

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Výroba otvorů při obrábění kompozitních materiálů

Autor: **Roman Zacharenko**
Vedoucí práce: **Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**

Akademický rok 2013/2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Roman ZACHARENKO**
Osobní číslo: **S13B0503P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Název tématu: **Výroba otvorů při obrábění kompozitních materiálů**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování:

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: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Datum zadání bakalářské práce: **7. října 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. června 2014**


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




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

V Plzni dne 7. listopadu 2013

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 práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoli nakládání s nimi, možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za odbornou pomoc při řešení experimentální části, za cenné připomínky a podněty poskytnuté během vypracovávání zvoleného tématu. Dále bych rád poděkoval firmě CompoTech Plus spol. s.r.o. v Sušici za umožnění měření a poskytnutí mnoha cenných rad speciálně Ladislavu Smitkovi.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení ZACHARENKO	Jméno Roman	
STUDIJNÍ OBOR	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	Výroba otvorů při obrábění kompozitního materiálu		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2014
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	51	TEXTOVÁ ČÁST	51	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS	<p>Hlavní náplní této práce je zhodnocení současného stavu ve výrobě otvorů FRP kompozitů.</p> <p>Současný stav je popsán z hlediska obrobiteľnosti a kvality povrchu vzhledem k použití vhodného nástroje. Detailněji jsou popsány dvě metody výroby otvorů a to vrtání a frézování. Byly popsány hlavní faktory ovlivňující kvalitu povrchu při obrábění otvorů.</p> <p>V experimentální části jsou zkoumány a porovnány kvality povrchu otvorů, obráběny frézováním při různých posuvových rychlostech.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	Kompozit, FRP, výztuž, matrice, obrobiteľnost, delaminace, řezné podmínky, kvalita povrchu

SUMMARY OF BACHELOR WORK

AUTHOR	Surname ZACHARENKO	Name Roman
FIELD OF STUDY	Department of Machining Technology	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. ZETEK, Ph.D.	Name Miroslav
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR
TITLE OF THE WORK	Delete when not applicable	
	Holes production when machining composite materials	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2014
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	51	TEXT PART	51	GRAPHICAL PART	0
BRIEF DESCRIPTION	<p>The aim of this thesis is to valorize evaluate options of holes production FRP composite materials.</p> <p>Current option is described in terms of machining and quality machined surface to using appropriate cutting tools. There are described two machining methods of holes production, drilling and milling. It was described the main factors affecting surface quality when machining holes.</p> <p>In experimental section was examined and compared quality surface of holes by milling when differents cutting speed.</p>				
KEY WORDS	Composite, FRP, fibre, matrix, machining, delamination, process parameters, surface quality				

Obsah

Seznam zkratk.....	10
1 Úvod.....	11
2 Rozbor současného stavu	12
2.1 Charakteristika obráběného materiálu[1,2,3,4,5].....	12
2.1.1 Matrice [1,3]	14
2.1.2 Výztuž [3,5].....	15
2.1.3 Zpracování matrice a výztuže.....	18
2.2 Obrábění FRP kompozitů – OBECNĚ [7,11,12,13].....	19
2.2.1 Tvorba třísky při obrábění FRP [11]	20
2.2.2 Ortogonální obrábění [7]	20
2.2.3 Klasifikace nástrojových materiálů pro obrábění FRP [7,13]	22
2.2.4 Požadavky na stroj [11,13]	23
2.3 Vrtání[7,10,11].....	23
2.3.1 Vliv orientace vláken na proces vrtání	24
2.3.2 Řezné síly při vrtání.....	25
2.3.3 Teplota řezání při vrtání.....	27
2.3.4 Kvalita obrobené plochy při vrtání	28
2.3.5 Delaminace	28
2.3.6 Volba nástroje	31
2.4 Frézování [7,11].....	33
2.4.1 Vliv orientace vlákna na proces frézování.....	33
2.4.2 Řezné síly při frézování	34
2.4.3 Teplota řezání při frézování.....	35
2.4.4 Kvalita obrobené plochy.....	35

2.4.5	Volba nástroje	36
3	Návrh vhodné metodiky obrábění	37
3.1	Experimentální část.....	37
3.1.1	Obráběný materiál	37
3.1.2	Nástroj.....	37
3.1.3	Obráběcí stroj.....	38
3.1.4	Postup při obrábění - volba řezných podmínek	39
3.1.5	Přeměření a porovnání hodnot vyfrézovaných děr	40
3.1.6	Vyhodnocení a porovnání kvality povrchu a delaminace.....	42
3.1.7	Shrnutí a vyhodnocení kvality povrchu	49
	Závěr	50
	Seznam použité literatury	51
	Seznam obrázků.....	52
	Seznam grafů	53
	Seznam tabulek.....	53

Seznam zkratek

FRP	-	vláknem vyztužený plast (fibre reinforced plastic)	
CFRP	-	uhlíkovým vláknem vyztužený plast (carbon fibre reinforced plastic)	
GFRP	-	skelným vláknem vyztužený plast (glass fibre reinforced plastic)	
RO	-	rychlořezná ocel	
PKD	-	polykrystalická diamant	
SK	-	slinutý karbid	
HSC	-	standardní uhlíkové vlákno (high strength carbon)	
UHM	-	vysoce modulové uhlíkové vlákno nad 500 GPa (ultra high modulus)	
Ψ	-	orientace navíjení vlákna	[°]
θ	-	úhel navíjení vlákna vůči směru posuvu obrobku	[°]
Φ	-	úhel kolmý na rovinu směru posuvu orientovanou ke špičce nástroje	[°]
d	-	průměr obrobené díry	[mm]
d_{max}	-	maximální průměr delaminace	[mm]
F_d	-	delaminační faktor	[-]
M	-	řezný moment při vrtání	[N.m]
F_c	-	síla působící na břit vrtáku	[N]
F_f	-	posuvová síla	[N]
F_n	-	normálová síla	[N]
v_f	-	posuvová rychlost	[m/min]
a_e	-	tloušťka obráběné plochy	[mm]
n	-	otáčky vřetena stroje	[1/s]
R_z	-	nerovnosti povrchu určené z 10 bodů	[μ m]

1 Úvod

Ve strojírenském průmyslu a nejen v něm se v poslední době začaly uplatňovat kompozitní materiály a to především pro jejich nízké měrné hmotnosti a vysoké pevnostní vlastnosti. Široká škála vlastností dvou a více fázové struktury kompozitů umožňuje velký výběr vlastností potřebné pro daný typ komponenty. Konstrukteři v různých odvětvích mají snahu nahrazovat stávající běžné materiály kompozity, které jsou využívány v podobě komponentů nejčastěji v leteckém, lodním a automobilovém průmyslu.

Tato práce se zabývá výrobou otvorů u FRP kompozitů. Obrábění tohoto druhu a obrábění všeobecně je v dnešní době stále málo prozkoumaná oblast. Ačkoliv se na první pohled zdají jako ideální materiály z hlediska použitelnosti, nastávají veliké komplikace při jejich výrobě, zvláště z hlediska obrobitelnosti spojené s kvalitou povrchu a rozměrové přesnosti, na kterou jsou v dnešní době kladeny vysoké nároky. Je třeba zhodnotit a přesně znát složení kompozitu, především orientaci navíjení a materiál vláken. Z těchto informací je třeba navrhnout procesní parametry a vhodný nástroj. Pro velké řezné rychlosti využívané při obrábění jsou kladeny vysoké nároky na stroje. Dále je třeba dbát na zdravotní stav a hygienu práce. Obrábění bez předepsaných pomůcek může způsobit velké zdravotní komplikace.

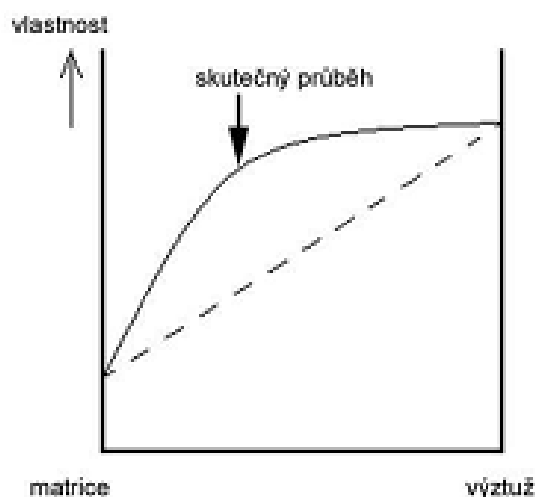
Cílem této práce je shromáždit co nejvíce důležitých informací o výrobě otvorů FRP kompozitů a na základě experimentu porovnat tyto informace s praxí a navrhnout vhodnou metodiku pro obrábění zadané oblasti.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Charakteristika obráběného materiálu[1,2,3,4,5]

Charakteristika kompozitního materiálu se udává jako složení dvou nebo více fází odlišných vlastností, jak mechanických, fyzikálních či chemických. Fáze jsou nehomogenní, ale je snaha, aby se dohromady jako technický materiál choval homogenně. Kompozit kvůli svému uspořádání je anizotropní a vyrábí se mechanickým mísením.

Pro kompozity je charakteristický synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou daleko lepší, než by odpovídalo pouhému sečtení vlastností jednotlivých složek. Synergismus je významný, protože vede k získávání materiálů úplně nových vlastností.

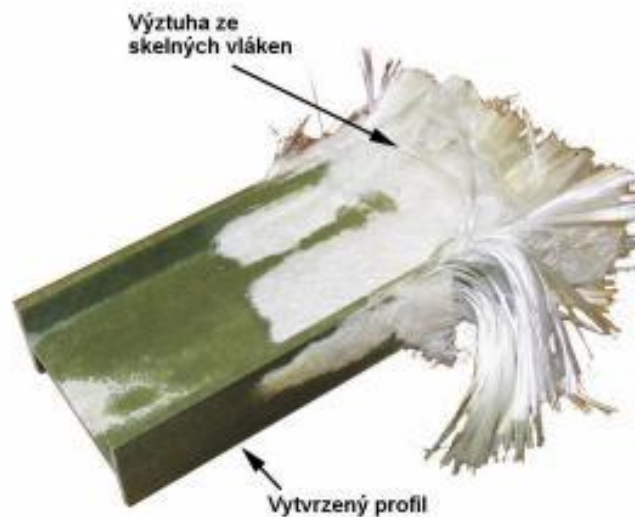


Obrázek 1: Synergické chování složek kompozitu [4]

Kompozity jsou rozděleny dle rozměrů výztuže na mikrokompozitní a makrokompozitní materiály. Pro strojírenství mají největší význam mikrokompozity, jejíž největší příčné rozměry výztuže jsou v rozmezí 10 až $10^2 \mu\text{m}$. Makrokompozity jsou využívány nejčastěji ve stavebním průmyslu ve formě železobetonů apod.

Dále jsou rozděleny na kompozity s dlouhým nebo krátkým vláknem. Hranice je určena podílem délky L a průměru vlákna D . Jestliže je $L/D > 100$, jedná se o kompozit s dlouhými vlákny. Je-li $L/D < 100$, je kompozit krátkovláknový.

Kompozit by měl obsahovat nejméně jednu spojitou fázi a nespojitou fázi. Spojitá fáze se nazývá matrice, která především udává tvar součásti. Má funkci pojiva, dále váže a chrání tuhou fázi kompozitu, která je nazývána výztuž.



Obrázek 2: Složení kompozitu

Tato práce se zabývá kompozity s polymerní matricí vyztuženou dlouhými vlákny. Z anglického názvu Fibre Reinforced Plastic (FRP) = plast vyztužený vláknem. Kvůli vysokým poměrům hodnot modulu pružnosti nebo pevnosti v tahu k hustotě, jsou FRP kompozity velmi vhodné pro použití v dopravě. Další předností těchto materiálů jsou nízká hmotnost, odolnost proti korozi, dobré dielektrické vlastnosti a nevodivost, nízké náklady na výrobu a dlouhá životnost. Využívají se především pro letecký, lodní a automobilový průmysl.

2.1.1 Matrice [1,3]

Úloha matrice je spojovat a přenášet vnější zatížení na výztuž, dále ji chránit před nečistoty a jinými vlivy okolí. Mezní poměrné prodloužení matrice při tahovém namáhání by měl být větší než mezní prodloužení vláken. To splňují pouze polymerní a kovové matrice. Ostatní matrice mají tento poměr menší například skelná, keramická nebo uhlíková.



Obrázek 3: Schematické rozdělení napětí v křivkách

2.1.1.1 Polymerní matrice[3,6]

Při výběru polymerní matrice se zohledňuje řada vlastností, jak z hlediska použití, tak z hlediska technologičnosti. Přehled vlastností je uveden níže v Tabulce 1

Užitné vlastnosti	Technologické vlastnosti
Pevnost	Viskozita pryskyřice
Modul pružnosti	Smáčivost vláken
Houževnatost	Doba želatinace
Prodloužení při přetržení	Skladovatelnost
Odolnost proti tečení	Reakční rychlost
Tepelná odolnost	Želatinace
Hořlavost	Obsah těkavých složek
Vlhkost prostředí	Smrštění při reakci
Odolnost proti UV záření	Citlivost na poměr složek
Chemická odolnost	Adheze k povrchu formy
Dielektrické vlastnosti	Vedlejší produkty k vytvrzování

Tabulka 1: Vlastnosti zohledňující výběr polymerní matrice[6]

Nejčastěji využívané matrice jsou reaktoplasty. Ekonomicky nejvhodnější jsou nenasyčené polyesterové pryskyřice (UP), jejichž viskozitu při výrobě kompozitu lze ovlivňovat pomocí reaktivního rozpouštědla, plnivy či ztužujícími přísadami. Dobu vytvrzování lze měnit v širokém rozmezí, krátké vytvrzovací doby jsou výhodou pro využití v hromadné výrobě.

Kratší dobu výroby mají jen termoplastické kompozity, protože zde není třeba vytvrzovat. Po vyjmutí z formy nebo po vytvarování kompozitní desky za tepla stačí matrici ochladit pod teplotu tvarové stálosti za tepla. Z ekonomického hlediska jsou nejlevnější na výrobu polypropylenové termoplastické matrice (PP).

