

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA v PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie-technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Frézování rovinných ploch a drážek při obrábění kompozitního materiálu

Autor: **Václav Schorník**
Vedoucí práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

Akademický rok 2012/2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav SCHORNÍK**
Osobní číslo: **S10B0175P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Název tématu: **Frézování rovinných ploch a drážek při obrábění kompozitního materiálu**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh vhodné metodiky obrábění
4. Závěr




Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:

Astakhof, Viktor P., Tribology and interface engineering series, Elsevier, 2006, ISBN 0-444-52881-4
Shaw, Milton Clayton, Metal cutting principles, Oxford University Press, 2005, ISBN 0-19-514206-3
Juneja, B.L., Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools, New Age International, ISBN 978-81-224-1467-7
Staněk, Jiří, Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací, Západočeská univerzita, 2005, ISBN 80-7043-363-9

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Konzultant bakalářské práce: **Ladislav Smítka**
Compo Tech PLUS, spol. s r.o.
Ostatní konzultanti: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Datum zadání bakalářské práce: **29. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. června 2013**


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. listopadu 2012

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

AUTORSKÁ PRÁVA

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské/diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

PODĚKOVÁNÍ

Tato bakalářská práce byla podpořena formou odborné konzultace Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky v rámci projektu č. CZ.1.07/2.3.00/35.0048 „Popularizace výzkumu a vývoje ve strojním inženýrství a jeho výsledků (POPULÁR)“. Odborným konzultantem byl Ing. Miroslav Zetek, Ph.D., kterému děkuji za poskytnuté konzultace, kvalifikované rady a odbornou pomoc při sepsování této BP. Také bych rád poděkoval slečně Ing. Ivaně Česákové a panu Ladislavovi Smítkovi za cenné konzultace a neustálý kontakt při zpracovávání této práce.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Schorník	Jméno Václav	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 - Strojírenská technologie-technologie obrábění		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Frézování rovinných ploch a drážek při obrábění kompozitního materiálu		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	46	TEXTOVÁ ČÁST	46	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS	<p>Cílem této bakalářské práce je shrnutí dostupných informací o frézování kompozitních materiálů.</p> <p>První část bakalářské práce obsahuje základní pojmy a informace o kompozitních materiálech. Další pak informace o řezných podmínkách, nástrojích a jejich materiálech a o problémech vyvstávajících při frézování kompozitních materiálů. Poslední část této bakalářské práce se zaměřuje na testování nalezených informací v praxi.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	Frézování kompozitů, vlákny vyztužený kompozit, řezné podmínky, řezné materiály

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Schorník	Name Václav	
FIELD OF STUDY	2301R016 Manufacturing Processes - Technology of Metal Cutting		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Milling Plane Surfaces and Grooves During Machining Composite Material		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	46	TEXT PART	46	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION	<p>The aim of this thesis is to summarize available information about the milling of composite materials.</p> <p>The first part includes basic terms and information about composite materials. The next part includes information about cutting conditions, tools and materials and issues raised during milling of composite materials. The last part of this thesis focuses on testing found information in practice.</p>
KEY WORDS	Milling composites, fiber-reinforced composites, cutting conditions, cutting materials

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	10
1 ÚVOD	11
2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU	12
2.1 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL	12
2.1.1 <i>Matrice</i>	12
2.1.2 <i>Dělení FRP kompozitů dle materiálů výztužného vlákna</i>	15
2.1.3 <i>Objemový podíl fází</i>	16
2.1.4 <i>Zpracování matrice a výztuže</i>	17
2.2 OBRÁBĚNÍ FRP KOMPOZITŮ OBECNĚ	17
2.3 FRÉZOVÁNÍ FRP KOMPOZITŮ	18
2.3.1 <i>Natočení vláken vůči směru řezání při frézování</i>	19
2.3.2 <i>Vliv natočení vláken na jakost obrobené plochy</i>	20
2.3.3 <i>Materiály nástrojů pro frézování FRP kompozitů</i>	23
2.3.4 <i>Typy nástrojů</i>	28
2.3.5 <i>Geometrie břítu</i>	30
2.3.6 <i>Řezné podmínky</i>	30
2.3.7 <i>Delaminační faktor, vlivy na velikost delaminace</i>	32
2.3.8 <i>Řezné síly</i>	34
2.3.9 <i>Teplo vzniklé při frézování</i>	37
2.4 SHRNUTÍ	38
3 NÁVRH VHODNÉ METODIKY OBRÁBĚNÍ	38
3.1 EXPERIMENT	38
3.1.1 <i>Použitý stroj</i>	38
3.1.2 <i>Měřicí technika</i>	39
3.1.3 <i>Materiál</i>	40
3.1.4 <i>Nástroje</i>	40
3.1.5 <i>Postup frézování</i>	40
3.1.6 <i>Řezné podmínky</i>	42
3.1.7 <i>Výsledky experimentu</i>	42
3.1.8 <i>Opotřeбенí nástrojů</i>	44
4 ZÁVĚR	45
ZDROJE	46

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Tvar třísky FRP kompozitu - uhlík/epoxidová pryskyřice (termoset) (a, b), uhlík/PEEK (termoplast) (c,d) [3]	14
Obrázek 2: Metoda navíjení [3]	17
Obrázek 3: Princip sousledného a nesousledného frézování [10]	18
Obrázek 4: Proměnná orientace vláken vůči směru řezání při frézování [6]	20
Obrázek 5: Porovnání mechanismu vzniku třísky u materiálu s orientací vláken $\theta = 0/180^\circ$ při a) pozitivním úhlu čela, b) při negativním úhlu čela [3]	21
Obrázek 6: Mikrostruktura povrchu vzorku po frézování $\beta = 0^\circ$ [3]	21
Obrázek 7: Porovnání mechanismu vzniku třísky u materiálu s orientací vláken $\theta = 45^\circ$ při (a) pozitivním úhlu čela, (b) při negativním úhlu čela [3]	22
Obrázek 8: Mikrostruktura povrchu vzorku z CFRP $\theta = 90^\circ$ po frézování nástrojem s úhlem čela 20° , při hloubce řezu 0.1 mm za úhlu $\beta = 90^\circ$ [3]	22
Obrázek 9: Mikrostruktura vzorku z CFRP $\theta = 135^\circ$ obráběného nástrojem s úhlem čela 20° , při hloubce řezu 0.1mm za úhlu $\beta = 45^\circ$ [3]	23
Obrázek 10: Mechanismus vzniku třísky při $\theta = 135^\circ$ a $\beta = 45^\circ$ [3]	23
Obrázek 11: Opotřebení C2 [3]	26
Obrázek 12: Opotřebení D20 [3]	27
Obrázek 13: Opotřebení D10 [3]	27
Obrázek 14: a) stopková fréza s přímými zuby, b)-c) stopková fréza se zuby do šroubovice, d) stopková fréza s protiběžnými šroubovicemi, e)-f) Burr frézy [3]	29
Obrázek 15: Stopková fréza v experimentu [7]	32
Obrázek 16: Obráběný materiál v exp. [7]	32
Obrázek 17: Delaminační faktor [7]	32
Obrázek 18: Delaminace typ I [3]	33
Obrázek 19: Delaminace typ II [3]	33
Obrázek 20: Delaminace typ III [3]	33
Obrázek 21: Delaminace typ I/II [3]	33
Obrázek 22: Řezné síly při nesousledném frézování	34
Obrázek 23: Mikrostruktura vzorku CFRP - závislost na teplotě, řezná rychlost 100 m/min [7] ..	36
Obrázek 24: Kress FME 1050-1 [11]	38
Obrázek 25: Frézka CNC - CompoTech	39
Obrázek 26: Mikroskop Multicheck PC 500	39
Obrázek 27: HC 650	40
Obrázek 28: WD 108	40
Obrázek 29: Tvar obrobené plochy s vyznačenou změnou orientace vláken I	41
Obrázek 30: Tvar obrobené plochy s vyznačenou změnou orientace vláken II	41
Obrázek 31: Pohled na obrobený vzorek	41
Obrázek 32: Třísky v obrobeném povrchu	41
Obrázek 33: Nesousledně HC 650	42
Obrázek 34: Nesousledně WD 108	42
Obrázek 35: Zvlněné vrstvy různých orientací vláken pozorovaných v obrobené ploše	43
Obrázek 36: Varianta D sousledně HC 650	43
Obrázek 37: Varianta G nesousledně HC 650	43
Obrázek 38: F S WD 108	44
Obrázek 39: H N WD 108	44
Obrázek 40: Břit HC 650 zvětšení 7x	44
Obrázek 41: Břit WD 108 zvětšení 7x	44

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratky použité v textu

FRP	Fiber reinforced plastic (vlákny vyztužený plast)
GFRP	Glass fiber reinforced plastic (plast vyztužený skelnými vlákny)
CFRP	Carbon fiber reinforced plastic (plast vyztužený uhlíkovými vlákny)
PKD	Polykrystalický diamant
SK	Slinutý karbid
CVD	Chemical vapor deposition (metoda povlakování)
PVD	Physical vapor deposition (metoda povlakování)
OH	Oxid hlinitý
HSC	High strenght carbon (standardní uhlíkové vlákno)
UHM	Ultra high modulus (vysokomodulové vlákno nad 500 GPa)
CNC	Computer numerical controlled (číslicové řízení pomocí počítače)
PEEK	Polyether ether keton
PPD	Oblast primární plastické deformace
SPD	Oblast sekundární plastické deformace
TPD	Oblast terciární plastické deformace

Symoly použité v textu

V_v	Objem výztuhy	[m^3]
V_m	Objem matrice	[m^3]
R_a	Střední aritmetická úchylka profilu	[μm]
R_z	Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů	[μm]
φ	Natočení frézy	[$^\circ$]
β	Okamžitý úhel natočení vláken vůči směru řezání	[$^\circ$]
θ	Úhel natočení vláken vůči směru posuvu nástroje	[$^\circ$]
r_e	Zaoblení řezné hrany nástroje	[mm]
v_f	Posuvová rychlost	[mm/min]
v_c	Řezná rychlost	[m/min]
f_z	Posuv na zub	[mm/zub]
h_q	Ekvivalentní tloušťka třísky	[mm]
D_f	Delaminační faktor	[1]
T_g	Teplota skelného přechodu	[$^\circ C$]
F_n	Normálová řezná síla	[N]
F_f	Posuvová řezná síla	[N]

1 Úvod

Kompozitní materiály nabízí širokou škálu velmi zajímavých vlastností. Ať už fyzikálních či mechanických. V poslední době jsou více a více vyhledávaným artiklem zejména ve vojenském, leteckém a automobilovém průmyslu. Je tomu tak zejména díky poměru jejich váhy k vysokým hodnotám mechanických vlastností, mnohdy převyšujících mechanické hodnoty standardně užívaných materiálů.

Problematika obrábění kompozitních materiálů je ale stále velmi málo probádána. Obrábění kompozitů je odlišné od obrábění konvenčních, běžně užívaných materiálů. Každý druh kompozitu má své specifické vlastnosti, které mají vliv na proces obrábění. Tyto vlastnosti mohou být měněny například materiálem použité výztuže či matrice. Popřípadě orientací výztuže v objemu výrobku. Při obrábění některých kompozitů dochází k extrémnímu opotřebení nástrojů vlivem vysokých hodnot mechanických vlastností výztuže. Vystávají vyšší nároky na stroje, kvůli používání vysokých řezných rychlostí. Je velmi obtížné dosáhnout požadované kvality povrchu díky mnoha faktorům, které zásadně ovlivňují průběh obrábění. Při obrábění kompozitů je třeba uvážit i zdravotní rizika. V některých případech může být obrábění bez ochranných pomůcek zdraví nebezpečné. Všechny tyto aspekty je třeba uvážit před samotným návrhem technologie.

Cíle této práce spočívají ve zjištění a shrnutí dostupných informací o frézování kompozitních materiálů z hlediska jejich obrobiteľnosti, jakosti obrobené plochy a úskalí spojených s frézováním těchto materiálů, zejména pak opotřebením nástrojů. Dalším významným cílem této práce je zjištění informací o použitelných nástrojích z hlediska materiálu a nástrojové geometrie, včetně zjištění informací o vlivu geometrie na jakost obrobené plochy. Tato práce se také pokusí ověřit nashromážděné informace a dostupné údaje v praxi.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Obráběný materiál

Kompozitní materiály jsou tvořeny ze dvou nebo více složek (fází), které se výrazně liší svými vlastnostmi. Vyrábějí se mechanickým mísením - jsou heterogenní. Tyto materiály vykazují anizotropní chování.

Kompozity se skládají z matrice, která má za úkol chránit výztuž, přenášet na ni zátěž a určovat tvar součásti. Výztuž má pak za úkol zvyšovat vlastnosti, pro které byla určena. Má většinou lepší mechanické vlastnosti než matrice. Je ve tvaru dlouhých vláken, částic či whiskerů. Tyto materiály jsou velmi oblíbené v konstrukcích, kde je důležitá nízká hmotnost a velmi vysoké pevnostní hodnoty. Tato práce se bude věnovat kompozitním materiálům s polymerní maticí, vyztuženou dlouhými vlákny.

Výhody FRP kompozitů spočívají především ve velmi nízké hmotnosti a velmi vysoké pevnosti. Dále vykazují vysokou chemickou a tepelnou odolnost. Na druhou stranu je návrh konstrukce z těchto materiálů složitější oproti standardně používaným materiálům (díky jejich anizotropnímu chování). Velmi složité je i opracování obrobků z těchto materiálů a jejich spojování do celku. Oproti konvenčně používaným materiálům jsou FRP kompozity poměrně drahé. Jsou velmi oblíbené v automobilovém, sportovním, leteckém a vojenském průmyslu. Nadále se dá předpokládat nárůst jejich použití v moderních automobilech pro běžné uživatele. V leteckém, vojenském i sportovním průmyslu se využívají již delší dobu.

