 15,3	102 ± 2,4
4.	236,5 ± 12,7	113,3 ± 4,3	123,9 ± 13
5.	214,3 ± 12,5	118,7 ± 3,7	118,4 ± 8
6.	186,2 ± 11,3	134,8 ± 8,1	95,8 ± 16,5
7.	245,5 ± 3,8	167,6 ± 3,2	162,7 ± 4,6
8.	229,3 ± 12,4	182,7 ± 2,1	180,2 ± 5,6
9.	234,6 ± 4	192,8 ± 6,3	176,8 ± 4,2
10.	237,6 ± 9,7	189,4 ± 9	161,7 ± 8,5

Nástroj s úhlem gama 40°

Při řezné rychlosti 150 m/min

Tab. 22 Síly u nástroje s úhlem 40°, při řezné rychlosti 150 m/min

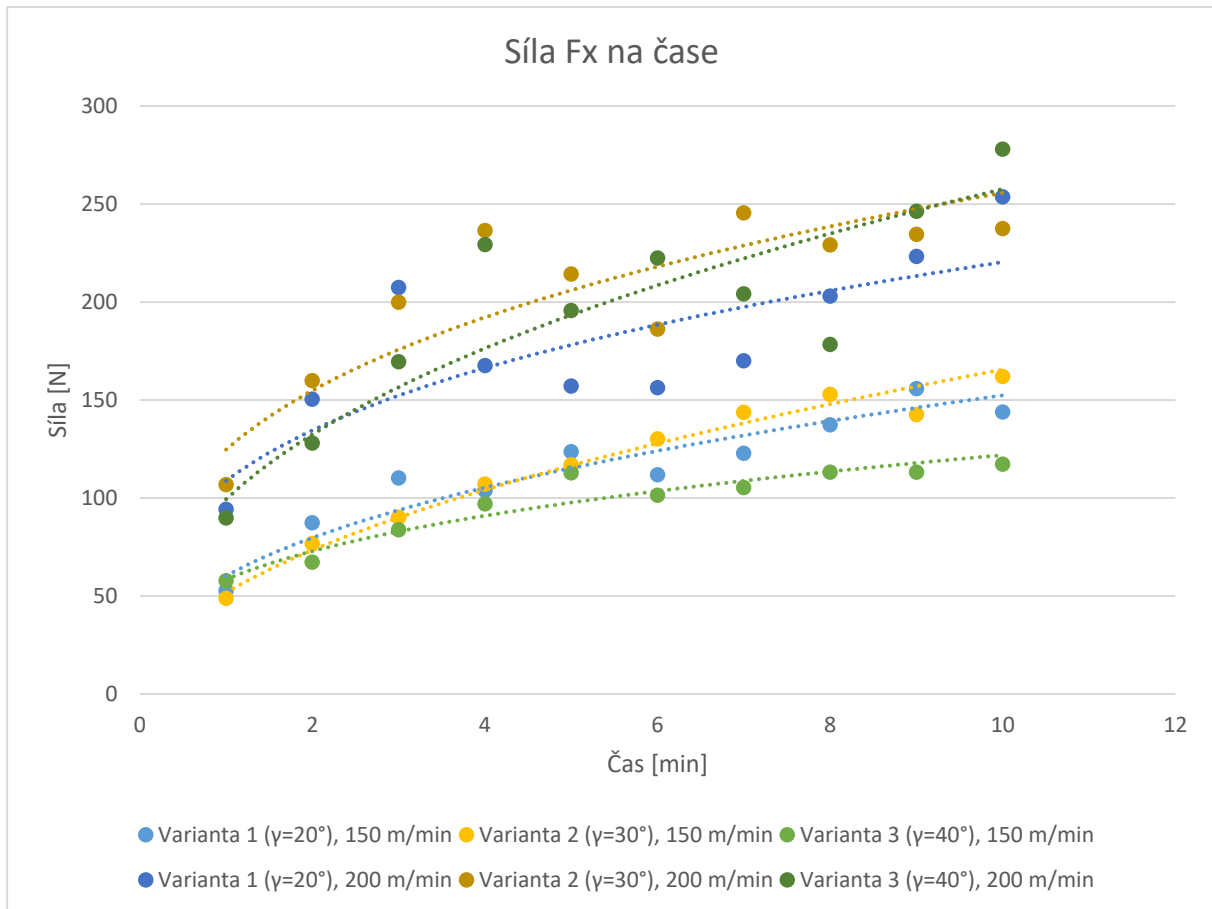
	Síla Fx	Síla Fy	Síla Fz
Čas [min]	Výsledná hodnota [N]	Výsledná hodnota [N]	Výsledná hodnota [N]
1.	57,9 ± 1,7	201 ± 8,3	87,7 ± 3,4
2.	67,3 ± 3,9	262,4 ± 2,7	88,3 ± 3
3.	83,8 ± 1,7	214,2 ± 1,2	89,6 ± 3,6
4.	97 ± 4,3	232 ± 5,1	93,6 ± 3,9
5.	112,9 ± 2,6	229,7 ± 3,4	103,3 ± 6,9
6.	101,5 ± 7,9	192,3 ± 8	63,9 ± 8,9
7.	105,3 ± 5,6	198,8 ± 9,6	68,3 ± 8,9
8.	113,2 ± 4,5	236,5 ± 19,3	101,8 ± 5,4
9.	113,3 ± 6	222,2 ± 2,8	82,8 ± 6,3
10.	117,3 ± 4,7	252,8 ± 10,4	87,8 ± 6,7