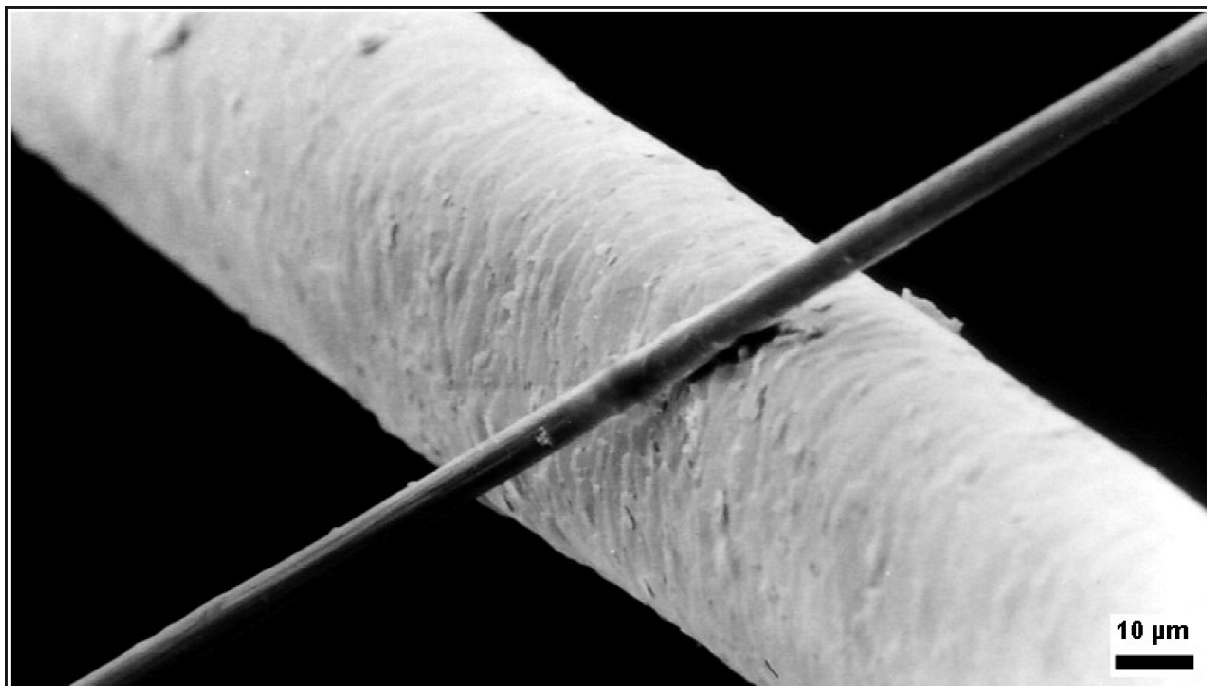
Další polymerní matrice se používají například epoxidové pryskyřice (EP), které mají nejlepší mechanické vlastnosti, tepelnou i chemickou odolnost. Fenolformaldehydové pryskyřice (FP) jsou nehořlavé a při ohni vykazují nízký vývin toxických zplodin a kouře, proto se využívají často v interiérech leteckého průmyslu a pozemní veřejné dopravě.

2.1.1.2 Kovová matrice

Je získávána postupy práškové metalurgie. Jako příklad je hliník vyztužený jemnými částicemi oxidu hliníku (Al_2O_3), karbidu křemíku (SiC) nebo zirkonia (Zr_2O). Matrice se používá v prostředí, kde je třeba vysoká tepelná odolnost například u součástí leteckých motorů.

2.1.2 Výztuž [3,5]

Výztuž neboli vlákna jsou vždy pevnější, než materiály v kompaktní podobě, z kterých vznikla, viz Tabulka 2. Pevnost vláken roste se snižujícím se průřezem, jelikož u malých průřezů vláken jsou defekty také malé. Většina vláken mají průměry v rozmezí od 5 do 20 μ m, což je mnohem menší průměr než lidský vlas, uvedeno na Obrázku 4. Menší vlákna se nevyrábějí, protože se špatně mísí s matricí.



Obrázek 4: Porovnání rozměru lidského vlasu s uhlíkovým vláknem[5]

Materiál	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu[MPa]
Skleněné vlákno typu E	73	2500
Sklovina E	73	100
Uhlíkové vlákno	230 až 950	2000 až 6000
Polykrystalický grafit	10	20
Keramické vlákno SiC	300	3000
SiC monolitický	410	500
Polyethylenové vlákno	90 až 170	3000
Lineární polyetylen	0,4	26

Tabulka 2: Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních materiálů[3]

Výztuž by měla tvořit minimálně 5% podílu hmotnosti celého kompozitu. Je to tvrdší složka a větší pevnost v tahu než matrice. Nejpoužívanější druhy výztuže ve strojírenství jsou skelné, uhlíkové, keramické, kovové a polymerní. Vlákná se dodávají natočená na cívce nebo ve formě textilií, viz Obrázek 5. Matrice s výztuží nelze mísit libovolně. Rozeznáváme vlákna pro polymerní matrici (uhlíková, skleněná, polymerní) nebo vlákna pro vysokoteplotní aplikace (uhlíková, keramická, kovová). Kupříkladu, polymerní matrici nelze výztužit keramickou či kovovou výztuží, protože vlákna by měli vyšší hustotu než matrice nebo z cenových důvodů.

2.1.2.1 Skelná vlákna

Jsou amorfní vlákna, u kterých jsou předpokládány podobné vlastnosti jak v podélném, tak příčném směru. Pevnost v tahu závisí na úpravě povrchu. Snižuje ji vzájemné sebepoškozování vláken. Tomu je možno zabránit ještě před svázáním do pramene nanášením povlaků. Jsou to tzv. lubrikace (mazivo, vosk). Bez nanesení povlaku se snižuje sebepoškozování pevnost až o 50%.



Obrázek 5: Skelné vlákno dodávané v textilní roli

2.1.2.2 Uhlíková vlákna

Vlákna jsou krystalická. Vlastnosti uhlíkových vláken závisí na směru jejich natočení, lze je tedy měnit v širokém rozmezí. Ve srovnání se skelnými vlákny jsou uhlíková vlákna křehčí a pro textilní zpracování, neboli pro uskladnění a namotání dlouhých uhlíkových vláken na cívku, jsou vyráběna vlákna s menšími průměry v rozmezí 6 až 8 μm . Vlákna jsou také chráněna proti sebepoškozování a pro lepší soudržnost s matricí. Jelikož vlákna jsou dobře elektricky vodivá, nejčastější povrchová úprava je použita elektrochemická úprava. Proti poškození při sdružování do pramene se uhlíková vlákna povlakuji speciální epoxidovou pryskyřicí, viz Obrázek 6.



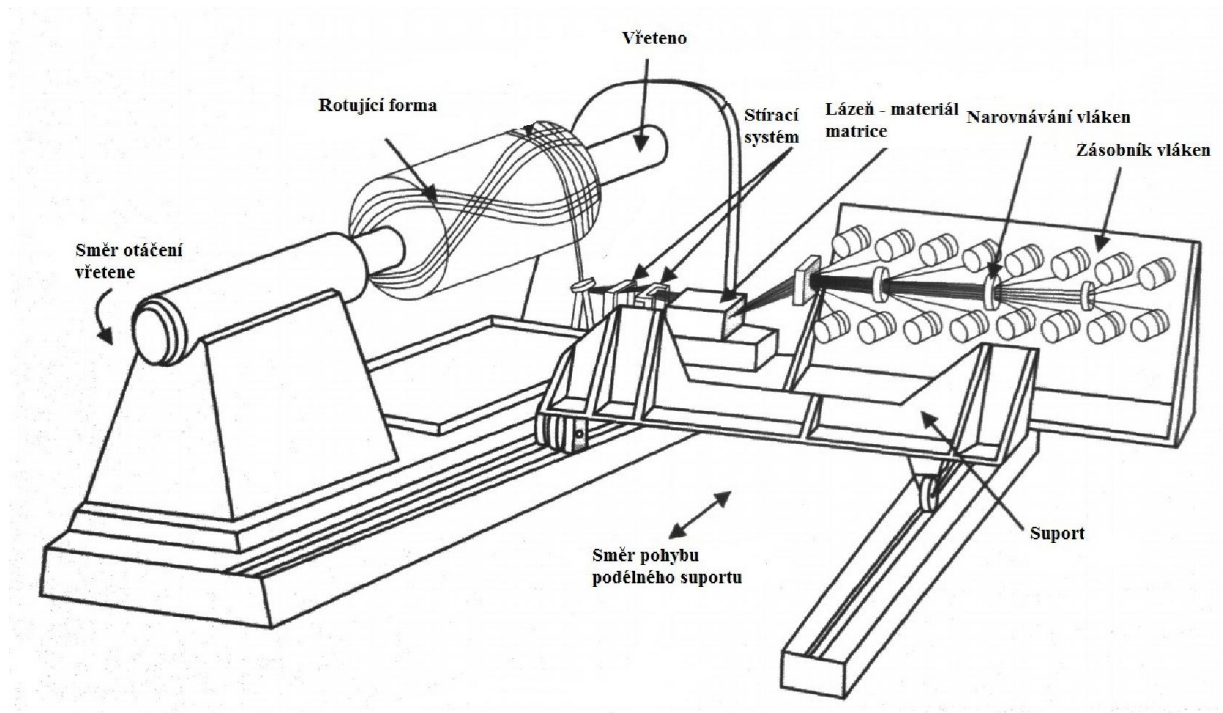
Obrázek 6: Uhlíkové vlákno povlakované epoxidovou pryskyřicí

2.1.3 Zpracování matrice a výztuže

Způsobů zpracování matice s výztuží existuje celá řada. Nejznámější metody jsou například difúzní spojování vrstev nebo pultruze, kde se automatizovaně vyrábí delší profily (tyče, nosníky, pruty, atd.). Jelikož se zde zabýváme FRP kompozity s kontinuálními vlákny uvedeme si metodu navíjení, protože v experimentální části bude vyhodnocován výrobek vyroben touto metodou.

2.1.3.1 Metoda navíjení[8]

Metoda navíjení je nejvíce používaná metoda v různých společnostech zabývajících se výrobou FRP kompozitů. Metoda výroby je popsána níže na Obrázku 7, ze zásobníku vláken jsou z cívek vinuta vlákna do narovnávacího zařízení. Dále pokračují do lázně, kde je roztavená matrice, například epoxidová pryskyřice a vlákno je smáčeno v lázni. Přes kladky je vlákno vedeno na prstencovou kladku, která je otočná a určuje směr navíjení. Na otáčivém vřetenu je umístěna forma, na které se navíjí naimpregnované jádro v různých směrech. Základní jsou radiální, do šroubovice nebo axiální. Výhodou této metody je nízká výrobní cena.



Obrázek 7: Metoda navíjení[8]

2.2 Obrábění FRP kompozitů – OBECNĚ [7,11,12,13]

Obrábění kompozitu se liší od klasického třískového obrábění. U kompozitů je nabízena několikanásobná škála materiálů a fáze jsou nehomogenní. Jelikož škála materiálů je nespočetná, nastává při obrábění problém a je potřeba přehodnotit řezné podmínky, volbu řezného materiálu, nástroje, jeho upnutí či volbu stroje. V těchto podmínkách jsou zohledňovány směry natočení vláken, materiály matrice a vlákna a jejich objemový podíl. Je důležité zohlednit, ve které vrstvě kompozitu je obráběno, což je velice složité především u vrtání a návrhu geometrie vrtáku, protože díra je vrtána ve většině případů ve všech vrstvách.

Řezné podmínky se liší od klasického obrábění především tím, že nevzniká tříska stříhem, jako je tomu u převážné většiny kovů. Vlákna jsou odlamována nebo se je odřezávána epoxidové pryskyřici (matrice). Dále by měla být zohledněna velmi nízká tepelná vodivost obráběného materiálu. Jeho tepelná roztažnost je velmi vysoká a mohlo by docházet k rozměrovým nepřesnostem.

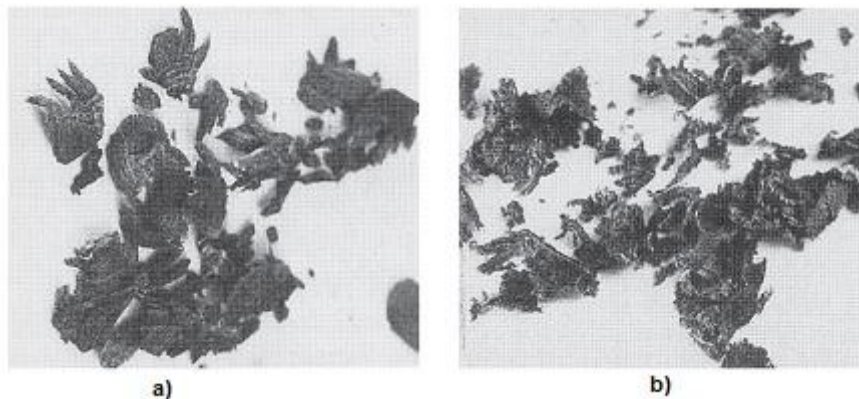
Nejdůležitější při obrábění kompozitů je velmi ostrý břit nebo břitové destičky, kterých je s velkou výhodou využíváno. Vyznačují se adekvátní vůlí pro čistý řez a

minimalizují tření nástroje o obrobek. Minimální změny geometrie břítu vedou ke zvýšení teploty v oblasti řezu a následnému vylomení.

Oblast obrábění kompozitů se neustále vyvíjí, pro velký zájem a vývoje v konstrukci na speciální využití kompozitů, proto je doporučeno se specializovat na speciální geometrii, metodu obrábění a řezné podmínky zvlášť pro každý druh kompozitu zvlášť.

2.2.1 Tvorba třísky při obrábění FRP [11]

Při obrábění kompozitních materiálů je tříška velkým problémem a z tohoto hlediska jsou kladeny velké nároky na stroj. Získaná tříška po obrábění není kontinuální jako při obrábění běžných kovových materiálů, ale bývá ve formě prachu či úlomech výztuže. Ty je třeba odsávat z místa řezu hlavně kvůli čistotě při obrábění, ochraně proti zanesení stroje, ochraně zdraví (především u skelného vlákna), ale také kvůli snížení teploty řezu. U uhlíkových vláken je odsávána tříška kvůli abrazivním vlastnostem uhlíku, to způsobuje brzké opotřebení nástroje nebo stroje ve třecích plochách.