2.1.1 Matrice

2.1.1.1 Kovové matrice

Kovové matrice se používají pro aplikace vyžadující vysokou odolnost proti tepelnému poškození. Používají se hlavně v leteckém průmyslu a u částí motorů aut. Velmi často se jako kovová matrice používá hliník. [1]

2.1.1.2 Keramické matrice

Kompozity s keramickou maticí se používají především kvůli vyšší lomové houževnatosti oproti nevyztužené keramice. Používá se např. oxid hlinitý v kombinaci se SiC whiskery. [1]

2.1.1.3 Polymerní matrice

Pro polymerní matrice se nejčastěji jako výztuže používají velmi pevná a křehká skelná (GFRP – Glass Fibre Reinforced Plastics), uhlíková (CFRP – Carbon Fibre Reinforced Plastics) a aramidová vlákna, která jsou velmi pevná a tuhá. Jejich cena je však velmi vysoká, proto se používají v konstrukcích, kde se nejedná o finanční náročnost, ale o extrémní požadavky na poměr mezi pevností a hmotností. [1]

2.1.1.4 Termosety

Termosety jsou poměrně pevné, tuhé a mají špatnou tvárnost. Po vytvrzení vytváří velmi složité trojrozměrné sítě, nelze je tvářet, nejdou roztavit. Jsou to např. epoxidové a polyesterové pryskyřice. Polyesterové pryskyřice jsou levnější než epoxidové, ale nejsou tak odolné. Používají se například na výrobu lodních trupů, panelů do aut a podobně. Epoxidové pryskyřice mají výbornou adhezi ke kovům, keramice a sklu. Málo se smršťují a umožňují tak vyšší výrobní přesnost. Dále dobře odolávají vodě, roztokům alkálií, kyselinám a některým rozpouštědlům. Jejich nejčastější použití je v kombinaci s kvalitními výztužnými vlákny - aramidovými a uhlíkovými v aplikacích pro automobilový, letecký, lékařský, sportovní a vojenský průmysl. Mají nízkou viskozitu a vysokou smáčivost při zpracování, které je tím výrazně usnadněno. Dále mají vyšší teplotu skelného přechodu než termoplasty. [1]

2.1.1.5 Termoplasty

Termoplastické polymery se skládají z pružných lineárních molekulárních řetězců, které jsou navzájem propleteny. Při zahřívání měknou. Mají nižší pevnost, modul pružnosti, ale mají poměrně vysokou houževnatost. Řadí se mezi ně například polyamidy a PEEK. Kompozity z těchto materiálů se hůře vyrábí díky velké viskozitě a nízké smáčivosti těchto pryskyřic. [1], [2]

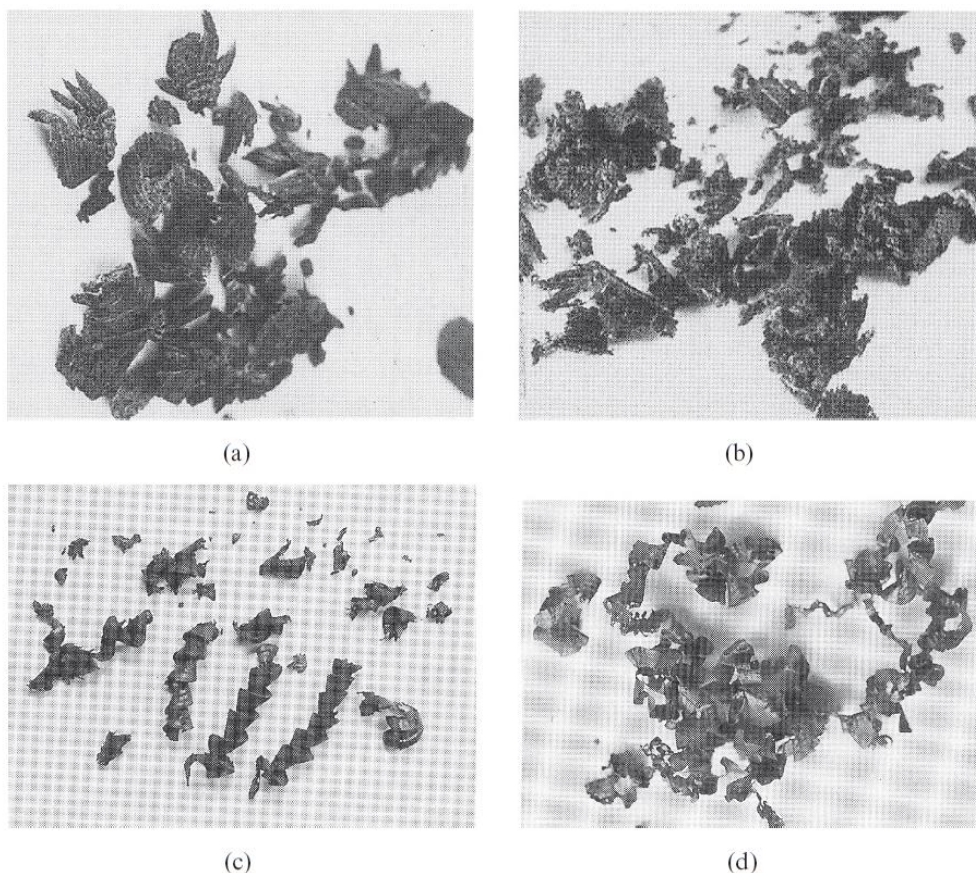
Matrice	Hustota ρ [g · cm ⁻³]	Modul pružnosti E [GPa]	Pevnost v tahu σ^* [GPa]	Tepelná roztážnost α [K ⁻¹ · 10 ⁻⁶]	Tepelná vodivost K [W · m ⁻¹ · K ⁻¹]
<i>Termosety</i>					
epoxidové p.	1,1 – 1,4	3 – 6	0,035 – 0,1	60	0,1
polyesterové p.	1,2 – 1,5	2,0 – 4,5	0,04 – 0,09	100 – 200	0,2
<i>Termoplasty</i>					
PP	0,9	1,0 – 1,4	0,02 – 0,04	110	0,2
PEEK	1,26 – 1,32	3,6	0,17	47	0,2
Hliník	2,7	70	0,2 – 0,6	24	130 - 230
Borosilikátové sklo	2,3	64	0,1	3	12

Tabulka 1: Porovnání vlastností různých typů matric [4]

Z Tabulky 1 je patrné, že matrice nevykazují vysoké pevnostní hodnoty. Dále mají velmi malou tepelnou vodivost, což se negativně projevuje na odvodu tepla z místa řezu při obrábění. V další tabulce je uvedeno srovnání mezi termosety a termoplasty při jejich zpracování. Termosetické matrice jsou oblíbené zejména kvůli jejich nízké ceně a poměrně jednoduchému zpracování. K jejich zpracování je na rozdíl od termoplastických matric dostatek informací. Ty jsou více odolné než termosetické matrice, ale také dražší a jejich zpracování je složitější.

	Termoset	Termoplast
Cena	Nízká	Vysoká
Odolnost	Průměrná	Dobrá
Impregnace vlákna	Lehká	Obtížná
Dostupnost informací	Značná	Limitovaná
Tlak při zpracování	Nízký	Vysoký
Teplota při zpracování	Nízká	Vysoká
Opravitelnost	Není	Dobrá
Viskozita	Nízká	Vysoká

Tabulka 2: Porovnání vlastností při zpracování – termoplastické a termosetické matrice [3]



Obrázek 1: Tvar třísky FRP kompozitu - uhlík/epoxidová pryskyřice (termoset) (a, b), uhlík/PEEK (termoplast) (c,d) [3]

Při obrábění FRP kompozitů s termosetickou matricí je vytvářena drobná – prášková tříška díky křehkosti a špatné tvárnosti těchto matric. Vznik těchto malých třísek má za následek zvýšení nároků na odsávání. Vdechování prachu vzniklého obráběním těchto materiálů by mohlo poškodit zdraví člověka. Tato tříška dále může díky své elektrické vodivosti zkratovat elektronická zařízení obráběcího stroje a díky tvrdosti poškodit vodící plochy suportů apod.

Při obrábění FRP kompozitu s termoplastickou matricí je vytvářena kontinuální tříška (díky lepší tvárnosti těchto matric). Na Obrázku 1 je možné vidět zmiňované rozdíly. [3]

2.1.2 Dělení FRP kompozitů dle materiálů výztužného vlákna

Ve FRP kompozitech se používají výztužná vlákna z různých materiálů. Většina materiálů vykazuje ve formě vláken vyšší hodnoty mechanických vlastností než ve formě jiné. Je to tak díky nižší koncentraci vad materiálu v malém objemu vlákna. Tento jev je možné pozorovat v následující tabulce.

	Uhlík		Sklo	
	Monolit	Vlákno (VM)	Monolit	Vlákno (E-sklo)
Modul pružnosti v tahu [GPa]	10	400	0,4	172
Pevnost v tahu [MPa]	-	2500-4500	-	2,964
Pevnost v ohybu [MPa]	20	-	26	-

Tabulka 3: Vlastnosti uhlíku a skla v monolitické a vlákně formě (VM – vysoko - modulové) [3]

Tato práce se zabývá zejména frézováním FRP kompozitů, které jsou vyztuženy uhlíkovými vlákny (CFRP). Tato vlákna jsou oblíbená díky jejich tuhosti, pevnosti, nízké hustotě a dostupnosti. Používají se k výrobě silně namáhaných lehkých konstrukcí. Uhlíková vlákna se dělí dle vlastností daných zpracováním na vlákna s vysokým modulem pružnosti a na vlákna s vysokou pevností. Tato vlákna se nejčastěji dodávají v průměru od 5 μm do 8 μm . Dále se pak pro lepší zpracovatelnost splétají do svazků v počtu od 2 do 12 000 (12k), pro levné aplikace pak až do 48 000 (48k). V kombinaci s matricí tvoří tato vlákna velmi tuhou a odolnou kompozit. [3]

Odolnost FRP kompozitů vyztužených těmito vlákny je silně ovlivněna mezifází na rozhraní vlákno – matrice. Jedná se o tenkou vrstvu na zmíněném rozhraní. Ovlivňuje adhezi vlákna k polymerní matrici. Pokud je adheze dokonalá, všechno napětí je z matrice přeneseno na vlákna. Mezifáze může být řízená a neřízená. Neřízená mezifáze znamená, že povrch vláken není nijak upraven. To má pak za následek sníženou adhezi, a tím i menší odolnost kompozitu jako celku. Řízená mezifáze pak spočívá v nanášení tenké reaktivní vrstvy, která zajistí zlepšenou adhezi vláken k matrici. Materiál je pak kompaktnější a má vyšší odolnost proti působení vnějších sil. [4]

V následující tabulce je pro porovnání možné vidět vlastnosti i ostatních vybraných výztužných vláken.

Vlákna	Hustota ρ [g·cm ³]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]	Pevnost v tahu σ^* [MPa]	Deformace do lomu [%]
<i>Anorganická:</i>				
Azbest	2,56	160	3100	1,9
Sklo	2,54	70 – 85	2200 – 3500	2,05
Borová vlákna	2,65	420	3500	0,8
SiC	2,60	250	2200	0,9
Uhlík	1,86	300 – 800	2700	0,7
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	3,2 – 3,9	300 – 414	1800 – 2000	0,3 – 0,8
<i>Organická:</i>				
Kevlar 29	1,45	60	2700	5,0
Kevlar 49	1,45	130	2900	2,5
Kevlar 129	1,44	120	3000	3,0
Kevlar 149	1,45	190	2600	2,5
PE Spectra	0,97	172	3000	1,7
PBT	1,50	250	2400	1,5
Len	1,30	180	2600	3,1

Tabulka 4: Používané materiály na výztuž FRP kompozitu [4]

2.1.3 Objemový podíl fází

Velmi důležitým faktorem pro přesnou identifikaci materiálu je objemový podíl výztuhy a matrice k celkovému objemu FRP kompozitu. Určuje, jakou část z celkového objemu zaujímá výztuha a jakou matrice.

$$\frac{V_v}{V} + \frac{V_m}{V} = \mathbf{1} \quad (1)$$

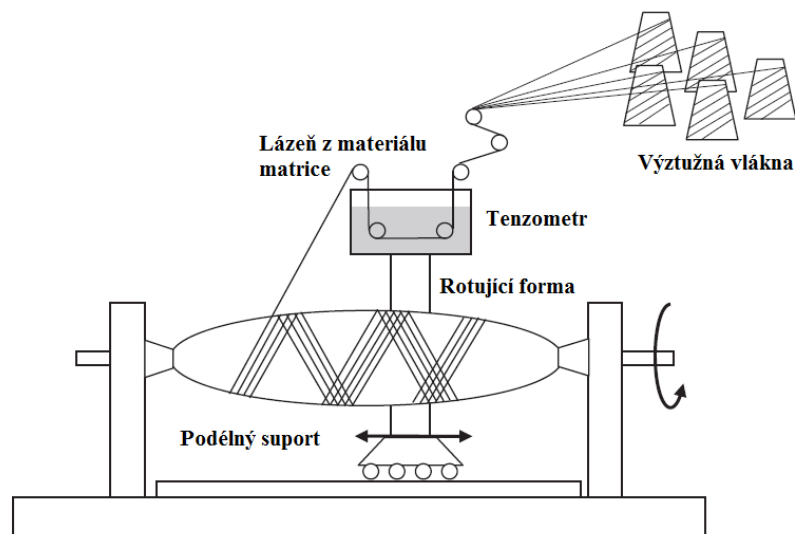
V_v – objem výztuhy

V_m – objem matrice

V – celkový objem kompozitu [1]

2.1.4 Zpracování matrice a výztuže

Existuje více druhů zpracování matrice a výztuže vláknenných kompozitů. Zde je uvedena pouze metoda navíjení. Tato metoda spočívá v navíjení vláken – svazků za daného předpětí na jádro formy. Vláknina jsou odebírána ze zásobníku, předimpregnována matricí a navíjena na formu. Pak je tento celek tepelně zpracován dle použitého druhu matrice. Na dalším obrázku je možné vidět postup navíjení. Výhoda této metody spočívá v nízké ceně. Touto metodou byl vyráběn vzorek, který byl obráběn v rámci experimentu. [3]



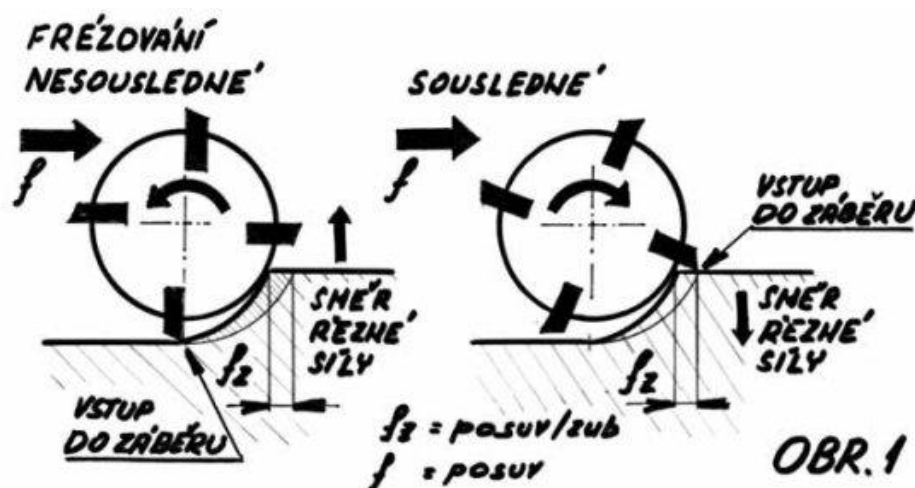
Obrázek 2: Metoda navíjení [3]

2.2 Obrábění FRP kompozitů obecně

Obrábění FRP materiálů je velmi složitá problematika. Je to dáno jejich nehomogenním složením, velkou odolností výztužných vláken, špatnou tepelnou vodivostí matrice a v neposlední řadě anizotropií těchto materiálů. Nehomogenní složení FRP kompozitů má při obrábění za následek výskyt rázů, které pak musí být zachyceny. To klade zvýšené nároky na tuhost soustavy S-N-O a na materiály nástrojů. Tato práce se zabývá frézováním, tudíž zde navíc vyvstává problém s přerušovaným řezem. O obrábění těchto materiálů není mnoho informací. Dá se předpokládat velký nárůst potřeby těchto informací díky stále se rozšiřujícímu zájmu o konstrukce z těchto materiálů. Již delší dobu se provádějí různé experimenty, které tyto informace podávají. Nicméně díky velkému množství kombinací materiálů, možností orientace vláken, zpracování těchto kompozitů apod. je třeba se věnovat určení rezných podmínek, používaných nástrojů a strojů každé této kombinaci zvlášť. [1]

2.3 Frézování FRP kompozitů

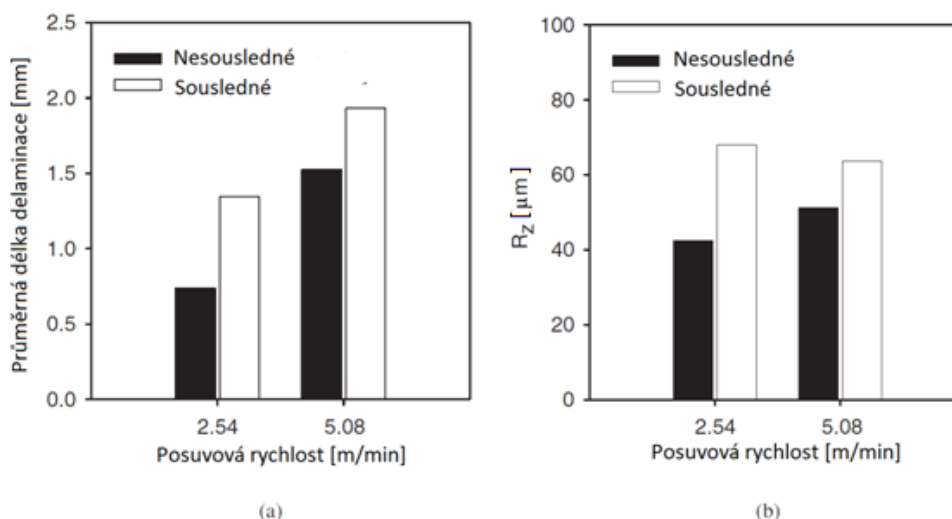
Frézování je strojní třískové obrábění, obvykle vícebřitým nástrojem, kde hlavní pohyb rotační koná nástroj a vedlejší pohyb přířív a posuv obrobek. Frézovací stroj se nazývá frézka, frézovací nástroj fréza.



