



Diplomová práce

Studium integrity povrchu při frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákný

Studijní program:

N0715A270015 Materiály a technologie

Autor práce:

Bc. Martin Váňa

Vedoucí práce:

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

Liberec 2023



Zadání diplomové práce

Studium integrity povrchu při frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny

Jméno a příjmení:

Bc. Martin Váňa

Osobní číslo:

S21000226

Studijní program:

N0715A270015 Materiály a technologie

Zadávací katedra:

Katedra obrábění a montáže

Akademický rok:

2022/2023

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o problematice frézování kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny se zaměřením na materiál nástroje a geometrii, orientaci vláken a analýzu vlivu opotřebení nástroje.
2. Volba obráběného materiálu (kompozitní desky vyztužené uhlíkovými vlákny), řezných nástrojů (fréz) a řezných podmínek bez procesního média.
3. Návrh metodiky experimentů pro frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení získaných výsledků v rámci opotřebení řezného nástroje v závislosti na použitém nástroji (z hlediska materiálového složení) a jeho geometrii a na orientaci vláken obráběného materiálu a vzniklé delaminaci.
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. KOČMAN, K., PROKOP, K. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
2. BILÍK, O. Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění. Ostrava: Vysoká škola báňská - TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
3. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing s.r.o, 2008. 235 s. ISBN: 8025422502.
4. MÁDL, J., JERSÁK, J., HOLEŠOVSKÝ, F., kol. Jakost obráběných povrchů. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 179 s. ISBN 80-7044-539-4.
5. Firemní podklady k nástrojům a obráběnému materiálu.

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 diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

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

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

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

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

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

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

ANOTACE

Diplomová práce se věnuje studiu integrity povrchu při frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny, s tkaninou keprové vazby a orientací vláken 90°.

Hlavním cílem studie je výzkum vlivu úhlu hřbetu u frézovacího nástroje na opotřebení nástroje, řezné síly, drsnost obrobenej plochy a delaminaci.

Potřebné znalosti problematiky obrábění kompozitních materiálů jsou uvedeny v teoretické části. V metodické části je popsána kompletní metodika měření experimentů, včetně použitých strojů, nástrojů a měřidel. Výsledkům experimentů je věnována experimentální část. Na konci práce je uvedena diskuze dosažených výsledků a závěr.

Klíčová slova: úhel hřbetu frézy, kompozitní materiál a uhlíkovými vlákny, delaminace, drsnost povrchu

ANNOTATION

The diploma thesis is dedicated to the study of surface integrity during milling of composites plates reinforced with carbon fibers, with twill weave fabric and fiber orientation of 90°.

The main objective of the study is to research the influence of the tool back angle of milling tool on tool wear, cutting forces, surface roughness and delamination.

The necessary knowledge of machining composites materials is presented in the theoretical part. The methodological part describes complete methodology of measuring experiments, including machines, tools and measuring devices. The experimental part is dedicated to the results of experiment. At the end of the thesis, a discussion of the results and conclusion are presented.

Key words: tool back angle, composite material with carbon fibers, delamination, surface roughness

Poděkování

Tímto děkuji vedoucí diplomové práce paní doc. Ing. et Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D. a konzultantovi Ing. Tomáši Knápkovi za cenné připomínky a odborné rady při vypracování této diplomové práce.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Teoretická část	11
2.1	Charakteristika konvenčního obrábění kompozitů vyztužených vlákny.....	11
2.1.2	Problematika obrábění kompozitů vyztužených vlákny	13
2.2	Vliv směru vlákna	15
2.2.1	Směr vlákna 0°	16
2.2.2	Směr vlákna 45°/135°	16
2.2.3	Směr vlákna 90°	17
2.3	Vliv nastavení úhlu čela frézy	18
2.3.1	Pozitivní úhel čela frézy	18
2.3.2	Negativní úhel čela frézy	19
2.4	Delaminace při frézování kompozitních materiálů	19
2.5	Nástroje pro frézování kompozitních materiálů.....	22
2.5.1	Geometrie nástrojů pro obrábění kompozitních materiálů.....	22
3	Metodika měření	25
3.1	Kompozitní materiál.....	25
3.2	Nástroje	26
3.3	Řezné podmínky	28
3.4	Stroj.....	28
3.5	Odsávací zařízení	29
3.6	Použité přípravky	31
3.7	Měření řezných sil.....	32
3.8	Měření drsnosti povrchu	33
3.9	Měření opotřebení nástroje a velikosti delaminace.....	34
4	Experimentální část.....	36
4.1	Hodnocení opotřebení nástroje	36
4.1.1	Závislost opotřebení nástroje na čase frézování.....	36
4.2	Hodnocení drsnosti obrobene plochy	38
4.2.1	Závislost drsnosti na opotřebení nástroje.....	38
4.3	Hodnocení řezné síly.....	39
4.3.1	Závislost řezné síly na opotřebení nástroje	39
4.3.2	Závislost drsnosti na řezné síle.....	40
4.4	Hodnocení delaminace	42
4.4.1	Vliv delaminace na drsnost	42
4.4.2	Vliv opotřebení na delaminaci	44
4.4.3	Vliv řezné síly na delaminaci	46
4.4.4	Typy delaminace	47
5.	Diskuse výsledků	50

6. Závěr	54
Použitá literatura	55

Seznam použitých zkratek a symbolů

FRP		fiber reinforced polymer
HV		tvrdost podle Vickerse
CFRP		carbon fiber reinforced polymer
v_c	[m/min]	řezná rychlost
v_f	[mm/min]	posuv
a_e	[mm]	boční krok
3D		trojrozměrný
SW		software
Ra	[μm]	průměrná aritmetická odchylka profilu
PC		osobní počítač
t	[min]	čas
VB	[μm]	opotřebení nástroje
VB_{krit}	[μm]	kritické opotřebení nástroje
U		nejistota měření
F_y	[N]	posuvová řezná síla

1 Úvod

Obrábění kompozitních materiálů je považováno za finální operaci vzhledem k tomu, že díly z polymerů vyztuženými vlákny jsou lisované, kladené nebo navíjené do podoby blízké konečnému tvaru výrobku. Dokončování na finální rozměr souvisí zejména s obrobením kontury často prostorově velmi členitého dílce na rozměr v předepsaných tolerancích a zhotovení montážních otvorů pro vzájemné spojení dílců, kde je zejména požadována přesná vzájemná poloha děr a to i na rozměrných dílcích. Hlavní předpoklad je jakostní provedení řezu při vysoké produktivitě obrábění.

Anizotropní charakteristika kompozitního materiálu vyztužených uhlíkovými vlákny snadno vede k defektům, jako je delaminace, trhání a ořepky v procesu frézování, což vážně omezuje jeho široké použití.

Předkládaná diplomová práce se věnuje studiu integrity povrchu při frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny.

Cíl studie je zaměřen na výzkumu vlivu úhlu hřbetu u frézovacího nástroje na opotřebení, řezné síly, drsnost obrobené plochy a delaminaci při nesousledném frézování kompozitních desek, vyztužených uhlíkovými vlákny, s tkaninou keprové vazby a s orientací vláken 90°.

K dosažení cíle studie je nutné nejprve navrhnout vhodné nástroje s různorodostí úhlu hřbetu a veškeré strojní a měřicí zařízení pro realizovaný výzkum. Dále vytvořit metody měření a vyhodnocení pro opotřebení řezného nástroje, řezné síly, drsnost obrobené plochy a delaminaci. V neposlední řadě shrnout a zhodnotit dosažené výsledky v rámci výzkumu.

Pro dosažení plánovaného cíle práce jsou nezbytné teoretické znalosti dané problematiky, které jsou uvedeny v teoretické části této práce.

2 Teoretická část

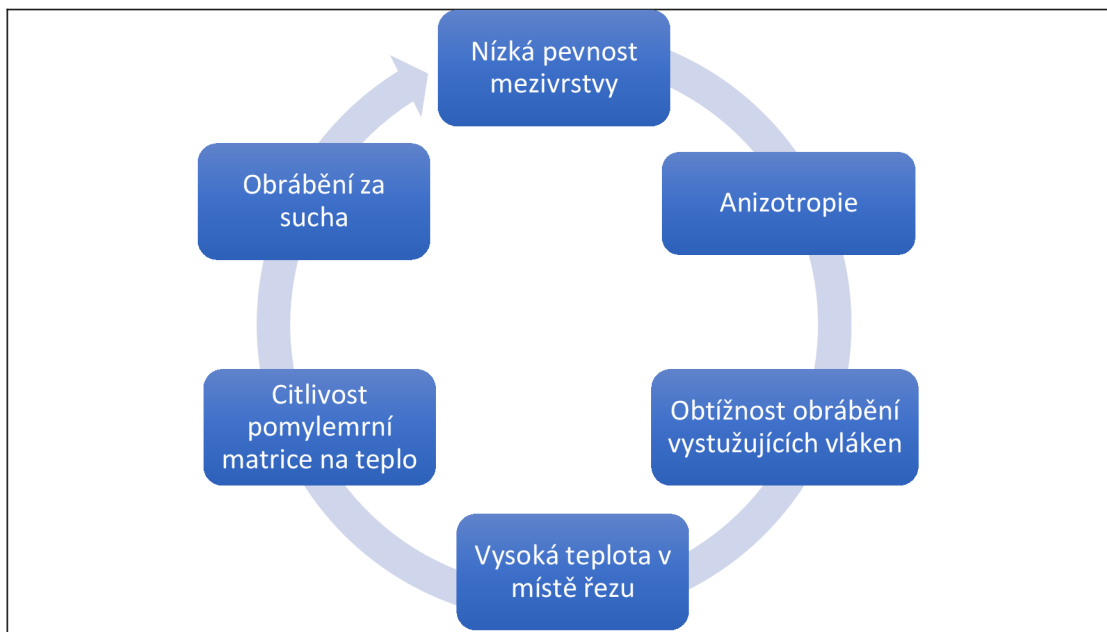
Teoretická část předkládané diplomové práce souvisí se současným stavem řešené problematiky.

Podstatné informace k obrábění kompozitních materiálů vyztužených vlákny a současným poznatkům s tím spojenými jsou uvedeny v podkapitole 2.1. Důležité informace o mechanismech poškození kompozitních materiálů a vlivu směru vyztužujících vláken, jsou vysvětleny v podkapitole 2.2. Význam vlivu nastavení úhlu čela frézy a problematika delaminace při frézování kompozitních materiálů je uvedena v podkapitolách 2.3 a 2.4. Závěrečná podkapitola 2.5 se věnuje nástrojům pro frézování kompozitních materiálů. Všechny podkapitoly jsou stěžejní pro experimentální část práce.

2.1 Charakteristika konvenčního obrábění kompozitů vyztužených vlákny

Kompozit je typ heterogenního materiálu, který je tvořen vyztužujícími prvky, nejčastěji uhlíkovými nebo skelnými vlákny, které jsou uloženy v polymerní, nejčastěji epoxidové nebo polyesterové matrici.

Při obrábění těchto materiálů je třeba se zaměřit na zásadní vlastnosti které jsou zobrazeny v následujícím obr. 1 a níže více popsány.



Obr. 1 – Vlastnosti polymerů vyztužených vlákn

Nízká pevnost mezivrstvy

Kompozitní materiály jsou převážně tvořeny na sebe poskládanými vrstvami, nejčastěji předem prosycené uhlíkové nebo skelné tkaniny. Vlastnosti pryskyřičné matrice rozhodují především o pevnosti mezivrstvy materiálů. Pevnost mezivrstvy, která zde vzniká může však být nízká vzhledem k realizovanému technologickému procesu nebo vadám, které při procesu kladení vrstev mohou vzniknout [1].

Anizotropie

Protože vlákna jsou kladena v určitém směru, vlákno zajišťuje mechanické vlastnosti kompozitních materiálů v podélném směru vlákna. Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů ve směru kolmém na osu vláken jsou výrazně nižší, což má za následek silnou anizotropii vlastností kompozitních materiálů.

Obtížné obrábění vyztužujících vláken

Vyztužující vlákna obecně způsobují určité potíže s obráběním kvůli své vysoké pevnosti a nízkému koeficientu tepelné vodivosti (oproti kovům). Například tvrdost uhlíkových vláken je asi 648 HV [2], je tedy nepatrně vyšší než u běžné rychlořezné oceli (asi 602 HV). Frézy (nástroje pro frézování) se proto při obrábění rychle opotřebovávají a zkracují tak svoji životnost. Při obrábění kompozitů z polymerů vyztužených uhlíkovými vlákny (v anglickém jazyce označováno jako CFRP) šroubovitým vrtákem

z rychlořezné oceli musí být každý vrták znovu nabroušen nebo vyměněn po vyvrtání 2–3 otvorů.

Vysoká teplota v místě řezu

Protože koeficienty tepelné vodivosti uhlíkových vláken, aramidových vláken a epoxidové pryskyřice jsou nízké v porovnání s kovy, koeficient tepelné vodivosti kompozitních materiálů, zejména koeficient tepelné vodivosti mezivrstvy, je výrazně nižší než u běžných kovových materiálů. Proto je snadné způsobit akumulaci a dosáhnout tepla v místě řezu, což má za následek nadměrnou teplotu.

Citlivost polymerní matrice na teplo

Vysoká teplota může ovlivnit jak chování uhlíkových vláken, tak může i významně ovlivnit pryskyřici. Teplota skelného přechodu standardní epoxidové pryskyřice je v rozmezí 50–150 °C. Teplota měknutí a teplota vytvrzování epoxidové pryskyřice jsou stejné. Pokud je teplota řezání vyšší než teplota skelného přechodu pryskyřice, pryskyřice změkne, dojde k chemickému rozkladu a degradaci. Degradace pryskyřice může způsobit destrukci rozhraní vlákna/matrice, což vede k vážným defektům a zhoršení celkového stavu kompozitních materiálů [4].

Obrábění za sucha

Při obrábění kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny často dochází k delaminaci vrstev. Vzhledem k tomuto problému není potenciálně žádoucí, aby mezi delaminované vrstvy vstupovaly procesní kapaliny. Přítomnost těchto směsí by vedla k prohlubování a rozšiřování vad mezi vrstvami a finální snižování funkce kompozitu [5]. Procesní kapalina proto není při zpracování kompozitu žádoucí ani povolena.

2.1.2 Problematika obrábění kompozitů vyztužených vlákny

Mezi hlavní technické potíže při obrábění kompozitních součástí v současnosti patří:

1) Obtížnost získání požadované kvality

Příprava kompozitních součástí určuje anizotropii mechanických vlastností. Charakteristická morfologie uhlíkových vláken uložených v epoxydové matici

pravděpodobně vedou k tvorbě submikrometrových struktur na povrchu obrobených součástí, které by se daly přirovnat k „velmi jemným chloupkům“ [6].

2) Vážné opotřebení nástroje

Díky vysoké tvrdosti vlákna a nízké tepelné vodivosti polymerů vyztuženými vlákny je opotřebení nástroje při obrábění rychlé. Teplota v místě řezu je vysoká a koncentruje se v úzké oblasti blízko řezné hrany nástroje. Proto je povrch boku frézy obvykle během procesu obrábění vážně opotřebován (krátká doba řezání nástroje). To ovlivňuje tvar, přesnost rozměrů výrobků a kvalitu povrchu a vyžaduje vysoké výrobní náklady [7].

3) Vysoké náklady na zpracování a rizika

Většina polymerů vyztuženými vlákny je drahá a jejich výrobní náklady s tím spojené jsou vždy vysoké. Tyto kompozitní součásti však lze jen stěží opravit kvůli nevyhovujícím otvorům nebo přesnosti a kvalitě obrábění při následném zpracování. Bylo hlášeno, že v leteckém průmyslu bylo odmítnutí dílů vyrobených z kompozitních laminátů kvůli poškození delaminací způsobeným vrtáním během konečné montáže až 60 % [8]. Například při stavbě malých letadel je do kompozitních součástí vyvrtáno až 100 000 děr.

4) Prachové znečištění provozního prostředí a poškození zařízení

Oblaka prachu vznikající při obrábění kompozitních materiálů jsou škodlivá pro zdraví pracovníků i pro zařízení. Zejména uhlíkové vlákno má vysokou elektrickou vodivost a kromě pochopitelného znečištění životního prostředí může způsobit zkrat periferního elektronického řídicího systému nebo elektrické sítě.