Při řezné rychlosti 200 m/min

Tab. 23 Síly u nástroje s úhlem 40°, při řezné rychlosti 200 m/min

	Síla Fx	Síla Fy	Síla Fz
Čas [min]	Výsledná hodnota [N]	Výsledná hodnota [N]	Výsledná hodnota [N]
1.	89,8 ± 7,3	55,5 ± 10,3	40,9 ± 10
2.	128 ± 1,7	99,6 ± 3,2	76,9 ± 5,3
3.	169,5 ± 3,5	124,9 ± 5,4	71,9 ± 4,2
4.	229,3 ± 15,4	109,2 ± 5,9	115,5 ± 9,9
5.	195,7 ± 9,7	128,3 ± 11,8	101,8 ± 4,6
6.	222,5 ± 19,7	130,6 ± 1,9	118,5 ± 18,1
7.	204,3 ± 17,1	145,2 ± 3,8	100 ± 15,5
8.	178,3 ± 1,7	150,3 ± 0,6	129 ± 2,7
9.	246,3 ± 14,6	180 ± 4,9	144,4 ± 13,1
10.	278,1 ± 5,2	224,8 ± 14	207,1 ± 9,6

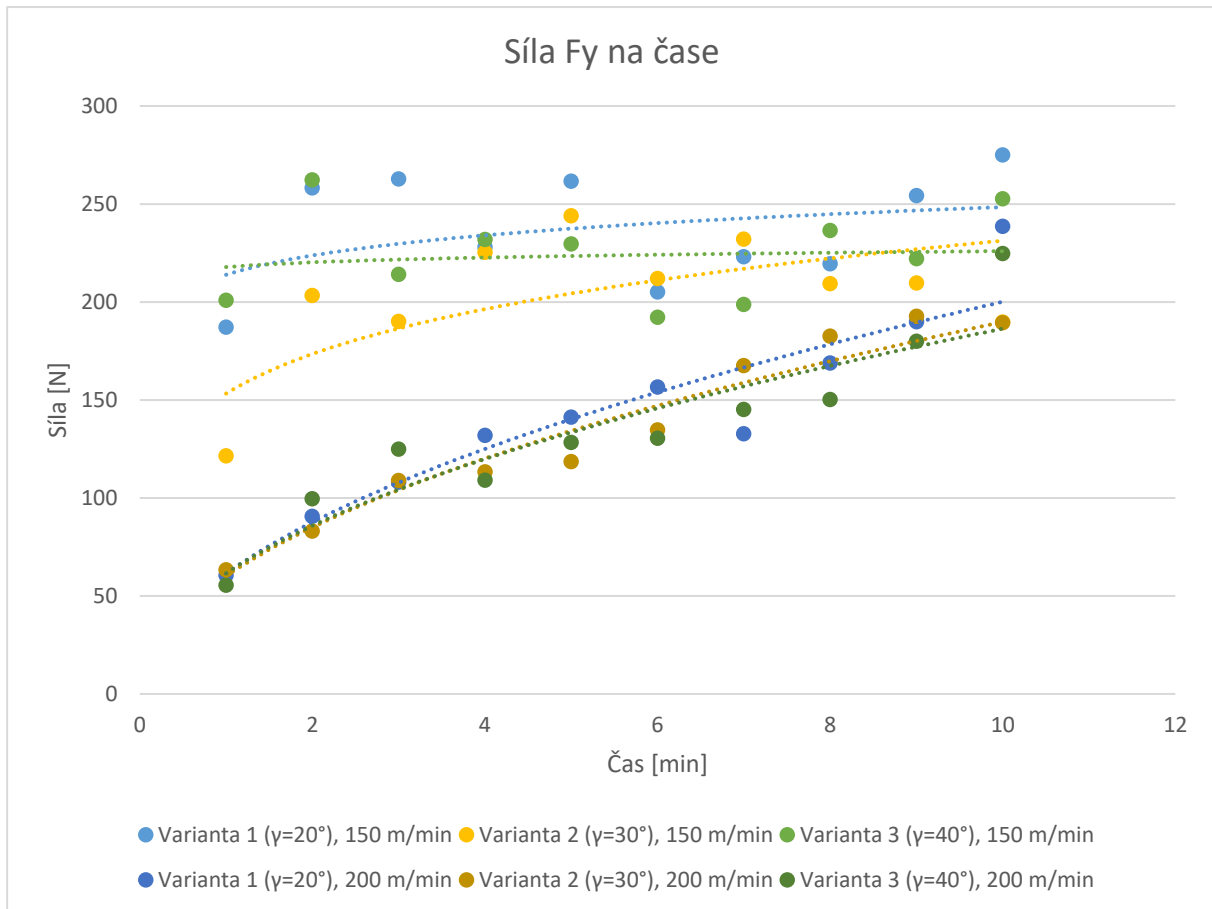
Graf Síla Fx



Obr. 32 Graf Síly F_x

Největší síla, která byla naměřena, náleží nástroji s úhlem $\gamma = 40^\circ$ při posledním desátém měření a řezné rychlosti 200 m/min o výsledné hodnotě 278,1 N. U této rychlosti ještě byla naměřena nejnižší hodnota u nástroje s úhlem $\gamma = 40^\circ$ při prvním měření a dosáhla hodnoty 89,8 N. Oproti tomu nejvyšší hodnota při otáčkách 150 m/min byla naměřena u nástroje s úhlem $\gamma = 30^\circ$, která byla 162 N. Opakem byl nástroj s úhlem $\gamma = 30^\circ$ s hodnotou 48,9 N. Z grafu je zřejmé, že síly, které působí při nižších řezných rychlostech (v našem případě 150 m/min), jsou v porovnání s rychlostí 200 m/min menší.