Obrázek 3: Princip sousledného a nesousledného frézování [10]

Frézování se dělí na sousledné a nesousledné. Na Obrázku 3 je možné vidět rozdíl mezi sousledným a nesousledným frézováním. Při sousledném frézování nástroj rotuje po směru posuvu, při nesousledném pak proti směru posuvu.

Pro frézování FRP kompozitů je doporučeno nesousledné frézování. Při nesousledném frézování je materiál odebrán z minima do maxima, velmi horké třísky jsou vyváděny mimo obrobený povrch a je pak tedy méně pravděpodobná interakce mezi obrobenou plochou a velmi horkými třískami (připékání k matrici). Co se týče trhlin, nesousledné frézování vykazuje spíše horizontální trhliny, které nezasahují do již obrobeného povrchu. Při sousledném frézování dochází k frakturám materiálu do již obrobeného povrchu. V Grafu 1 je možné vidět porovnání mezi sousledným a nesousledným frézováním. Nesousledné frézování vykazuje jak menší delaminaci, tak menší drsnost obrobené plochy. Graf pochází z experimentu, kde byl použit nástroj typu Burr o průměru 6,35 mm k frézování CFRP při řezné rychlosti 100 m/min. [5]



Graf 1: Efekt druhu frézování a posuvové rychlosti na velikost delaminace (a), efekt druhu frézování a posuvové rychlosti na drsnosti R_z (b) [3]

Frézování FRP se většinou používá jako dokončovací operace, jako je například odjehlování a odstraňování modelovací směsi. Někdy je třeba vytvořit do obrobku různé prvky - např. drážky pro různé druhy spojů.

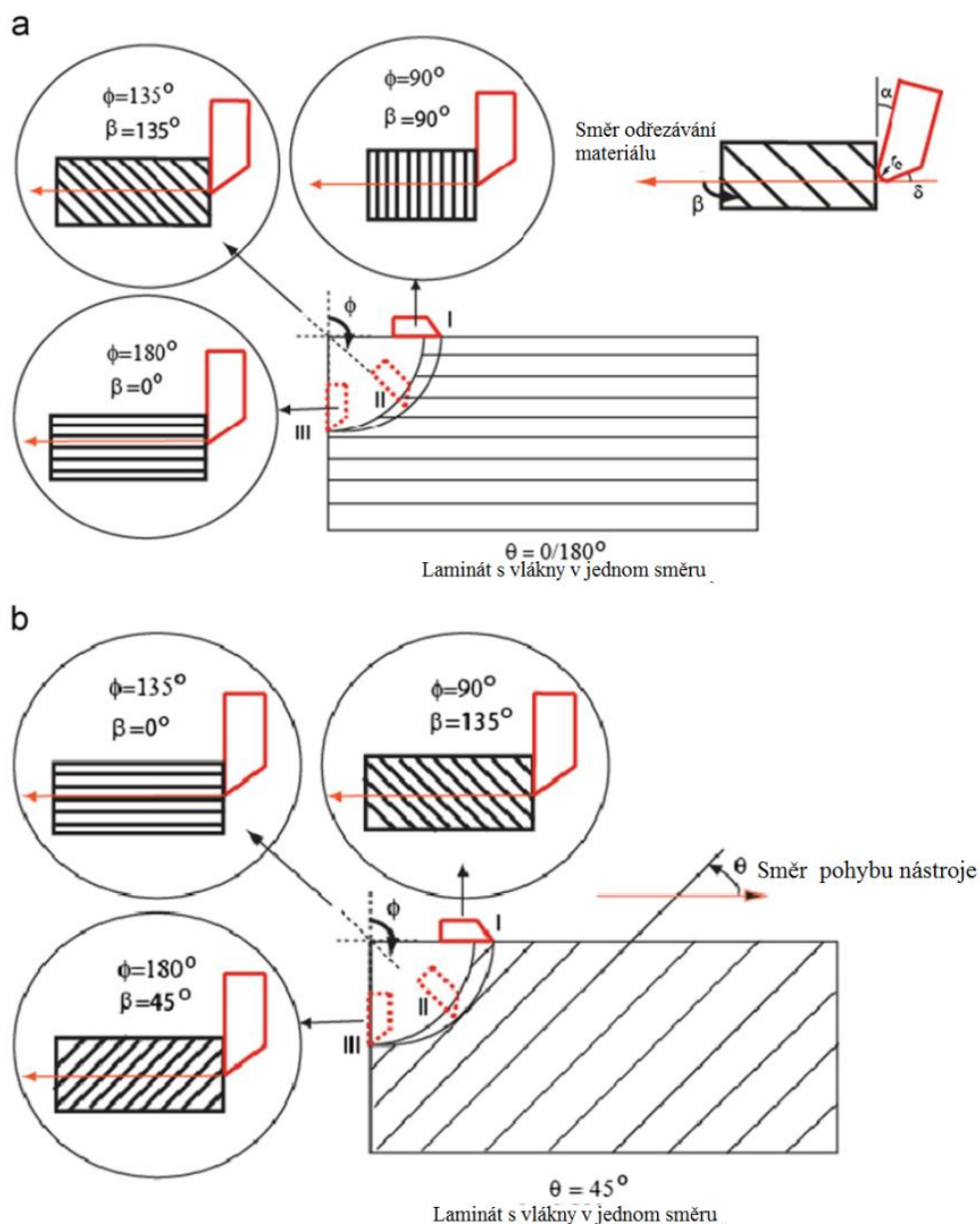
Na kvalitě obrobené plochy z hlediska přesnosti a drsnosti má největší vliv uspořádání vláken vůči směru obrábění, geometrie nástroje, řezné podmínky a objemový podíl jednotlivých fází.

Při frézování vyvstává problém s proměnným úhlem natočení vláken vůči směru odřezávání materiálu. V následující kapitole budou uvedeny potřebné informace k pochopení problému. [1]

2.3.1 Natočení vláken vůči směru řezání při frézování

Nadefinujeme tedy úhel (φ), (β), (θ), (α) a zaoblení řezné hrany nástroje r_e . Úhel (α), jak je vidno z Obrázku 4, je úhlem čela nástroje – v tomto případě je roven nule, stejně jako rádius zaoblení řezné hrany nástroje. Úhel (θ) je neměnný úhel natočení vláken vůči směru posuvu nástroje. Úhel (β) je okamžitý úhel natočení vláken vůči směru řezání. Úhel (φ) je úhel od roviny kolmé na směr posuvu ke špičce nástroje - měřený po směru hodinových ručiček. V podstatě je jím určena poloha břitu při frézování daná natočením frézy. Na následujícím obrázku je možné vidět znázorněné úhly a to, jak se úhel (β) mění v závislosti na natočení (φ). Tyto změny mají zásadní vliv na kvalitu obrábění.

Odběr materiálu pod určitým úhlem vykazuje různé mechanismy tvorby třísky. Následující část této práce tyto mechanismy popisuje. [6]



Obrázek 4: Proměnná orientace vláken vůči směru řezání při frézování [6]

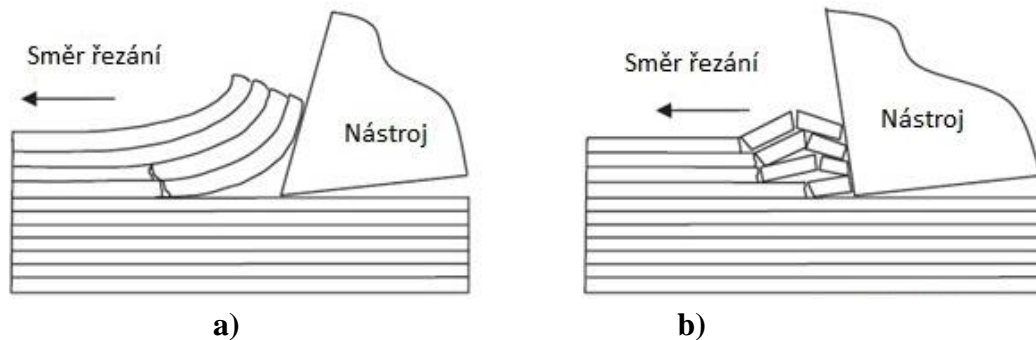
2.3.2 Vliv natočení vláken na jakost obrobené plochy

Na výsledek obrábění má také velmi důležitý vliv velikost úhlu čela nástroje. Proto bude dále také uvažován a provázán s výkladem vzniku třísky. Při úhlu $\beta = 0^\circ$ a kladném úhlu čela nástroje vytvoří nástroj tlak na vlákna ve směru jejich os. Vlákna jsou pak ohýbána a vytrhávána z matrice skluzem po čele nástroje. Při použití záporného či nulového úhlu čela dochází ke vzpěru vláken tím, jak nástroj na vlákna tlačí ve směru jejich podélné osy (jak je

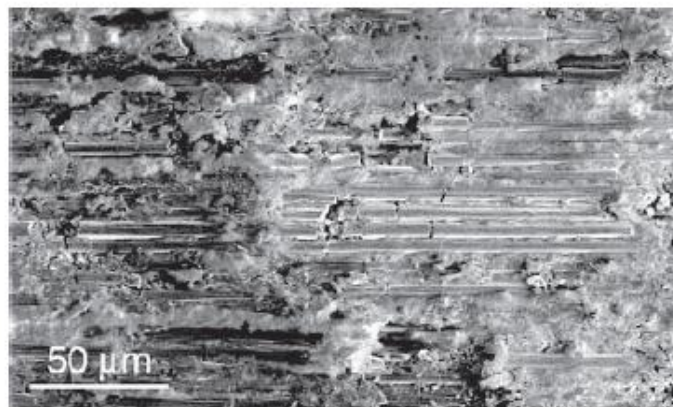
možné vidět na následujícím obrázku) a ke vzniku malých trhlin na rozhraní mezi výztužnými vlákny a matricí před ostřím nástroje.

Řezné síly velmi kolísají (méně u negativního úhlu čela) vlivem střídání delaminace, ohybu a praskání vláken. Povrch při obrábění nástrojem s pozitivním úhlem čela je poměrně nekvalitní tím, že se část matrice odtrhne a část dále chrání vlákna, která díky elastické deformaci nebyla oddělena. Při použití negativního úhlu čela tedy dochází ke vzpěru vláken těsně před řeznou hranou nástroje a tím ke vzniku velmi malých třísek. Vlákna jsou polámana kolmo k jejich podélné ose vlivem tlaku ostří na obráběný povrch.

Na následujících obrázcích (Obrázek 5 a, b), je možné vidět znázornění tvorby třísky a mikrostrukturu po obrobení. Při obrábění a) tedy převažuje delaminace, při b) pak vzpěr. Na Obrázku 6 pak lze vidět mikrostrukturu vzorku z CFRP obráběného nástrojem s úhlem čela 20° při hloubce řezu 0.1 mm. [3]



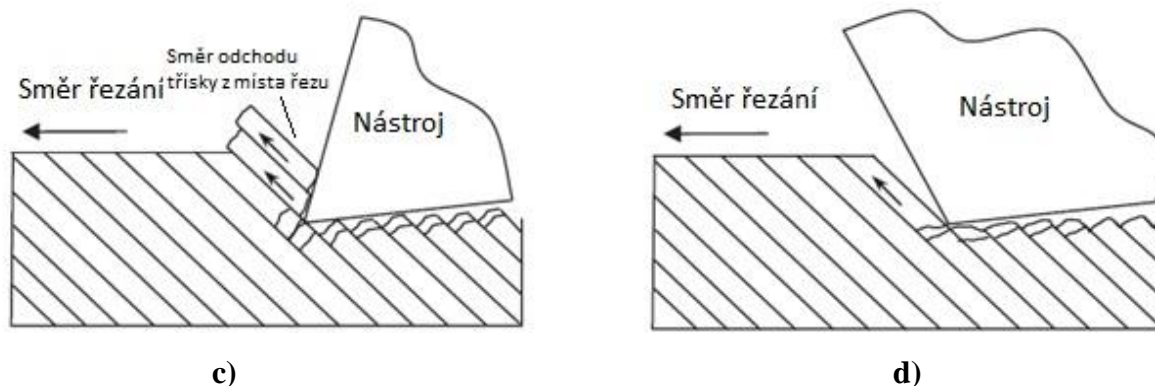
Obrázek 5: Porovnání mechanismu vzniku třísky u materiálu s orientací vláken $\theta = 0/180^\circ$ při a) pozitivním úhlu čela, b) při negativním úhlu čela [3]



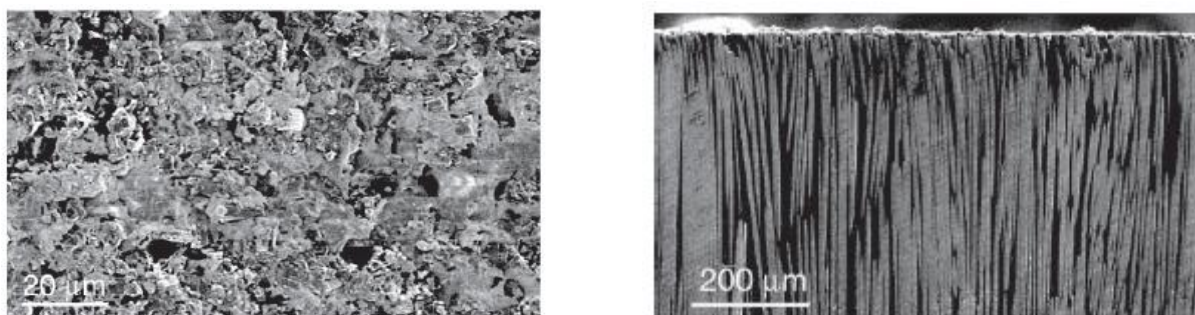
Obrázek 6: Mikrostruktura povrchu vzorku po frézování $\beta = 0^\circ$ [3]

Při obrábění pod úhlem β v rozmezí 90° a méně než 180° nástrojem s pozitivním i negativním úhlem čela vzniká tříska smykem vyvolaným tlakem na vlákna téměř kolmo k jejich podélné ose a interlaminárním smykem, který zapříčiní posunutí vrstev laminátu na rozhraní vlákna a matrice. Stlačením vláken jsou vytvářeny trhliny pod rovinou řezu.