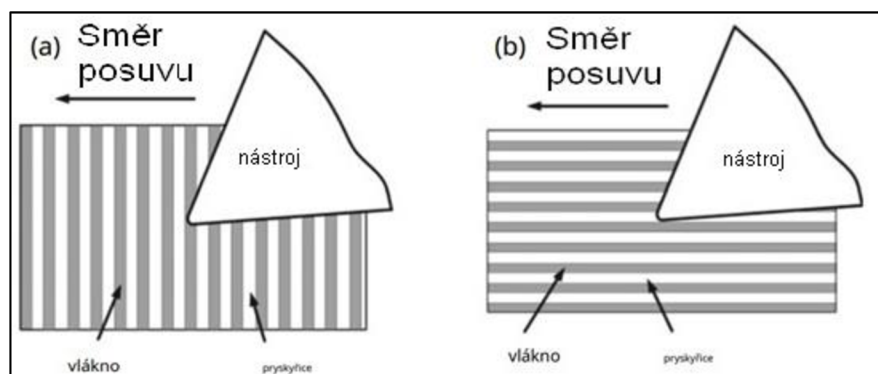
5) Mechanismy poškození

Formy poškození a způsoby porušení polymerních materiálů vyztužených vlákny jsou silně ovlivněny změnami jejich mikrostruktur a vlastnostmi rozhraní, včetně orientace vláken, objemového podílu vláken a matrice, dutin a trhlin. V důsledku vysoké řezné síly to může způsobit nové poškození během procesu řezání polymerů vyztuženými vlákny. Protože se kompozit skládá z vyztužené fáze (vlákno) a spojité fáze (epoxidová pryskyřice), je proces obrábění kompozitů složitější než u homogenních materiálů. Například úhel řezu se v různých polohách ostří mění během vrtání polymerů vyztuženými vlákny pomocí standardního spirálového vrtáku. Na polymery vyztuženými

vlákny je tedy aplikována nerovnoměrná řezná síla, která může způsobit komplexní stav napětí v polymerech vyztuženými vlákny.

Vlákna jsou pokládána podle specifického směru a tvoří tak kompozit vyztužený dlouhými vlákny. Jinými slovy, podélné a příčné vlastnosti vlákna se výrazně liší. Jednosměrný kompozit, ve kterém jsou vlákna uložena ve stejném směru, má silnou anizotropii. Při analýze režimu řezání lze anizotropii materiálů zjednodušit do dvou modelů: řezání kolmo k ose vlákna ve více vrstvách (ortogonální obrábění [9]) a řezání ve vrstvě (paralelní řezání), jak je znázorněno na Obr.2 [10].

Ortogonální obrábění se používá zejména ke studiu anizotropie při zpracování kompozitů. Namáhání materiálů při soustružení a vrtání se však výrazně liší od ortogonálního obrábění. V úběru materiálu nedominuje ortogonální obrábění, ale převládá řezání ve vrstvě. Zejména vícevrstvé materiály byly při vrtání řezány současně hlavním břitem. Řezání ve vrstvě materiálu je skutečně důsledkem jednoho úseku hlavního ostří. Proto lze vrtání definovat jako řezání příslušné vrstvy vláken vícestupňovým hlavním břitem. Lze jej rozložit na několik řezných procesů řezání ve vrstvě. Protože řezná rychlost používaná při vrtání kompozitu je obecně vysoká a rychlost posuvu je relativně nízká, je axiální rychlost posuvu, když vrták otáčí o jeden cyklus (rychlost posuvu na otáčku), relativně malá [11]. Vrtání má jak ortogonální obrábění, tak řezání ve vrstvě, řezání ve vrstvě může mít dominantní roli při vrtání kompozitů. Řezný režim hlavního břitu běžného šroubovitého vrtáku lze zjednodušit na ortogonální obrábění podobné soustružení.



Obr. 2 – Model obrábění v ortogonální rovině obrábění – a) směr vláken 90°, b) směr vláken 0° [22]

2.2 Vliv směru vlákna

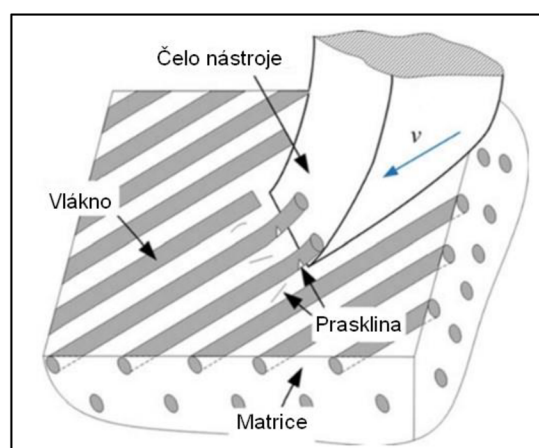
Mechanické chování mezi kompozitem a frézou je ovlivněno hlavně anizotropií materiálu a úhlem frézy. V kompozitech vlákna nesou zatížení a pryskyřice slouží k

přenosu sil mezi vlákny. Způsoby porušení materiálu lze tedy analyzovat především z pohledu namáhání vláken.

2.2.1 Směr vlákna 0°

Při obrábění ve směru rovnoběžném se směrem vláken (0°) se nástroj pohybuje určitou rychlostí a hlavní řezná síla je generována interakcí mezi čelem nástroje a materiálem. Řezná síla se rozkládá na sílu rovnoběžnou se směrem vlákna a kolmou ke směru vlákna. Síla kolmá k vláknu vytváří tlakové napětí na vlákno, vlákna jsou tlačena, dochází k jejich prohýbání do obou stran (namáhání ve vzpěru) v místech tahového napětí ve vláknech vznikají trhliny a vlákna se lámou. Křehká polymerní matrice obklopující vlákna je také namáhána tlakem, praská a drtí se na malé částice. Směr deformace způsobené vzpěrem a pozice (umístění) trhlin je ovlivněna především úhlem nástroje.

Mechanismus úběru materiálu u kompozitů z polymerů vyztužených uhlíkovými vlákny při obrábění ve směru rovnoběžném se směrem vláken (0°) je znázorněn na Obr.3.



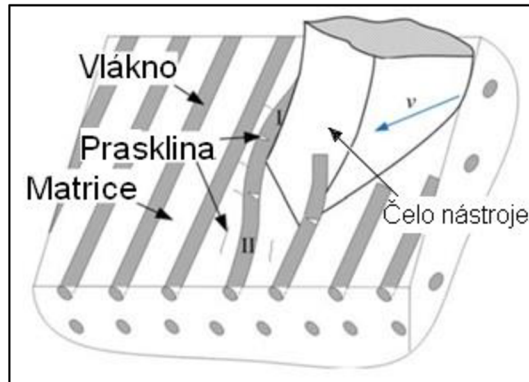
Obr. 3 – Mechanismus úběru polymerního materiálu vlákny při směru vlákna 0° [25]

2.2.2 Směr vlákna 45°/135°

Při obrábění ve směru vláken pod úhlem 45°/135° je řezná síla rozložena na řeznou sílu kolmou ke směru vláken a rovnoběžnou se směrem vláken. Dochází k ovlivnění vláken jak tlakovou, tak tahovou silou – vlákna v přímém kontaktu s nástrojem jsou namáhána tlakem, zatímco dochází k jejich natahování na straně druhé. Vznikají trhliny, vlákna jsou současně tlačena, tažena a ohýbána. Trhliny vzniklé na jedné straně napětí v tahu se snadno šíří, zatímco trhliny na straně napětí v tlaku se šíří špatně. Následkem těchto sil dochází k praskání a štěpení vláken. Současně dochází k destrukci křehké pryskyřice při tlaku, tahu i ohybu, matrice nese tlakové napětí a vytváří tlakovou

deformaci. V důsledku toho se trhliny šíří kolmo ke směru vláken v oblasti rozhraní a v některých případech může docházet i k podélné destrukci vláken.

Mechanismus úběru polymerního materiálu vyztuženým vlákny při obrábění pod úhlem směru vláken $45^\circ/135^\circ$ je znázorněn na Obr.4.



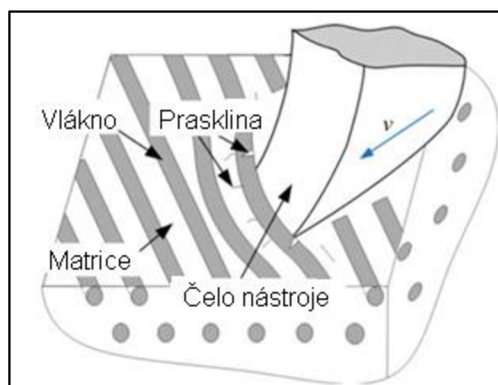
Obr. 4 – Mechanismus úběru polymerního materiálu vlákny při směru vlákna 45° [25]

Na obr. 4 je viditelné, že ohyb v části I vytvoří tlakové napětí v pryskyřici a tvoří tlakovou deformaci. Současně se vytváří a rozšiřují trhliny kolmo ke směru vláken na rozhraní vlákno – pryskyřice. Ohyb v části II vytváří v matrici tahovou deformaci díky tlakovému napětí v řezné zóně. Výsledkem je delaminace mezi vláknem stejně jako trhliny v pryskyřici paralelní k vláknu. Pokud jsou vyztužujícími vlákny uhlíková, křehký materiál, může malá deformace vytvořit trhlinu ve vlákně. Dále ještě dochází k tomu, že trhliny jsou vytvářeny zejména na místě, kde je největší zakřivení. Následně proto v části II vlákna snadno tvoří trhliny, zatím co u vláken v části I je náročné trhliny vytvořit. Trhliny vytvořené na jedné straně tahového napětí se snadno šíří, zatím co trhliny na straně tlakového napětí se šíří obtížně.

2.2.3 Směr vlákna 90°

Při obrábění ve směru vláken pod úhlem 90° je hlavní řezná síla kolmá k ose vlákna a lze ji rozložit na řeznou sílu v rovině vlákna a kolmo k rovině vlákna. Vlákna jsou v místě kontaktu s nástrojem namáhána tlakem a mohou tvořit praskliny, na opačné straně vlákna dochází k tahu a následnému lomu vláken. Polymerní matrice je před frézou namáhána tlakem a vznikají praskliny a křehká matrice se drtí na malé částice.

Mechanismus úběru materiálu polymeru vyztuženým vlákny při obrábění pod úhlem směru vláken 90° je znázorněn na Obr.5.



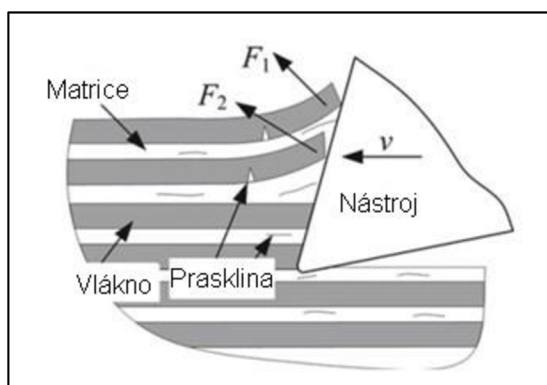
Obr. 5 – Mechanismus úběru polymerního materiálu vlákny při směru vlákna 90° [25]

2.3 Vliv nastavení úhlu čela frézy

Namáhání kompozitních materiálů při frézování se liší s úhlem čela frézy, což má za následek různorodé mechanické chování materiálů. V rámci mnohých studií bylo zkoumáno mechanické chování kompozitních materiálů pod různými úhly čela frézy, tj. pod úhlem pozitivním, negativním a nulovým.

2.3.1 Pozitivní úhel čela frézy

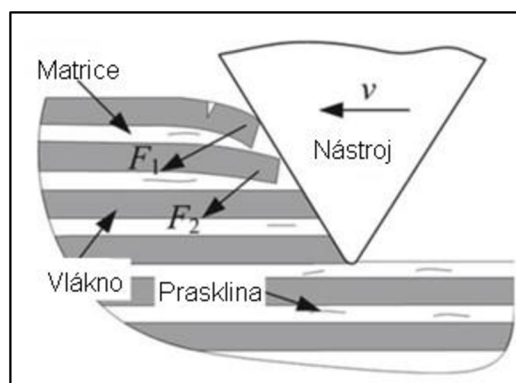
Při řezném procesu frézování s pozitivním úhlem čela frézy se v rámci účinku řezné síly hromadí materiál. Kromě toho řezná síla způsobuje odlupování vlákna z matrice. Když deformace vlákna dosáhne určitého stavu, vlákna se začínají lámat a jsou odstraňována z místa řezu. Tuhost odloupeného vlákna je relativně nízká, takže některá vlákna je obtížné odstranit a udržet v místě řezu. Následně odloupená vlákna pak vytváří jemné chloupky, Obr.6.



Obr. 6 – Mechanismus úběru polymerního materiálu vlákny při kladném úhlu řezu frézy [16]

2.3.2 Negativní úhel čela frézy

Při řezném procesu frézování s negativním úhlem čela frézy řezná síla směřuje na vnitřní stranu kompozitního materiálu pod čelo frézy. Vlákna jsou stlačována řeznou silou a tím dochází k jejich ohybové deformaci. Když deformace dosáhne určitého rozsahu, začnou se na vláknech vytvářet a šířit trhliny. Vlákna jsou následně odstraněna z místa řezu jako rozdrčené třísky. V procesu řezání jsou vlákna rozdrčena, nevytváří se jemné chloupky a kvalita obrobeneho povrchu je relativně dobrá, jak je znázorněno na Obr. 7.



Obr. 7 – Mechanismus polymerního materiálu vlákny při záporném úhlu řezu frézy [16]

Trhliny v kompozitním materiálu se snadno vytvářejí na rozhraní pryskyřice a vlákna pod různými úhly čela frézy. Účinkem řezné síly se na rozhraní vlákna a pryskyřice tvoří trhliny. S nárůstem řezné síly se začínají z rozhraní šířit trhliny. Kromě toho jsou trhliny na různých rozhraních vláken spojeny do velké trhliny. Při záporném úhlu čela frézy směřuje řezná síla dovnitř materiálu. Trhliny v křehkých materiálech se snadno šíří směrem k obrobeneému povrchu.

2.4 Delaminace při frézování kompozitních materiálů

Zcela rozdílné mechanické parametry vyztužujících vláken a použité matrice se projevuje při obrábění z hlediska kvality obrobeneého povrchu takzvanou delaminací. Delaminace, která je nejproblematičtější, vzniká v důsledku překročení sil držících vrstvy kompozitu pohromadě. Je tedy daná soudržností jednotlivých nanesených vrstev kompozitu, ale i tím, jak pevné je spojení mezi vlákny a jejich pojivem. V extrémních případech může dojít k takovým poškozením, že dojde k ovlivnění mechanických vlastností v blízkém i vzdálenějším okolí od obráběného povrchu [31].

Delaminace je nejvíce diskutovaným problémem při obrábění polymerních kompozitů s vláknovou výztuží. Předcházení delaminaci je jedna ze základních podmínek úspěšného obrobeneho kompozitního dílce. Při vzniku delaminace dochází k významnému

poklesu mechanických vlastností kompozitu v místě jejího výskytu a dále ke zhoršení jakosti obrobeného povrchu. Zvládnutí delaminace při obrábění je komplexní problém zahrnující v sobě vliv vhodné geometrie obráběcího nástroje a řezných podmínek [32]. Kombinací řezných podmínek a geometrie nástroje lze řídit směr a velikost působících sil na krajní vrstvy kompozitu. Trendem v obrábění kompozitů je předcházet delaminaci zcela nebo ji alespoň minimalizovat.

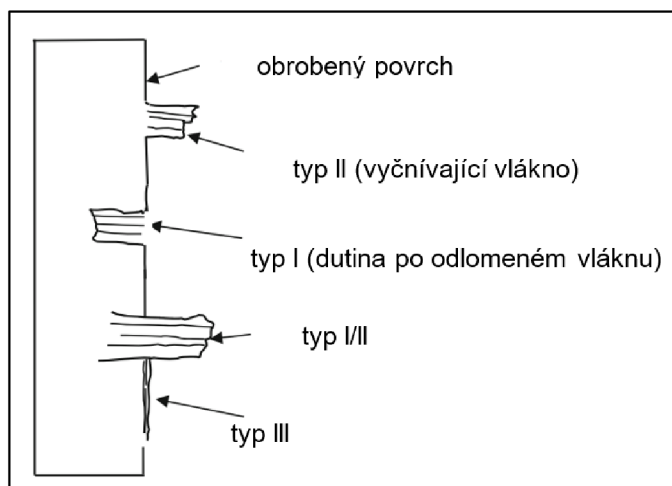
Delaminace u polymerních kompozitních materiálů s termoplastickou maticí a s maticí termosetickou se liší zejména v tom, v jaké míře se vyskytují. Obecně je faktem, že kompozity s termoplastickou maticí jsou méně náchylné na delaminaci [32].