Obrázek 8: Tvary třísek při obrábění CFRP

a) $v=8\text{m/min}, f=0,6\text{mm/ot.}$ b) $v=63\text{m/min}, f=0,075\text{mm/ot.}$

2.2.2 Ortogonální obrábění [7]

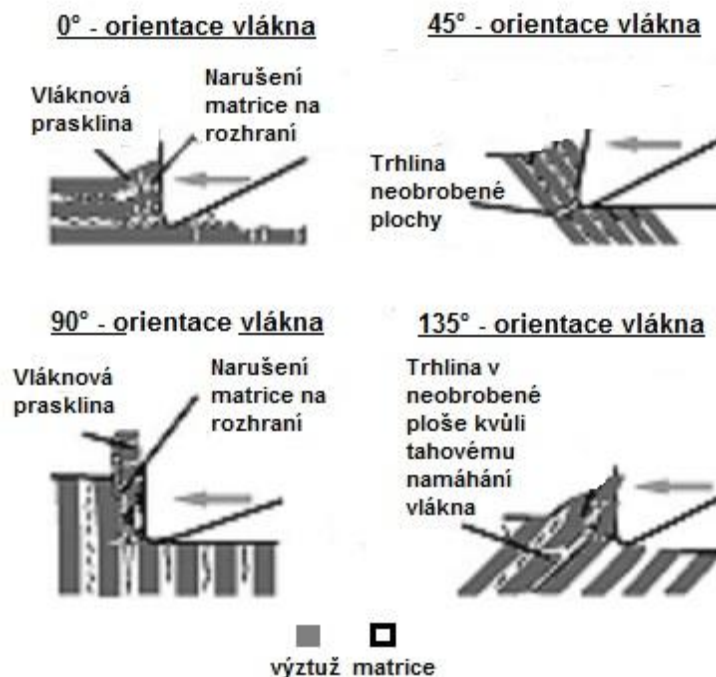
Tento typ obrábění je s výhodou využíván při obrábění kompozitů. V ortogonálním řezání je hrana nástroje kolmá na směr vektoru řezné rychlosti. Výzkum provedený v ortogonálním obrábění FRP kompozitů s různými natočení vláken nám umožňuje objasnit řezné mechanismy. Na Obrázku 9 jsou znázorněna různá natočení vláken vůči směru obrábění.

Při orientaci vláken 0° je matrice namáhána ve směru vláken a vrstva pod břitem je stlačována. Kompozit je odlamován v přední části břitu a dochází k delaminaci nebo k praskání na rozhraní mezi vlákny a matricí.

Při růstu úhlu mezi směrem řezání a orientací vláken, jsou vlákna stlačována a ohýbána proti směru orientace vláken. To je následováno narušením rozhraní mezi matricí a vláknem u neobrobené plochy. Tyto směry zatížení, především v rozsahu 30° - 60° , jsou nejméně vhodné pro obrábění FRP a jsou následkem špatné kvality povrchu.

U orientace vláken 90° jsou vlákna namáhána na stříh a v ohybu. Při porovnání s natočením vláken 0° , je u tohoto případu každé vlákno řezáno zvlášť. Tlakovou silou, která působí kolmo na vlákna, jsou způsobeny trhliny na rozhraní mezi matricí a vláknem v neobrobené části kompozitu.

Nejvhodnější je orientace vlákna 135° . Vlákna jsou namáhána na tah na ohyb. Nevýhoda tohoto natočení je způsobeno v nedostačující přilnavosti matrice a vlákna a vlákna mohou být vytahována z obrobku.



Obrázek 9: Vliv natočení vláken vůči směru obrábění

2.2.3 Klasifikace nástrojových materiálů pro obrábění FRP [7,13]

Při obrábění FRP kompozitů nelze snadno určit typ nástrojového materiálu. Jako první krok je třeba znát přesné složení kompozitu (matrice, vlákno, směr navíjení, atd.). Teplu odváděno z místa řezu by mělo být odvedeno nástrojem, protože FRP kompozit s nízkou tepelnou vodivostí, špatně odvádí teplo třískou, jako je tomu u obrábění kovových materiálů nebo kompozitu s kovovou maticí.

2.2.3.1 Rychlořezné oceli

RO jsou řazeny mezi nejstarší používané nástroje. Když jsou porovnávány s jinými řeznými materiály, jsou charakteristické nižší tvrdostí, což při obrábění abrazivních materiálu (vláken) je nežádoucí. Tepelná vodivost je poměrně nízká, tím je způsobeno vysoké tepelné opotřebení břitu. Nástroje z RO je nutné povlakovat pro zvýšení tepelné odolnosti a trvanlivosti břitu.

2.2.3.2 Slinuté karbidy

Ve srovnání s nástroji z RO, je dosaženo daleko lepších vlastností. Tepelná vodivost bývá až 4 - krát vyšší. Podílem pojiva a velikost zrna karbidické fáze (většinou Co) jsou určeny mechanické vlastnosti nástroje. Vyšší tvrdost je zvyšována jemným zrnem karbidické fáze a naopak větším zrnem je zvyšována houževnatost. Pro obrábění CFRP a GFRP, kde jsou vlákna velmi abrazivní, je doporučena jemnější karbidická fáze, která lépe odolává opotřebení. Nižší hodnoty houževnatosti je třeba zhodnotit u obrábění s dynamickým zatížením. Pro zvýšení trvanlivosti nástroje jsou SK povlakovány různými povlaky na bázi nitridů, oxidů, atd.

2.2.3.3 Polykrystalický diamant

U PKD je dosahováno nejlepších vlastností pro obrábění. Vysoká tvrdost odolávající abrazivnímu účinku vláken a velmi dobrá tepelná vodivost pro rychlý odvod tepla z místa řezu. Dlouhodobou ostrotí nástroje je zaručen chladnější řez a snižuje vznik delaminace. Jediná nevýhoda pro tento řezný materiál jsou vysoké pořizovací náklady. Je třeba zvážit četnost výroby děr a využití nástroje. Při vhodném použití PKD je produktivita výroby zvýšena o 50 – 100% vzhledem k lepším řezným podmínkám, která jsou PKD umožňována, především zvýšení řezné rychlosti.

2.2.3.4 Cenové a provozní srovnání nástrojů PKD a SK

Nástroj z PKD je až 12 - krát dražší než nástroj z SK. Z pohledu životnosti v poměru s řeznými rychlostmi je PKD více odolnější. Ke srovnání jsou používány tzv. obrobené metry.

Bylo naměřeno, že při obrábění GFRP kompozitu je životnost PKD 1900 m při řezné rychlosti $v_c = 800$ m/min. Životnost SK je 100m při $v_c = 400$ m/min, tedy při poloviční řezné rychlosti. I při několika násobné ceně PKD nástroje, je úspora na provozní náklady více než 50%.

U CFRP kompozitů je uspořeno menší procento provozních nákladů. Při mírně nižších řezných rychlostech PKD poskytuje úsporu na provozní náklady kolem 18% v porovnání s SK nástroji.

2.2.4 Požadavky na stroj [11,13]

Pokud mají být FRP kompozity obráběny ve vysoké kvalitě, je důležitý vhodný výběr obráběcího stroje a to jak z hlediska materiálu komponentů, tak z hlediska tuhosti stroje. Například obráběcím výkonem je řízena část teploty v řezu, která je při obrábění kompozitů nežádoucí.

Pro vysoké řezné rychlosti spolu s malými průměry nástrojů jsou vyžadovány vysoké otáčky vřeten. Vřetenem musí být zajištěna široká škála nastavení řezných rychlostí spolu s hodnotou posuvu.

Vzhledem ke složité a různorodé geometrii FRP kompozitu je požadováno, aby obráběcí stroj měl ideálně 5 stupňů volnosti a speciální upínací zařízení.

Třískový prach nelze chladit běžnými kapalinami a měl by být z místa řezu velmi důkladně odsáván, aby nebyly překročeny limity z hlediska hygieny a zdravotního prostředí. Stroj by měl obsahovat velmi výkonné odsávací zařízení.

Vzhledem k vysoce abrazivnímu materiálu a v některých případech i elektricky vodivých, by vodící plochy a ložiska měli být zakrytovány a samostatně větrány.

2.3 Vrtání[7,10,11]

Vrtání je definováno jako obrábění vnitřních ploch neboli děr, do plného materiálu zpravidla dvoubřitým nástrojem. Hlavní řezný pohyb je konán nástrojem, který je rotační. Vedlejší řezný pohyb je vykonáván také nástrojem, ale pohyb je posuvný. Vrtání společně se

zahlubováním je využíváno pro obrábění a přípravu kompozitních dílů na spojování či montáž.

Představuje nejdůležitější operaci při obrábění jak kovových tak kompozitních materiálů. Patří mezi nesložitější operace, protože při špatné volbě řezných podmínek, či geometrie nástroje dochází k rozštěpení horní či spodní vrstvy (tzv. delaminace). Spolu s delaminací jako další, je klíčové při vrtání kompozitů sledovat a řídit teplotu při obrábění a opotřebením nástroje. Cílem je navrhnout co nejlepší podmínky, aby bylo dosaženo co nejlepšího povrchu.

Špatná tepelná vodivost matrice i vláken způsobuje nahromadění vysoké teploty v místě řezu. Ta je potřeba odvádět a snižovat, například pomocí vhodné geometrie nástroje, řeznou rychlostí či posuvem. Další možností je použití chladicí kapaliny, nelze ale použít jakákoliv, protože při obrábění nevzniká kontinuální tříška, ale prach a odštěpky z výztuže. Vhodnější je chlazení vzduchem. Prach je třeba odvádět z místa řezu vhodným odsáváním, hlavně ze zdravotních důvodů. Různou tepelnou vodivostí výztuže a matrice vzniká vysoký tepelný gradient, kterým jsou způsobovány nepřesnosti vyrobených otvorů, to ovlivňuje například špatnou montáž výrobků kvůli nepřesné toleranci.

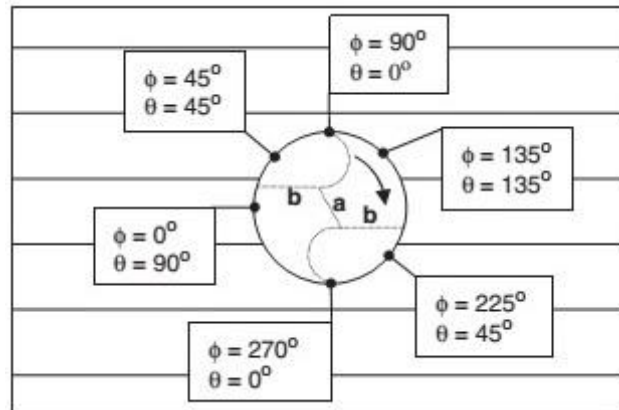
Otěruvzdornost nástroje je snížena vyztužujícími dlouhými vlákny. Toto opotřebením nástroje zvyšuje axiální sílu v řezu, která je hlavní příčinou delaminace.

2.3.1 Vliv orientace vláken na proces vrtání

Orientace natočení vláken je pro kvalitu obrobene plochy také důležitým faktorem. Nadefinujeme úhly Φ , Ψ , θ , kde úhel Ψ je směr orientace vláken, úhel θ je úhel natočení vláken vůči směru posuvu obrobku. Tento úhel není konstantní pro obrábění rotačním nástrojem (frézování, vrtání, atd.). Úhel Φ je měřený od roviny kolmé na směr posuvu obrobku ke špičce nástroje, měřený ve směru hodinových ručiček. Tímto úhlem je dána okamžitá poloha břitu k obrobku.

Obrázek níže ukazuje geometrii dvoubřitého šroubovitého vrtáku, vlákno je navinuto v jednom směru ($\Psi=0^\circ$) a je sledována poloha neboli natočení břitu vůči směru vláken. Materiál je řezán převážně hlavním ostřím (Obr.8b). Příčné ostří (Obr.8a) také řeže materiál, ale mnohem menším množstvím, než je tomu tak u hlavního ostří. U vrtání je tloušťka třísky nezávislá na úhlové poloze a střed otáčení nástroje je vždy pevně určen vzhledem k obrobku a je neměnný. Proměnná je pouze poloha hlavního ostří vzhledem k orientaci vláken.

Jak je ukázáno na Obrázku 10, úhlová poloha hlavního ostří vůči natočení vlákna je rovna nule, když je rovnoběžná s orientací vlákna. Když zvyšujeme úhlovou polohu, úhel orientace vlákna se snižuje a nulové hodnoty dosahuje při úhlové poloze hlavního ostří $\Phi=90^\circ$.



Obrázek 10: Schéma orientace vláken při vrtání jednosměrných kompozitů [7]

2.3.2 Řezné síly při vrtání

V kompozitech s neměnnou orientací vláken jsou způsobeny cyklicky měnící se síly vzhledem k okamžitému měnícímu se řeznému úhlu vůči orientaci vláken.

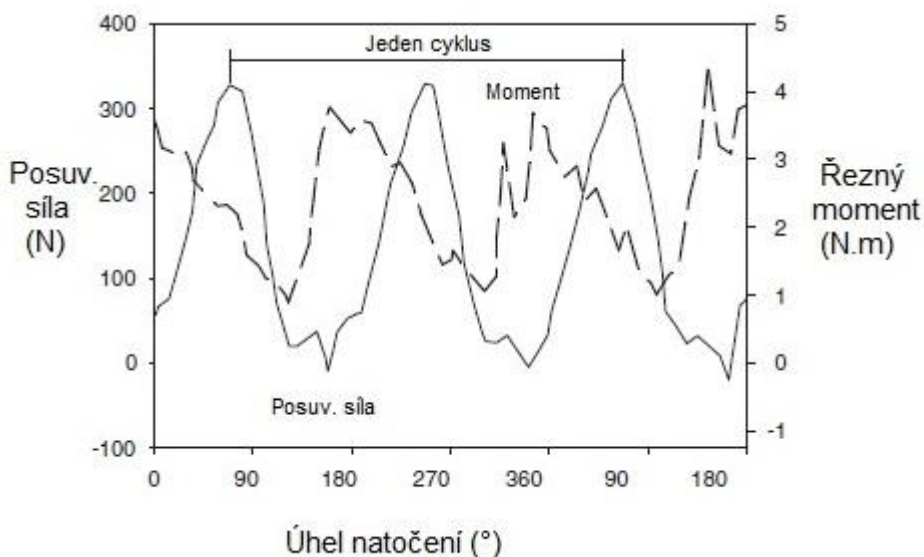
Při vrtání jsou zachycovány dvě hlavní síly. Axiální síla neboli posuvová, působící ve směru posuvu nástroje a kroutící síla neboli řezný moment. Jsou proměnné v čase i při vrtání kovů, kde je tloušťka třísky konstantní. Většina třísky z místa řezu je odstraněna dvěma hlavními řeznými hranami, které ovlivňují především řezný moment. Posuvovou sílu způsobuje příčné ostří, které v axiálním směru působí na obráběný materiál. Velikostí posuvové síly je hlavní složkou příčiny delaminace.

Jak je vidět na Grafu 1 níže, posuvová síla je v jednom cyklu maximální při záběru hlavního ostří. Maxima je dosaženo tedy při úhlu natočení 90° , kdy je směr řezného pohybu rovnoběžný s vlákny ($\Phi=0^\circ$). V záběru je první hrana hlavního ostří a při záběru druhého hlavního ostří při úhlu natočení 270° . Minima je dosaženo v pozici 135° ($\Phi=135^\circ$).