Velikost třísky souvisí s velikostí smykového napětí mezi jednotlivými vrstvami materiálu. V prvním případě – viz Obrázek 7 c) by měla být tříška kontinuální, ve druhém případě - viz Obrázek 7 d) pak diskontinuální. Povrch obrobené plochy je velmi nepravidelný. Z povrchu vyčnívají vlákna o rozdílné délce. Je tomu tak proto, že k odlomení vláken dochází v různých místech jejich délky. Na Obrázku 8 je možné vidět povrch obrobené plochy při $\beta = 90^\circ$.



Obrázek 7: Porovnání mechanismu vzniku třísky u materiálu s orientací vláken $\theta = 45^\circ$ při (a) pozitivním úhlu čela, (b) při negativním úhlu čela [3]



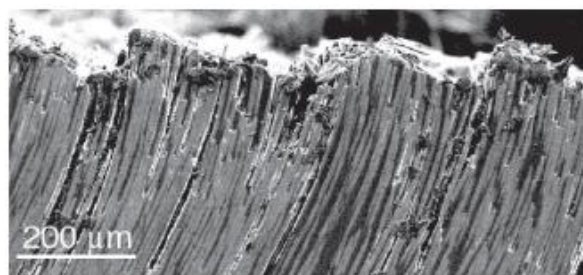
Obrázek 8: Mikrostruktura povrchu vzorku z CFRP $\theta = 90^\circ$ po frézování nástrojem s úhlem čela 20° , při hloubce řezu 0.1 mm za úhlu $\beta = 90^\circ$ [3]

Při obrábění pod úhlem β v rozmezí $30-75^\circ$ dochází k deformaci vláken vedoucí k delaminaci, smyku podél rozhraní vlákno – matrice. Je zde patrná velmi rozsáhlá elastická deformace vzniklá ohnutím vláken řeznou hranou. Ta má pak za následek kontakt s hřbetem nástroje a jeho následné poškození. Povrch obrobené plochy při zmiňované orientaci vláken je možné vidět na Obrázku 9. Na Obrázku 10 je pak schematicky znázorněný průběh odběru třísky.

Při nesousledném frézování rozhoduje o kvalitě povrchu natočení vláken ve vrstvě, do které nástroj vstupuje. U sousledného frézování je rozhodující orientace vláken ve vrstvě, ze které fréza vystupuje.



Obrázek 10: Mechanismus vzniku třísky při $\theta = 135^\circ$ a $\beta = 45^\circ$ [3]



Obrázek 9: Mikrostruktura vzorku z CFRP $\theta=135^\circ$ obráběného nástrojem s úhlem čela 20° , při hloubce řezu 0.1 mm za úhlu $\beta = 45^\circ$ [3]

2.3.2.1 Doporučení k volbě úhlu natočení vláken vůči směru řezání pro frézování FRP kompozitu s termosetickou matricí

Doporučený úhel pro frézování FRP materiálů s termosetickou matricí je $\beta = 0^\circ$. Mezi úhlem $\beta = 135^\circ$ - 150° dochází ke kombinaci ohybo - tlakového napětí, které produkuje nejvyšší síly a nejnižší kvalitu povrchu. Zvýšením úhlu β se poté kvalita opět zlepší. [1]

2.3.2.2 Doporučení k volbě úhlu natočení vláken vůči směru řezání pro frézování FRP kompozitu s termoplastickou matricí

Materiály s termoplastickou matricí vykazují poněkud odlišné chování při frézování. Zkoušky prováděné na jednosměrných kompozitních laminátech s různými typy vláken ukazují, že nejlepším úhlem pro obrábění je úhel $\beta = 90^\circ$. Při obrábění pod úhlem $\beta = 0^\circ$ dochází k vytrhávání jednotlivých vláken z matrice. Při obrábění pod $\beta = 90^\circ$ vykazuje matrice plastickou zdeformovanost rozkládající se po celé ploše řezu. Jednotlivé hrany vláken jsou pak těžko rozeznatelné. Částečně natavená – změkčená matrice je pak charakteristická pro obrábění FRP kompozitů s termoplastickou matricí. [1]

2.3.3 Materiály nástrojů pro frézování FRP kompozitů

Některé materiály vláken mají tvrdost obráběcího nástroje a k jejich obrábění nedochází plastickou deformací, ale křehkým lomem.

Materiál ostří tak musí být velmi odolný. Dále musí vykazovat velmi dobrou tepelnou vodivost, díky nízké tepelné vodivosti matric. Nejdůležitější vlastnosti materiálu nástroje jsou tedy odolnost proti opotřebení a velmi dobrá tepelná vodivost. [1]

2.3.3.1 Slinuté karbidy

Osvědčily se břity z jemnozrnných karbidů třídy K 10 - slinuté karbidy wolframové, vhodné pro obrábění tvrdých, křehkých materiálů. Velmi často se povlakuji - TiN, TiCN, TiWN a CrCN kvůli snížení opotřebení. Povlak snižuje koeficient tření mezi nástrojem a materiálem, dobrá odolnost proti oděru pak zajistí větší životnost nástroje. Slinuté karbidy mají velmi omezenou životnost oproti PKD, ale jsou mnohem levnější. Tvrdost materiálu je zajištěna tvrdými karbidickými částicemi a potřebná houževnatost je pak dána většinou kobaltovým pojivem. Na frézy je většinou používáno povlakování metodou PVD, které probíhá za nižších teplot, vykazuje jemnější strukturu, vyšší tuhost a menší poškození karbidového substrátu. [3], [1]

2.3.3.2 Polykrystalický diamant – monokrystal, destičky, povlaky

Břítové destičky z PKD vykazují nejlepší vlastnosti z hlediska tepelné vodivosti, pevnosti a tvrdosti pro frézování FRP. Při obrábění FRP mají velkou odolnost proti opotřebení a velmi vysokou tepelnou vodivost; nicméně jsou velmi drahé. Nástroje z PKD jsou více náchylné k rozpouštění pojivé fáze kobaltu, než k samotnému opotřebení třením mezi nástrojem a obrobkem. U nástrojů z PKD je doporučena velikost zrna 10 μm z důvodu vysoké odolnosti proti abrazi. Nástroje s hrubším zrnem a s větším zaoblením řezné hrany obecně vytváří horší povrch.

Povlaky jsou nejčastěji aplikovány ve velikosti od několika mikronů do 25 μm , při obrábění FRP kompozitů se však nejčastěji používá vrstva povlaku o tloušťce od 7 μm do 10 μm . Silnější vrstva více zaobljuje řeznou hranu a ta je pak méně ostrá. Síla vrstvy se volí dle obráběného materiálu. U povlakovaných nástrojů vyvstává problém s menší adhezí k substrátu. Tento problém je ještě umocněn požadavkem na velmi ostrou řeznou hranu. K porušení povlaku dochází delaminací. Vypozorovalo se, že se řezná hrana z PKD již po několika odfrézovaných metrech zaobljuje. Je to dáno odlupováním diamantového filmu vlivem rázů v začátku obrábění. Po chvíli se tento jev stabilizuje a výsledkem je mnohem vyšší životnost, než mají nástroje ze slinutých karbidů.

Monokrystal diamantu se příliš nepoužívá z cenových a technologických důvodů. Nelze ho lehce tvarovat do požadovaného tvaru. I když svými vlastnostmi – tvrdostí, velmi dobrou tepelnou vodivostí a malým koeficientem tření splňuje požadavky k obrábění FRP. [3]
[1]

2.3.3.3 Ostatní

2.3.3.3.1 Keramické materiály

Keramické materiály jsou zcela nevhodné díky vysoké křehkosti, citlivosti na rázy a nízké tepelné vodivosti, která znemožňuje dostatečný odvod tepla při obrábění FRP. [1]

2.3.3.3.2 Kubický nitrid bóru

Kubický nitrid bóru je cenou velmi blízký PKD, ale díky své horší odolnosti proti opotřebení a velmi malé houževnatosti nemá příliš velké uplatnění. [1]

2.3.3.3.3 Nástrojové oceli

Nástroje z tohoto materiálu se nepoužívají díky tomu, že si nedokáží uchovat tvrdost i za vysoké teploty. Tvrdost je nejdůležitější vlastností používaných materiálů vzhledem k extrémnímu abrazivnímu účinku vláken při obrábění FRP kompozitu. [1] [3]

2.3.3.4 Porovnání řezných materiálů z hlediska mechanických vlastností

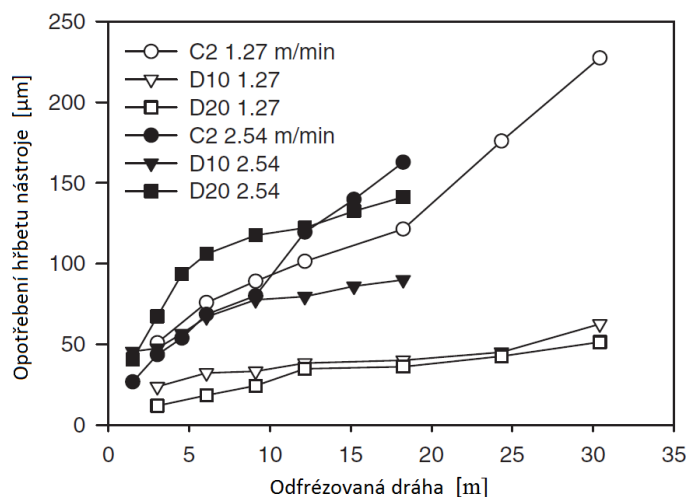
Materiál	Pevnost v ohybu [MPa]	S_c [MPa]	Tvrdost HV30	α [$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	K [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$]
Al_2O_3	550	3000	1600	8,2	10,5
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$	800	4500	2200	8,0	16,7
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$	700	-	2230	8,5	10,5
SiAlON	800	3500	1870	3,2	20-25
WC-Co (6% Co)	1900	5380	1600	4,3-5,6	80
PKBN	700-1200	3500	-	3,2-4,2	110-200
PKD	860-1950	7700	-	1,5-3,8	543
CVD diamantový povlak	1300	9000	-	3,84	500-2200
Monokrystal diamantu	1350	6900	-	0,8-4,8	600-2100

Tabulka 5: Porovnání řezných materiálů z hlediska pevnosti v ohybu (TRS), pevnosti v tlaku (S_c), tvrdosti, tepelné roztažnosti α a tepelné vodivosti K [3]

2.3.3.5 Porovnání povlakovaných a nepovlakovaných nástrojů pro frézování

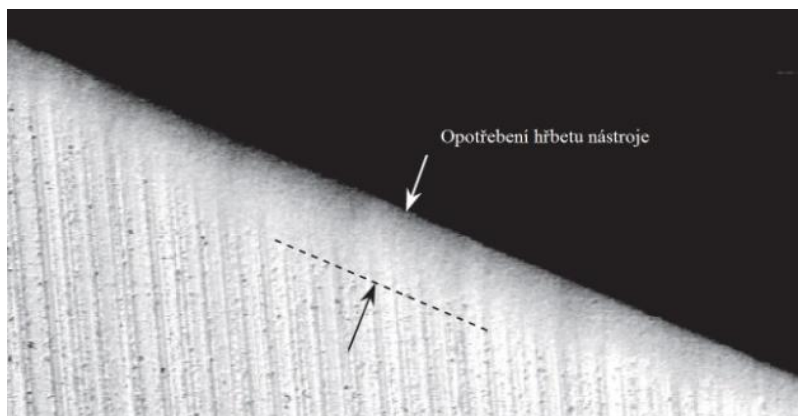
Na Grafu 2 je možné vidět porovnání opotřebení povlakovaného (PKD) a nepovlakovaného nástroje. Experiment byl prováděn za dvou posuvů a to za $v_f = 1,27$ m/min a $v_f = 2,54$ m/min nástrojem, kterým byla dokončovací fréza se čtyřmi šroubovitými drážkami o stoupání šroubovice 30° . Úhel čela byl 15° a úhel břitu 65° . C2 označuje nepovlakovaný nástroj ze slinutých karbidů o průměru 7,9 mm; D10 a D20 pak nástroj s diamantovým povlakem (PKD - CVD) o tloušťce 10 a 20 μm .

Z Grafu 2 je patrné, že po odfrézování 31m při nižší hodnotě posuvu je opotřebení C2 3,5 krát větší než u D10 a přibližně 4 násobně větší než u D20. Větší opotřebení u D10 oproti D20 je způsobené dřívějším otěrem slabší vrstvy povlaku. Účinnost povlaků je tedy velmi výrazná, jejich odolnost je velmi příznivá při frézování CFRP.

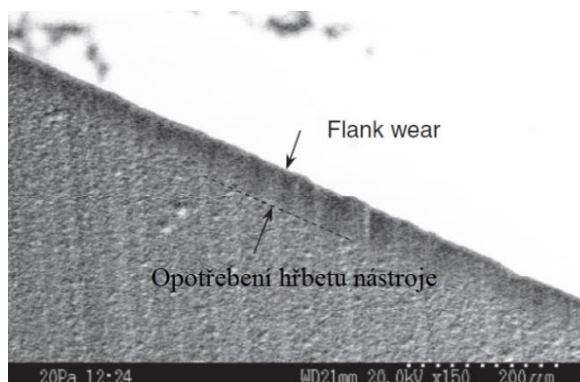


Graf 2: Závislost opotřebení hřbetu nástroje na odfrézované dráze – otáčky 2500 ot/min, hloubka řezu 1 mm [3]

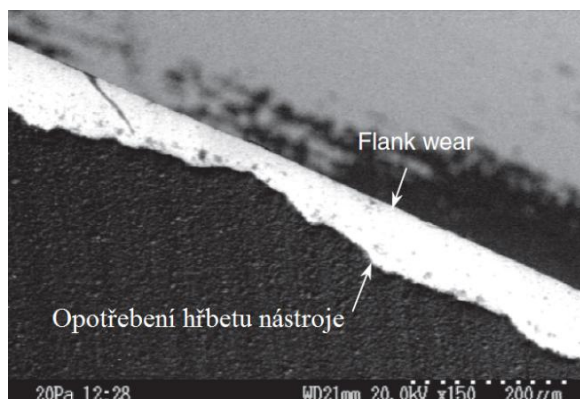
Na následujících obrázcích je možné vidět porovnání opotřebení jednotlivých nástrojů z daných materiálů. Nepovlakovaný C2 na Obrázku 11 vykazuje velmi velké zaoblení řezné hrany vlivem abrazivního účinku vláken na nástroj. Na Obrázcích 12 a 13 je možné vidět opotřebení D10 vlivem delaminace slabé vrstvy povlaku, následné zaoblení řezné hrany substrátu a odření řezné hrany D20. Z uvedených důvodů je tedy zřejmé, že je vhodné používat diamantové povlaky za menšího posuvu v řádech stovek mm/min. Vzniká při něm menší tříska a nevznikají zde tak velké rázy, které mají za následek odlupování povlaku.