Delaminaci lze popsat dle literatury [36] následovně. Nástroj vniká do kompozitního materiálu. Vyztužující vlákna se ohýbají pod tlakem a na jejich horní části vznikají trhliny vlivem tahu. Vzniklé trhliny iniciují lámání vláken. Na spodní části jsou vlákna tlačena do pryskyřice. Pryskyřice je pod vlákny zatěžována v tlaku a drtí se. Protože se vlákno v horní vrstvě obráběného vzorku po vniknutí nástroje do materiálu láme dochází k jejich následnému uvolňování. A tak poté v horní vrstvě vlákna chybí. Tento způsob je dle literatury nazýván delaminace typu I. K delaminaci typu I dochází nejběžněji při obrábění ve směru vláken pod úhlem 45° a 90° .

Nástroj působí tlakem na vyztužující vlákna, vlákna se ohýbají či se vyhnou od dráhy posouvajícího se nástroje. Ohyb či vyhnutí vláken způsobí neořezání některých vláken, která se posléze vrátí zpět do své původní polohy v kompozitním materiálu. Vznikají tak vyčnívající vlákna na obrobeném povrchu. Jedná se delaminaci typu II. K delaminaci typu II dochází nejběžněji při obrábění ve směru vláken pod úhlem 135° .

Delaminace typu III popisuje volná vlákna, která částečně ulpívají k obrobenému povrchu a leží rovnoběžně se směrem posuvu nástroje. Delaminace typu I i typu III generují volná vlákna „připojená“ k obrobenému povrchu a způsobují nekvalitní „neostrou“ obrobenou plochu velmi připomínající ořepy známé z obrábění kovových materiálů.

Typy delaminace jsou uvedeny na Obr. 8.



Obr. 8 – Typy delaminace při frézování [20]

V posledních letech se na danou problematiku zaměřilo mnoho studií a pokoušelo se poskytnout fenomenologické a empirické modely pro predikci vzniku a šíření delaminace. Takové modely usnadňují implementaci delaminace jako kritéria monitorování procesu.

Hintze a kol. [37] studovali výskyt a šíření delaminace a vyčnívání vláken při obvodovém frézování jednosměrného kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny a uvedli, že delaminace úzce souvisí s opotřebením břitu (ostří) a orientací vláken horní vrstvy kompozitního materiálu.

Bylo zjištěno, že výskyt delaminace je častější u řezných nástrojů s velkými poloměry špičky nástroje a při obrábění kompozitních materiálů se směrem vláken pod úhlem 90° a 180° .

Později byl odvozen analytický model pro predikci délky vyčnívajících vláken [38]. Hosokawa a kol. [39] zkoumali vliv úhlu šroubovice stopkové frézy na opotřebení nástroje a delaminaci při ořezávání hran vícesměrného polymeru vyztužený uhlíkovými vlákny. Bylo prokázáno, že při obrábění nástrojem s velkým úhlem šroubovice bylo dosaženo hladšího povrchu a menšího opotřebení břitu nástroje. Kromě toho došlo i ke snížení opotřebení nástroje a delaminace, když byl směr frézování nakloněn tak, že směr výsledné síly byl paralelní se směrem posuvu. Toto zjištění bylo potvrzeno prací Qinglianga a kol. [40], který ukázal, že minimálního poškození delaminací bylo dosaženo, když byl úhel sklonu roven úhlu šroubovice frézy. Ve své práci také ukázali, že typ delaminace a její četnost výskytu závisela na úhlu sklonu a orientaci vláken. Při velkém úhlu sklonu vláken byl výrazným typem delaminace typ I/II. Při malém úhlu

sklonu docházelo k delaminaci typu I častěji při orientaci směru vláken 45° a 90° a k delaminaci typu II častěji docházelo při orientaci vláken ve směru 135° .

2.5 Nástroje pro frézování kompozitních materiálů

Volba vhodného nástroje pro obrábění daného typu kompozitního materiálu s polymerní výztuží je důležitá z hlediska předcházení výskytu delaminace, snížení řezných sil, správného odřezávání vláknové výztuže i matrice.

Nástroj musí být dostatečně ostrý, s malým poloměrem špičky a velmi pozitivním úhlem čela a hřbetu kvůli odřezávání matrice a výztuže. Kvůli abrazivní výztuži musí být i velmi odolný vůči abrazivnímu otěru [34].

Mechanismy opotřebení nástrojů obrábějících polymerní kompozitní materiály jsou odlišné od mechanismů opotřebení při obrábění kovů. U kovů může teplota s rostoucí řeznou rychlostí růst rychle a často se stává hlavní příčinou opotřebení nástrojů. Do takového opotřebení můžeme započítat například chemický otěr či difúzi. U polymerních kompozitních materiálů však teplota neroste tak výrazně a nemůže dosáhnout tak vysokých hodnot, aby mohlo docházet k mechanismům opotřebení nástroje souvisejících s vysokou řeznou rychlostí a potažmo teplotou v řezu [32]. Jako hlavní mechanismus opotřebení byl identifikován abrazivní otěr. Ten je způsobený vysokou tvrdostí a pevností vláknové výztuže kompozitu [32].

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

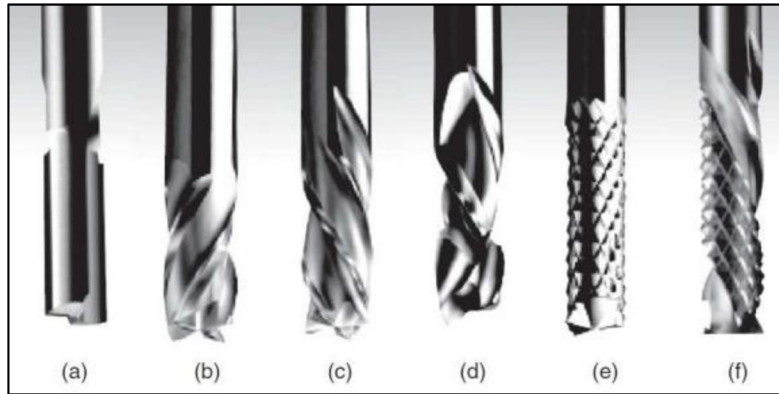
2.5.1 Geometrie nástrojů pro obrábění kompozitních materiálů

Pro obrábění kompozitních materiálů je doporučován úhel stoupání šroubovice přibližně 45° a úhel čela mezi 0° až 7° . Příliš malý úhel hřbetu vede k velkému opotřebení na hřbetu. V důsledku malého úhlu hřbetu totiž dochází k velkému tření mezi hřbetem nástroje a obrobenou plochou. Co se poloměru ostří týče, ten by měl být co možná nejmenší v řádech setin mm. Pro skelná a uhlíková vlákna je požadavek na rádius řezné hrany $r = 10$ až $15 \mu\text{m}$. Při větších poloměrech bude více materiálu odcházet pod břit. Vzhledem k povaze obráběného materiálu bude v důsledku velkého poloměru ostří docházet k elasticko-plastické deformaci matrice pod břitem, tím pádem k nárůstu teploty a zároveň místo odřezávání vláken bude docházet k jejich ohýbání a lámání, což vede

k poškození obráběného povrchu a rychlejšímu opotřebení nástroje. Na druhou stranu při použití ostré řezné hrany bude docházet k rychlejšímu opotřebení nástroje, které bude způsobené abrazií vláknové výztuže. Opotřebovaná hrana se pak bude chovat stejně jako velký poloměr ostří. Je nutné tedy použít nástroje s velkou řezivostí, které nepodléhají tak rychle abrazi, protože ostrou hranu na nástroji potřebujeme, požadujeme-li dobrou jakost obrobené plochy [32].

Pro obrábění kompozitních materiálů je k dispozici široká paleta řezných materiálů a řezných geometrií. Jeden z důvodů pro tolik variant nástrojů spočívá v rozdílných charakteristikách výrobků pramenících z rozdílných typů výztuže a matric a objemu vláknové výztuže, které jsou využívány v rozličných aplikacích. Je také obecně známo, že nástroje pro kompozitní materiály těží z know how dřevozpracujícího průmyslu. Vzhledem k podobnosti v makrostruktuře některých kompozitů a dřeva je možné aplikovat geometrie fréz na dřevo i na obrábění kompozitů. To je zřejmé z porovnání řezných geometrií na Obr. 9. Tyto frézy ze slinutých karbidů reprezentují skupinu řezných nástrojů vhodných pro obrábění a ořezávání kompozitních desek. Přímoý břit u nástroje je nejjednodušší a nejvíce všestranná nástrojová geometrie kvůli jednoduché výrobě. Nástroj s nulovým úhlem šroubovice umožňuje dosáhnout čisté odřezávání a dobré jakosti obrobené plochy. Má ovšem nevýhodu ve snížené schopnosti odvádět třísky a má tendenci k ucpávání drážek nástroje. To ústí v odtlačování povrchových vrstev a zhoršení jakosti povrchu Obr. 9 a. a také způsobuje měknutí matrice a její lepení na řeznou hranu nástroje. Použití chlazení vzduchem v kombinaci s vhodnými řeznými podmínkami může zlepšit odvod třísek [35]. Šroubovice v jednom směru u nástroje vytváří axiální sílu, která působí normálově ke skladbě jednotlivých vrstev laminátů. Směr síly závisí na směru vinutí šroubovice. Tato síla pak může být příčinou delaminace či zhoršeného odřezávání svrchních vrstev, které nemají proti působící síle oporu v daném směru Obr. 9 b, c. Problém může být řešen dvojitou šroubovicí, nebo také kompresními frézami. Dvě protiběžné šroubovice vytvářejí síly, které způsobují kompresi obou protilehlých stran desky laminátu, a tak předcházejí delaminaci Obr. 9 d.

Protiběžné šroubovice vybroušené na těle nástroje vytvářejí mnoho řezných špiček, které stíhají vlákna v kompozitu, zatímco působí současně jejich natažení. To vede k jistému přestřížení vláken. Zjevná nevýhoda tohoto nástroje je brzké opotřebení hrotů a náchylnost k ucpávání drážek. Obě tyto nepříznivé vlastnosti mohou být ovlivněny volbou vhodné tloušťky třísky. [35].



Obr. 9 – Geometrie řezných nástrojů pro frézování kompozitních materiálů (a) přímé břity, (b) fréza se šroubovou drážkou, (c) levořezná fréza se šroubovou drážkou, (d) dvouspirálový kompresní nástroj, (e) vícehrutý nástroj, (f) vícebřitý s drážkou (ukázka nástrojů z nástrojárny ONSRUD) [35].

V rámci provedené rešerše nebyl nalezen žádný kvalitní výzkum, který by se zabýval přímo vlivem úhlu hřbetu frézovacího nástroje na kvalitu integrity povrchu při frézování kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny. Proto je předkládaná diplomová práce zaměřena na výzkumu vlivu úhlu hřbetu u frézovacího nástroje na opotřebení, řezné síly, drsnost obrobenej plochy a delaminaci kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny.

3 Metodika měření

Metodika měření podává informace o realizovaném experimentálním měření z pohledu jeho přípravy, provedení a vyhodnocení. V kapitole 3.1 je popsán použitý kompozitní materiál. Popis a důležité technické údaje použitých frézovacích nástrojů a návrh řezných podmínek je v kapitole 3.2 a 3.3. Popis a specifikace použitého frézovacího stroje, periferních zařízení a přípravků je uveden v kapitolách 3.4, 3.5 a 3.6. Postup měření sil a použité vybavení je uvedeno v kapitole 3.7, měření drsnosti povrchu je uvedeno v kapitole 3.8. V poslední kapitole 3.9 je popsáno měření opotřebení frézovacího nástroje a měření vzniklé delaminace.

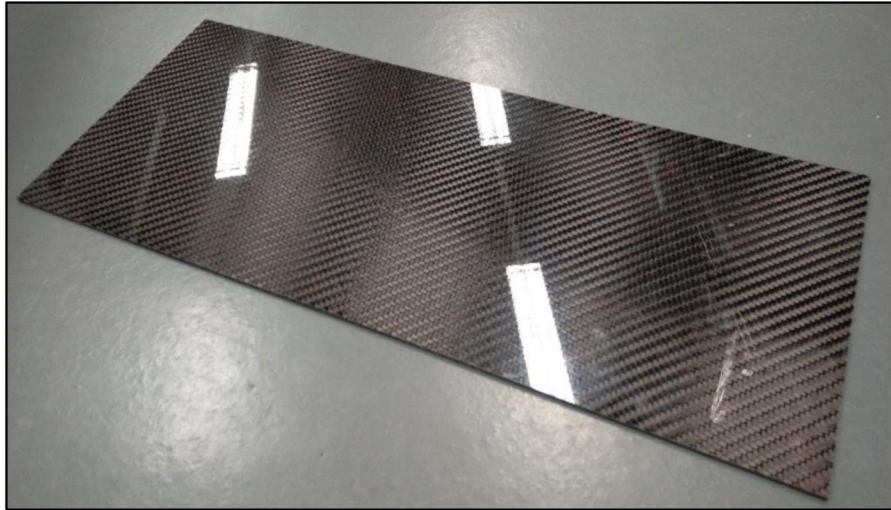
Experimentální měření probíhalo v laboratoři třískových technologií a procesů Katedry obrábění a montáže Technické univerzity v Liberci.

3.1 Kompozitní materiál

Jako materiál byl zvolen kompozit vyztužený uhlíkovými vlákny s tkaninou keprové vazby s orientací vláken 90°. Informace o materiálu jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 – Vlastnosti kompozitní desky

tloušťka [mm]	4
šířka [mm]	250
délka [mm]	600
metoda výroby	vakuová infuze
matrice	epoxidová pryskyřice LG120 (GRM Systems s.r.o.)
tužidlo	HG 356 (GRM Systems s.r.o.)
výztuž	CCH600 (Kordkarbon a.s.)
gramáž výztuže [g/cm ²]	600
typ vazby	keprová – 2x2 cm



Obr. 10 – Kompozitní deska

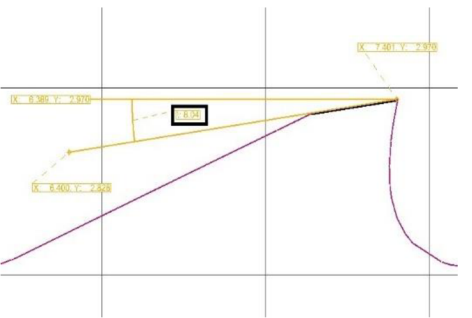
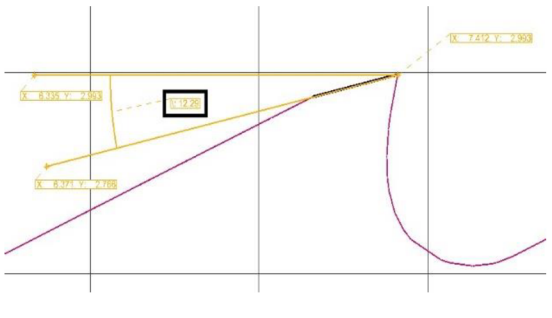
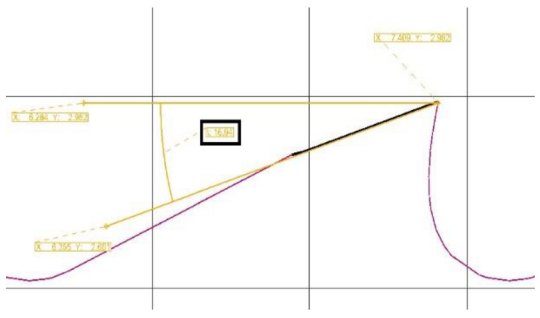
Výše uvedená kompozitní deska byla zvolena pro její široké použití při výrobě odlehčených konstrukcí především v leteckém průmyslu.

3.2 Nástroje

Pro experiment této diplomové práce byly použity 3 frézy vyrobené společností Unicut. Frézy byly stopkové o průměru 6 mm vybroušeny ze slinutého karbidu. Geometrie fréz byla speciálně určena pro obrábění kompozitních materiálů. Byly použité 3 frézy se stejnou geometrií pouze každá měl jiný úhel hřbetu, a to: 8,4°, 12,4° a 16,4°. Na nástrojích nebyl nanesen žádný povlak. Technické specifikace jednotlivých nástrojů jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 – Frézovací nástroje

úhel hřbetu	8,4°	12,4°	16,4°
nástroj			

parametr	hodnota		
úhel hřbetu	8,4°	12,4°	16,4°
grafické znázornění			
průměr [mm]	6	6	6
délka řezné části [mm]	15	15	15
úhel stoupání šroubovice [°]	44,7°	44,7°	44,7°
řezný materiál	WC-5Co	WC-5Co	WC-5Co
povlak	bez povlaku	bez povlaku	bez povlaku

Tab. 3 – Technická specifikace nástrojů

Nástroje byly upnuty v tepelných upínačích. Tyto upínače vynikají především nízkou hodnotou obvodové házivosti 0,003 mm. Štíhlá konstrukce upínače je výhodná především při víceosém obrábění a obrábění tvarově složitých dílů kdy dochází k minimalizaci kolizí upínače a obrobku.