Řezný moment je způsoben dvojicí sil působících na hlavní řezné hrany vrtáku. Jeho velikost je dána velikostí těchto sil a průměru vrtáku.

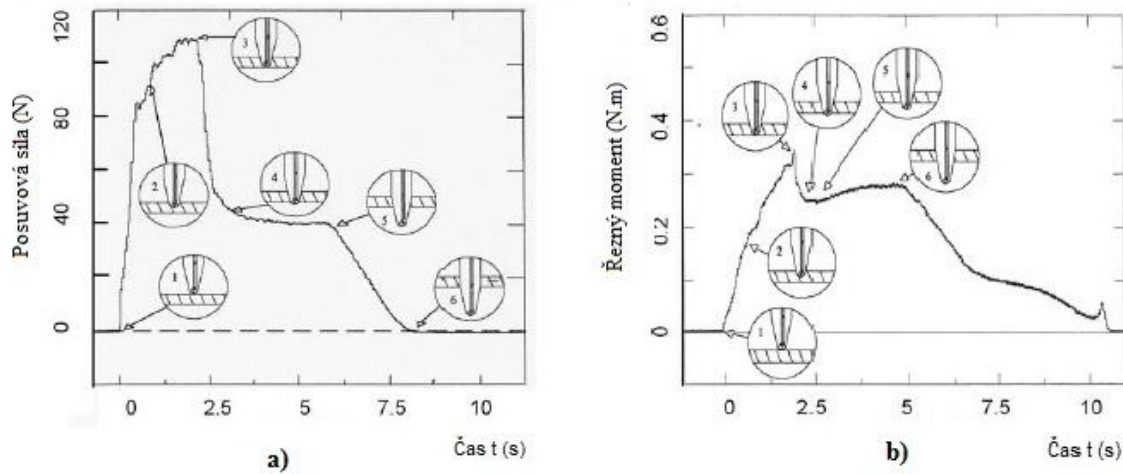
$$M = F_c \frac{d}{2}$$

kde F_c je síla působící na hranu hlavního ostří a d je průměr vrtáku. Jak je znázorněno na Grafu 1, maximum řezného momentu je dosaženo při úhlu natočení 0° ($\Phi=90^\circ$) a minima při 135° .



Graf 1: Závislost posuvové síly a řezného momentu na úhlu natočení vrtáku při obrábění CFRP kompozitu[7]

Na řezné síly se lze nahlédnout i z hlediska, v jaké pozici se nachází nástroj v čase. Existuje celkem 6 hlavních bodů. Jak je vidět na Grafu 2, zpočátku vzniká prudký nárůst přítláčné síly a točivého momentu (1), ty se následně dále zvyšují vstupem druhého hlavního břitu do obrobku (2). Maximum je dosaženo při průrazu špičky spodní vrstvou matrice (3). Dále se posuvová síla prudce sníží a řezný moment mírně poklesne, protože spodní vrstva obrobku byla proražena špičkou nástroje (4). Než projde celé příčné ostří obrobkem, posuvová síla se téměř nemění a kroticí moment lehce vzroste (5). Po průchodu celého příčného ostří obě síly pozvolna klesají k nule (6).



Graf 2: Řezné síly proměnné v čase při vrtání CFRP nepovlakovaným nástrojem
a) Posuvová síla proměnná v čase, b) Řezný moment proměnný v čase [11]

2.3.3 Teplota řezání při vrtání

Na rozdíl od obrábění kovů a jejich slitin, kde je teplo z místa řezu odváděno třískou, u kompozitů je teplo odváděno nástrojem a obrobkem. Teplotní gradienty jsou velice závislé na tepelné vodivosti obrobku a nástroje. Například nižší tepelný spád je naměřen u kompozitu v kombinaci epoxidová pryskyřice – uhlíkové vlákno oproti kombinaci epoxid - skelné vlákno.

Teplota řezání při vrtání je velmi ovlivněna řeznou rychlostí a hodnotou posuvu. Ačkoliv řezná rychlost nemá velký vliv na řezné síly, při zvyšování řezné rychlosti za konstantní hodnoty posuvu, zvyšuje teplotu v místě řezu. Řezná rychlost je omezena takovou horní hodnotou, aby nevznikalo tepelné poškození obrobku, například natavení polymerní matrice.

Bylo zjištěno, že řezná rychlost a hodnota posuvu by se měla měnit také v závislosti na hloubce vrtané díry. Například při vrtání díry malé hloubky, je při nižších rychlostech řezání vhodné zvýšit posuv, aby byla doba řezání co nejkratší a teplota se pomalým posuvem nezvyšovala. U hlubších děr při vrtání vyššími řeznými rychlostmi je doporučena delší doba vrtání, tedy hodnotu posuvu nezvyšovat.

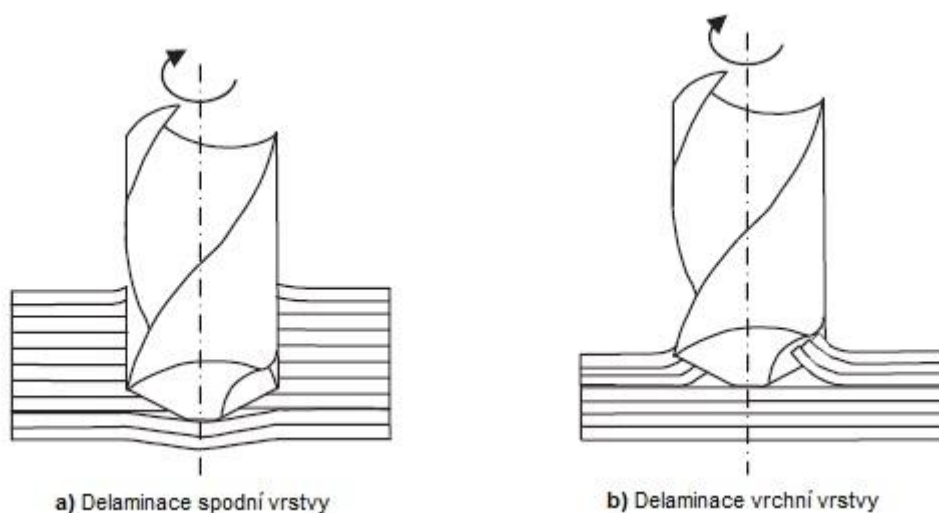
2.3.4 Kvalita obrobené plochy při vrtání

Kvalita obrobené plochy po vrtání je charakterizována drsností povrchu, kvalitou hrany díry, kulatostí díry a rozsahem porušení delaminací. Drsnost povrchu je měřena na stěnách díry ve směru posuvu a je velice závislá na orientaci vlákna v obvodu díry. Kvalita hrany díry, kulatost a rozměrová přesnost je ovlivněna delaminací, opotřebením nástroje a řeznou teplotou. V otvoru je možno kvůli rozdílné tepelné roztažnosti matrice a vláken dojít k deformaci a tím rozměrové nepřesnosti díry nebo narušení kruhovitosti.

2.3.5 Delaminace

Mezi nejhlavnější vlivy na kvalitu obrobené plochy je řazena delaminace, protože je ovlivňována struktura dlouhodobá spolehlivost obráběné komponenty. Jak bylo řečeno dříve, delaminace je způsobena převážně velkou přitlačnou silou, dále je způsobena nedostatečnou ostrostí nástroje.

Delaminace probíhá postupně ve dvou fázích. Je zaznamenávána buď na vrchní vrstvě, kde je odlupována povrchová vrstva nebo ve spodní vrstvě obrobku, kde se odlupuje spodní neobrobená vrstva pod nástrojem, jak je znázorněno na Obrázku 9.



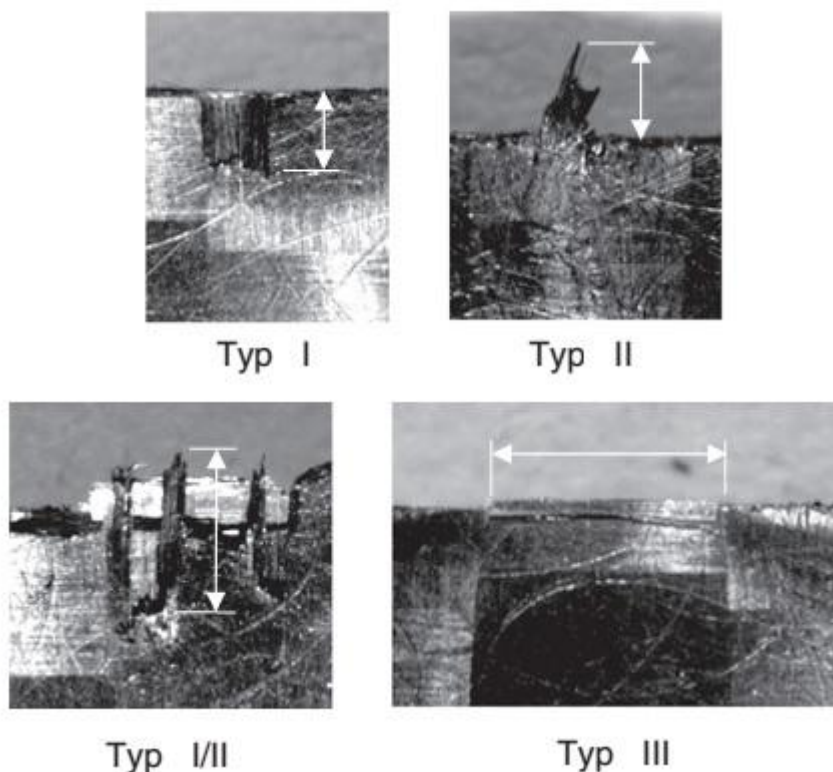
Obrázek 11: Schéma delaminace – 2 fáze[7]

Delaminace spodní vrstvy (viz Obrázek 11a) je způsobena příčným ostřím nástroje. Příčné ostří je tlačeno na neobrobenou vrstvu pod nástrojem a tím je vrstva elasticky ohýbána. Vzhledem k tomu, že nástroj pokračuje směrem ke konci obrobku, je snižován počet vrstev a

tím se snižuje i elasticita vrstev obrobku. Při kritické tloušťce je překročena mez pevnosti v ohybu mezi vrstvami a kolem vyvrtaného otvoru vznikají trhliny. Trhliny, vznikající po průchodu nástroje z obrobku. Tím vzniká delaminace typu I a III (vysvětlení typů níže).

Delaminace vrchní vrstvy (viz. Obrázek 11b) vzniká při průniku špičky nástroje do obrobku. Drážkami vrtáku a energií vrtáku jsou nabaleny první vrstvy obrobku a to způsobuje vytlačování vláken proti směru posuvu nástroje. Ohýbání povrchových vrstev vede k jejich odlamování. Jsou známy tři základní typy delaminace, viz Obrázek 12.

- **TYP I** – jsou popsány oblasti, které byly rozbity směrem do materiálu v určitých vzdálenostech
- **TYP II** – delaminace je složena z nenařezaných vláken, které vyčnívají z povrchu obrobku
- **TYP I/II** – kombinace obou typů popsány výše
- **TYP III** – jsou částečně odtržená vlákna z povrchu, rovnoběžná s obrobeným povrchem



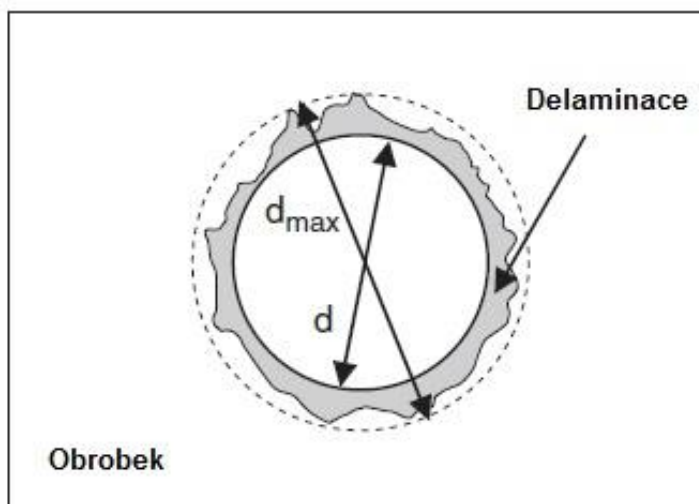
Obrázek 12: Typy delaminace a jejich rozměry [7]

2.3.5.1 Vyhodnocení a měření delaminace

Vyhodnocení a poškození delaminace je složitý úkol, protože delaminace bývá vnější i vnitřní. Vyhodnocení tvaru, rozměru a polohy delaminace je nezbytnou součástí pro určení poškození po obrábění.

Vnější delaminace se vyhodnocuje nejčastěji použitím optického mikroskopu na spodní a vrchní vrstvě obrobku. Ultrazvukový scan byl použit pro vyhodnocení vnitřní delaminace. K vyhodnocení delaminace je často využíván delaminační faktor F_d . Je nejčastěji využíván pro charakteristiku rozsahu poškození delaminací při vrtání. Je definován jako poměr maximálního průměru delaminace d_{max} a průměru vyvrtaného otvoru d , viz Obrázek 13.

$$F_d = \frac{d_{max}}{d}$$



Obrázek 13: Schematický popis výpočtu delaminačního faktoru [7]

Počátek a rozsah delaminace je dán hlavními procesními parametry, především hodnotou posuvu, kterou je nejvíce ovlivňována hodnota posuvové síly a tou je rozsah delaminace nejvíce ovlivněn. Dalšími parametry ovlivňující delaminaci jsou například otáčky vřetena, průměr vrtáku, tvar neboli úhel špičky vrtáku a volba materiálu.

Pro vnější delaminaci studie dokázaly, že nejvíce je delaminace ovlivňována a roste s hodnotou posuvu a řezné rychlosti. Snížení řezné rychlosti se statisticky fyzikálně zdá být nejvhodnějším řešením pro snížení hodnoty delaminačního faktoru. To ovšem platí jen pro

CFRP kompozity. U GFRP kompozitů je doporučeno snižovat posuv následující řeznou rychlostí.