Obrázek 11: Opotřebení C2 [3]

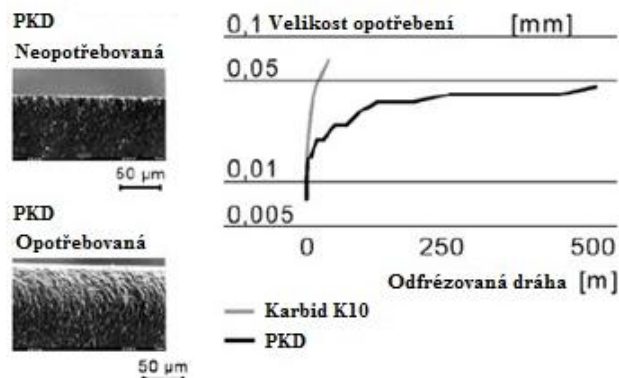


Obrázek 12: Opotřebení D20 [3]



Obrázek 13: Opotřebení D10 [3]

Na Grafu 3 je vidět porovnání opotřebení u nástrojů s břitem z PKD a karbidu K10.



Graf 3: Porovnání opotřebení u nástrojů z PKD a z karbidu K10 + snímek opotřebované a neopotřebované řezné hrany PKD [1]

Nástroj z PKD je několikrát dražší než nástroj ze slinutého karbidu. Výdrž nástroje z PKD je ale o mnoho větší. Při obrábění GFRP nástroj z PKD obrobil do zničení 1900 m řeznou rychlostí 800 m/min a nástroj stejných parametrů, ze slinutého karbidu pak 100 m při řezné rychlosti 400 m/min. Volba materiálu nástroje tedy záleží na četnosti a náročnosti obrábění. [1]

Opotřebení nástrojů je mnohem vyšší při frézování FRP kompozitu s termoplastickou maticí než při frézování FRP kompozitu s maticí termosetickou. Proto je lepší používat nástroje z PKD. Dále je také velmi důležitá jemnost zrna mající vliv na pevnost materiálu. Je doporučeno spíše jemné zrno v řádech μm . [1]

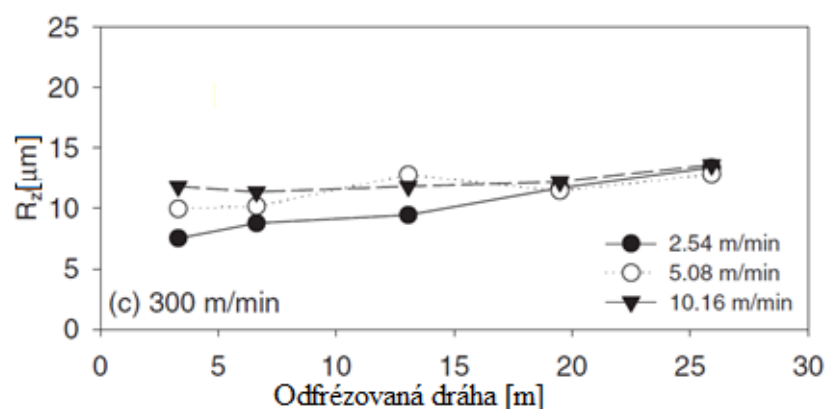
2.3.4 Typy nástrojů

Nejčastěji se používají nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami, monolitní nástroje ze SK s různými povlaky a tzv. Burr nástroje (viz Obrázek 14 – e, f).

Protože obrábění FRP kompozitů vyžaduje vysokou řeznou rychlost, musí být nástroje dokonale vyvážené. Používají se jak frézy s přímými zuby (viz Obrázek 14 a)), tak se zuby do šroubovice (viz Obrázek 14 b), c), d)). Počet zubů není nijak omezen.

Pro CFRP kompozity jsou doporučovány nástroje se zuby do šroubovice. Experiment dokázal, že nástrojem se zuby do šroubovice byl vytvořen lepší povrch než s nástrojem s rovnými zuby. V [6] obrobil nástroj se dvěma břity do šroubovice CFRP kompozit s menším delaminačním faktorem, než nástroj s šesti přímými zuby. Nástroje s přímými zuby se rychleji ucpou (díky horšímu odvodu třísek z místa řezu). To má za následek stlačení povrchu a zhoršení jeho jakosti. Nástroje se zuby do šroubovice ale generují axiální sílu, která může zavinit delaminaci vrstvy, která není ze strany, proti které působí zmiňovaná síla podepřená. Tento nepříjemný jev byl vyřešen použitím zubů do protiběžných šroubovic.

Opotřebení nástroje má také vliv na kvalitu obrobenej plochy. Dobře je tento jev vidět v Grafu 4. Je zde závislost drsnosti R_z na odfrézované dráze, při řezné rychlosti 300 m/min a různých rychlostech posuvu. Experiment byl prováděn nástrojem Burr o průměru 6,35 mm s hloubkou řezu 1,6 mm.



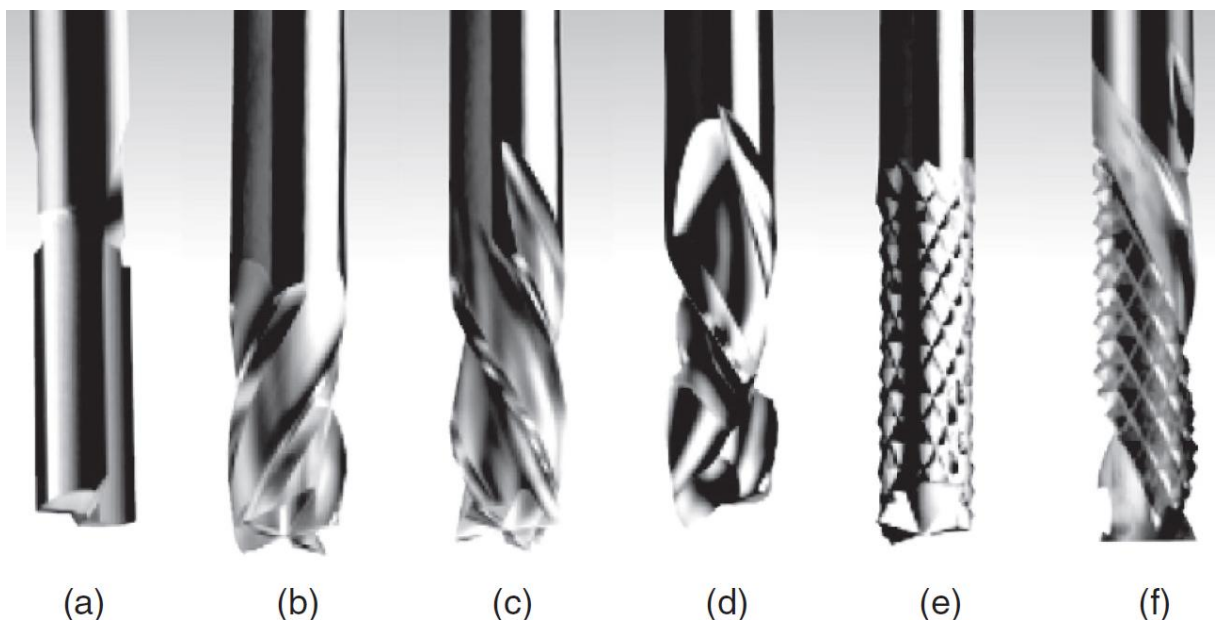
Graf 4: Závislost drsnosti povrchu na opotřebení nástroje daným odfrézovanou drahou [m] [3]

Velmi oblíbené jsou tedy i tzv. Burr nástroje používané nejčastěji pro hrubovací operace. Skládají se z těla, na kterém se pomocí pravých a levých šroubovic vytanou kosočtvercové břity, které vlákno za tahu usmýknou. Břity se navzájem překrývají, díky čemuž nástroj nevytváří drážky v obrobené ploše. Zavádí se zde takzvaná ekvivalentní tloušťka třísky, která je dána jako násobek hloubky řezu s podílem mezi posuvovou rychlostí a řeznou rychlostí.

$$h_q = a_c \frac{v_f}{v_c} \quad (2)$$

Se zvětšující se h_q se zvětšuje poškození břitů Burr nástroje. Což souvisí se zvýšením posuvové rychlosti či snížením řezné rychlosti (dojde k většímu odběru materiálu jedním břitem). Je pak třeba větší síla na odebrání třísky. Ta pak zapříčiní větší opotřebení nástroje, respektive břitu. [3] Burr nástroje jsou již několik let používány pro frézování GFRP kompozitů, díky jejich vysoké odolnosti a schopnosti vytvořit čistý řez při vysoké řezné rychlosti a relativně vysoké rychlosti posuvu.

Aramidová vlákna ve FRP kompozitech musí být řezána za současného předpětí. Vlákna jsou tedy vystavována ohybu před řeznou hranou za současného předpětí, k tomu se používá nástroj typu Burr. Stejně jako u ostatních FRP kompozitů s odolnými vlákny je také vyžadován malý rádius zaoblení řezné hrany a vysoká ostrost břitu pro kvalitní obrobení. [1]



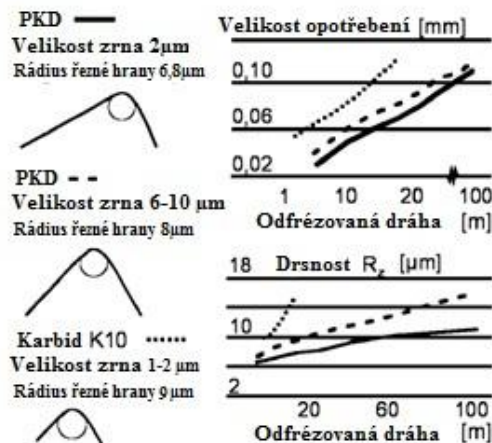
Obrázek 14: a) stopková fréza s přímými zuby; b),c) stopková fréza se zuby do šroubovice; d) stopková fréza s protiběžnými šroubovicemi; e),f) Burr frézy [3]

2.3.5 Geometrie břitu

Geometrie břitu je volena dle druhu obráběného materiálu. Pro frézování CFRP kompozitů je doporučeno volit úhel čela v rozmezí od 0-7°. Úhel břitu pak 75°. Zvětšením úhlu čela a snížením hloubky řezu dochází ke zmenšení deformace materiálu při tvorbě třísky. [1]

Větší úhel čela má také za následek menší řezné síly při obrábění a menší rozmazávání matrice po povrchu. Celkově je tedy doporučeno volit větší kladný úhel čela pro lepší jakost povrchu. Hřbet nástroje je o obráběný FRP kompozit, díky elastické deformaci, odírán. Proto je také doporučeno volit větší úhel hřbetu pro mírné zlepšení jakosti povrchu.

U nástrojů určených k obrábění FRP kompozitů má vliv na jakost povrchu a odolnost břitu kromě nástrojových úhlů také rádius řezné hrany. Ten by měl být co nejmenší v poměru k hloubce řezu. Při frézování FRP kompozitů se obráběná oblast dělí na stlačovanou a na oblast, kde skutečně dochází k úběru materiálu. Byly provedeny experimenty, které zjistily, že při obrábění pod úhlem $\beta = 150^\circ$ nástrojem se zaoblením řezné hrany $r_e = 50 \mu\text{m}$ došlo v hloubce řezu $100 \mu\text{m}$ k téměř čistému stlačení materiálu a k žádnému odběru třísky. Břit by tedy měl mít co nejmenší rádius řezné hrany $r_e = 6-8 \mu\text{m}$ (záleží na nabroušení) a velmi kvalitní povrch - $R_a < 1,5 \mu\text{m}$. Na Grafu 5 je možné vidět závislost velikosti R_z na velikosti rádia řezné hrany. [1] [3]



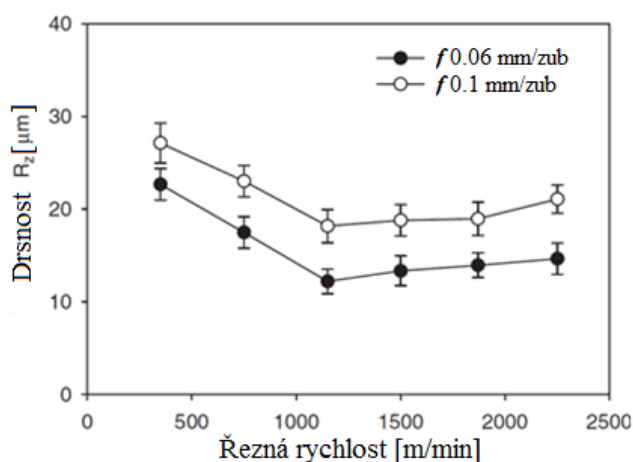
Graf 5: Závislost velikosti opotřebení a drsnosti na odfrézované dráze, velikosti zaoblení řezné hrany a jakosti zrna PKD [1]

2.3.6 Řezné podmínky

Různé druhy polymerů vykazují přechod od tvárného do křehkého lomu vlivem rozdílné rychlosti deformace. Tím je pak ovlivněna kvalita obrobenej plochy. Řezné podmínky je tedy nutné volit dle stavby a složení obráběného materiálu.

Ve většině případů se používá vysoká řezná rychlost a dále menší posuv na zub. Zvyšování rychlosti posuvu má za následek velmi velké tepelné namáhání a zhoršení jakosti obrobenej plochy. [3] Vyšší řezná rychlost má za následek to, že materiál selhává pod menším napětím a křehkým lomem. Na druhou stranu se díky zvýšení řezné rychlosti zvýší i teplota. V důsledku nehomogenity a anizotropie materiálu vznikají při obrábění FRP kompozitů dynamické síly, které musí být zachyceny nástrojem a upnutím. Další vliv vyvolávající podobné aspekty jako rychlost posuvu, je hloubka řezu. Ta by měla být poměrně malá s přihlédnutím k velikosti zaoblení řezné hrany. [6] [3]

Závislost drsnosti R_z na řezné rychlosti nemá přesně definovatelný charakter. Na Grafu 6 je možné vidět tuto závislost, vytvořenou dle výsledků experimentu. Nástrojem byla dvouzubá fréza z PKD, o průměru 8 mm a úhlem čela -2° a úhlem hřbetu 7° . Drsnost obrobenej plochy se snižuje se zvyšující se řeznou rychlostí až do 1130 m/min. Další zvýšení řezné rychlosti má za následek mírné zvýšení drsnosti obrobenej plochy.



Graf 6: Závislost drsnosti na řezné rychlosti [3]

Dále je také definována tzv. kritická řezná rychlost. Je to hodnota řezné rychlosti (vztažená k určité hodnotě posuvu a hloubce řezu) při které vzniká teplo, které již může poškodit matici. Je tedy třeba volit řeznou rychlost pod touto hodnotou. Uhlík/PEEK kompozit má nízkou teplotu skelného přechodu. Tudíž má velmi nízkou kritickou řeznou rychlost kolem 75 m/min. [3]

V experimentu [7] byly pro 16 - ti vrstvý, 4 mm tlustý laminát z CFRP, s termosetickou maticí (55 % C vláken), s orientací vláken $0/90^\circ$ (viz Obrázek 16) obráběny dvoubřitou frézou z K10 (viz Obrázek 15) s dvojí šroubovitou drážkou, zvoleny řezné podmínky vypsány v Tabulce 6.