Obr. 11 – Upnutý řezný nástroj

3.3 Řezné podmínky

Pro experiment byly zvolené konstantní řezné podmínky uvedené v tabulce 4.

Tab. 4 – Řezné podmínky

parametr	jednotka	hodnota
řezná rychlost	m/min	220
posuv	mm/min	1167
boční krok	mm	1

3.4 Stroj

Měření byla kompletně provedena na číslicově řízeném tříosém frézovacím centru DMG MORI CMX 600V, jehož technické parametry jsou uvedeny v následující tab. 5.

Tab.5 – Technické parametry frézovacího centra

DMG MORI CMX 600V		
parametr	jednotka	hodnota
pojezd v ose X	mm	600
pojezd v ose Y	mm	560
pojezd v ose Z	mm	510
rychlost posuvu v osách X/Y/Z	mm/min	30 000
přesnost polohování	mm	0,006

DMG MORI CMX 600V		
parametr	jednotka	hodnota
šíře stolu	mm	900
délka stolu	mm	560
maximální zatížení stolu	kg	600
upínací kužel	ISO	40
maximální otáčky	ot/min	12 000
maximální výkon vřetene	kW	13
řídící systém	-	Sinumerik Operate 4.8Dsl

Tento stroj řady CMX se vyznačuje odlišnou konstrukcí rámu kdy byl použit tzv. typ C-rám. Toto řešení přináší zvýšenou tuhost v osách X,Y a také vysoké zatížení stolu. Program pro dané měření byl vytvořen v blokovém programovacím jazyku ShopMill, který je nainstalován přímo ve stroji.



Obr. 12 – frézovací centrum CMX 600V

3.5 Odsávací zařízení

Všeobecně při obrábění kompozitních materiálů vznikají mimo klasické drobné třísky i prachové částice, které jsou velmi problematické. Především u uhlíkových kompozitů jsou prachové částice zdraví škodlivé, proto se musí zajistit dostatečná ochrana zdraví obsluhy stroje.

Dostatečná ochrana zdraví obsluhy byla zajištěna pomocí mobilního odsávacího zařízení POC9 M1, jehož technické parametry jsou zobrazeny v tab. 6.

Tab. 6 - Technické parametry odsávání

POC9 M1		
parametr	jednotka	hodnota
odsávané množství vzduch	m ³ /h	900
celkový tlak na sání	Pa	1200
výkon elektromotoru	kW	0,7
hlučnost	dB	65
minimální velikost zachycených částic	μm	0,3



Obr. 13 – odsávání POC9 M1

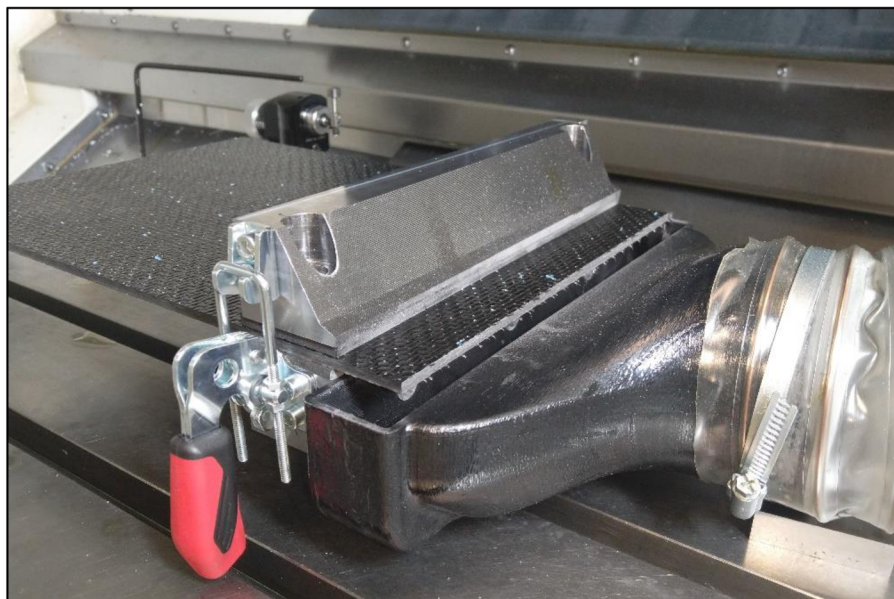
Odsávací zařízení bylo připojeno k 3D tištěnému náfuku který zajistil odtah prachu v celé oblasti obrábění.



Obr. 14 – 3D tištěný náfuk odsávání

3.6 Použité přípravky

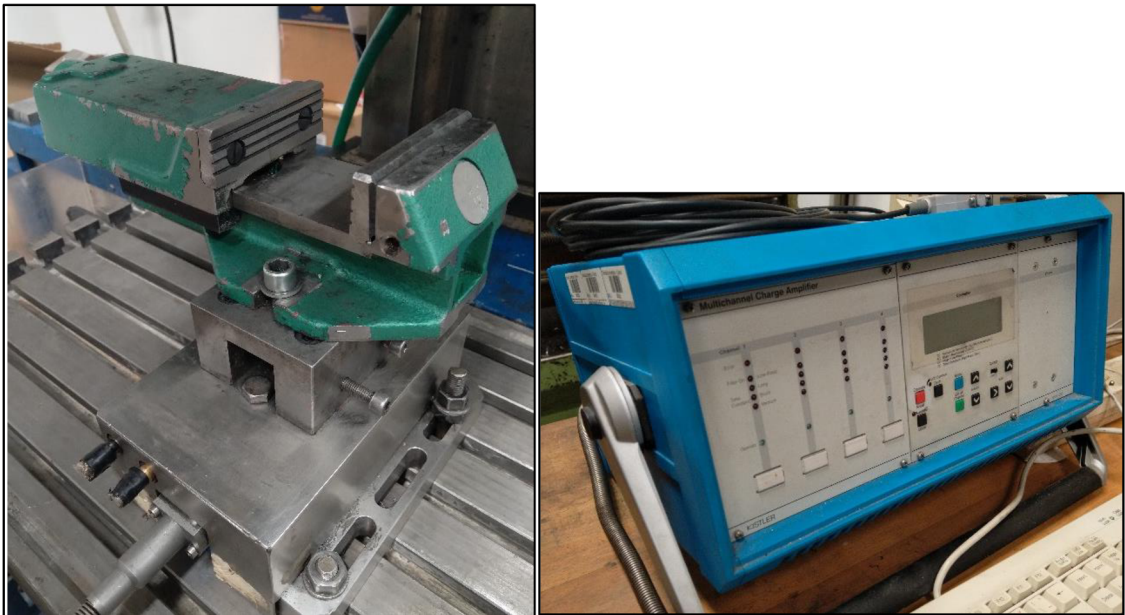
Pro upnutí kompozitních desek byl navržen a vyroben speciální upínací přípravek, který byl vybaven rychloupínací pákou a náfukem. Tento přípravek umožňuje rychlé a opakované upnutí frézovaných desek kompozitu a zároveň chrání zdraví obsluhy. Díky náfuku se odsával prach vznikající během procesu obrábění.



Obr. 15 – Upínací přípravek s 3D tištěným náfukem

3.7 Měření řezných sil

K měření řezných sil byl použit 3složkový piezoelektrický dynamometr Kistler. Piezoelektrické dynamometry používají snímače obsahující krystal, který se pod zatížením deformuje a dojde k posunu těžiště kladných a záporných iontů. Tímto posunutím vznikne na povrchu krystalu elektrický náboj přímo úměrný velikosti zatížení. Elektrický náboj vzhledem k jeho velikosti je zesilován pomocí nábojového zesilovače který je součástí měřicí sestavy. Zesílený náboj je poté zpracován v SW LabView, kde se jednotlivé složky sil vykreslí v podobě grafů.



Obr. 16 – Dynamometr Kistler (vlevo), zesilovač náboje (vpravo)

Ze získaných grafů se vybralo 5 úseků, kde se v každém odečetlo 5 hodnot pro další zpracování.

Před samotným měřením byl dynamometr kalibrován. Kalibrace proběhla pomocí ručního siloměru, kterým se tlačilo v jednotlivých osách a vyhodnocující SW si díky tomu dopočítal konstanty nutné pro přesné měření řezných sil.

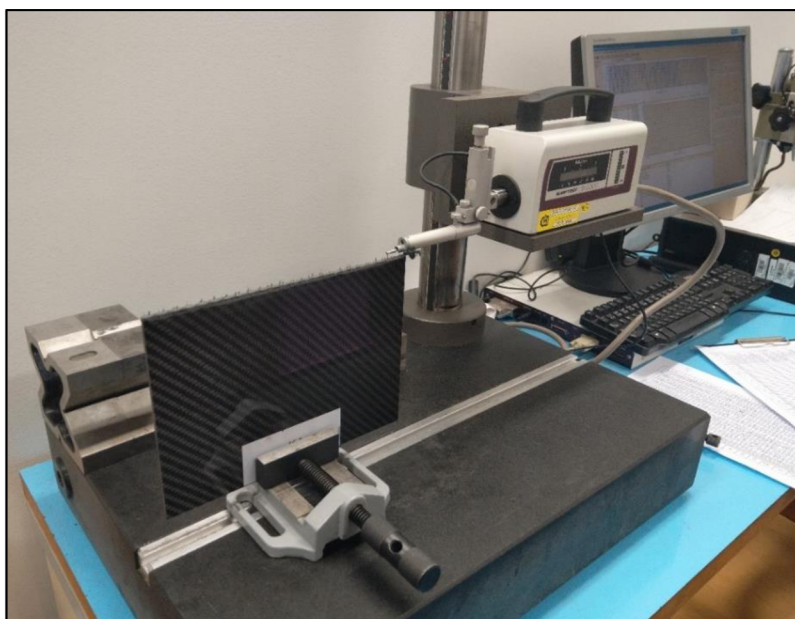


Obr. 17 – Ruční siloměr

3.8 Měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti probíhalo na kontaktním profilometru Mitutoyo SV-2000N2 SurfTest. Mechanická část se skládá ze snímacího ramínka a sběrné jednotky. Snímací ramínko s diamantovým hrotem o vrcholovém úhlu 60° přejíždí po povrchu a vykonává vertikální pohyb. Tento vertikální pohyb sběrná jednotka převede na elektrický signál, který je potom vyhodnocován v připojeném PC pomocí programu SurfPak. Tento program je schopen měřit dle norem ISO, DIN, JIS a ANSI 26 parametrů drsnosti ale, také základní rozměry malých prvků či dílů.

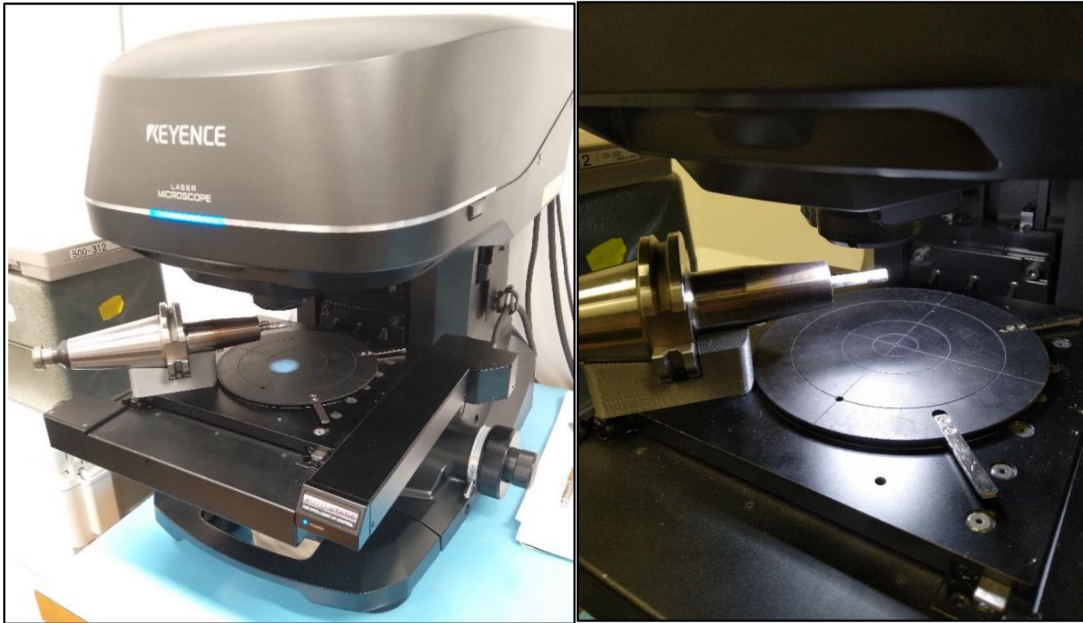
V rámci této diplomové práce se měřil parametr R_a . Na každém vzorku bylo provedeno měření ve 3 různých místech, naměřené hodnoty byly zaznamenány a následně vyhodnoceny v programu MS Excel.



Obr. 18 – Profilometr Mitutoyo SV-2000N2

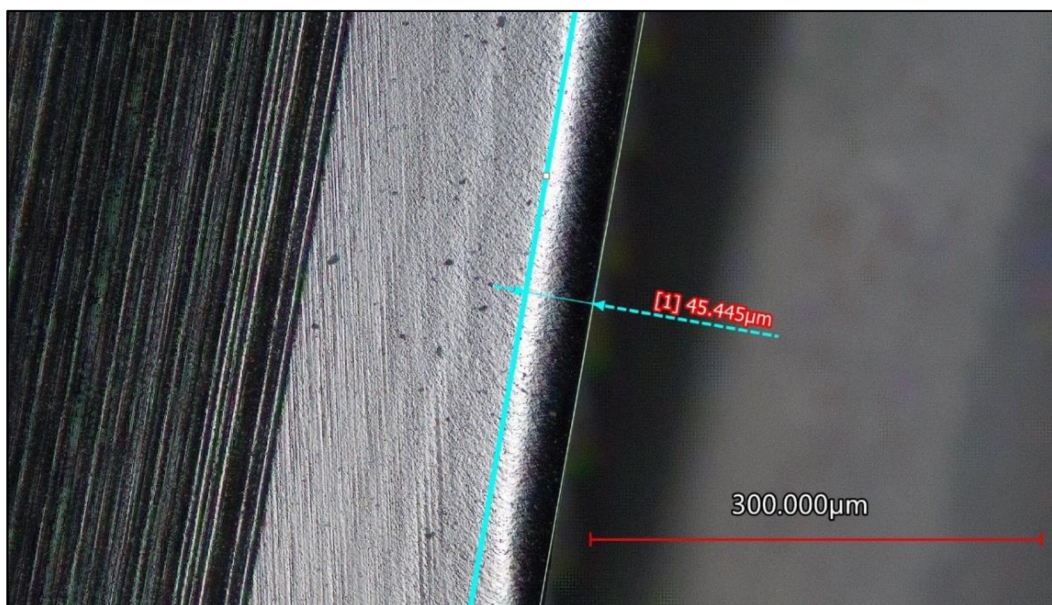
3.9 Měření opotřebení nástroje a velikosti delaminace

Opotřebení nástroje a velikost delaminace bylo kontrolováno pomocí konfokálního mikroskopu s laserovým skenováním Keyence VK-X 1000. Tento mikroskop disponuje možností kontroly profilu povrchu, skenování povrchů a jejich kontroly. Maximální rozlišení mikroskopu je 0,01 nm.