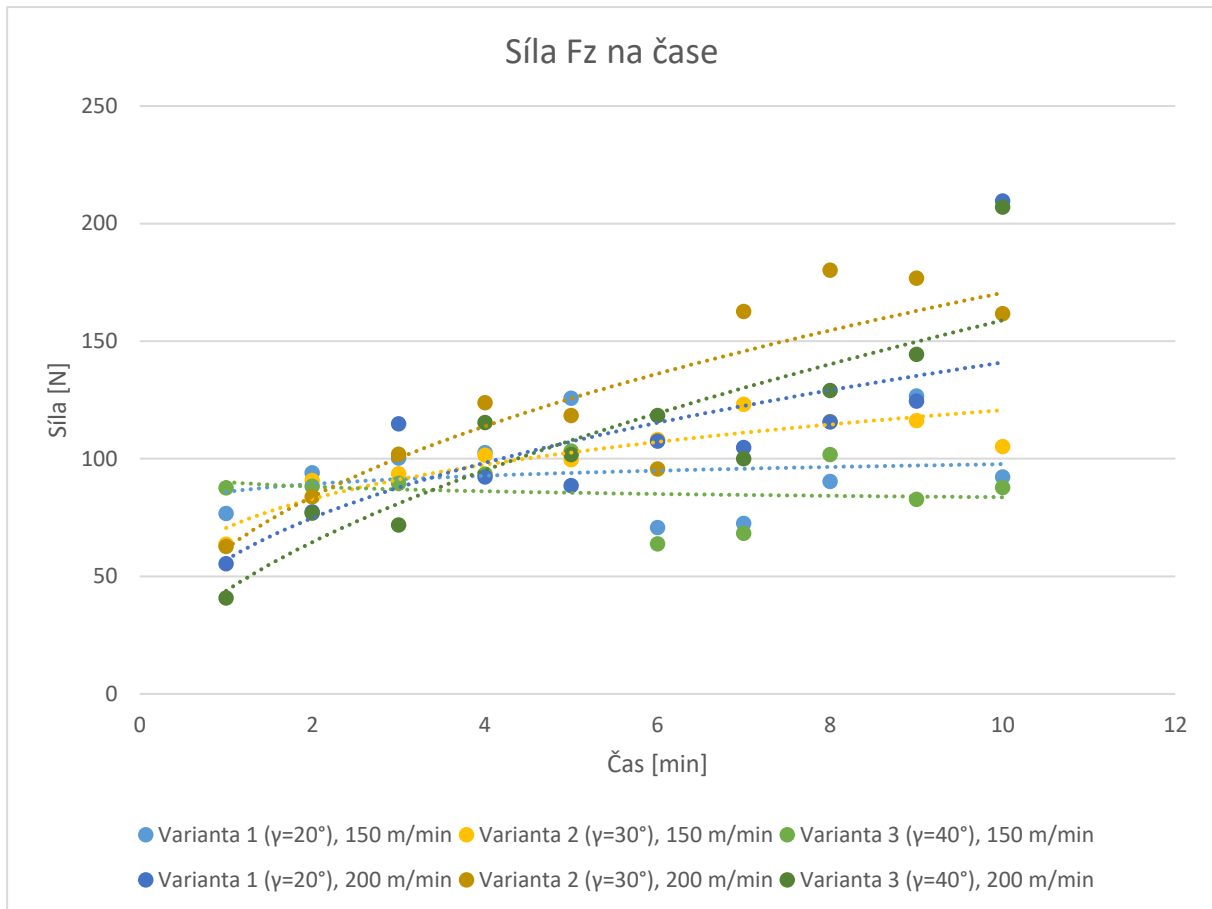
Graf Síla Fy



Obr. 33 Graf Síly Fy

Zde nastal pravý opak toho, co bylo možné pozorovat v grafu Síly Fx (Obr. 32) a to, že největší síly byly pozorovány u měření s nižšími otáčkami. Konkrétně nejvyšší hodnota byla zaznamenána nástrojem s úhlem $\gamma = 20^\circ$, jak již bylo naznačeno při 150 m/min a dosáhla hodnoty 275,1 N při desátém měření. K této rychlosti ještě přísluší nejnižší hodnota o velikosti 121,5 N, ta připadá nástroji s úhlem $\gamma = 30^\circ$. Dále u rezné rychlosti 200 m/min. Této rychlosti připadá maximální hodnota 238,6 N, která spadá pod nástroj s úhlem $\gamma = 20^\circ$. K této rychlosti je třeba ještě doplnit nejnižší hodnotu, jež nabývá velikosti 55,5 N od nástroje s úhlem $\gamma = 40^\circ$.

Graf Síla Fz



Obr. 34 Graf Síly F_z

Maximální hodnoty u řezné rychlosti 200 m/min byly u nástroje s úhlem γ 20°, konkrétně 209,7 N. Na druhém konci se nacházela hodnota od nástroje s úhlem γ 40° s 40,9 N. Následně hodnoty dosažené při řezné rychlosti 150 m/min. Hodnota, na níž se zastavila nejvyšší síla, dosáhla hodnoty 126,8 N, nástroj s úhlem γ 20°. Nejnižší hodnota, která byla u nástroje s úhlem γ 20°, dosáhla hodnoty 63,7 N. Nelze si nevšimnout téměř lineárního průběhu všech sil s řeznou rychlostí 150 m/min.

Souhrn

Data vykazují přímou úměru s řeznou rychlostí. A to takovou, že s rostoucí řeznou rychlostí roste velikost sil. Tato závislost ovšem nelze pozorovat ve složce F_y (Obr. 33), zde tato závislost platí obráceně. Dále je možné vidět i závislost na opotřebení. S rostoucím opotřebením stoupá i velikost sil.

5 Diskuze

Cílem této práce bylo prověřit: „Vliv změn řezných podmínek na průvodní jevy při frézování kompozitního materiálu na bázi uhlíkových vláken“.