Řezná rychlost: $v_c = 38$ m/min
Posuv $v_f = 200$ mm/min
Hloubka řezu $a_p = 2$ mm

Tabulka 6: Řezné podmínky v experimentu [7]

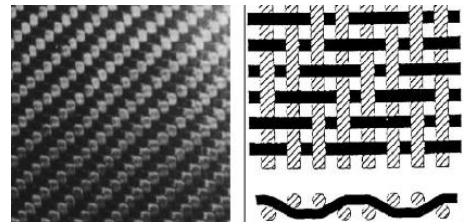
Nástroj měl tyto parametry:

Průměr $d = 6$ mm
Úhel čela $\gamma = 10^\circ 30'$
Úhel hřbetu $\alpha = 9^\circ$
Úhel stoupání šroubovice $\xi = 30^\circ$
Výška šroubovice $\pi = 10$ mm

Tabulka 7: Parametry nástroje použitého v experimentu [7]



Obrázek 15: Stopková fréza v experimentu [7]

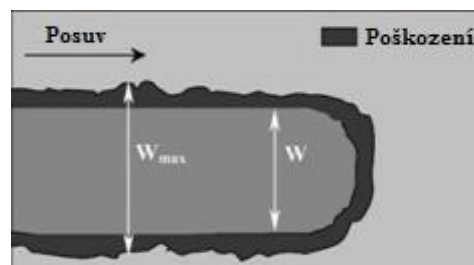


Obrázek 16: Obráběný materiál v exp. [7]

Při obrábění tohoto materiálu bylo dosaženo delaminačního faktoru $D_f = 1,007$ (výpočet viz kapitola 2.3.7) a průměrné drsnosti R_a z pěti měření $R_a = 1,55$ μm . Dosažená jakost napovídá, že při zvolení správného nástroje a řezných podmínek je možno dosáhnout dobré kvality opracování. Pro zvolení správných řezných podmínek, materiálu a typu nástroje, je tedy důležité přesně identifikovat obráběný materiál, nároky na obroběný povrch a možnosti dostupných strojů.

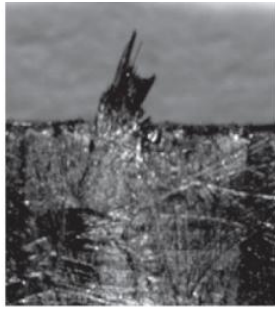
2.3.7 Delaminační faktor, vlivy na velikost delaminace

Při obrábění chceme dosáhnout určité přesnosti a drsnosti. U kompozitů však uvažujeme ještě delaminační faktor. Ten je dán jako podíl velikosti největší deformace kolmo na směr posuvu a průměru nástroje. V podstatě nám říká, jak moc je materiál vytrháván z míst, která by měla být čistě obrobena.

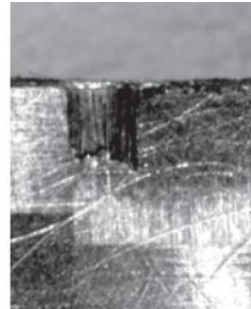


Obrázek 17: Delaminační faktor [7]

Z Obrázku 17 je patrné že $D_f = \frac{W_{max}}{W}$. [7] Kvalita obrábění se tedy posuzuje dle celistvosti a jakosti povrchu, která zahrnuje tepelné a mechanické poškození povrchu, jako je poškození delaminací. K delaminaci dochází při frézování FRP kompozitů standardně, ale ve větší míře při použití nástrojů se zuby do šroubovice. Na dalších obrázcích je možné vidět tři druhy delaminace.



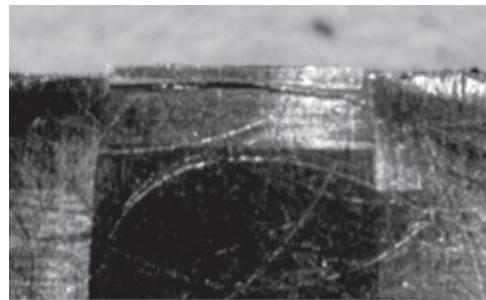
Obrázek 19: Delaminace typ II [3]



Obrázek 18: Delaminace typ I [3]



Obrázek 21: Delaminace typ I/II [3]

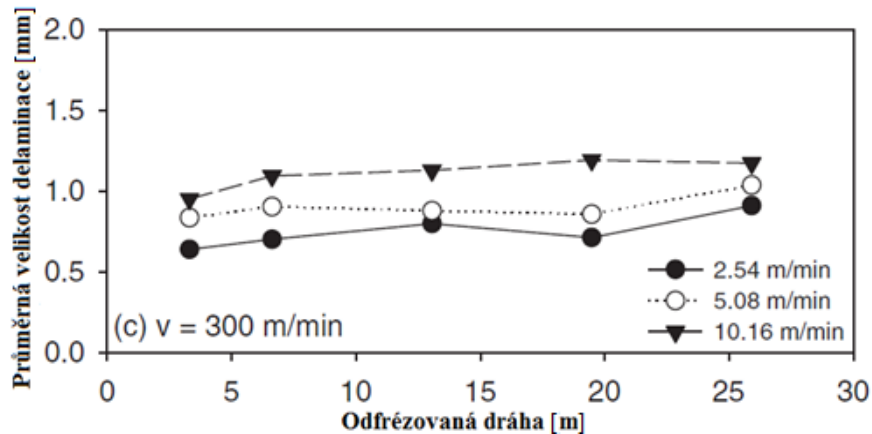


Obrázek 20: Delaminace typ III [3]

U typu I dochází v delaminační zóně k odlomení vláken a jejich odstranění z obrobku do určité hloubky. Typ II je charakteristický neodříznutými vlákny vyčnívajícími ven z obrobku. K tomuto typu delaminace dochází tím, že se vlákna mohou ohnout, a tím se vyhnou postupujícímu nástroji. Poté odpruží zpět do své původní polohy (dle jejich původní orientace). Typ I/II je určitou kombinací mezi delaminací typu I a II. Typ III je charakteristický částečně odtrženými vlákny od povrchu. Povrch je pak roztržený. [3] Typ a velikost delaminace závisí také na orientaci vláken v krajních vrstvách. Tuto závislost je vhodné zkoumat pro využití poznatků při návrhu obrobku pro snížení delaminace na únosnou mez. Protože se axiální síla, kterou vytvářejí nástroje se zuby do šroubovice, mění i úhlem stoupání šroubovice, je nutné přihlídnout k druhu nástroje, kterým se bude obrábět. [3]

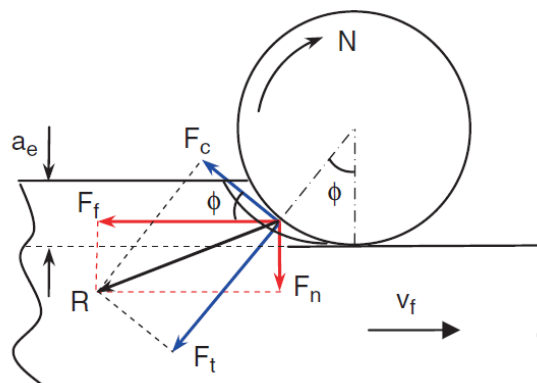
Na velikost delaminace má vliv i opotřebení nástroje. Tento jev je možné popsat závislostí velikosti delaminace na odfrézované dráze (viz Graf 6).

Nástrojem byla opět Burr fréza o průměru 6,35 mm, při hloubce řezu 1,6 mm. Jak je vidět, posuv nástroje má také velmi významný vliv na velikost delaminace. Nástroj s přímými zuby tak může při nevhodně zvolených řezných podmínkách vytvořit povrch s vyšším delaminačním faktorem než nástroj se zuby do šroubovice. [3]



Graf 7: Závislost velikosti delaminace na odfrézované dráze [3]

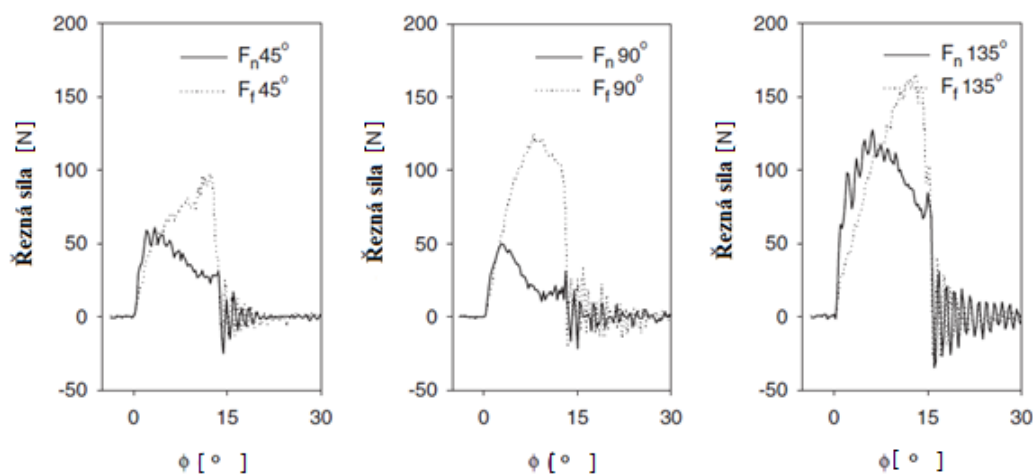
2.3.8 Řezné síly



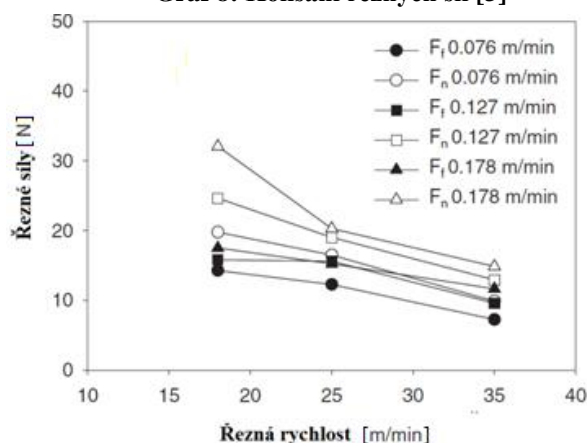
Obrázek 22: Řezné síly při nesousledném frézování

Při obrábění FRP kompozitů řezné síly silně kolísají. Stupeň kolísání je primárně závislý na orientaci vláken a tloušťce třísky. Oba zmíněné faktory se mění s úhlem natočení frézy. Jak se nástroj otáčí, je vystavován cyklicky se opakujícím proměnným silám. Tento jev je dobře vidět v následujících grafech (viz Graf 8). Byly testovány jednosměrné lamináty s úhlem $\theta = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$. Jako nástroj byla použita jednozubá fréza s přímou drážkou. Kolísání vzniká tím, jak se jednotlivé vrstvy materiálu odlupují a dochází k různému mechanickému namáhání vlivem měnící se orientace vláken vůči směru řezání (změna mechanismu vzniku třísky). Horizontální osa reprezentuje úhel natočení frézy od svislice. Je dána rozmezím od 0 do 30° . Je to tak proto, že zub frézy zabíral pouze v tomto rozmezí.

Velikost sil F_n a F_f se snižuje se zvýšením řezné rychlosti a snížením posuvu. Tento jev byl ověřen experimentem, provedeným povlakovanou (TiN) koncovou frézou se čtyřmi zuby do šroubovice (úhel stoupání 30°) o průměru $d = 11,11$ mm, při frézování kompozitu uhlík/epoxidová pryskyřice s objemovým podílem vláken 63%. Hloubka řezu byla 4 mm. Orientace vláken ve vrstvách $\theta = [90, (+45/-45)_3, (-35/+45)_3, 90]$. Při obrábění frézou se zuby do šroubovice vzniká axiální síla kolmá na rovinu tvořenou silami F_f a F_n . Tato síla je jen zlomkem síly F_f . Tato síla vykazuje podobné chování jako F_f a F_n . Při zmiňovaném experimentu se testovala i závislost řezných sil na řezné rychlosti. Tato závislost je vidět na Grafu 9. [3]



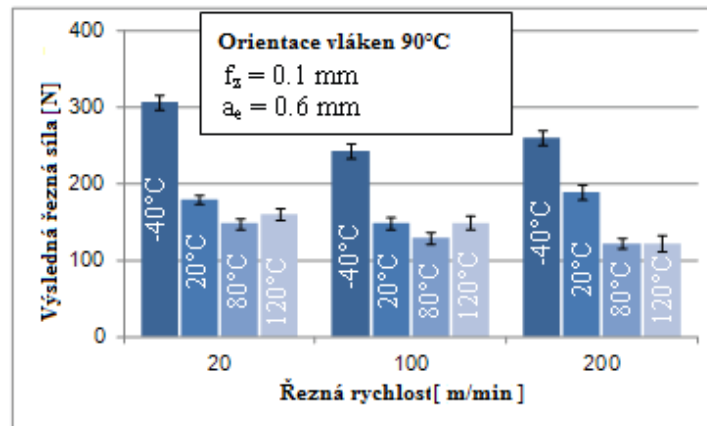
Graf 8: Kolísání řezných sil [3]



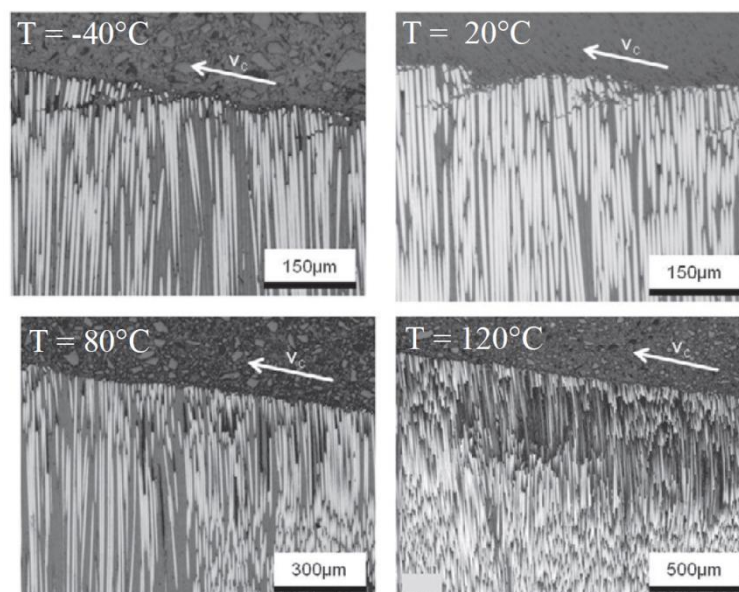
Graf 9: Závislost řezných sil na řezné rychlosti a rychlosti posuvu [3]

Řezné síly závisí také na teplotě obrobku. V Grafu 10 je možné vidět závislost velikosti řezných sil na jeho teplotě a velikosti řezné rychlosti. Nástrojem byla kotoučová fréza s břitovými destičkami (úhel čela -12° , úhel hřbetu 7° , rádius řezné hrany $35 \mu\text{m}$) ze slinutých karbidů o průměru 160 mm. Obrobek byl frézován nesousledně.