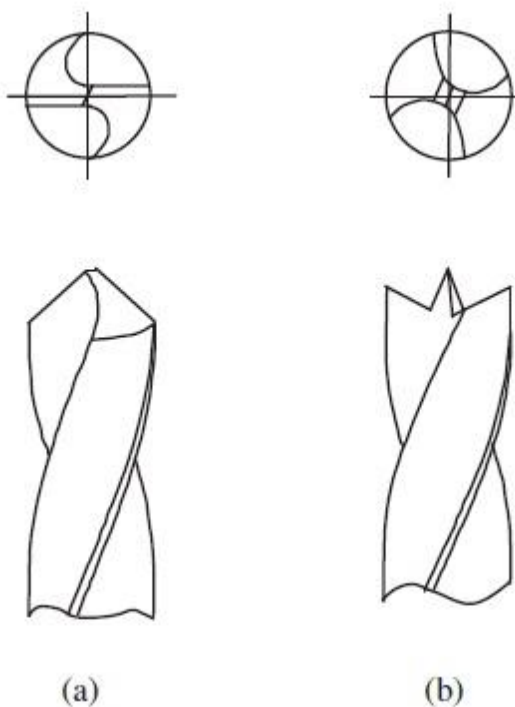
Na ultrazvukovém scanu se ukázalo, že vnitřní delaminace je nejvíce ovlivněna posuvem a průměrem vrtáku.

2.3.6 Volba nástroje

Volba nástroje bude rozlišena ze dvou pohledů a to z hlediska řezného materiálu tak z hlediska geometrie vrtáku.

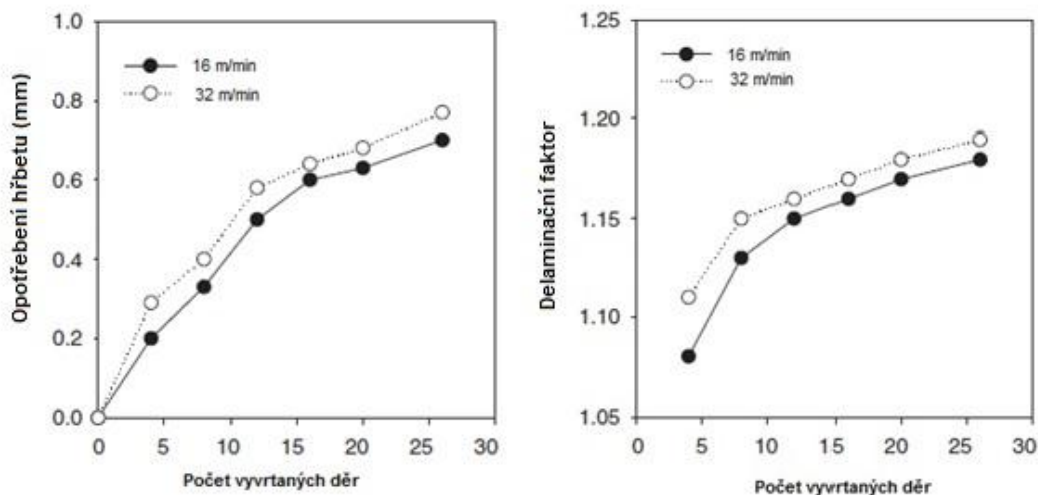
2.3.6.1 Geometrie nástroje a jeho vliv na delaminaci

Ke snížení delaminace je důležitá volba vhodné geometrie nástroje a materiálu. Studie dokázaly, že volba vrtáku s malým úhlem nástroje vede ke snížení delaminačního faktoru. Vrtáky z karbidové oceli s malým úhlem špičky, například 35° (Obrázek 14b), je ideálním nástrojem pro vrtání kompozitů a snížení delaminace oproti klasickému šroubovitému vrtáku s úhlem špičky 118° (Obrázek 14a), který je méně vhodný pro vrtání kompozitu, protože dlouhou hranou příčného ostří a velkým úhlem špičky je zvětšována posuvová síla a ta je doprovázena delaminací, která je až o 40-60% větší než u vrtáků s malým úhlem špičky.



Obrázek 14: Různé úhly špičky vrtáků

Posuvová síla je také ovlivněna a roste s opotřebením nástroje. Mírou opotřebením nástroje je také ovlivněna delaminace Na grafu níže je zaznamenáno, jak opotřebením nástroje a delaminační faktor roste s počtem vyvrtaných děr a delaminace se zvětšuje s rostoucí řeznou rychlostí.



Graf 3: Vztah mezi opotřebením a delaminačním faktorem na počtu vyvrtaných děr a řezné rychlosti

2.3.6.2 Volba řezného materiálu

Nepovlakovaná RO není vhodná pro větší počet vrtaných děr vzhledem k nízké tvrdosti nástroje a abrazivním účinkům vlákna. Trvanlivost nástroje je snižována nízkou tepelnou vodivostí materiálu. Jako nejvhodnější geometrie pro vrták z RO byl navržen vrták s velmi malým úhlem špičky, viz Obrázek 11(b).

SK jsou vhodnějšími a dostačujícími materiály pro středně velkou výrobu. SK na bázi karbidu wolframu (WC) jsou požívány pro svojí dostačující trvanlivost z hlediska kombinace tvrdosti a houževnatosti. Bylo zjištěno, že nejvhodnější geometrie s SK bývá vrták s rovnými drážkami.

Z hlediska opotřebením je nejvhodnější použití PKD nebo povlakování diamantovou vrstvou. Jak bylo řečeno v kapitole 2.2.3, je třeba zvážit, jak je často vrták využíván. Nejvhodnější PKD vrták byl navržen s drážkami do šroubovice, viz Obrázek 11(a).

2.4 Frézování [7,11]

Frézování nebo spirálové frézování děr je pro obrábění otvorů využíváno méně než vrtání, ale jak bude vidět v experimentální části, metoda by mohla být využívána s větší výhodou než vrtání. Nástroje jsou voleny tak, aby jejich geometrie byla vhodná pro výrobu děr.

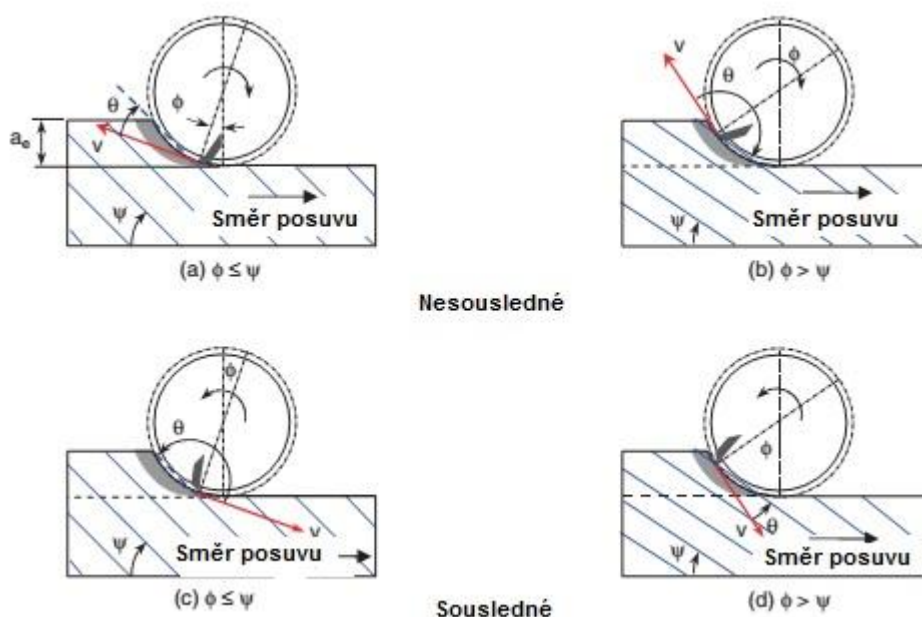
Frézování je definováno jako obrábění mnohobřítým, kde hlavní řezný pohyb je konán nástrojem a to rotačním. Vedlejší řezný pohyb je konán obrobkem, který je zpravidla posuvný.

Při frézování FRP kompozitů oproti kovovým materiálům nevzniká tak velký odpad, protože je využíváno spíše pro dokončovací operace a zkvalitnění povrchu. Druh vlákna a objemový podíl matrice a výztuže je hlavním faktorem pro volbu nástrojů a parametrů obrábění.

2.4.1 Vliv orientace vlákna na proces frézování

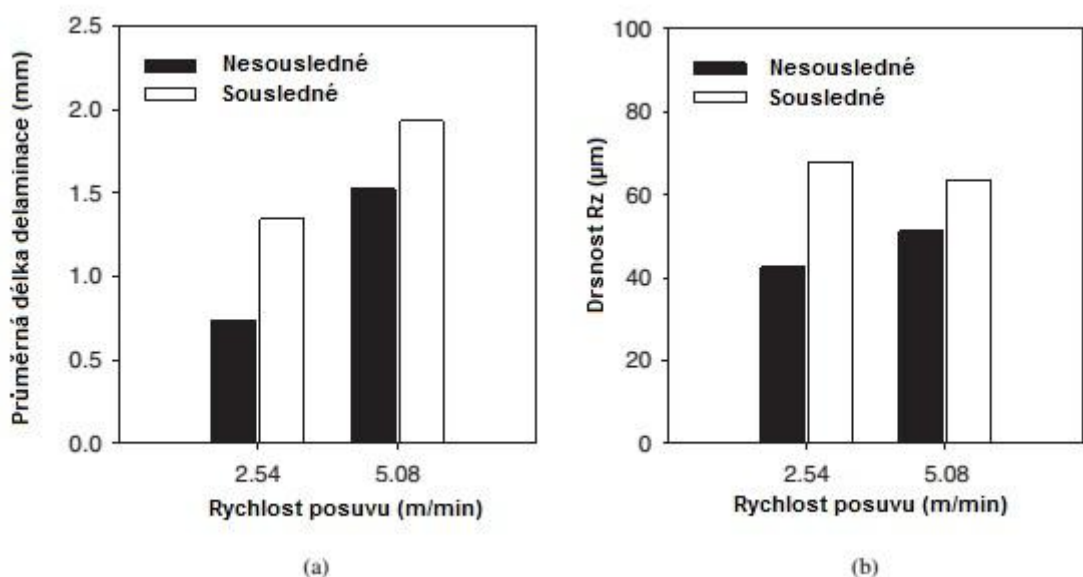
Nadefinované úhly byly nadefinovány v kapitole 2.3.1, jsou stejné jako při vrtání. Úhel Φ je nekonstantní a je měněn v závislosti na poloze špičky vůči ose nástroje. Na tomto úhlu je závislá tloušťka třísky.

Jak je ukázáno na Obrázku 15, pro kompozit $\Psi < 90^\circ$ s konstantní vinutím. Je zde znázorněno sousledné (c), (d) a nesousledné frézování (a), (b).



Obrázek 15: Vliv orientace vláken při frézování jednosměrných kompozitů [7]

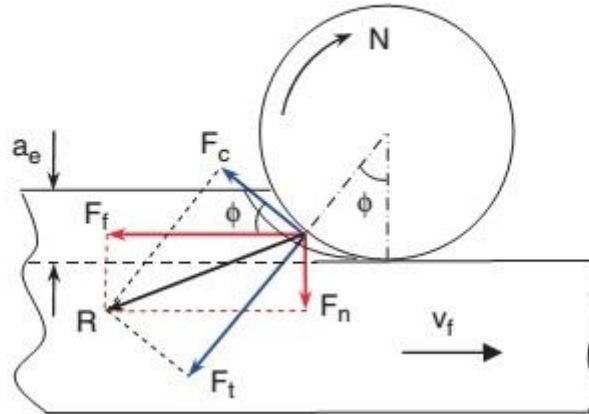
Pro frézování FRP kompozitů je doporučováno nesousledné frézování, zub frézy zabírá od minimální do maximální tloušťky obrobku. Vlákná jsou namáhána na tah a ohyb, mezi které je napětí rozloženo a to má za následek lepší kvalitu povrchu, když ovšem není úhel $\theta=0^\circ$, tímto natočením je způsobeno vytrhávání vláken. Při sousledném frézování jsou vlákna a matrice namáhána na tlak a ohyb. Při výjezdu zubu frézy z obrobku, kde je tloušťka minimální, jsou vlákna vylomena v obrobené ploše, což je nechtěný jev. Na Grafu 4 je porovnáno sousledné a nesousledné frézování, kde je použita fréza Burr s průměrem 6,35 při řezné rychlosti $v_c = 100$ m/min, obráběný materiál CFRP. Je porovnáno frézování s délkou delaminace (a) a drsností povrchu (b) na rychlosti posuvu. Jak je vidět z obou grafů, nesousledné frézování je doporučeno z obou hledisek.



Graf 4: Porovnání sousledného a nesousledného obrábění

2.4.2 Řezné síly při frézování

Řezné síly jsou ovlivňovány úhly, která byly popsány v kapitole 2.4.1 a neřezanou tloušťkou třísky. Jelikož úhly mezi směrem řezání a orientací vláken jsou měněny plynule, řezné hrany jsou vystavěny cyklickým silám. Rozložení sil při nesousledném frézování jsou znázorněny na Obrázku 16. Je zde znázorněn vztah mezi řeznými silami a pozicí břítu nástroje.



Obrázek 16: Řezné síly při nesousledném frézování

Řezné síly jsou svojí velikostí daleko menší ve srovnání s frézováním kovových materiálů, je to způsobeno nehomogenitou kompozitů. Při vyšších řezných rychlostech roste zároveň i posuvová síla F_f , zejména u menších průměrů nástrojů, což je důležité pro kvalitu obrobeneho povrchu.

2.4.3 Teplota řezání při frézování.

Podmínky pro řízení teploty u frézování jsou velice podobné jako při vrtání, viz kapitola 2.3.3. Je ovlivněna hloubkou řezu, hodnotou posuvu, materiálem nástroje a obráběného materiálu.

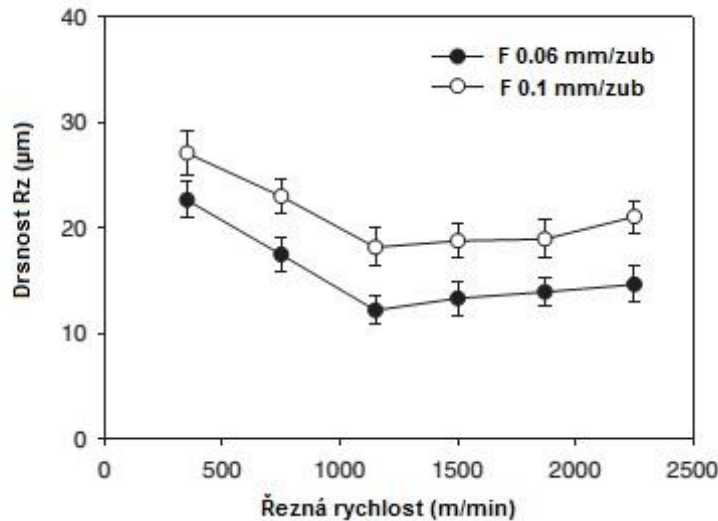
Teploty jsou přímo úměrné hloubce řezu a posuvu, bylo ovšem dokázáno, že nejvíce závislá je na řezné rychlosti.