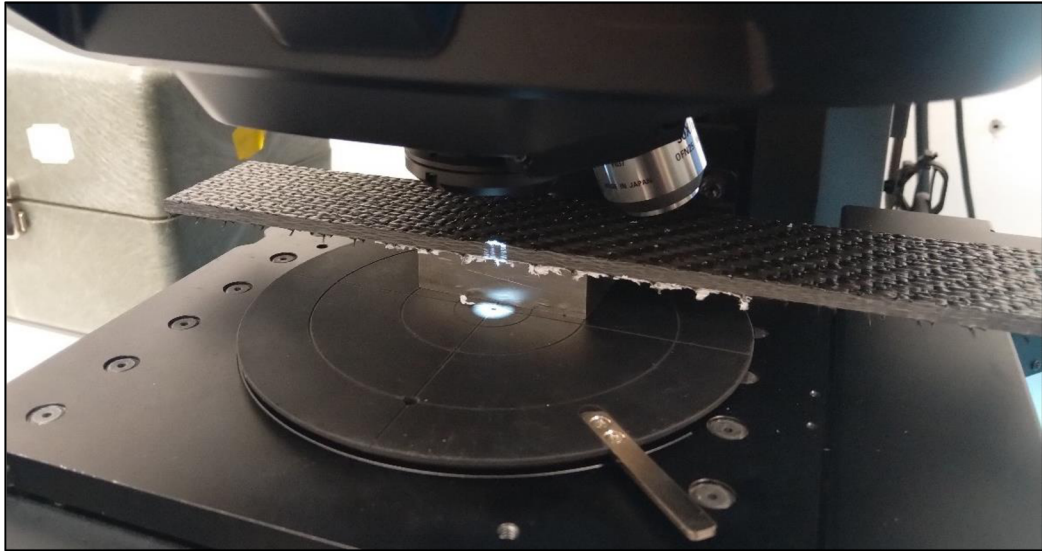


Obr. 19 – Konfokální mikroskop Keyence VK-X 1000

Hodnota opotřebení a delaminace byla na vybraných místech kontrolována pomocí SW VK-Viewer od firmy Keyence. Uvedený SW se používal v módu Image observation



Obr. 20 – Detail měření opotřebení v SW VK-Viewer



Obr. 21 – Měření delaminace

4 Experimentální část

V následující kapitole jsou popsány jednotlivé provedené experimenty a vyhodnocení získaných výsledků. V rámci realizovaných experimentálních měření bylo sledováno opotřebení nástroje, řezné síly, drsnost obráběné plochy a vzniklá delaminace. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulkách a grafech v příslušných podkapitolách. Experimenty byly prováděny bez procesní kapaliny a za použití konstantních řezných podmínek uvedených v tab.7

Tab.7 – Řezné podmínky

v_c [m/min]	v_f [mm/min]	a_e [mm]
220	1167	1

4.1 Hodnocení opotřebení nástroje


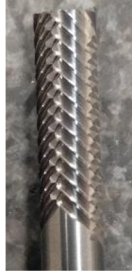

Měření opotřebení bylo provedeno na 5ti vybraných místech po obvodu nástroje. Na každém vybraném místě bylo měřeno opotřebení na hřbetu pro každý nástroj 5krát. Hodnocení opotřebení bylo prováděné 10krát v intervalu po $t=1$ min., poté se interval zvýšil na $t=2$ min. kdy se hodnocení v tomto intervalu opakovalo 5krát. Následné prodloužení hodnotícího intervalu na $t=5$ min. se použilo až do ukončení experimentu.

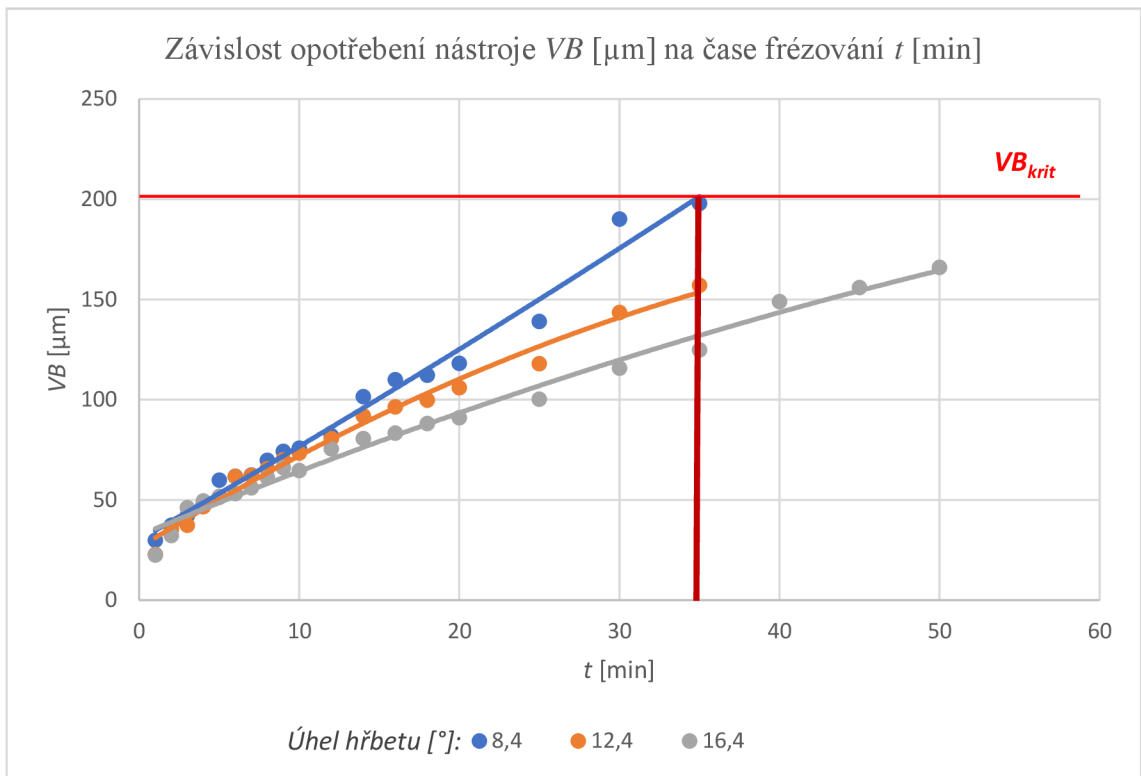
Kritická životnost nástroje $VB_{krit.}$ byla stanovena dle doporučení výrobce nástroje.

4.1.1 Závislost opotřebení nástroje na čase frézování

V rámci realizovaného měření byla zkoumána závislost mezi opotřebením nástroje a časem frézování.

Tab. 8 – Závislost opotřebení nástroje na čase frézování

nástroj	 8,4°	 12,4°	 16,4°
čas t [min]	opotřebení VB [μm] \pm nejistota měření U [μm]		
10	75,77 \pm 0,89	73,43 \pm 0,88	64,57 \pm 0,99
20	118,09 \pm 0,88	106,01 \pm 0,87	90,91 \pm 0,95
35	197,83 \pm 0,95	157,09 \pm 0,89	124,8 \pm 0,98
50	-	-	165,88 \pm 0,99



Graf 1 – Závislost opotřebení nástroje VB [μm] na čase frézování t [min]

Z naměřených výsledků uvedených v tab. 7 a graficky zpřehledněných v grafu 1 plyne, následující:

- 1) opotřebení nástrojů se zvyšovalo s rostoucím časem frézování,
- 2) opotřebení nástrojů se zvyšovalo s menším úhlem hřbetu nástroje.

Opotřebení VB [μm] všech 3 nástrojů s rozdílnými úhly hřbetu ($8,4^{\circ}$; $12,4^{\circ}$; $16,4^{\circ}$) se s rostoucím časem frézování zvyšovalo. U nástroje s úhlem hřbetu $8,4^{\circ}$ bylo rychlejší opotřebení hřbetu (během $t=35$ min byla dosažena kritická životnost nástroje $VB_{krit.}=200$ μm), nežli u nástroje s úhlem hřbetu $16,4^{\circ}$, kde byl nárůst spíše pozvolný a nebylo ani dosaženo kritické hodnoty životnosti nástroje $VB_{krit.}=200$ μm za 50 min frézování.

Opotřebení všech 3 nástrojů rostlo s klesajícím (menším) úhlem hřbetu. Nástroj s úhlem hřbetu $8,4^{\circ}$ měl nejvyšší opotřebení $VB=197,83$ μm ve sledovaném čase $t=35$ min, kdežto nástroj s nejvyšším úhlem hřbetu $16,4^{\circ}$ měl nejnižší opotřebení $VB=124,80$ μm ve sledovaném čase.

V rámci měření bylo dále pozorováno, že hladký a lesklý povrch v oblasti opotřebení nástroje vykazoval přítomnost opotřebení otěrem. Toto opotřebení otěrem bylo způsobeno silnou abrazivností uhlíkových vláken. Třísky, které se při procesu

obrábění otíraly o hřbet nástroje, fungovaly jako lešticí mechanismus, jehož výsledkem byla právě lesklá a leštěná oblast v oblasti opotřebení nástroje.

4.2 Hodnocení drsnosti obrobené plochy

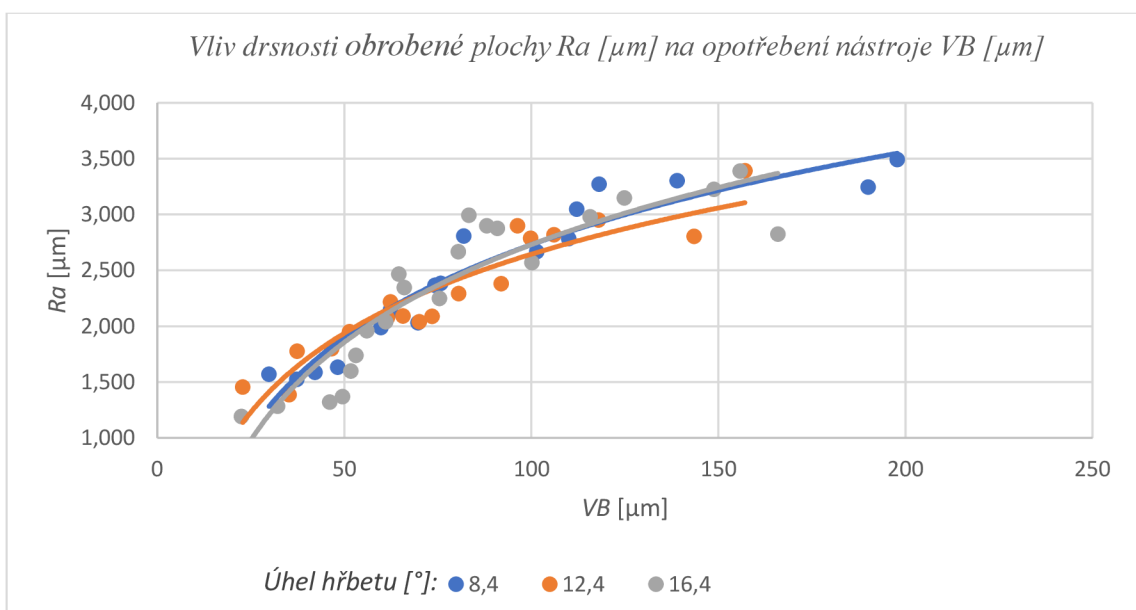
Pro experiment měření drsnosti povrchu byly použity stejné řezné podmínky jako při předchozím experimentu. Byl měřen parametr drsnosti Ra . Měření drsnosti bylo provedeno na 10ti místech podél celé kompozitní desky, na každém vybraném místě byla drsnost měřena 3krát. Získané hodnoty jsou zanesené v následujících tabulkách a grafech.

4.2.1 Závislost drsnosti na opotřebení nástroje

V rámci realizovaného měření byla zkoumána závislost mezi drsností obrobené plochy a opotřebení nástroje.

Tab. 9 – Závislost drsnosti Ra na opotřebení nástroje

nástroj	8,4°	12,4°	16,4°
čas t [min]	drsnost Ra [μm] \pm nejistota měření U [μm] opotřebení VB [μm] \pm nejistota měření U [μm]		
10	2,37 \pm 0,81 75,77 \pm 0,89	2,09 \pm 0,86 73,43 \pm 0,88	2,46 \pm 0,99 64,57 \pm 0,99
20	3,27 \pm 0,87 118,09 \pm 0,88	2,82 \pm 0,84 106,01 \pm 0,87	2,88 \pm 0,94 90,91 \pm 0,95
35	3,49 \pm 0,85 197,83 \pm 0,95	3,4 \pm 0,88 157,09 \pm 0,89	3,15 \pm 0,96 124,8 \pm 0,98
50	-	-	2,83 \pm 0,98 165,88 \pm 0,99



Graf 2 – Vliv drsnosti obrobené plochy Ra [μm] na opotřebení nástroje VB [μm]

Z naměřených výsledků uvedených v tab. 8 a graficky zpřehledněných v grafu 2 plyne, následující:

- 1) opotřebenění nástroje VB [μm] má vliv na drsnost povrchu u všech 3 nástrojů s rozdílnými úhly hřbetu ($8,4^\circ$; $12,4^\circ$; $16,4^\circ$). S rostoucím opotřebením nástroje rostla i drsnost Ra obrobené plochy,
- 2) drsnost obrobené plochy a opotřebenění nástroje se významně nezvyšovalo ani nesnižovalo s menším či větším úhlem hřbetu nástroje.

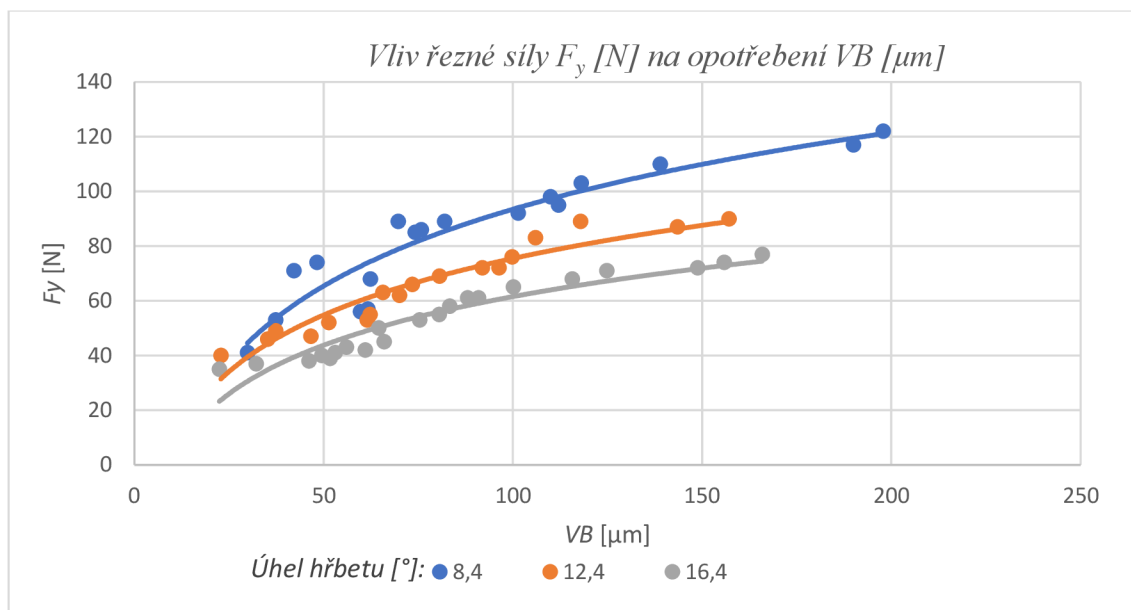
4.3 Hodnocení řezné síly

4.3.1 Závislost řezné síly na opotřebenění nástroje

V rámci realizovaného měření byla zkoumána závislost mezi řeznou silou (posuvová řezná síla F_y) a opotřebením nástroje.