Posuv na zub byl zvolen $f_z = 0,1$ mm a hloubka řezu 0,6 mm. Obrobkem byl jednosměrný laminát CFRP o $\theta = 90^\circ$ s objemovým podílem vláken 50 %. Chlazení probíhalo pomocí oxidu uhličitého, který byl dopravován pomocí trysky do místa řezu. Ohřev probíhal pomocí aplikace proudu horkého vzduchu. K měření teploty byly použity dva termočlánky Ni-Cr/Ni typu K. Rozložení teplot bylo -40°C , 20°C , 80°C , 120°C . [7]



Graf 10: Závislost výsledné řezné síly na teplotě a řezné rychlosti [7]



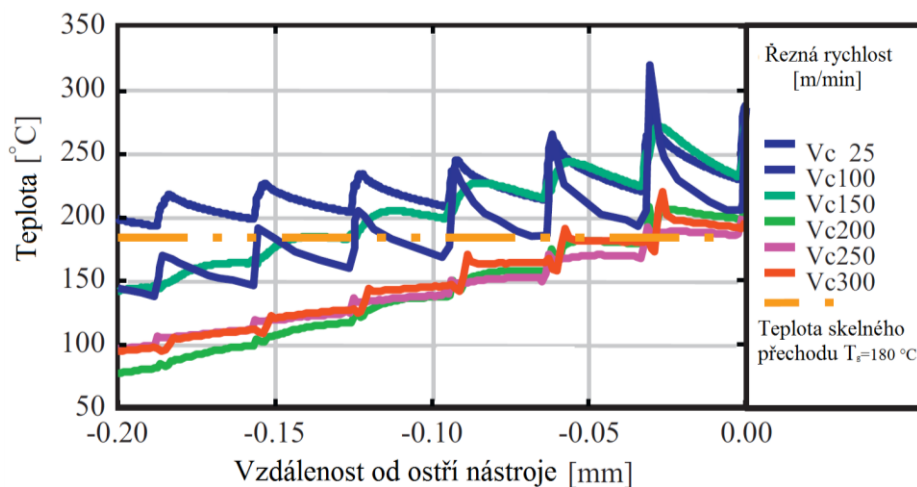
Obrázek 23: Mikrostruktura vzorku CFRP - závislost na teplotě, řezná rychlost 100 m/min [7]

Na Obrázku 23 je možné vidět mikrostrukturu povrchu, frézovaného zmíněným způsobem. Mezi teplotami -40°C a 20°C je možné pozorovat trhliny skloněné přibližně o úhel 18° a velikosti do $200\ \mu\text{m}$. Pro vyšší teploty obrobku mezi 80°C a 120°C dochází ke ztrátě křehkosti matrice. Povrch se zdá být hladký a pravidelný, bez viditelných trhlin. Při bližším zkoumání je ale možné zjistit, že jsou vlákna polámana do hloubky až $500\ \mu\text{m}$ díky

tomu, že je matrice tepelně degradována a již vlákna nedokáže udržet na svém místě. Toto poškození má za následek zvýšení delaminace a snížení pevnosti obrobku. [7]

2.3.9 Teplo vzniklé při frézování

Při obrábění FRP kompozitů vyvstává problém s odvodem tepla. Je tomu tak díky nízké tepelné vodivosti polymerních matic. Při obrábění polymerů vzniká teplo smykem v oblasti PPD, dále v oblasti SPD třením třísky o čelo nástroje a oblasti TPD třením obrobenej plochy o břit nástroje vlivem elastické deformace. Ve srovnání s obráběním kovů, kde je vzniklé teplo až ze 70 % odváděno třískou (vysoké řezné rychlosti), je teplo při obrábění polymerů odvedeno až z 90 % třískou díky tomu, že teplo téměř neprojde k nástroji. Tento fakt má za následek to, že matrice z termosetického materiálu může díky lokálnímu ohřevu začít hořet, termoplastická se pak může nalepovat na již obrobenej povrch. [3] Uhlíková vlákna jsou schopná odvádět teplo ve směru jejich os lépe než vlákna aramidová a skelná. To vede k lepšímu odvodu tepla z místa řezu. Nicméně při spojení s polymerní maticí má výsledný CFRP kompozit velmi nízkou tepelnou vodivost. Je třeba sledovat hodnotu teploty skelného přechodu matrice a teplotu těsně před ostřím nástroje. Teplota se se zvyšující vzdáleností od ostří velmi dramaticky snižuje díky nízké vodivosti matrice. Při překročení teploty T_g dojde k nevratné ztrátě pevnosti matrice a ke zhoršení kvality obrobenej plochy. V následujícím Grafu 11 je možné vidět závislost teploty na vzdálenosti od ostří nástroje. Chlazení je problematické díky nasákavosti matrice. Olejové emulze se z těchto materiálů těžko odstraňují. Rozdílné koeficienty teplotní roztažnosti mohou vést k pnutí materiálu, které může vést k poškození obrobku. [3], [9]



Graf 11: Závislost teploty vzorku na vzdálenosti od oblasti primární plastické deformace [9]

2.4 Shrnutí

Ve srovnání s frézováním kovů jsou při opracovávání FRP kompozitů několikanásobně menší úběry materiálu. Nejvýznamnější vliv na výslednou jakost povrchu frézované plochy má natočení vláken vůči směru řezání. Tento úhel se ale při frézování díky rotaci nástroje mění. Proto je důležité přesně identifikovat obráběný materiál. Vzhledem k požadavkům na materiály nástrojů určených k frézování FRP je možné použít jemnozrnné slinuté karbidy, polykrystalický diamant a povlaky pro snížení koeficientu tření a zvýšení odolnosti proti opotřebení. Je doporučeno volit kladný úhel čela nástroje, větší úhel hřbetu kvůli odpružení materiálu do hřbetu a co nejmenší rádius řezné hrany kvůli zvyšující se elastické deformaci s jeho rostoucí hodnotou. Dále pak vyšší řeznou rychlost a nižší rychlost posuvu. S rostoucí rychlostí posuvu roste i síla v jeho směru. Tato síla pak zapříčiní zvýšení teplot při řezání a velmi velké tepelné namáhání nástroje i obrobku. Také je třeba volit řeznou rychlost pod její kritickou hodnotu. Obrábění nadkritickou řeznou rychlostí vede k nenávratnému poškození matrice. Hodnoty kritických řezných rychlostí pro dané materiály ale nejsou příliš dostupné.

3 Návrh vhodné metodiky obrábění

3.1 Experiment

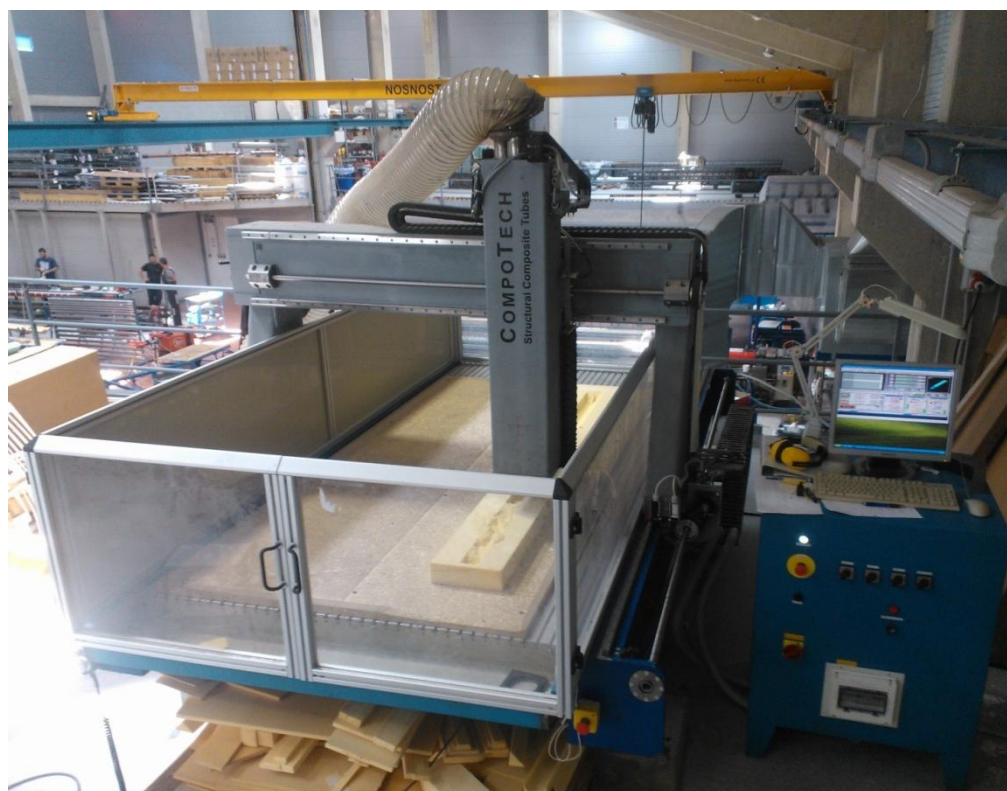
Ve firmě CompoTech byl proveden experiment v podobě frézování vzorku vnitřního nosníku - trubky 104/90 mm z CFRP kompozitu vyráběného metodou navíjení. Cílem bylo zjištění vhodných řezných podmínek, které zajistí nejmenší delaminaci vláken.

3.1.1 Použitý stroj

Strojem byla CNC frézka kompletně postavena ve firmě CompoTech (viz Obrázek 25). Vřeteno bylo vyrobeno firmou Kress - FME 1050-1 - 1050W (viz Obrázek 24). Zásadní pro volbu vřetena byl rozsah otáček. Toto vřeteno má rozsah 5 000 – 25 000 ot/min.



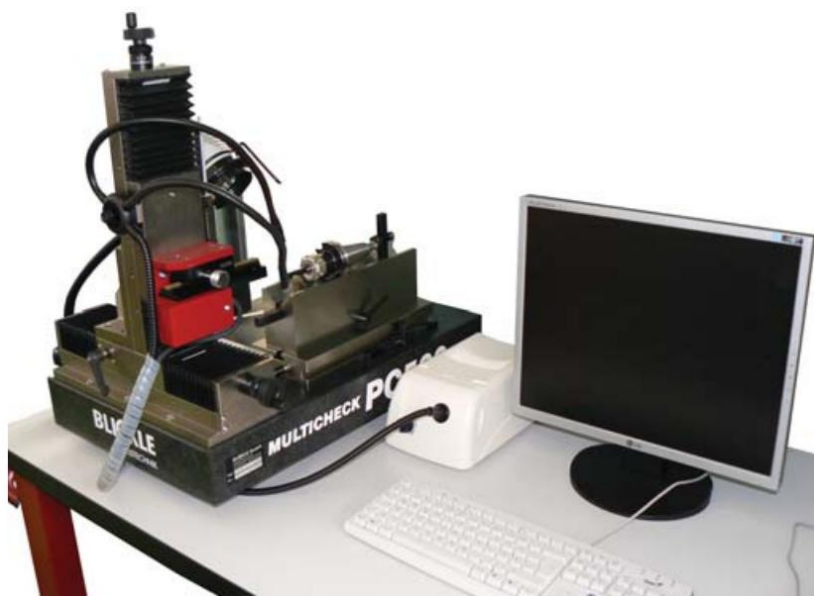
Obrázek 24: Kress FME 1050-1 [11]



Obrázek 25: Frézka CNC - CompoTech

3.1.2 Měřicí technika

K měření byl použit optický mikroskop Multicheck PC 500 pro měření opotřebení řezných nástrojů (viz Obrázek 26).



Obrázek 26: Mikroskop Multicheck PC 500

3.1.3 Materiál

Jak již bylo řečeno, materiálem byl kompozit s uhlíkovými vlákny, přesněji HSC, UHM a matricí z epoxidové pryskyřice. Orientace vláken se v průřezu trubky měnila. V rozmezí průměrů byla konstantní orientace vláken. Tento jev popisuje Tabulka 8.

Průměr [mm]	Vlákno	Úhel [°] (+/-)	Tloušťka [mm]
90 - 91,18	HSC	45,3	0,59
91,18 - 95,34	UHM	0,0	2,08
95,34 - 96,6	HSC	37,1	0,63
96,6 - 101,32	HSC	0,0	2,36
101,32 – 102,54	HSC	38,8	0,61
102,54 - 104	HSC	39,1	0,58

Tabulka 8: Orientace vláken v jednotlivých vrstvách trubky

3.1.4 Nástroje

Na experimenty byly použity tyto nástroje:

Dokončovací fréza Hufschmied HC 650 o průměru 8 mm se zuby do šroubovice ze slinutých karbidů (povlakovaná vrstvou TLX) (viz Obrázek 27). Výrobce neudává informace ohledně geometrie nástroje.

Dále dokončovací fréza typu Burr - Hufschmied WD 108 o průměru 8 mm ze slinutých karbidů (nepovlakovaná) (viz Obrázek 28).



Obrázek 27: WD 108

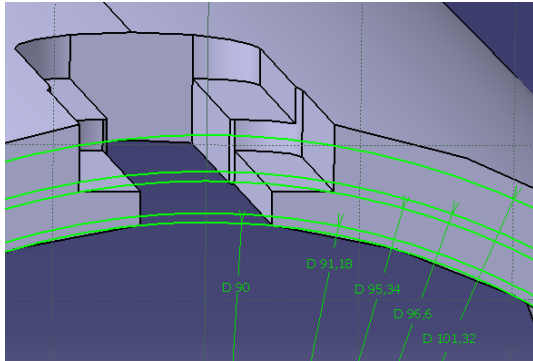


Obrázek 28: HC 650

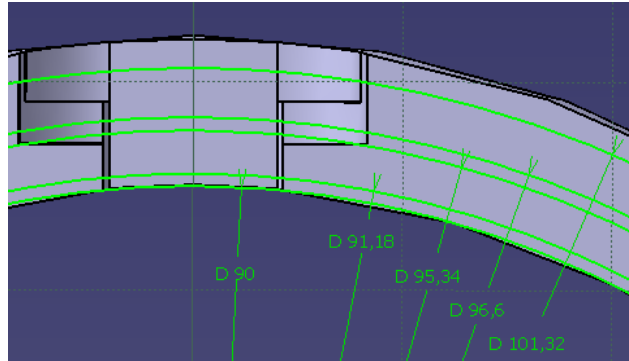
3.1.5 Postup frézování

Obrobek byl upnut ve strojním svěráku. Nejprve se vyrobila průchozí drážka nástrojem Hufschmied WD 108 postupně po hloubce řezu 2,5 mm a délce 50 mm. Poté se na obou stranách drážky vytvořily schůdky o hloubce 3 mm a šířce 4 mm. Do poloviny délky schůdků se pak provedl úběr dokončovací frézou Hufschmied HC 650 o hloubce řezu 2 mm a šířce 4,3 mm. Na těchto dvou schůdkách se pak sledoval vliv změny způsobu frézování ze sousledného na nesousledné (poté co byl rozřezán na jednotlivé díly).

Výsledný tvar obrobené plochy je možné vidět na Obrázku 29 a 30 včetně vyznačení změn orientace vláken v průřezu pomocí kót v důležitých přechodových místech.



Obrázek 29: Tvar obrobené plochy s vyznačenou změnou orientace vláken I

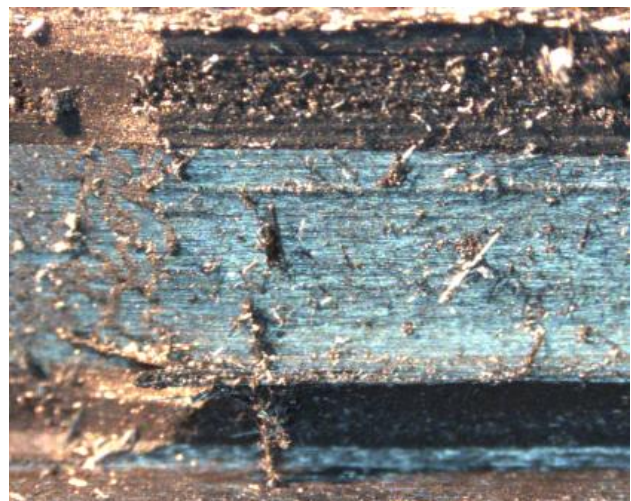


Obrázek 30: Tvar obrobené plochy s vyznačenou změnou orientace vláken II

Na Obrázku 31 je možné vidět drážku těsně po obrobení frézou Hufschmied WD 108. Povrch je z části pokryt třískami, které se následně odstranily, nicméně některé z nich nebylo možné odstranit stejným způsobem a třísky zůstaly vtlačené do obrobené plochy (viz Obrázek 32). Za vysokého posuvu se některé zubové mezery nástroje ucply a následně byly třísky zatlačeny zpět do obrobené plochy. Tento jev byl nejvíce patrný při obrábění frézou WD 108. Světlá plocha na Obrázku 32 jsou ořezaná vlákna v orientaci 0°. Delaminace viditelná na pravé straně dolní hrany drážky u Obrázku 31 je způsobena nesprávným nastavením polohy nástroje, nikoli nesprávnými řeznými podmínkami. Tato delaminace se po korekci programu stroje dále nevyskytovala.