Kapitola dvě teoreticky představuje problémy spojené s tématem frézování kompozitních materiálů, které byly nalezeny v různých odborných člancích, studiích a knihách. Tyto získané poznatky jsou shrnuty v této kapitole.

V kapitole tři se nachází metodika experimentu. Zde lze nalézt soupis všech použitých strojů, nástrojů a materiálů s popisem použití. Dále doplněné o technické informace. Jako poslední jsou uvedené informace o stanovení počátečních podmínek experimentu. S následným popisem měřených veličin.

Za nástroje byly zvoleny tři druhy jednozubých fréz s rozdílnými úhly gama viz. kapitola 3.3, které byly vyrobeny speciálně pro tento účel. Jako obráběný materiál byly vyrobeny desky spojením matrice a tvrdidla, do nichž byla vložena karbonová výztuž s keprovou vazbou (více informací v kapitole 3.4).

Čtvrtou kapitolu je možné rozdělit do tří částí podle měření daných veličin.

Měřily se hodnoty opotřebení nástroje, velikost delaminace a velikosti sil, které působí při obrábění. To probíhalo při dvou řezných rychlostech, konkrétně při 150 m/min a 200 m/min. Seznamy všech zařízení, které byly použity jsou popsány v kapitole 3.1 a 3.2. Měření probíhalo podle metodiky podrobněji rozepsané v kapitole 3.5. Výsledky s následným vyhodnocením je možné nalézt v kapitole 4.

První měření, které bylo provedeno je měření **opotřebení hřbetu nástroje** (kapitola 4.1). Toto měření probíhalo podle metodiky v kapitole 3.6. Při měření bylo dosaženo těchto konečných hodnot:

Při řezné rychlosti 150 m/min

- Konečné poškození bylo u nástroje s úhlem gama 20° – **145,2 μm**
- Konečné poškození bylo u nástroje s úhlem gama 30° – **144,3 μm**
- Konečné poškození bylo u nástroje s úhlem gama 40° – **121,7 μm**

Při řezné rychlosti 200 m/min

- Konečné poškození bylo u nástroje s úhlem gama 20° – **240,7 μm**
- Konečné poškození bylo u nástroje s úhlem gama 30° – **243,6 μm**
- Konečné poškození bylo u nástroje s úhlem gama 40° – **210,1 μm**

Z dat, která byla získána při experimentu, je patrné, že u nástroje s větším úhlem gama bylo dosaženo menší opotřebení hřbetu než u ostatních nástrojů. U nástroje s menším úhlem gama narůstá opotřebení daleko rychleji v porovnání s ostatními nástroji. Vyjádřeno v procentech bylo opotřebení v případě řezné rychlosti 150 m/min o 16,2 % menší u nástroje s úhlem gama 40°, oproti nástroji s úhlem gama 20°. U řezné rychlosti 200 m/min to bylo o 12,7 % menší. Opět v porovnání nástrojem s úhlem gama 40° s nástrojem s úhlem gama 20°.

Druhé měření bylo zaměřeno na **delaminaci**. Průběh měření je popsán v kapitole 3.7. Naměřené hodnoty s příslušnými grafy jsou v kapitole 4.2.

Při řezné rychlosti 150 m/min na horní hraně při úhlu vláken 0°

- Největší hodnota přesahujících vláken od hrany byla u nástroje s úhlem gama 30° – **314,3 μm**
- Nejmenší hodnota přesahujících vláken od hrany byla u nástroje s úhlem gama 30° – **84 μm**

Při řezné rychlosti 150 m/min na horní hraně při úhlu vláken 90°

- Největší hodnota přesahujících vláken od hrany byla u nástroje s úhlem gama 20° – **2522,3 μm**
- Nejmenší hodnota přesahujících vláken od hrany byla u nástroje s úhlem gama 30° – **929,3 μm**

Při řezné rychlosti 150 m/min na spodní hraně při úhlu vláken 0°

- Největší hodnota přesahujících vláken od hrany byla u nástroje s úhlem gama 40° – **278,8 μm**
- Nejmenší hodnota přesahujících vláken od hrany byla u nástroje s úhlem gama 20° – **86,2 μm**