Tab. 10 – Vliv řezné síly F_y na opotřebenění VB

nástroj	$8,4^\circ$	$12,4^\circ$	$16,4^\circ$
čas t [min]	řezná síla F_y [N] nejistota měření U [μm] opotřebenění VB [μm] \pm nejistota měření U [μm]		
1	$41 \pm 0,91$ $29,87 \pm 0,91$	$40 \pm 0,99$ $22,84 \pm 0,9$	$35 \pm 0,88$ $22,44 \pm 0,98$
10	$86 \pm 0,99$ $75,77 \pm 0,89$	$66 \pm 0,92$ $73,43 \pm 0,88$	$50 \pm 0,91$ $64,57 \pm 0,99$
20	$103 \pm 1,09$ $118,09 \pm 0,88$	$83 \pm 0,95$ $106,01 \pm 0,87$	$61 \pm 0,94$ $90,91 \pm 0,95$
35	$122 \pm 1,15$ $197,83 \pm 0,95$	$90 \pm 0,91$ $157,09 \pm 0,89$	$71 \pm 0,92$ $124,8 \pm 0,98$
50	-	-	$77 \pm 0,97$ $165,88 \pm 0,99$



Graf 3 – Vliv řezné síly F_y [N] na opotřebení VB [μm]

Z naměřených výsledků uvedených v tab. 9 a graficky zřehledněných v grafu 3 plyne, následující:

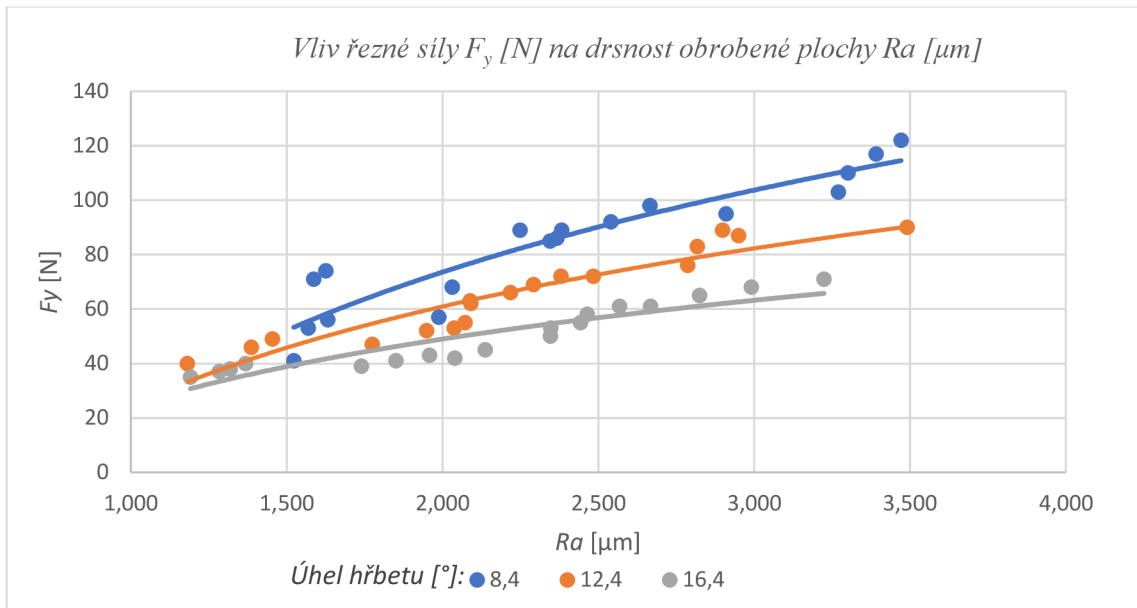
- 1) řezná síla (posuvová) F_y [N] se u všech 3 nástrojů s rozdílnými úhly hřbetu ($8,4^\circ$; $12,4^\circ$; $16,4^\circ$) s rostoucí drsností obrobeneé plochy zvyšovala,
- 2) řezná síla a drsnost u všech 3 nástrojů rostla s menším úhlem hřbetu.

4.3.2 Závislost drsnosti na řezné síle

Zkoumána byla také závislost mezi řeznou silou (posuvová řezná síla F_y) a drsností obrobeneé plochy.

Tab. 11 – Vliv řezné síly F_y na drsnost obrobeneé plochy R_a

nástroj	$8,4^\circ$	$12,4^\circ$	$16,4^\circ$
čas t [min]	řezná síla F_y [N] nejistota měření U [μm] drsnost R_a [μm] \pm nejistota měření U [μm]		
1	$41 \pm 0,91$ $1,52 \pm 0,97$	$40 \pm 0,99$ $1,18 \pm 0,83$	$35 \pm 0,88$ $1,91 \pm 0,97$
10	$86 \pm 0,99$ $2,37 \pm 0,81$	$66 \pm 0,92$ $2,09 \pm 0,86$	$50 \pm 0,91$ $2,46 \pm 0,99$
20	$103 \pm 1,09$ $3,27 \pm 0,87$	$83 \pm 0,95$ $2,82 \pm 0,84$	$61 \pm 0,94$ $2,88 \pm 0,94$
35	$122 \pm 1,15$ $3,49 \pm 0,85$	$90 \pm 0,91$ $3,4 \pm 0,88$	$71 \pm 0,92$ $3,15 \pm 0,96$
50	-	-	$77 \pm 0,97$ $2,83 \pm 0,98$



Graf 4 – Vliv řezné síly F_y [N] na drsnost obrobené plochy Ra [μm]

Z naměřených výsledků uvedených v tab. 10 a graficky zřehledněných v grafu 4 plyne, následující:

- 1) řezná síla (posuvová) F_y [N] se u všech 3 nástrojů s rozdílnými úhly hřbetu (8,4°; 12,4°; 16,4°) s rostoucí drsností obrobené plochy zvyšovala,
- 2) řezná síla a drsnost u všech 3 nástrojů rostla s menším úhlem hřbetu.

4.4 Hodnocení delaminace

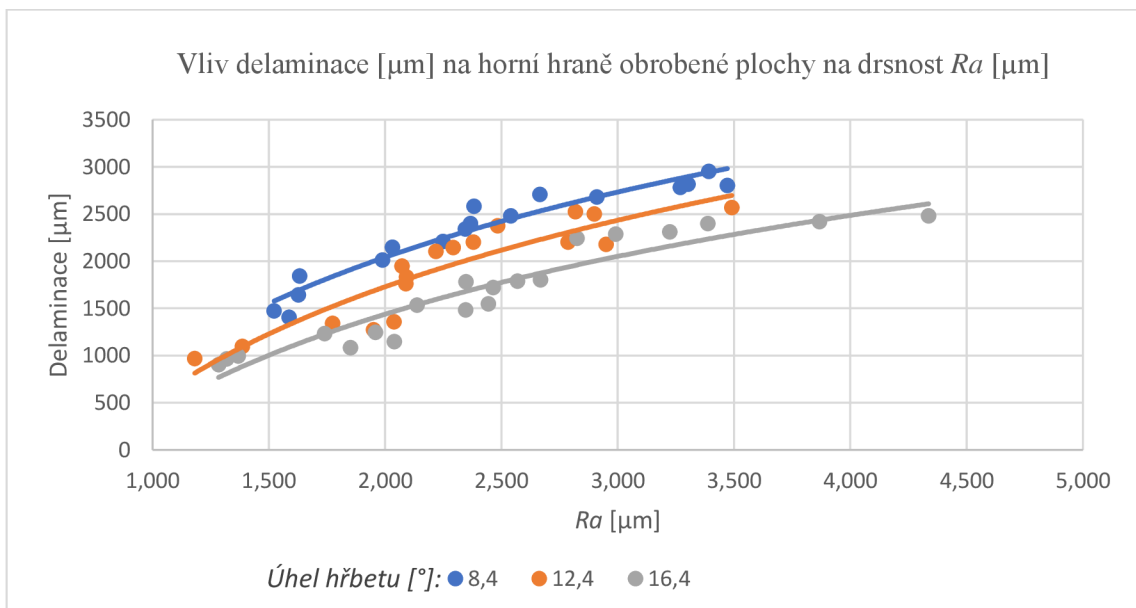
V rámci experimentu byla měřena vzniklá delaminace.

4.4.1 Vliv delaminace na drsnost

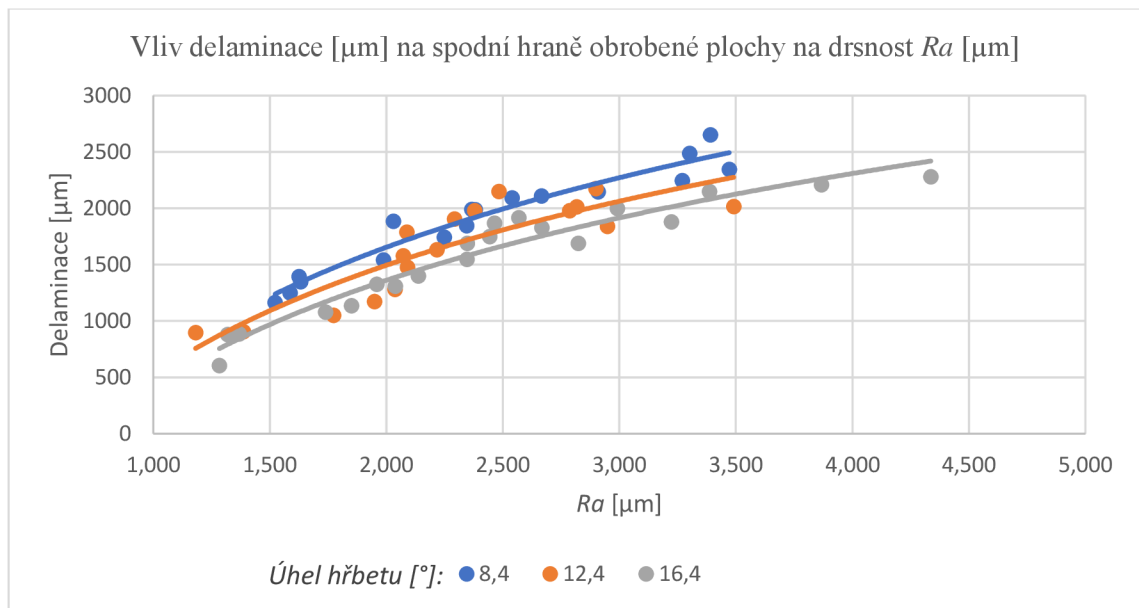
V rámci realizovaného měření byla zkoumána závislost mezi vzniklou delaminací a drsností obrobeneé plochy.

Tab. 12 – Vliv delaminace na drsnost

nástroj	8,4°	12,4°	16,4°
čas t [min]	velikost delaminace horní hrany [μm] velikost delaminace spodní hrany [μm] drsnost Ra [μm] \pm nejistota měření U [μm]		
1	1475 \pm 0,91 1164 \pm 0,98 1,52 \pm 0,97	970 \pm 0,99 897 \pm 1,03 1,18 \pm 0,83	904 \pm 0,89 603 \pm 0,94 1,91 \pm 0,97
10	2401 \pm 0,94 1990 \pm 0,95 2,37 \pm 0,81	2103 \pm 0,94 1631 \pm 0,98 2,09 \pm 0,86	1485 \pm 0,96 1547 \pm 0,92 2,46 \pm 0,99
20	2784 \pm 0,99 2245 \pm 0,93 3,27 \pm 0,87	2524 \pm 0,95 2013 \pm 1,15 2,82 \pm 0,84	1804 \pm 0,94 1827 \pm 0,93 2,88 \pm 0,94
35	2804 \pm 1,1 2343 \pm 0,96 3,49 \pm 0,85	2568 \pm 0,99 2015 \pm 0,94 3,4 \pm 0,88	2312 \pm 0,9 1878 \pm 1,1 3,15 \pm 0,96
50	-	-	2481 \pm 0,88 2278 \pm 0,94 2,83 \pm 0,98



Graf 5 – Vliv delaminace [μm] na horní hraně obrobeneé plochy na drsnost Ra [μm]



Graf 6 – Vliv delaminace [μm] na spodní hraně obrobeneé plochy na drsnost R_a [μm]

Z naměřených výsledků uvedených v tab. 11 a graficky zprehledněných v grafech 5 a 6 plyne, následující:

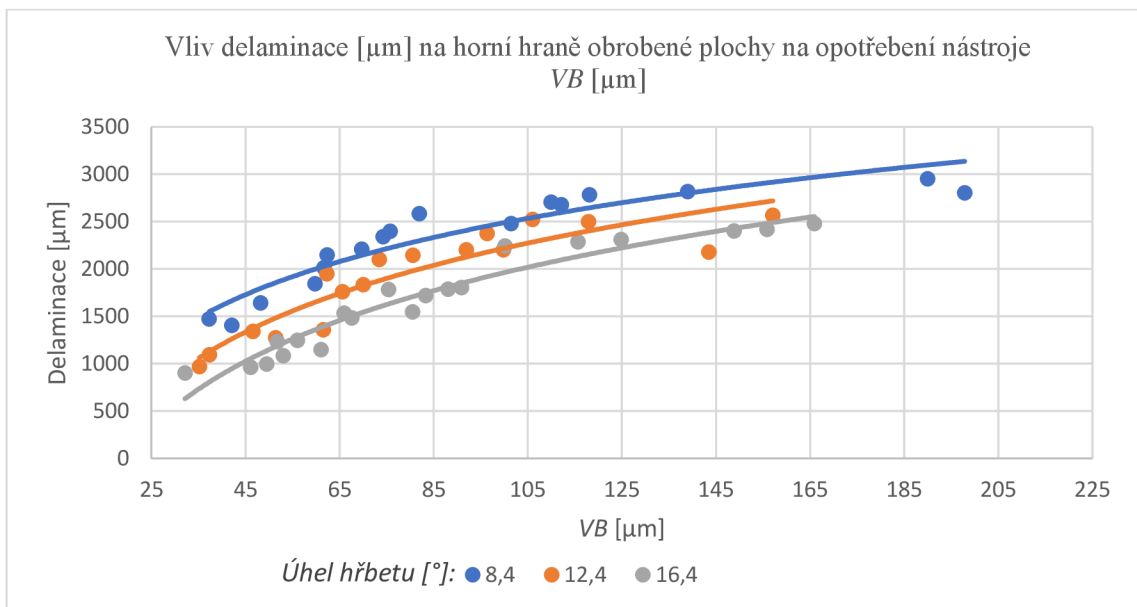
- 1) delaminace [μm] se u všech 3 nástrojů s rozdílnými úhly hřbetu ($8,4^\circ$; $12,4^\circ$; $16,4^\circ$) s rostoucí drsností obrobeneé plochy zvyšovala,
- 2) delaminace a drsnost u všech 3 nástrojů rostla s menším úhlem hřbetu.

4.4.2 Vliv opotřebení na delaminaci

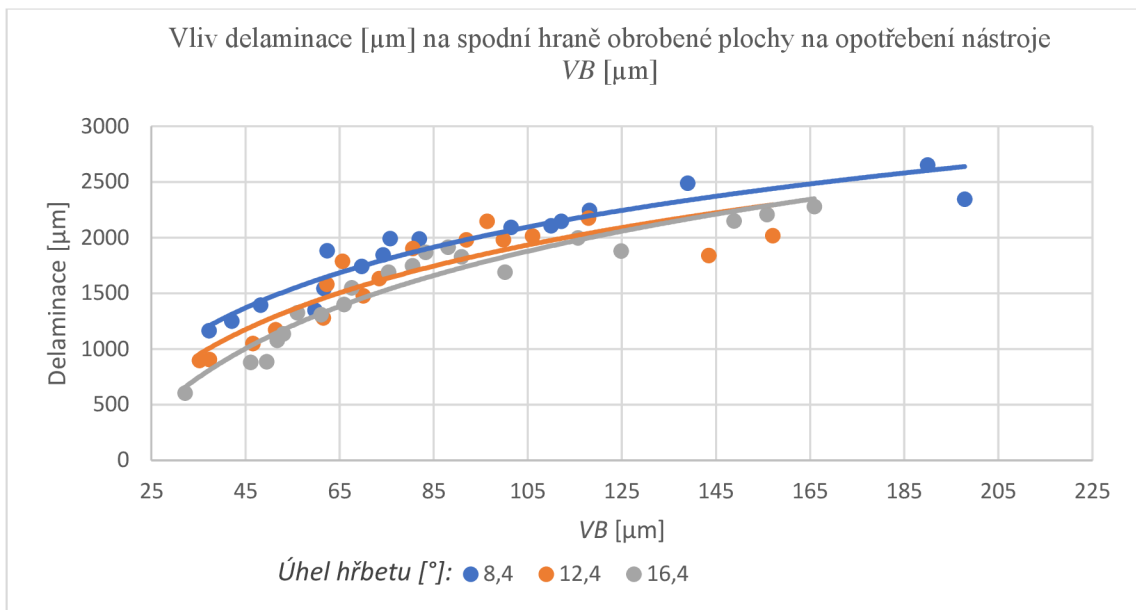
Dále byla zkoumána závislost mezi delaminací a opotřebením nástroje.