Obrázek 31: Pohled na obrobený vzorek



Obrázek 32: Třísky v obrobeném povrchu

3.1.6 Řezné podmínky

Pro porovnání bylo použito sousledné i nesousledné frézování při různých hodnotách posuvu.

Varianta	C	D	E	F	G	H
WD 108 Posuv [mm/min]	600	500	700	400	300	200
HC 650 Posuv [mm/min]	400	350	300	250	200	150
Otáčky [1/min]	20 000					
Hloubka řezu WD 108 [mm]	3	Šířka řezu WD 108 [mm]		4		
Hloubka řezu HC 650 [mm]	2	Šířka řezu HC 650 [mm]		4,3		

Tabulka 9: Řezné podmínky frézování

3.1.7 Výsledky experimentu

Zkoumal se povrch obrobené plochy se zaměřením na delaminaci – vytrhaná vlákna. Dále se sledovala matrice, její deformovanost po průchodu nástroje. Fréza HC 650 vytvářela obecně mnohem lepší povrch než fréza WD 108. Jak při sousledném, tak i nesousledném frézování. Pro příklad je možné použít variantu G a E se střední hodnotou posuvu (300 mm/min) pro obě frézy. Na Obrázcích 34 a 33 je dno drážky.



Obrázek 34: Nesousledně WD 108



Obrázek 33: Nesousledně HC 650

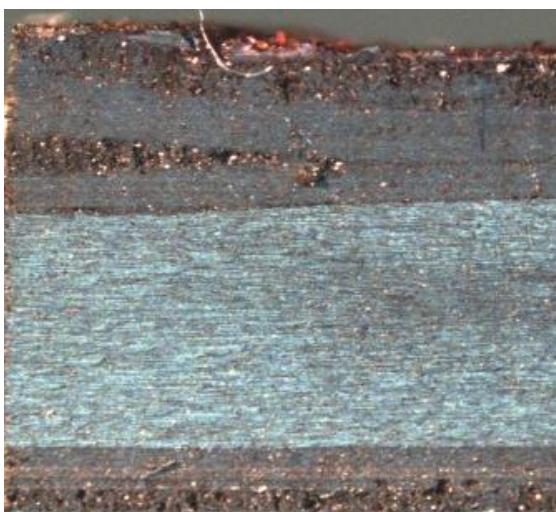
Z Obrázku 33 a 34 je možné vyhodnotit, že plocha frézovaná frézou HC 650 je o mnoho kvalitnější než plocha obrobená frézou WD 108. Na Obrázku 34 WD 108 je možné pozorovat, jak jsou některá vlákna oříznuta a jiná jsou dále kryta matricí (nebyla díky elastické deformaci oddělena). Fréza HC 650 sice obráběla jiná vlákna (UHM) než fréza WD 108 (HSC), nicméně na kvalitu obrobené plochy by měla vliv rozdílná matrice, která drží vlákna na svém místě, ta je ale ve všech vrstvách stejná.

Rozdíl mezi sousledným a nesousledným frézováním není příliš znatelný. Rozdíl by se dal pozorovat na hodnotách drsnosti, nicméně tento vzorek nebyl vhodný k tomuto měření. Nebylo možné s jistotou zaručit, že by se hrot drsnoměru pohyboval po vrstvě se sledovanou orientací vláken díky malému rozměru vrstev a díky jejich drobnému zvlnění pozorovatelném na Obrázku 35.

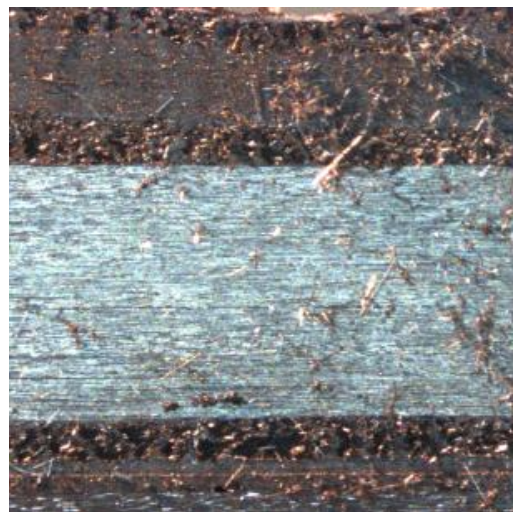


Obrázek 35: Zvlněné vrstvy různých orientací vláken pozorovaných v obrobené ploše

Významným přínosem tohoto experimentu by mělo být určení vhodných řezných podmínek vzhledem ke kvalitě obrobené plochy. Na Obrázku 37 je možné vidět povrch obrobené plochy frézované nesousledně frézou HC 650 při podmínkách varianty G. Tento povrch je poměrně čistý, bez výrazné delaminace. Oproti tomu povrch při sousledném frézování s řeznými podmínkami varianty D vykazuje poměrně velkou delaminaci s viditelnými vytrhanými neodříznutými vlákny (viz Obrázek 36). Pro frézu HC 650 je tedy nejvýhodnější volit posuv dle varianty G.



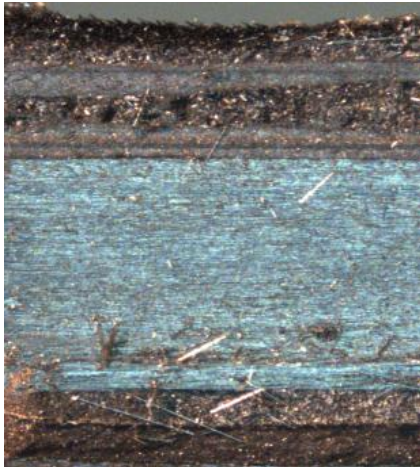
Obrázek 37: Varianta G nesousledně HC 650



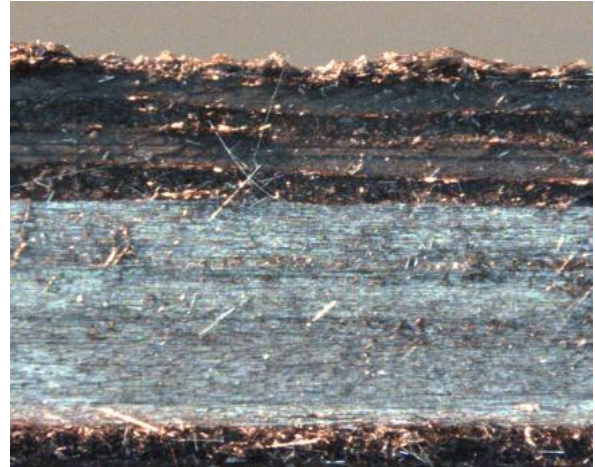
Obrázek 36: Varianta D sousledně HC 650

Pro nástroj WD 108 je pak rozdíl posuvů také velmi významný. Na Obrázku 39 je povrch obrobené plochy frézované nesousledně dle varianty H. Ze všech variant, byl tento povrch nejčistší, bez výrazného vytrhávání vláken. Oproti tomu při variantě F (Obrázek 38) je povrch delaminován i ve vyšších vrstvách s rozdílnou orientací vláken.

Je to zřejmě vyšší rychlostí posuvu. Při vyšších hodnotách posuvu variant F, D a C není již příliš rozpoznatelný rozdíl v kvalitě obrobené plochy. Je vždy delaminována a na některých místech jsou patrná již zmiňovaná znovu do povrchu zatlačená vlákna. Pro frézu WD 108 tedy vyplývá doporučení v podobě volby nejnižší hodnoty posuvu dle varianty H nesousledně.



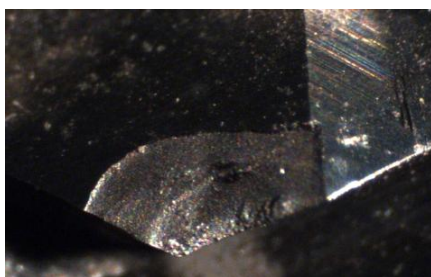
Obrázek 39: H N WD 108



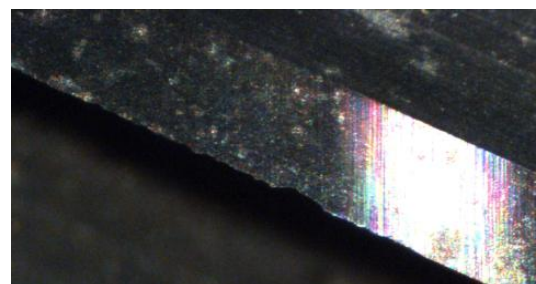
Obrázek 38: F S WD 108

3.1.8 Opotřebení nástrojů

Vlivem abrazivního účinku vláken na břit nástroje dochází k jeho vysokému opotřebení. Nejvyšší opotřebení je možné pozorovat u nepovlakované frézy WD 108. Některé zuby jsou vylámané po odfrézování cca 2 m při úběru 3 mm a proměnných řezných podmínkách. Je to zřejmě způsobeno poměrně vysokými hodnotami posuvů. U nástroje WD 108 by se jistě vyplatil povlak, který je použit u nástroje HC 650. Tento nástroj nebyl tak extrémně poničen abrazivním účinkem vláken. U frézy WD 108 je velikost opotřebení v podobě vylomení řezné části v rozmezí od 17 μm do 627 μm . Na Obr. 41 je možné vidět vylomení břitu frézy WD 108. U frézy HC 650 bylo opotřebení v hodnotách od 10 μm do 35 μm . Nejvyšší hodnota opotřebení břitu byla naměřena dle snímku na Obrázku 40.



Obrázek 40: Břit WD 108 zvětšení 7x



Obrázek 41: Břit HC 650 zvětšení 7x

4 Závěr

Tato práce je zaměřena na problematiku frézování kompozitních materiálů. Podává přehled dostupných informací o této problematice z hlediska nejvýznamnějších faktorů majících vliv na kvalitu obrobené plochy, použitelných řezných podmínek, nástrojů a materiálů, ze kterých mohou být vyrobeny.

První část této práce se zaměřuje na shrnutí dostupných informací ohledně zmiňované problematiky. Práce v této části pojednává o materiálech používaných na výrobu matric a výztuží. Zahrnuto je i porovnání jednotlivých materiálů z hledisek, která jsou zásadní pro výrobu a obrábění kompozitních materiálů. Dále je zde popis vlivu natočení vláken vůči směru obrábění na kvalitu obrobené plochy, včetně popisu mechanismu vzniku třísky. Práce se v této části dále zaměřuje na použitelné řezné materiály, na jejich vlastnosti a porovnání z hlediska odolnosti proti opotřebení.

V navazující kapitole je popsán přehled nástrojů určených pro frézování kompozitních materiálů. Je zde popsán i vliv geometrie nástroje na kvalitu obrobené plochy; dále také vliv řezných podmínek. Na tuto část navazuje kapitola pojednávající o řezných silách, jejich závislostech na řezných podmínkách, natočení vláken vůči směru řezání a teplotě. Dále je zde popsán proces vzniku delaminace, včetně jejích druhů.

Druhá část této bakalářské práce je zaměřena na ověřování zjištěných informací v praxi. Je zde uveden popis experimentu, při kterém se frézovala trubka z CFRP kompozitu. Dále pak vyhodnocení experimentu v podobě popisu povrchu obrobené plochy zkoumaného na optickém mikroskopu MultiCheck 500. V poslední kapitole experimentu je i vyhodnocení opotřebení dvou testovaných nástrojů.

Frézování a obrábění kompozitních materiálů obecně je poměrně složitá problematika. Díky vzrůstající poptávce po výrobcích z těchto materiálů se dá předpokládat další vývoj v oblasti jejich obrábění.

ZDROJE

- [1] R. TETI, *Machining of Composite Materials*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 51, Issue 2, 2002, Pages 611-634, ISSN 0007-8506, [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61703-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61703-X). [Citace: 20.listopadu 2012.]
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785060761703X>)
Keywords: Machining; Composite Materials; Conventional Cutting Processes
- [2] Ing. MILAN VNOUČEK, Ph.D. Ateam. *Kompozitní materiály*. [Online]
http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf. [Citace: 25. duben 2013]
- [3] SHEIKH-AHMAD, JAMAL Y. *Machining of Polymer Composites*. The Petroleum Institute, Department of Mechanical Engineering Abu Dhabi, United Arab Emirates : Springer Science + Business Media, LLC, 2009. ISBN: 0387355391, 9780387355399
- [4] KNOB ANTONÍN. *Bakalářská práce - vláknové výztuže pro polymerní kompozity*. Brno : Vysoké učení technické, 2010. dostupné z:
https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/7255/BP_Anton%C3%ADn_Knob.pdf?sequence=1 [Citace: 6. prosince 2012]
- [5] KENNEDY, BILL. *Super tools. CUTTING TOOL ENGINEERING plus*. [Online] 6 2006. [Citace: 25. květen 2013.] http://www.ctemag.com/aa_pages/2010/100601_SuperTools.html.
- [6] YIGIT KARPAT, ONUR BAHTIYVAR, BURAK DEGER, *Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 56, May 2012, Pages 79-93, ISSN 0890-6955, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.01.001>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695512000028>)
Keywords: Carbon fiber reinforced polymers; Milling; Polycrystalline diamond; Variable helix tool geometry [Citace: 3. května 2013.]
- [7] OLIVER PECAT, RUDINGER RENTSCH, EKKARD BRINKSMEIER, *Influence of Milling Process Parameters on the Surface Integrity of CFRP*, Procedia CIRP, Volume 1, 2012, Pages 466-470, ISSN 2212-8271, <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.083>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827112000844>)
Keywords: Machining; milling; CFRP; surface integrity [Citace: 20. května 2013.]
- [8] J.PAULO DAVIM, PEDRO REIS, *Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 160, Issue 2, 20 March 2005, Pages 160-167, ISSN 0924-0136, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.06.003>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604008453>)
Keywords: Milling; Carbon fiber-reinforced plastics (CFRPs); Dimensional precision; Taguchi's method; Orthogonal arrays; Analysis of variance (ANOVA) [Citace: 15. května 2013.]
- [9] TAKESHI YASHIRO, TAKAYUKI OGAWA, HIROYUKI SSAHARA, *Temperature measurement of cutting tool and machined surface layer in milling of CFRP*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 70, April 2013, Pages 63-69, ISSN 0890-6955, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.03.009>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695513000503>)
Keywords: CRFP; Cutting; Milling; Thermocouple; Temperature; Cutting point [Citace: 5.červen 2013.]
- [10] Ing. PETR BORO VAN, Technicky Tydenik, *TECH TÝDENÍK PRŮMYSLOVÝ PORTÁL*. [Online] 28. 6 2011. [Citace: 13.duben 2013.] dostupné z:
http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serial/rezne-nastrojerezne-nastroje-7_8519.html.
- [11] CNCSHOP.cz. *CNC & automatizace* dostupné z: <http://www.cncshop.cz/kress-fme1050-1-vysokootackova-frezka-1050w> [Citace: 14. květen 2013.]