Při řezné rychlosti 150 m/min na spodní hraně při úhlu vláken 90°

- Největší hodnota přesahujících vláken od hrany byla u nástroje s úhlem gama 20° – **3475 μm**
- Nejmenší hodnota přesahujících vláken od hrany byla u nástroje s úhlem gama 40° – **1119,9 μm**

Při řezné rychlosti 200 m/min na horní hraně při úhlu vláken 0°

- Největší hodnota přesahujících vláken od hrany byla u nástroje s úhlem gama 30° – **403,6 μm**
- Nejmenší hodnota přesahujících vláken od hrany byla u nástroje s úhlem gama 20° – **63,6 μm**

Při řezné rychlosti 200 m/min na horní hraně při úhlu vláken 90°

- Největší hodnota přesahujících vláken od hrany byla u nástroje s úhlem gama 40° – **2502,1 μm**
- Nejmenší hodnota přesahujících vláken od hrany byla u nástroje s úhlem gama 20° – **662,4 μm**

Při řezné rychlosti 200 m/min na spodní hraně při úhlu vláken 0°

- Největší hodnota přesahujících vláken od hrany byla u nástroje s úhlem gama 40° – **372,5 μm**
- Nejmenší hodnota přesahujících vláken od hrany byla u nástroje s úhlem gama 20° – **73,2 μm**

Při řezné rychlosti 200 m/min na spodní hraně při úhlu vláken 90°

- Největší hodnota přesahujících vláken od hrany byla u nástroje s úhlem gama 30° – **2959,1 μm**
- Nejmenší hodnota přesahujících vláken od hrany byla u nástroje s úhlem gama 40° – **826,8 μm**

Z výsledků vyplývá, že nejmenší delaminace byla docílena při obrábění vláken pod úhlem 0°. V porovnání s úhlem 90°. Jde opravdu o velké rozdíly přesahujících vláken. Pokud k porovnání přidáme další kritérium v závislosti na řezné síle, tak lze říci, že nejmenší delaminace docílíme kombinací:

- Nástroj s malým úhlem gama
- Materiál s orientací vláken pod úhlem 0°
- Malá řezná rychlost

Poslední měřenou veličinou byly **velikosti sil** (F_x , F_y , F_z), které působí při obrábění. Postup měření je popsán v kapitole 3.8. Výsledky jsou v kapitole 4.3.

Při řezné rychlosti 150 m/min, síla v ose x

- Největší hodnota síly F_x u nástroje s úhlem gama 30° – **162 N**
- Nejmenší hodnota síly F_x u nástroje s úhlem gama 30° – **48,8 N**

Při řezné rychlosti 150 m/min, síla v ose y

- Největší hodnota síly F_y u nástroje s úhlem gama 20° – **275,1 N**
- Nejmenší hodnota síly F_y u nástroje s úhlem gama 30° – **121,5 N**

Při řezné rychlosti 150 m/min, síla v ose z

- Největší hodnota síly F_z u nástroje s úhlem gama 20° – **126,8 N**
- Nejmenší hodnota síly F_z u nástroje s úhlem gama 20° – **63,7 N**

Při řezné rychlosti 200 m/min, síla v ose x

- Největší hodnota síly F_x u nástroje s úhlem gama 40° – **278,1 N**
- Nejmenší hodnota síly F_x u nástroje s úhlem gama 40° – **89,8 N**

Při řezné rychlosti 200 m/min, síla v ose y

- Největší hodnota síly F_y u nástroje s úhlem gama 20° – **238,6 N**
- Nejmenší hodnota síly F_y u nástroje s úhlem gama 40° – **55,5 N**

Při řezné rychlosti 200 m/min, síla v ose z

- Největší hodnota síly F_z u nástroje s úhlem gama 20° – **209,7 N**
- Nejmenší hodnota síly F_z u nástroje s úhlem gama 40° – **40,9 N**

Při pozorování naměřených hodnot sil lze vyzdvihnout výskyt maximální a minimální hodnoty síly u téhož nástroje. Též je možné pozorovat ve většině případů vyšší naměřené hodnoty u nástrojů obráběných řeznou rychlostí 200 m/min. Tento nástroj bych doporučoval používat za řezné rychlosti 150 m/min.