2.4.4 Kvalita obrobene plochy

Kvalita povrchu obrobene plochy je ovlivněna rychlostí posuvu, řezné rychlosti poloměru špičky nástroje a opotřeбенí nástroje.

V experimentech bylo zjištěno, že drsnost je zvyšována přímo úměrně s rychlostí posuvu nástroje, s rostoucí řeznou rychlostí se drsnost povrchu nezvyšuje, viz Graf 5 (frézování GFRP, nástroj PKD). Řeznou rychlostí je zlepšována drsnost povrchu do kritické rychlosti, která je pro tento případ 1130 m/min. Kritická rychlost je definována jako hraniční

rychlost, do které jsou zlepšovány vlastnosti povrchu obrobku po obrábění. Je různá pro odlišné obráběné i řezné materiály. Drsnost roste přímo úměrně i s opotřebením nástroje.



Graf 5: Závislost drsnosti na řezné rychlosti a posuvu [7]

Stejně jako při vrtání je velkým problémem delaminace, která je řízená velikostí axiální síly obrobku, detailně byla popsána v kapitole 2.3.5. Její závislost je dána procesními parametry (řezná rychlost, posuv, opotřebením nástroje, atd.).

2.4.5 Volba nástroje

Při volbě nástroje pro frézování CFRP nebo GFRP kompozitu je doporučeno zaměřit se na výběr řezného materiálu. Na rozdíl u vyztužení aramidovým vláknem je rozhodující faktor u výběru nástroje jeho geometrie. Specifikace řezných materiálů pro frézování je podobná jako v kapitole 2.3.6, protože se jedná o obrábění děr. Blíže si v specifikujeme řezný materiál v experimentální části.

3 Návrh vhodné metodiky obrábění

3.1 Experimentální část

Ve firmě Compotech Plus spol. s.r.o. v Sušici bylo provedeno frézování děr nosníku z CFRP kompozitu. Cílem bylo vyfrézování děr sousledným a nesousledným frézováním a zjistit vhodné řezné podmínky pro tuto operaci z hlediska nejnižší delaminace.

3.1.1 Obráběný materiál

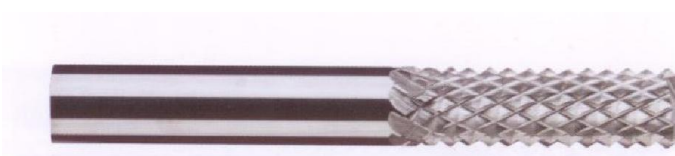
Byl frézován VOD vnitřní nosník ve tvaru trubky s rozměry 104/90 mm s tloušťkou stěny 7 mm, vyroben metodou navíjení. Rozložení kompozitu neboli orientace a typy vláken jsou uvedeny níže v Tabulce 3, kde je HSC – standardní uhlíkové vlákno, UHM – vysoce modulové uhlíkové vlákno nad 500 GPa. Vlákná v tabulce jsou seřazena od vnitřní strany nosníku. Typ matrice byla použita epoxidová pryskyřice.

Typ vlákna	Orientace vláken [°]	Tloušťka [mm]
HSC	45,3	0,59
UHM	0	2,08
HSC	37,1	0,63
HSC	0	2,36
HSC	38,8	0,61
HSC	39,1	0,58

Tabulka 3: Složení obráběného kompozitu

3.1.2 Nástroj

Jako nástroj byla použita dokončovací fréza s katalogovým označením Hufschmied WD 108, průměr 8 mm. Tvar zubů je uzpůsoben pro frézování děr. Materiál nástroje je jemnozrný slinutý karbid bez povlakované vrstvy.



Obrázek 17: Fréza Hufschmied WD 108 [14]

3.1.3 Obráběcí stroj

Pro frézování děr byla použita CNC fréza, vyrobená a postavená ve firmě Compotech Plus spol. s.r.o., viz Obrázek 16. Pro chlazení a odvod tepla z místa řezu pro snížení opotřebení bylo využito speciální odsávání vedeno vřeteníkem CNC frézy. Bylo použito vřeteno s katalogovým označením Kress – FME 1050-1 – s výkonem motoru 1050W, upínání pomocí matice a maximálními otáčkami 25000 ot/min. Vřeteno je ukázáno na Obrázku 18.



Obrázek 18: CNC frézka



Obrázek 19: Vřeteno Kress – FME 1050-1 [15]

Obrobek byl upnut do standardního svěráku mezi dvě čelisti zajištěn závitem, jak je zobrazeno na Obrázku 20.



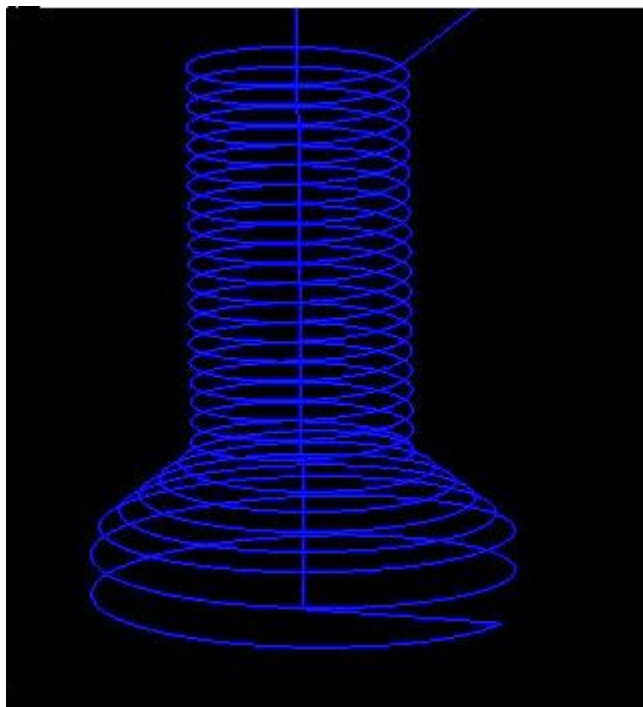
Obrázek: 20: Upnutí obrobku

3.1.4 Postup při obrábění - volba řezných podmínek

Pro frézování díry byl zvolen cílový rozměr 12mm. Metoda výroby otvoru byla zvolena tzv. frézování díry do šroubovice neboli spirálové frézování. Tato metoda je výhodnější oproti klasickému vrtání, protože při průchodu vrtáku materiálem dochází při stejném průměru vrtáku, jako je díra, k přechování neodsáté třísky pod vrtákem. Vrták s menšími průměry není schopen odvádět třísku drážkami, jelikož drážky jsou oproti třísce, kterou tvoří nalámaná výztuž, malé. Simulace dráhy frézy při frézování do šroubovice je znázorněna na Obrázku 21. Stoupání šroubovice bylo zvoleno 1 mm.

Pro stejné řezné podmínky byly spirálově frézovány dvě díry a to sousledně a nesousledně. Při frézování byla měněna rychlost posuvu, otáčky vřetena zůstaly konstantní. Řezné podmínky jsou uvedeny v Tabulce 4.

Následně byly naměřeny hodnoty otvorů po obrábění a zkoumaný materiál byl nařezán pro zkoumání kvality povrchu a delaminace.



Obrázek 21: Dráha frézy – frézování do šroubovice

Frézování	X	C	D	E	F	G	H
Posuvová rychlost v_f [m/min]	250	350	450	500	550	600	700
Otáčky včetně n [1/min]	20 000						

Tabulka 4: Rezné podmínky při frézování

3.1.5 Přeměření a porovnání hodnot vyfrézovaných děr

Průměr otvoru byl stanoven 12 mm. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 5. Díry byly měřeny mikroskopem na vnitřní průměry (rozsah 5-30mm, přesnost 0,01mm), viz Obrázek 22. S rostoucí posuvovou rychlostí rozměr díry klesá, to je dáno opotřebením nástroje, protože hodnota nuly polohy nástroje na CNC frézce byla nastavena pouze při prvním frézování. Ukázalo se, že při nesousledném frézování se dosahovalo menších rozměrů děr než při sousledném frézování.

Rozměry děr po obrábění		X	C	D	E	F	G	H
Sousledné	Průměr díry D [mm]	11,85	11,9	11,93	11,92	11,92	11,91	11,86
Nesousledné		11,86	11,85	11,84	11,79	11,85	11,85	11,8

Tabulka 5: Naměřené průměry děr po frézování



Obrázek 22: Mikroskop pro měření vnitřních průměrů

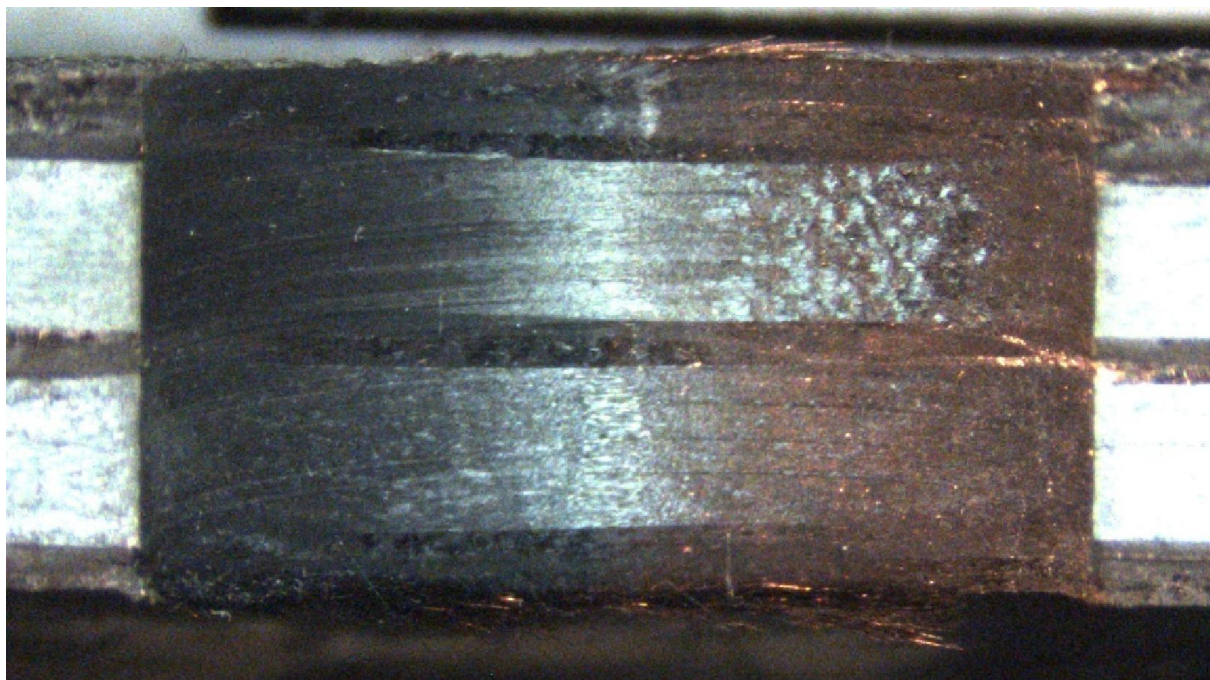
3.1.6 Vyhodnocení a porovnání kvality povrchu a delaminace

Měření bylo provedeno na optickém mikroskopu Multicheck PC 500. Rozsah v horizontálním i vertikálním směru je 150 mm a přesnost 0,001 mm v obou směrech.

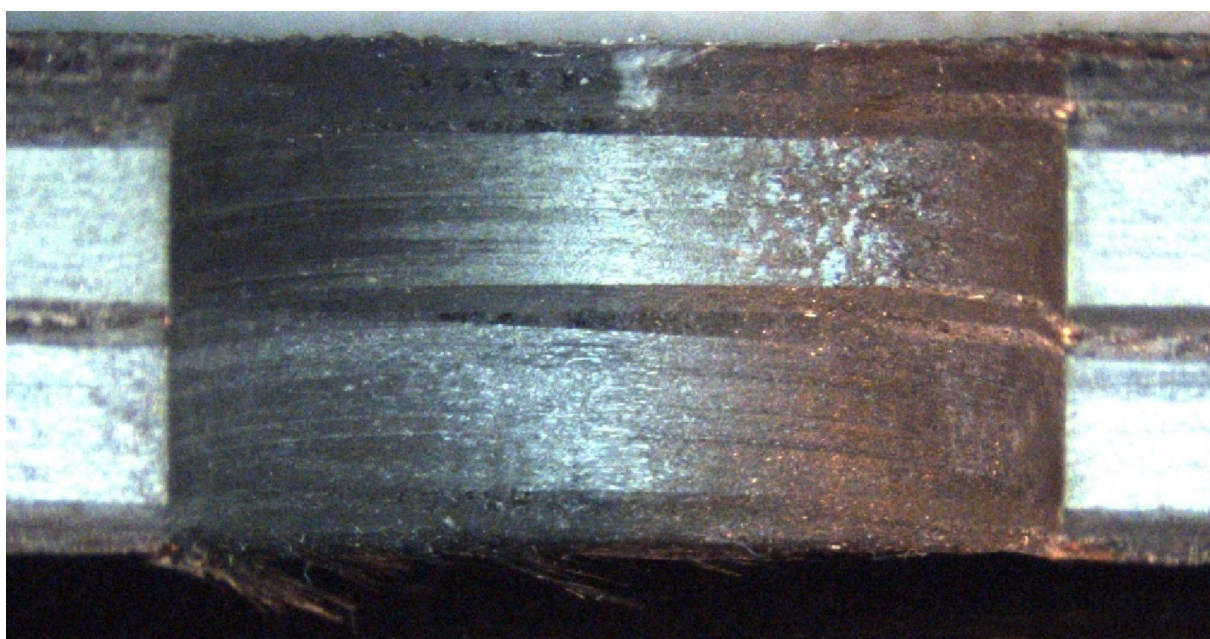


Obrázek 23: Mikroskop Multicheck PC 500 [16]