Tab. 13 – Vliv opotřebení na delaminaci

nástroj	8,4°	12,4°	16,4°
čas t [min]	velikost delaminace horní hrany [μm] velikost delaminace spodní hrany [μm] opotřebení VB [μm] \pm nejistota měření U [μm]		
1	1475 \pm 0,91 1164 \pm 0,98 29,87 \pm 0,91	970 \pm 0,99 897 \pm 1,03 22,84 \pm 0,9	904 \pm 0,89 603 \pm 0,94 22,44 \pm 0,98
10	2401 \pm 0,94 1990 \pm 0,95 75,77 \pm 0,89	2103 \pm 0,94 1631 \pm 0,98 73,43 \pm 0,88	1485 \pm 0,96 1547 \pm 0,92 64,57 \pm 0,99
20	2784 \pm 0,99 2245 \pm 0,93 118,09 \pm 0,88	2524 \pm 0,95 2013 \pm 1,15 106,01 \pm 0,87	1804 \pm 0,94 1827 \pm 0,93 90,91 \pm 0,95
35	2804 \pm 1,1 2343 \pm 0,96 197,83 \pm 0,95	2568 \pm 0,99 2015 \pm 0,94 157,09 \pm 0,89	2312 \pm 0,9 1878 \pm 1,1 124,8 \pm 0,98
50	-	-	2481 \pm 0,88 2278 \pm 0,94 165,88 \pm 0,99



Graf 7 – Vliv delaminace [μm] na horní hraně obrobené plochy na opotřebení nástroje VB [μm]



Graf 8 – Vliv delaminace [μm] na spodní hraně obrobene plochy na opotřebení nástroje VB [μm]

Z naměřených výsledků uvedených v tab. 12 a graficky zřehledněných v grafech 7 a 8 plyne, následující:

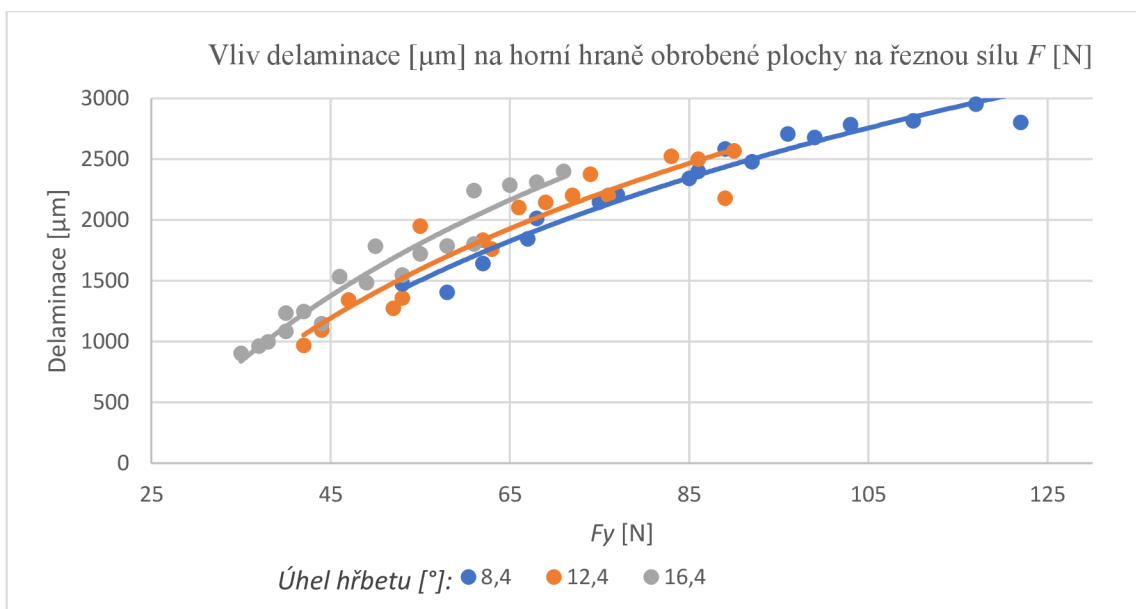
- 1) delaminace [μm] se u všech 3 nástrojů s rozdílnými úhly hřbetu ($8,4^\circ$; $12,4^\circ$; $16,4^\circ$) s rostoucím opotřebením nástroje zvyšovala,
- 2) delaminace a opotřebení nástroje u všech 3 nástrojů rostla s menším úhlem hřbetu.

4.4.3 Vliv řezné síly na delaminaci

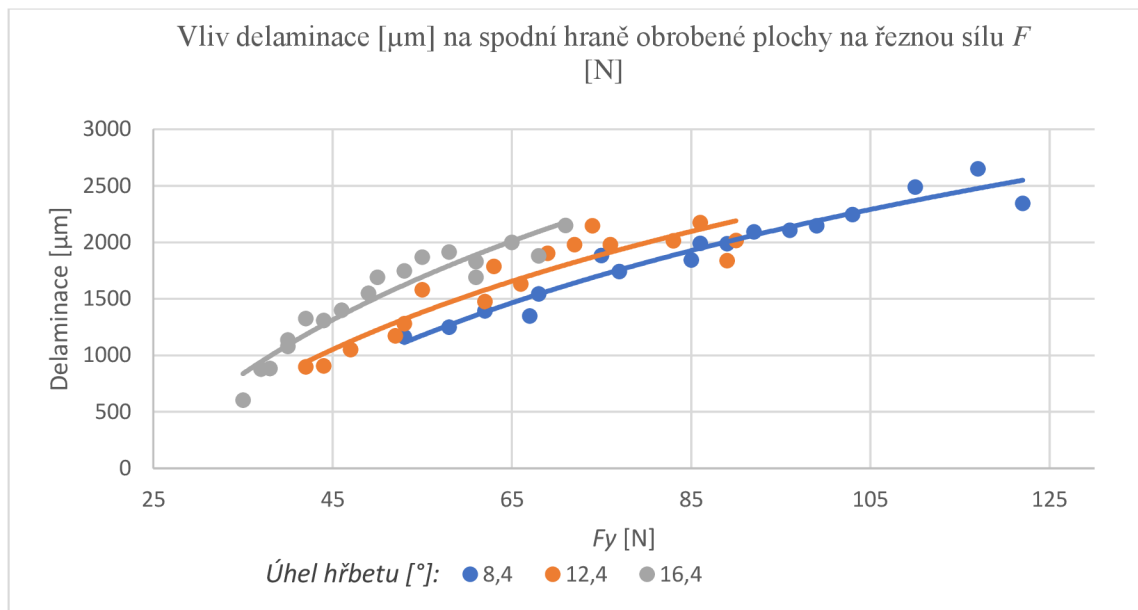
V rámci realizovaného měření byla zkoumána také závislost mezi delaminací a řeznou silou.

Tab. 14 – Vliv delaminace na řeznou sílu

nástroj	8,4°	12,4°	16,4°
čas t [min]	velikost delaminace horní hrany [μm] velikost delaminace spodní hrany [μm] řezná síla F_y [N] nejistota měření U [μm]		
1	1475 \pm 0,91 1164 \pm 0,98 41 \pm 0,91	970 \pm 0,99 897 \pm 1,03 40 \pm 0,99	904 \pm 0,89 603 \pm 0,94 35 \pm 0,88
10	2401 \pm 0,94 1990 \pm 0,95 86 \pm 0,99	2103 \pm 0,94 1631 \pm 0,98 66 \pm 0,92	1485 \pm 0,96 1547 \pm 0,92 50 \pm 0,91
20	2784 \pm 0,99 2245 \pm 0,93 103 \pm 1,09	2524 \pm 0,95 2013 \pm 1,15 83 \pm 0,95	1804 \pm 0,94 1827 \pm 0,93 61 \pm 0,94
35	2804 \pm 1,1 2343 \pm 0,96 122 \pm 1,15	2568 \pm 0,99 2015 \pm 0,94 90 \pm 0,91	2312 \pm 0,9 1878 \pm 1,1 71 \pm 0,92
50	-	-	2481 \pm 0,88 2278 \pm 0,94 77 \pm 0,97



Graf 9 – Vliv delaminace [μm] na horní hraně obrobené plochy na řeznou sílu F [N]



Graf 10 – Vliv delaminace [μm] na spodní hraně obrobene plochy na řeznou sílu F [N]

Z naměřených výsledků uvedených v tab. 13 a graficky zpřehledněných v grafech 9 a 10 plyne, následující:

- 1) delaminace [μm] se u všech 3 nástrojů s rozdílnými úhly hřbetu ($8,4^\circ$; $12,4^\circ$; $16,4^\circ$) s rostoucí řeznou silou zvyšovala,
- 2) delaminace a řezná síla u všech 3 nástrojů rostla s menším úhlem hřbetu.

4.4.4 Typy delaminace

V rámci realizovaného měření byla pozornost věnována také typu delaminace, která vznikala zejména u horní obrobene hrany kompozitní desky s uhlíkovými vlákny.

Jednalo se o delaminace typu I / II i III.


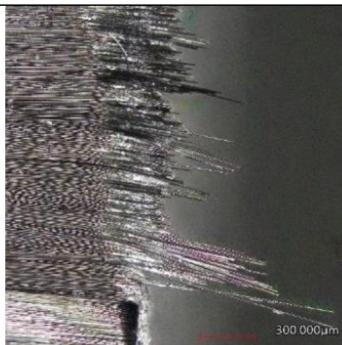
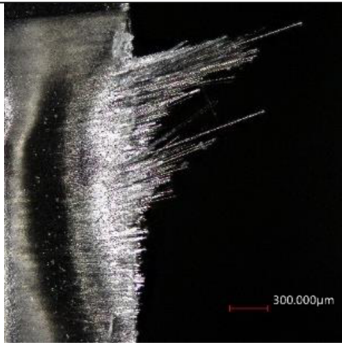
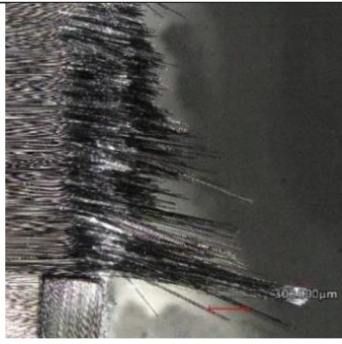
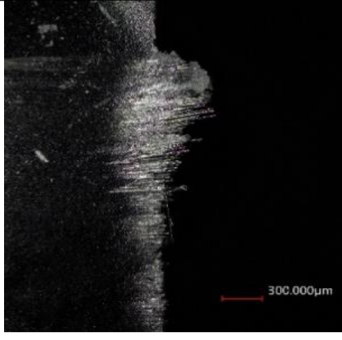

Delaminace typu I/ II se projevovala jak u horní tak i spodní hrany obrobene desky a to velkým podílem zejména vyčnívajících neořezaných vláken, které byly jen ohnuty posouvajícím se nástrojem ve směru řezu, nebo jen mírně oříznuty, viz tabulka 14 a 15. Nekvalitní obrobene hrana, tj. neřezaná vyčnívající vlákna, byla nejvíce po čase $t=35$ min. To dokazovalo, že opotřeбенý nástroj má zásadní vliv na delaminaci.

Tabulka 14 a zejména 15 zdůrazňuje tento efekt. V rámci pozorování bylo zjištěno, že pomocí ostrého nástroje, lze vlákna čistě řezat a nedochází k delaminaci. Naopak použitím nástroje s průměrným opotřeбенím byly již viditelná neřezaná vyčnívající vlákna. S rostoucím opotřeбенím docházelo již k velmi výrazné delaminaci ve formě nejen neřezaných vyčnívajících vláken, ale i k lámání vláken v jednotlivých vrstvách

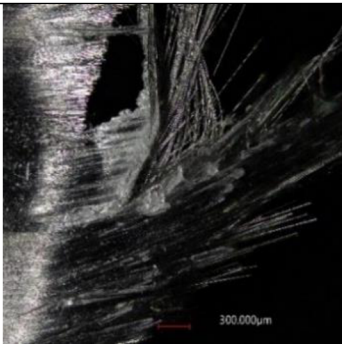
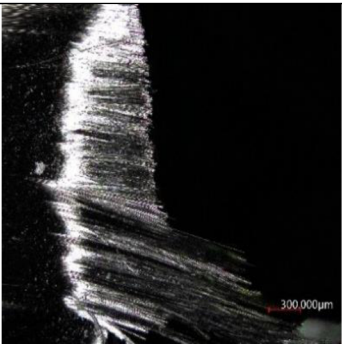
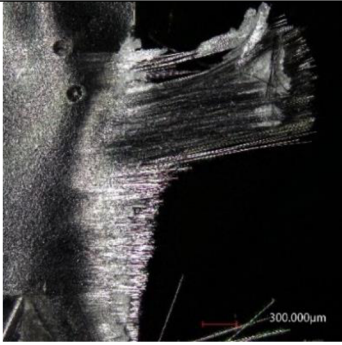
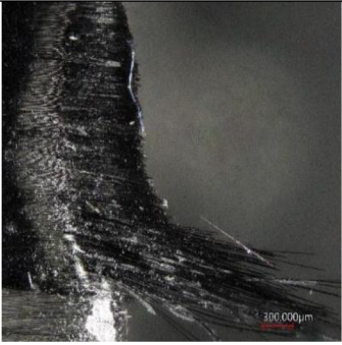
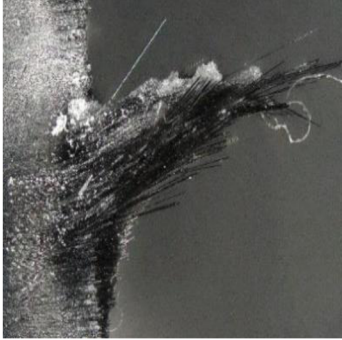
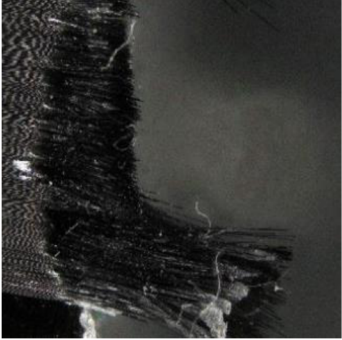
frézované hrany kompozitu s uhlíkovými vlákny. Dále se na povrchu obrobené hrany mimo jiné vyskytovaly i shluky rozdrčené epoxydové pryskyřice, která vytvářely jemnou krustu na neořezaných vláknech a po obrobené hraně.

Občas se vyskytoval i typ delaminace III. Delaminace typu III se projevovovala jako volná vlákna, která částečně ulpívají k obrobenému povrchu a leží rovnoběžně se směrem posuvu nástroje. Volná vlákna způsobovaly nekvalitní „neostrou“ obrobenou plochu velmi připomínající otřepty známé z obrábění kovových materiálů. Tento typ delaminace se vyskytoval zejména u horní hrany obrobené plochy.

Tab. 15 – Delaminace po čase 10 min

při frézovací čase $t=10$ min		
nástroj	horní hrana obrobené plochy	spodní hrana obrobené plochy
8,4°		
12,4°		
16,4°		

Tab. 16 – Delaminace po čase 35 min

při frézovací čase $t=35$ min		
nástroj	horní hrana obrobené plochy	spodní hrana obrobené plochy
8,4°		
12,4°		
16,4°		

5. Diskuse výsledků

Předkládaná diplomová práce se věnovala studiu integrity povrchu při frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny. Cílem studie byl výzkum vlivu úhlu hřbetu u frézovacího nástroje na opotřebení, řezní síly, drsnost obrobenej plochy a delaminaci nesousledně frézovaného materiálu, vyztuženého uhlíkovými vlákny, s tkaninou keprové vazby a orientací vláken 90°.

K dosažení plánovaného cíle práce byly nezbytné teoretické znalosti dané problematiky, které jsou uvedeny v teoretické části této práce, kapitola 2 s názvem Teoretická část.

Dále bylo nutné navrhnout vhodné nástroje s různorodostí úhlu hřbetu, veškeré strojní a měřicí zařízení pro realizovaný výzkum, včetně vytvoření metod měření a vyhodnocení pro opotřebení řezného nástroje, řezné síly, drsnosti obrobenej plochy a delaminaci. To vše je obsaženo v kapitole 3 s názvem Metodika měření.

Samotný realizovaný výzkum je obsažen v kapitole 4 s názvem Experimentální část, včetně dosažených výsledků.

Z realizovaného experimentálního měření plynou následující závěry:

- **Vliv času frézování na opotřebení nástroje**

Opotřebení nástroje VB [μm] se u všech 3 nástrojů s rozdílnými úhly hřbetu (8,4°; 12,4°; 16,4°) s rostoucím časem frézování zvyšovalo. Dále opotřebení nástroje rostlo s menším úhlem hřbetu (8,4°).

V rámci měření bylo dále pozorováno, že hladký a lesklý povrch v oblasti opotřebení nástroje vykazoval přítomnost opotřebení otěrem. Toto opotřebení otěrem bylo způsobeno silnou abrazivností uhlíkových vláken. Třísky, které se při procesu obrábění otíraly o hřbet nástroje, fungovaly jako leštící mechanismus, jehož výsledkem byla právě lesklá a leštěná oblast v oblasti opotřebení nástroje.

Z celkového měření následně plyne, že geometrie nástroje, resp. úhel hřbetu významně ovlivnil opotřebení nástroje při procesu frézování. Čím větší úhel hřbetu nástroje (16,4°), tím menší opotřebení a naopak čím menší úhel hřbetu nástroje (8,4°), tím větší opotřebení.

- **Vliv opotřebení nástroje na drsnosti obrobené plochy**

Jako parametr pro výzkum závislosti byla vybrána hodnota Ra [μm]. Drsnost obrobené plochy se u všech 3 nástrojů s rozdílnými úhly hřbetu ($8,4^\circ$; $12,4^\circ$; $16,4^\circ$) zvyšovala s rostoucím opotřebením nástroje. Dále drsnost obrobené plochy a opotřebení nástroje se nikterak významně nezvyšovala ani nesnižovala s menším či větším úhlem hřbetu nástroje. Sledovaný vliv nebyl nikterak prokázán.