6 Závěr

Tato bakalářská práce s názvem „Vliv změn řezných podmínek na průvodní jevy při frézování kompozitního materiálu na bázi uhlíkových vláken“ měla potvrdit případně vyvrátit souvislost řezných podmínek na velikost opotřebení hřbetu nástroje a delaminaci. Práce byla rozdělena do několika kapitol.

První částí je teoretická strana řešeného problému. Blíže jsou zde popsány základy frézování. Dále pak informace o tom, co vlastně jsou kompozitní materiály. Z čeho se skládají a jak se vyrábějí jednotlivé složky. Ty jsou následně rozděleny do různých skupin.

V druhé části jmenovitě Metodika experimentů je naznačen postup, jakým byl proveden samotný experiment. Je zde soupis všech použitých zařízení s technickými informacemi a jak s nimi bylo zacházeno při samotném měření. Nakonec byly zvoleny počáteční podmínky experimentu.

Experimentální část popisuje již samotný experiment. Tato kapitola obsahuje naměřené hodnoty, které jsou statisticky vyhodnoceny a zaznamenány do tabulek. K těmto hodnotám náleží také grafy s komentářem.

Souhrn naměřených hodnot.

- a) Opotřebení hřbetu – Z experimentu vyplývá, že opotřebení nástroje bylo menší při použití úhlu čela 40° . Maximálního opotřebení bylo dosaženo u nástroje s úhlem čela 20° . Velikost opotřebení se také zvětšovala s rostoucí řeznou rychlostí.
- b) Delaminace – Naměřená data jasně poukazují na vliv orientace vláken při frézování. Vlákná kolmá na řeznou rychlost dosahují svojí délkou několika násobků toho, co vlákna rovnoběžná s řeznou rychlostí. Kdežto vliv velikosti řezné rychlosti se do výsledků příliš neprojevuje. Stejně tak, zda se vlákna nacházejí na vrchní straně, nebo na spodní straně obráběného materiálu.
- c) Řezné síly – Velikost sil byla v případě složek síly F_x a F_z větší při vyšších řezných rychlostech. Výjimkou byla složka síly F_y . Ta byla naopak menší. Dále pak po proložení křivkou byla patrná závislost na opotřebení. A to taková, že s rostoucím opotřebením stoupala rychlost, nebo si ve výjimečných případech udržovala konstantní hodnotu.

Pro prozkoumání vývoje opotřebení nástroje a vývoj delaminace by bylo dobré nasbírat více dat a zjistit, jak se budou dané hodnoty vyvíjet po 10 minutách.

Závěrem lze usoudit, že nejkompexnějším nástrojem pro obrábění kompozitních materiálů na bázi uhlíkových vláken, je nástroj s úhlem $\gamma 40^\circ$. Důvody vedoucí k tomuto rozhodnutí byly, že nástroj vykazoval nejmenší opotřebení. Sice nevykazoval nejlepší výsledky při měření delaminace a sil, ale také úplně v těchto naměřených výsledcích nepropadl. Tento nástroj bych doporučil v kombinaci s řeznou rychlostí 150 m/min.

Použitá literatura

- [1] NĚMEC, Dobroslav. *Strojírenská technologie 3: strojní obrábění*. 1. Praha: Nakladatelství technické literatury, nedatováno. Řada strojírenské literatury.
- [2] *Základní způsoby frézování*. [online]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1226>
- [3] *Frézování* [online]. [vid. 2024-05-04]. Dostupné z: https://www.moodle-trebesin.cz/pluginfile.php/9915/mod_resource/content/0/FR%C3%89ZOV%C3%81N%C3%8D.pdf
- [4] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [5] DESHMUKH, Suhas P., Ramakant SHRIVASTAVA a Chetan M. THAKAR. Machining of composite materials through advance machining process. *International Conference on Smart and Sustainable Developments in Materials, Manufacturing and Energy Engineering* [online]. 2022, **52**, 1078–1081. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.10.495
- [6] HEGDE, Sharun, B. SATISH SHENOY a K.N. CHETHAN. Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance. *1st International Conference on Manufacturing, Material Science and Engineering* [online]. 2019, **19**, 658–662. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2019.07.749
- [7] RAJAK, Dipen K., Pratiksha H. WAGH a Emanoil LINUL. Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review. *Polymers* [online]. 2021, **13**(21). ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym13213721
- [8] MARSH, Harry a F. RODRÍGUEZ-REINOSO. *Activated carbon*. 1st ed. Amsterdam ; Boston: Elsevier, 2006. ISBN 978-0-08-044463-5.
- [9] HSISSOU, Rachid, Rajaa SEGHIRI, Zakaria BENZEKRI, Miloudi HILALI, Mohamed RAFIK a Ahmed ELHARFI. Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures* [online]. 2021, **262**, 113640. ISSN 0263-8223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2021.113640
- [10] GEIER, Norbert, J. Paulo DAVIM a Tibor SZALAY. Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2019, **125**, 105552. ISSN 1359-835X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2019.105552
- [11] WANG, Fuji, Xiaonan WANG, Xinghai JIN a Boyu ZHANG. A comparison of cutting mechanisms of the carbon fibre reinforced thermoset and thermoplastic composites by the experimental and computational modelling methods. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2022, **79**, 895–910. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2022.05.033
- [12] GEIER, Norbert, Karali PATRA, Ravi Shankar ANAND, Sam ASHWORTH, Barnabás Zoltán BALÁZS, Tamás LUKÁCS, Gergely MAGYAR, Péter TAMÁS-BÉNYEI, Jinyang XU a J Paulo DAVIM. A critical review on mechanical micro-drilling of glass and carbon fibre