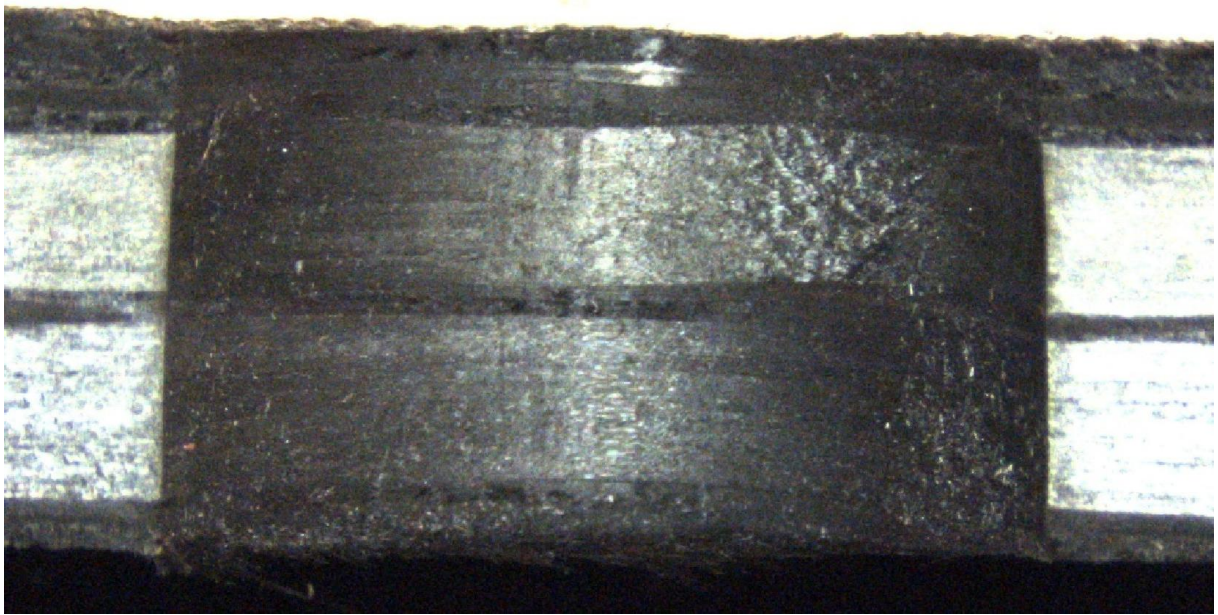
Při spirálovém frézování je rozdíl mezi sousledným a nesousledným frézováním nepatrný, viz Obrázek 24 a 25. Je to dáno tím, že při dráze nástroje do šroubovice je oproti frézování rovných ploch pohyb rozložen do více směrů a průběh při obou typech frézování je při úběru třísky vcelku totožný. To samé platí pro kvalitu povrchu vnitřní plochy otvoru, u které není patrný ani rozdíl při zvyšování posuvové rychlosti. Pro porovnání je uveden důkaz pro varianty C, H (sousledné), varianty s nižší a vyšší zvolenou posuvovou rychlostí, viz Obrázek 26 a 27. Na vnitřních plochách jsou dobře viditelné jednotlivé vrstvy a různé úhly navíjení vláken.



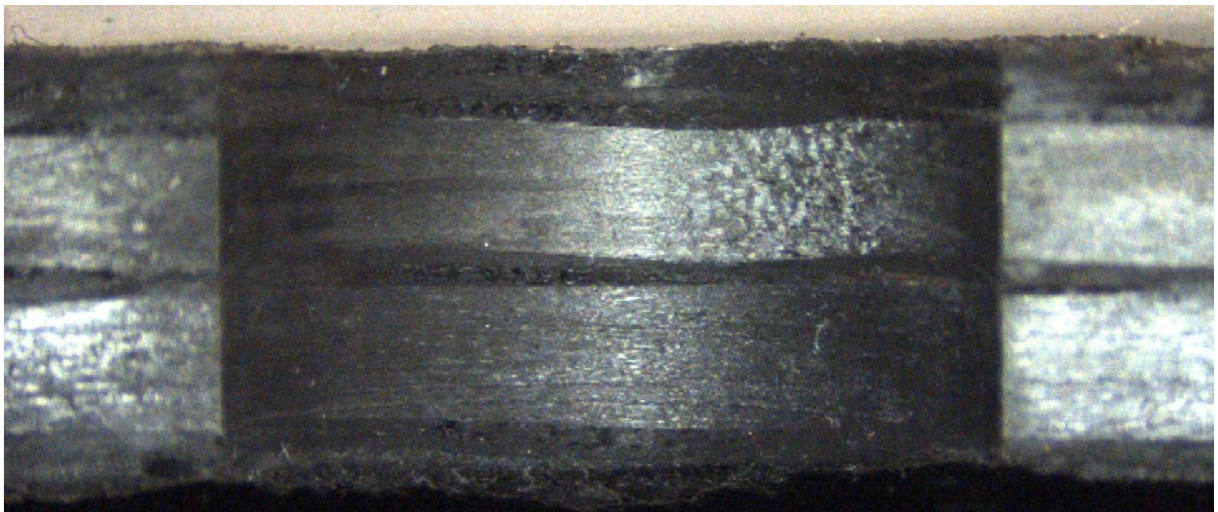
Obrázek 24: Varianta E – Vnitřní plocha - Nesousledně



Obrázek 25: Varianta E – Vnitřní plocha - Sousledně



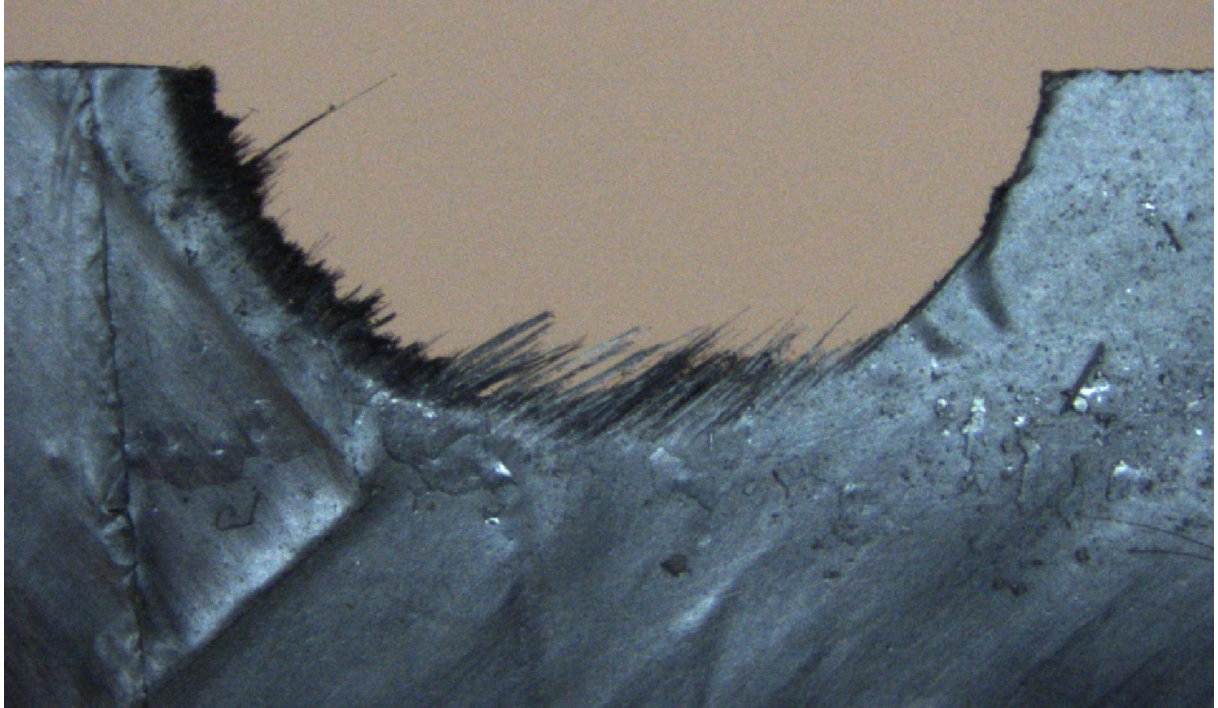
Obrázek 26: Varianta C – Vnitřní plocha - Sousledně



Obrázek 27: Varianta H – Vnitřní plocha - Sousledně

Porovnání vzorků vzhledem k delaminaci byly nalezeny rozdíly. Vzorek byl velmi delaminován ve spodní vrstvě při průchodu nástroje z obráběného materiálu. Ve většině případů byla nalezena delaminace typu II neboli nenařezaná vlákna. Byly objeveny občas i delaminace typu I na polovině otvoru, tato delaminace byla způsobena především rozřezáním vzorku. Delaminace pozvolna narůstala především s posuvovou rychlostí, při typu frézování rozdíl v delaminaci nebyl patrný. Pro porovnání budou srovnány varianty C, F, H.

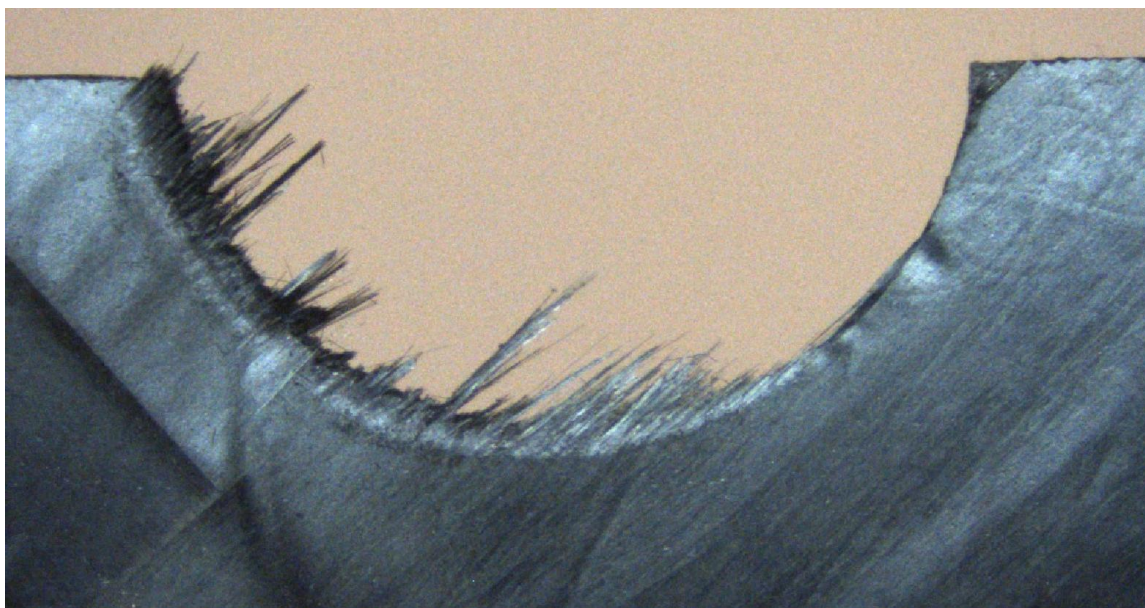
Na Obrázku 28 je ukázána mírná delaminace typu II na vnitřním průměru vzorku při posuvové rychlosti $v_f = 350$ m/min. Při frézování při nižší posuvové rychlosti docházelo, protože spodní vrstva je velmi tenká, tloušťka vrstvy byla naměřena 0,59 mm. Na Obrázku 29 je dokázáno, že směr orientace vláken spodní vrstvy byl 45° .



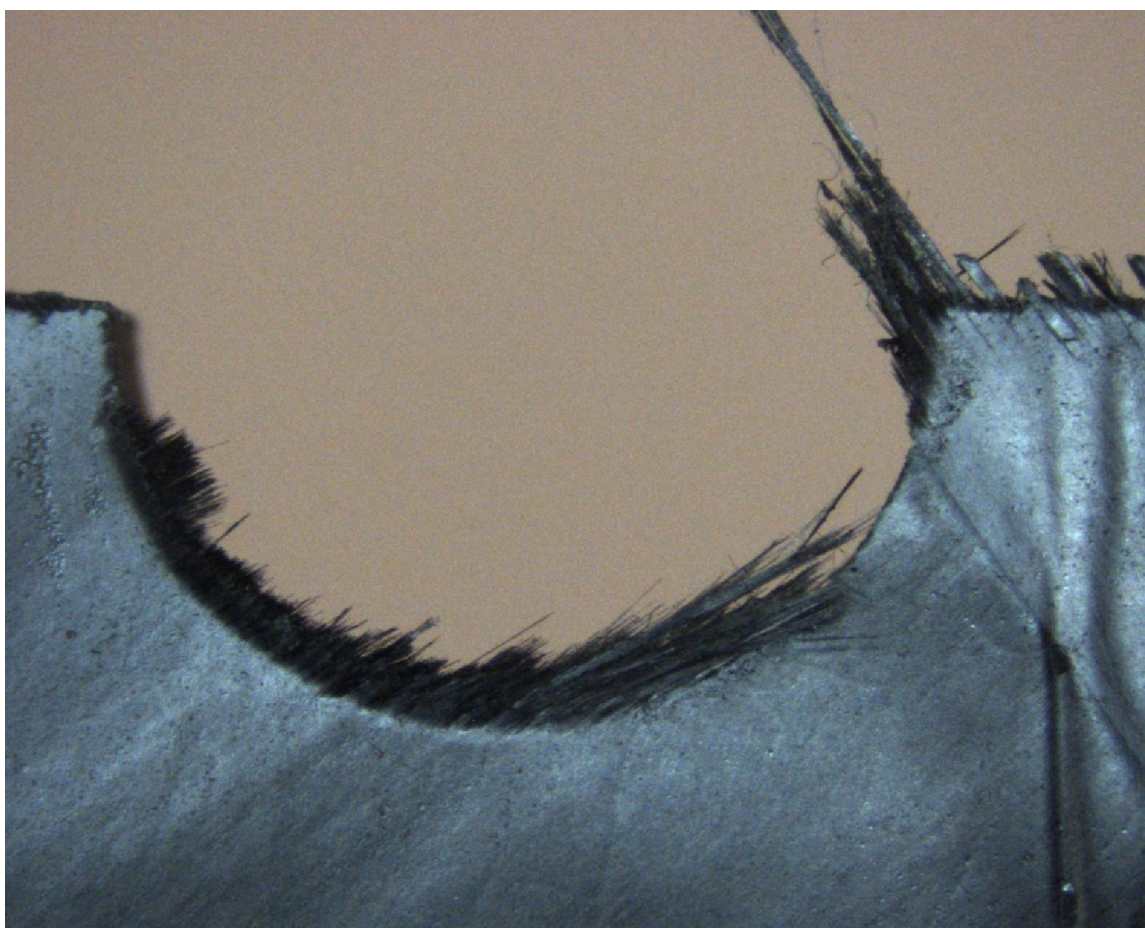
Obrázek 28: Varianta C – Spodní vrstva – Sousedně

Na Obrázku 29 byla spodní vrstva delaminována při posuvové rychlosti $v_f = 500$ m/min. Jedná se o delaminaci typu II. Ve srovnání a variantou C jsou vlákna delší a četnější.