Z celkového měření následně plyne, že geometrie nástroje, resp. úhel hřbetu významně neovlivnila vliv opotřebeného nástroje na velikost drsnosti obrobené plochy.

- **Vliv opotřebení nástroje na řeznou sílu (posuvová řezná síla F_y)**

Řezná síla F_y [N] se u všech 3 nástrojů s rozdílnými úhly hřbetu ($8,4^\circ$; $12,4^\circ$; $16,4^\circ$) zvyšovala s rostoucím opotřebením nástroje. Dále se řezná síla a opotřebení nástroje zvyšovalo s menším úhlem hřbetu nástroje ($8,4^\circ$).

Z celkového měření následně plyne, že řezná (posuvová) síla významně rostla s rostoucím opotřebením. S rostoucím úhlem hřbetu nástroje se snižovala jak řezná síla, tak opotřebení nástroje. S nízkým úhlem hřbetu ($8,4^\circ$) nástroje se zvyšovala jak řezná síla, tak opotřebení nástroje. Nízká řezná síla zabraňovala opotřebením nástroje.

Malá velikost řezných sil měla vliv na malé opotřebení nástroje a tím i na malou spotřebu energie.

- **Vliv řezné síly (posuvová řezná síla F_y) na drsnost obrobené plochy**

Řezná síla F_y [N] se u všech 3 nástrojů s rozdílnými úhly hřbetu ($8,4^\circ$; $12,4^\circ$; $16,4^\circ$) zvyšovala s rostoucí drsností obrobené plochy. Dále se řezná síla a drsnost obrobené plochy zvyšovalo s menším úhlem hřbetu nástroje ($8,4^\circ$).

Z celkového měření následně plyne, že řezná (posuvová) síla významně rostla s rostoucí drsností povrchu obrobené plochy. S rostoucím úhlem hřbetu ($16,4^\circ$) nástroje se snižovala jak řezná síla, tak drsnost povrchu. S nízkým úhlem hřbetu ($8,4^\circ$) nástroje se zvyšovala jak řezná síla, tak drsnost povrchu.

Celkově nízká řezná síla pomáhala snižovat jak drsnost povrchu, tak i zabraňovala opotřebením nástroje.

- **Vliv drsnosti obrobené plochy na delaminaci**

Delaminace [μm] se u všech 3 nástrojů s rozdílnými úhly hřbetu ($8,4^\circ$; $12,4^\circ$; $16,4^\circ$) zvyšovala s rostoucí drsností obrobené plochy, jak na horní, tak spodní hraně desky. Dále se delaminace a drsnost obrobené plochy se zvyšovala s menším úhlem hřbetu nástroje ($8,4^\circ$).

Z celkového měření následně plyne, že delaminace významně rostla s rostoucí drsností povrchu obrobené plochy. S rostoucím úhlem hřbetu ($16,4^\circ$) nástroje se snižovala jak delaminace, tak drsnost povrchu. S nízkým úhlem hřbetu ($8,4^\circ$) nástroje se zvyšovala jak delaminace, tak drsnost povrchu.

Bylo vysledováno, že vždy docházelo k delaminaci v místě prvotního kontaktu nástroje a vlákna desky z polymeru vyztužený uhlíkovými vlákny, kde docházelo k prvotnímu řezání. Vlákna byla v místě kontaktu s nástrojem namáhána tlakem a začaly se tvořit praskliny, na opačné straně vlákna docházelo k tahu a následnému lomu vláken. Polymerní matrice byla před nástrojem namáhána tlakem a vznikaly praskliny a křehká matrice se drtila na malé částice.

- **Vliv opotřebení nástroje na delaminaci**

Delaminace [μm] se u všech 3 nástrojů s rozdílnými úhly hřbetu ($8,4^\circ$; $12,4^\circ$; $16,4^\circ$) zvyšovala s rostoucím opotřebením nástroje, jak na horní, tak spodní straně obrobené desky. Dále se delaminace a opotřebení nástroje se zvyšovala s menším úhlem hřbetu nástroje ($8,4^\circ$).

Z výše uvedeného plyne, že delaminace rostla s rostoucím opotřebením nástroje. S rostoucím úhlem hřbetu ($16,4^\circ$) nástroje se snižovala jak delaminace, tak opotřebení nástroje. S nízkým úhlem hřbetu ($8,4^\circ$) nástroje se zvyšovala jak delaminace, tak opotřebení nástroje.

- **Vliv řezné síly (posuvová řezná síla F_y) na delaminaci**

Delaminace [μm] se u všech 3 nástrojů s rozdílnými úhly hřbetu ($8,4^\circ$; $12,4^\circ$; $16,4^\circ$) zvyšovala s rostoucí řeznou silou, jak na horní, tak spodní straně obrobené desky. Rostoucí řezná síla zvyšovala stupeň delaminace. Dále se delaminace a řezná síla se zvyšovala s menším úhlem hřbetu nástroje ($8,4^\circ$).

Z výše uvedeného plyne, že delaminace rostla s rostoucí řeznou silou. S rostoucím úhlem hřbetu ($16,4^\circ$) nástroje se snižovala jak delaminace, tak řezná síla. S nízkým úhlem hřbetu ($8,4^\circ$) nástroje se zvyšovala jak delaminace, tak řezná síla.

- **Typ delaminace**

V rámci realizovaného měření byla pozornost věnována také typu delaminace, která vznikala zejména na horní straně obrobené hrany kompozitní desky s uhlíkovými vlákny.

Jednalo se o delaminace typu I / II i III, Tabulka 14 a 15.

Delaminace typu I / II byla významně viditelná zejména na horní a spodní hraně obrobené plochy desky. Projevovala se velkým podílem vyčnívajících neořezaných vláken, které byly jen ohnuty posouvajícím se nástrojem ve směru řezu, nebo jen mírně oříznuty. To dokazovalo, že opotřebený nástroj měl zásadní vliv na delaminaci. Občas se vyskytoval i typ delaminace III. Delaminace typu III se projevovala jako volná vlákna, která částečně ulpívají k obrobenému povrchu a leží rovnoběžně se směrem posuvu nástroje.

6. Závěr

Předložená diplomová práce zpracována na téma „Studium integrity povrchu při frézování kompozitních desek vyztužených uhlíkovými vlákny“ přispívá k významnému rozšíření poznatků v rámci problematiky obrábění kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny.

Cílem studie byl výzkum vlivu úhlu hřbetu u frézovacího nástroje na opotřebení, řezné síly, drsnost obrobené plochy a delaminaci nesousledně frézovaného polymerního materiálu vyztuženého uhlíkovými vlákny s tkaninou keprové vazby a orientací vláken 90°.

Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků lze konstatovat následující poznatky:

Úhel hřbetu nástroje má významný vliv na opotřebení nástroje, drsnost obrobené plochy a delaminaci kompozitní desky s uhlíkovými vlákny.

Nástroj s úhlem hřbetu 8,4° se opotřebovával rychleji než nástroj s úhlem hřbetu 16,4°. Totéž platilo i pro řeznou sílu, sledovanou drsnost obrobené plochy a delaminaci.

V dané souvislosti bylo prokázáno, že s rostoucím opotřebením nástroje rostla řezná síla, která následně zvyšovala drsnost povrchu a rozšiřovala delaminaci.

Ze snímků povrchové topografie nástrojů bylo vysledováno, že v rámci opotřebení nástroje dochází k opotřebením otěrem.

V rámci pozorování obrobené horní i spodní hrany byla zaznamenána delaminace typu I/II i III. Nejvíce se projevovala delaminace typu I/II, která rostla se zvyšujícím se opotřebením nástroje a to zejména na horní obrobené hraně.

Výsledky provedeného výzkumu mají velký praktický význam a to nejen z pohledu kvality obrobené plochy, ale i úspor času, finančních nákladů a energie při obrábění kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny.

Použitá literatura

- [1] Geng, D., Liu, Y., Shao, Z., Lu, Z., Cai, J., Li, X., Jiang, X., Zhang, D. Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: a review. Online. *Compos. Struct.* 216, (2019), 168–186. Dostupné z: [10.1016/j.compstruct.2019.02.099](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.099)
- [2] Rawat, S., Attia, H.: Wear mechanisms and tool life management of WC-Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites. Online. *Wear* (2009), 267,(5–8), 1022–1030, Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2009.01.031>
- [3] Freeman, W.-T., Kuebler, G.-C.: Composite Materials: Testing and Design (Third Conference). Online. *ASTM International* (1974), Dostupné z: 10.1520/STP546-EB
- [4] Chatterjee, A.: Thermal degradation analysis of thermoset resins. Online. *J. Appl. Polym. Sci.* (2009), 114(3), 1417–1425. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/app.30664>
- [5] Selzer, R., Friedrich, K.: Mechanical properties and failure behaviour of carbon fibre-reinforced polymer composites under the influence of moisture. Online. *Compos. Part A* (1997), 28(6), 595–604. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(96\)00154-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(96)00154-6)
- [6] König, W., Graß, P.: Quality definition and assessment in drilling of fibre reinforced thermosets. Online. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* (1989), 38(1), 119–124. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62665-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62665-1)
- [7] Xu, W., Zhang, L.: Tool wear and its effect on the surface integrity in the machining of fibre reinforced polymer composites. Online. *Compos. Struct.* (2018), 188, 257–265. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.018>
- [8] Stone, R., Krishnamurthy, K.: A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates. Online. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* (1996), 36(9), 985–1003. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(96\)00013-2](https://doi.org/10.1016/0890-6955(96)00013-2)
- [9] Li, H., Qin, X., He, G., Price, M.-A., Jin, Y., Sun, D.: An energy based force prediction method for UD-CFRP orthogonal machining. Online. *Compos. Struct.* (2017), 159, 34–43. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.051>
- [10] An, Q., Cai, C., Cai, X., Chen, M.: Experimental investigation on the cutting mechanism and surface generation in orthogonal cutting of UD-CFRP laminates. Online. *Compos. Struct.* (2019), 230, 111441. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111441>
- [11] Liu, D., Tang, Y., Cong, W.-L.: A review of mechanical drilling for composite laminates. *Compos. Struct.* (2012) 94(4), 1265–1279. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.024>
- [12] Vasudevan, H., Rajguru, R., Tank, K., Shetty, N.: Optimization of multi-performance characteristics in the turning of GFRP(E) composites using principle component analysis combined with grey relational analysis. Online. *Mater. Today Proc.* 5(2), 5955–5967. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.12.197>
- [13] Davim, J.-P., Mata, F.: A new machinability index in turning fiber reinforced plastics. Online. *J. Mater. Process. Technol.* (2005) 170(1–2), 436–440. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.jmatprotec.2005.05.047>
- [14] Henerichs, M., Voß, R., Kuster, F., Wegener, K.: Machining of carbon fiber reinforced plastics: influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces. Online. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* (2015) 9, 136–145. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.11.002>

- [15] Rajasekaran, T., Palanikumar, K., Vinayagam, B.-K.: Application of fuzzy logic for modeling surface roughness in turning CFRP composites using CBN tool. Online. *Prod. Eng.* (2011) 5(2), 191–199. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-011-0297-y>
- [16] Sivasankaran, S., Harisagar, P.-T., Saminathan, E., Siddharth, S., Sasikumar, P.: Effect of process parameters in surface roughness during turning of GFRP pipes using PCD insert tool. Online. *Procedia Eng.* (2014) 97, 64–71. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.225>
- [17] Hou, G., Zhang, K., Fan, X., Luo, B., Cheng, H., Yan, X., Li, Y.: Analysis of exit-ply temperature characteristics and their effects on occurrence of exit-ply damages during UD CFRP drilling. Online. *Compos. Struct.* (2020) 231, 111456. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111456>
- [18] Fu, R., Jia, Z., Wang, F., Jin, Y., Sun, D., Yang, L., Cheng, D.: Drill-exit temperature characteristics in drilling of UD and MD CFRP composites based on infrared thermography. Online. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* (2018) 135, 24–37. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.08.002>
- [19] Su, F., Zheng, L., Sun, F., Wang, Z., Deng, Z., Qiu, X.: Novel drill bit based on the step-control scheme for reducing the CFRP delamination. Online. *J. Mater. Process. Technol.* (2018) 262, 157–167. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.06.037>
- [20] Hrechuk, A., Bushlya, V., Ståhl, J.-E.: Hole-quality evaluation in drilling fiber-reinforced composites. Online. *Compos. Struct.* (2018), 204, 378–387. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.105>
- [21] Persson, E., Eriksson, I., Zackrisson, L.: Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates. Online. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* (1997), 28(2), 141–151. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(96\)00106-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(96)00106-6)
- [22] Ho-Cheng, H., Dharan, C.K.H.: Delamination during drilling in composite laminates. Online. *J. Eng. Ind. (Trans. ASME)*, (1990), 112(3), 236–239. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/1.2899580>
- [23] Wang, B., Yang, B., Wang, M., Zheng, Y., Hong, X., Zhang, F.: Effect of cutting temperature on bending properties of carbon fibre reinforced plastics. Online. *Sci. Eng. Compos. Mater.*, (2019), 26(1), 394–401. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1515/secm-2019-0019>
- [24] Shyha, I.-S., Soo, S.-L., Aspinwall, D.-K., Bradley, S., Perry, R., Harden, P., Dawson, S.: Hole quality assessment following drilling of metallic-composite stacks. Online. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, (2011), 51(7–8), 569–578. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.04.007>
- [25] Wang, B., Wang, Y., Zhao, H., Sun, L., Wang, M., Kong, X.: Effect of a Ti alloy layer on CFRP hole quality during helical milling of CFRP/Ti laminate. Online. *Compos. Struct.*, (2020), 252, 112670. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112670>
- [26] Wang, C., Liu, G., An, Q., Chen, M.: Occurrence and formation mechanism of surface cavity defects during orthogonal milling of CFRP laminates. Online. *Compos. Part B Eng.*, (2017) 109, 10–22. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.015>
- [27] Hocheng, H., Tsao, C.-C.: Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials. Online. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, (2006), 46(12–13), 1403–1416. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.10.004>
- [28] Jia, Z., Zhang, C., Wang, F., Fu, R., Chen, C.: An investigation of the effects of step drill geometry on drilling induced delamination and burr of Ti/CFRP stacks. Online. *Compos. Struct.*, (2020), 235, 111786. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111786>

- [29] Wang, F., Qian, B., Jia, Z., Fu, R., Cheng, D.: Secondary cutting edge wear of one-shot drill bit in drilling CFRP and its impact on hole quality. Online. *Compos. Struct.*, (2017), 178, 341–352. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.024>
- [30] HAEGER, A. et al. Non-Destructive Detection of Drilling-induced Delamination. CFRP and its Effect on Mechanical, Online. *Procedia Engineering*, (2016), vol. 149, 130 – 142. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.647>
- [31] MAŠEK, Petr. Frézování kompozitních materiálů s termoplastickou maticí. PhD Thesis. Czech Technical University. 2019. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/82082>
- [32] SZVAJKA, K. a T. TRZEPIECIŃSKI. Effect of tool material on tool wear and delamination during machining of particleboard. Online. *Journal of Wood Science*, (2016), roč. LXII. pp. 305-315. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-016-1555-6>
- [33] SHYHA, Islam; HUO, Dehong. *Advances in Machining of Composite Materials*. Online. Springer International Publishing, 2021. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-71438-3>
- [34] DAVIM, P. J. *Machining composite materials*. London: ISTE Ltd, 2010, 261 s.. ISBN 978-1-84821-170-4.
- [35] SHEIKH-AHMAD, J. Y. *Machining of polymer composites*. New York: Springer Science + Business Media, 9780387686196. (2009) ISBN 978-0-387-35539-9. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-68619-6>
- [36] Colligan K, Ramulu M. The effect of edge trimming on composite surface plies. *Manuf Rev*, USA, (1992), 5(4):274–283. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/284760012_The_effect_of_edge_trimming_on_composite_surface_plyies
- [37] Hintze W, Hartmann D, Schutte C . Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs)—an experimental study. Online. *Compos Sci Technol.* (2011), 71:1719–1726. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.08.002>
- [38] Hintze W, Hartmann D. Modeling of delamination during milling of unidirectional CFRP. Online. *Proc CIRP* (2013), 8:444–449. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.131>
- [39] Hosokawa A, Hirose N, Ueda T, Furumoto T. High-quality machining of CFRP with high helix end mill. Online. *CIRP Ann - Manuf Technol*, (2014), 63:89–92. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.084>
- [40] Qingliang C et al. Experimental study on delamination during trimming of CFRP. Online. *Adv Mater Res*, (2015), 1089:331–33. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1089.331>