reinforced polymer (GFRP and CFRP) composites. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2023, **254**, 110589. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2023.110589

[13] DELRUE, Steven a Koen VAN DEN ABEELE. Three-dimensional finite element simulation of closed delaminations in composite materials. *Ultrasonics* [online]. 2012, **52**(2), 315–324. ISSN 0041-624X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ultras.2011.09.001

[14] *Delaminace*. [online]. [vid. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/category/tool-selection/page/5/>

[15] ZHANG, Lifeng a Xiaoguang ZHANG. Effect of milling type and cooling mode on cutting characteristics during CFRP milling using a PCD burr end mill. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2023, **129**(5), 2735–2745. ISSN 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-023-12488-6

[16] ZHANG, Lifeng a Xiaoguang ZHANG. Effect of cooling and lubrication conditions on the variable angle milling of unidirectional CFRP with PCD tools. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2023, **319**, 118073. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2023.118073

[17] TURNER, J., R. J. SCAIFE a H. M. EL-DESSOUKY. Effect of machining coolant on integrity of CFRP composites. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science* [online]. 2015, **1**(1), 54–60. ISSN 2055-0340. Dostupné z: doi:10.1179/2055035914Y.0000000008

[18] NGUYEN, Dinh, Mohammad Sayem BIN ABDULLAH, Ryan KHAWARIZMI, Dave KIM a Patrick KWON. The effect of fiber orientation on tool wear in edge-trimming of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates. *Wear* [online]. 2020, **450–451**, 203213. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2020.203213

[19] WANG, Changying, Gongyu LIU, Qinglong AN a Ming CHEN. Occurrence and formation mechanism of surface cavity defects during orthogonal milling of CFRP laminates. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2017, **109**, 10–22. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2016.10.015

[20] WANG, Fuji, Boyu ZHANG, Zhenyuan JIA, Xiang ZHAO a Qi WANG. Structural optimization method of multitooth cutter for surface damages suppression in edge trimming of Carbon Fiber Reinforced Plastics. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2019, **46**, 204–213. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2019.09.013

[21] ZHANG, Lifeng, Sheng WANG, Weilin QIAO, Zhan LI, Ning WANG, Jin ZHANG a Tao WANG. High-speed milling of CFRP composites: a progressive damage model of cutting force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, **106**(3), 1005–1015. ISSN 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-019-04662-6

[22] *DMG MORI CMX 600 V*. [online]. [vid. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/resource/blob/15758/c03faf92a996b26595688eddc90ed003/cm-x-600-v-product-teaser-picture-data.png>

Seznam příloh

Příloha A – Výkres frézy, název výkresu: F6140.6.V6.81.16.Z1, Číslo varianty: UC-59546
TUL

Příloha B – Výkres frézy, název výkresu: F6140.6.V6.81.16.Z1, Číslo varianty: UC-59547
TUL

Příloha C – Výkres frézy, název výkresu: F6140.6.V6.81.16.Z1, Číslo varianty: UC-59548
TUL

Příloha D – Technical Data Sheet, produktu: TDS CCA 600 24K