Na Obrázku 30 byla dána posuvová rychlost $v_f = 700$ m/min. Byla zaznamenána delaminace typu II. V porovnání se dvěma předchozími variantami nejsou nenařezaná vlákna znatelně delší, ovšem jejich četnost se velmi zvýšila.

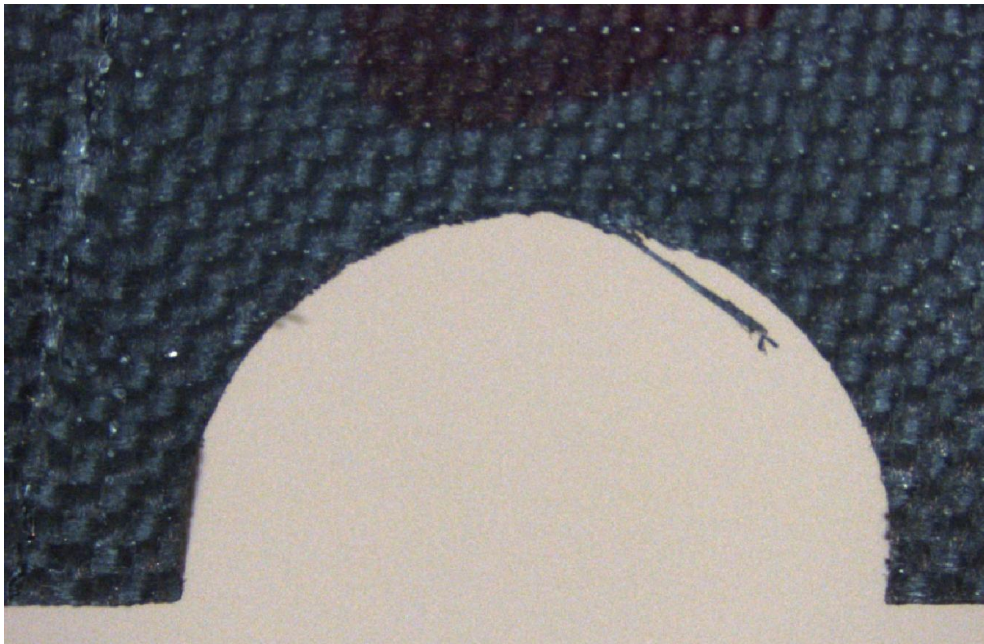


Obrázek 29: Varianta E – Spodní vrstva - Sousedně

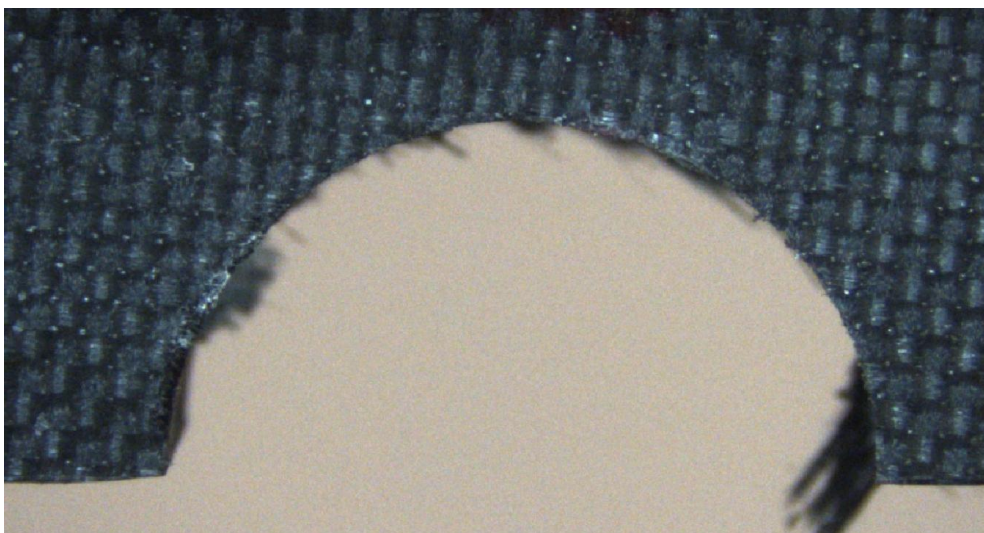


Obrázek 30: Varianta H – Spodní vrstva - Sousedně

Vrchní vrstva vzorku byla delaminována velmi zřídka, jak bude viděno na ukázkách níže. Zřídka byl zaznamenán otřep při náběhu frézy do obrobku a to při nižších posuvových rychlostech (C, D). Pro srovnání budou ukázány dvě varianty D a H. Ve variantě D ($v_f=450\text{m/min}$) byla zaznamenána delaminace typu II při náběhu frézy do materiálu, viz Obrázek 31. Varianta H ($v_f=700\text{m/min}$) byla velmi málo delaminovaná, objevily se malé úlomky po průměru díry, viz Obrázek 32.

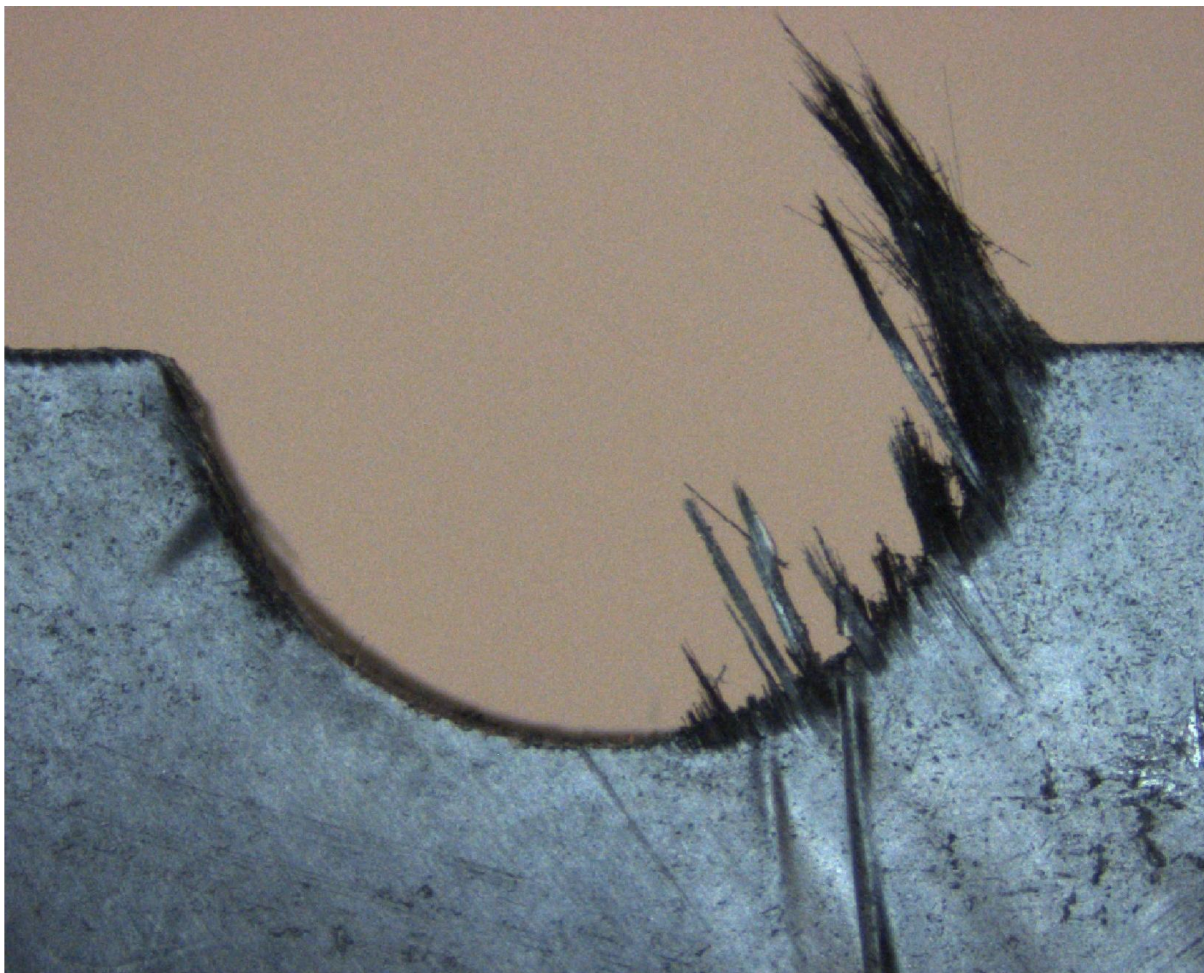


Obrázek 31: Varianta C – Vrchní vrstva – Nesousledně



Obrázek 32: Varianta H – Vrchní vrstva - Nesousledně

Pro zajímavost byly jako poslední díry frézovány variantou X s nejnižší posuvovou rychlostí $v_f = 250$ m/min, aby byl ukázán vliv opotřebení nástroje na delaminaci. Vrchní vrstva byla narušena minimálně. Na rozdíl od spodní vrstvy, která vykazuje četnou delaminaci typu II. Svou četností je srovnatelná s variantou E, viz Obrázek 33.



Obrázek 33: Varianta X – Spodní vrstva – Nesousledně

3.1.7 Shrnutí a vyhodnocení kvality povrchu

Z částečného experimentu je zjevně vidět, že nejvíce je znehodnocena kvalita povrchu delaminací. Ta roste s posuvovou rychlostí v návaznosti s opotřebením nástroje. V literatuře je udávána jako doporučená posuvová rychlost v rozmezí 200 – 500 m/min. V porovnání s experimentem je rozmezí vcelku vhodné, ovšem je třeba ji vhodně zkombinovat s otáčkami vřetene. Ve vyšších posuvových rychlostech než doporučených byla delaminace už velice četná.

V měření se vyskytovala delaminace pouze delaminace typu II neboli nenařezaná vlákna, která při frézování způsobená vysokou ohebností vláken, nebyla nařezána. Nejvíce se vyskytovala ve spodní vrstvě obráběného materiálu, na vrchní vrstvě velmi zřídka. Při srovnání s vrtáním, kde se často objevuje delaminace typu I a III při průchodu vrtáku spodní i vrchní vrstvou je obrábění otvorů frézováním z hlediska kvality povrchu kvalitnější.

Delaminace vzrůstala spolu s narůstající posuvovou rychlostí také s opotřebením nástroje. Frézy ze slinutých karbidů, pro obrábění kompozitních materiálů, bych doporučil pro čtenější výrobu otvorů povlakovat povlakovou vrstvou na bázi nitridů či oxidů. Tato vrstva snižuje při opakovatelnosti výroby nejen opotřebením nástroje, ale i teplotu řezu.

Při nízkých hodnotách tepelné roztažnosti matrice dochází při vysokých teplotách v místě řezu k tepelné deformaci, která způsobuje narušení kruhovitosti a rozměrovou nestálost otvoru. Vzhledem k tomu, že při spirálovém frézování otvoru nedochází ke styku nástroje v celé ploše díry, je zde daleko menší teplota v místě řezu než při vrtání. Obrábění je tak i lépe chlazeno a veškerý prach a tříska je dobře odsávána z místa řezu, čímž se teplota řezu snižuje.

Bylo také zjištěno, že při frézování otvoru do šroubovice nemá na kvalitu povrchu vliv sousledné nebo nesousledné obrábění, tímto je ovlivňována více rozměrová přesnost. Znatelnější ukazatel mezi sousledným a nesousledným frézováním by mohl být v porovnání měření drsnosti povrchu, vzhledem k malým rozměrům vrstev by nebylo možné zaručit přesné měření drsnosti povrchu.

Závěr

Sepsaná práce se zabývá výrobou otvorů při obrábění kompozitních materiálů. Z citovaných zdrojů byly podrobně sepsané informace, které udávají základní přehled o problémech při obrábění ovlivněné několika faktory. Mezi nejvýznamnější faktory patří složení kompozitního materiálu, od toho odvíjecí volba řezných podmínek a nástroje z hlediska geometrie či řezného materiálu.

První část práce byla věnována rozboru současného stavu ve výrobě otvorů obráběním u kompozitů. Nejdříve byl vypsán obráběný materiál, kde je uvedena charakteristika kompozitů, jejich základní rozdělení z hlediska výztuže a matrice a použití.

Vzhledem k široké škále kompozitů byla tato práce zredukována a zaměřena na obrábění otvorů FRP kompozitů. Následující část se zabývala obecnou obrobiteľností FRP kompozitů, problematice v tvorbě třísky a ortogonálním obráběním, které jsou základní teorií pro další poznatky. Dále byly sepsány další ovlivňující faktory pro obrábění, například požadavky na stroje a nástrojové materiály společně s řeznými podmínkami při obrábění.

V následující části jsou popsány dvě metody pro výrobu děr, jsou to vrtání a frézování. Byly zde sepsány a rozebrány faktory ovlivňující kvalitu obrobené plochy. Jsou to orientace vláken vzhledem ke směru obrábění, řezné síly, teplota v místě řezu a volba nástroje. Tím byl splněn první hlavní cíl práce.

Druhý cíl práce byl provést experiment pro konkrétní případ výroby otvorů obráběním. Experiment byl proveden ve firmě Compotech Plus spol. s.r.o detailně je popsán v druhé části práce. Byl zvolen materiál z CFRP kompozitu, ve kterém byly spirálově frézovány díry v sousledném a nesousledném směru při konstantních otáčkách vřetene a proměnných posuvových rychlostech. Experiment byl vyhodnocen a kvalita povrchu zkoumána na optickém mikroskopu Multicheck PC 500.

Práce s teoretickou částí, která byla sepsána z různých pramenů a experimentální částí může být do budoucna použita pro další výzkumy a návrhy metod obrábění pro FRP kompozity, které jsou kvůli neopakovatelnosti zkoumaných výsledků doporučeny.

Seznam použité literatury

- [1] DAŘOUREK, Karel. TUL V LIBERCI. *Kompozitní materiály: definice a rozdělení* [online]. 2008 [cit. 2014-06-17]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf
- [2] RSC.ORG. *Composite materials* [online]. [cit. 2014-06-24]. Dostupné z: <http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/Inspirational/resources/4.3.1.pdf>
- [3] UMI ČVUT. *Kompozitní materiály* [online]. [cit. 2014-06-24]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/files/6_kompozitni-materialy.pdf
- [4] D, Vojtěch. *Kompozitní materiály s kovovou maticí* [online]. Praha, 2006 [cit. 2014-06-24]. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pdf/152.pdf
- [5] VNOUČEK, Milan, PhD. ATEAM. *Kompozitní materiály* [online]. Plzeň [cit. 2014-06-24]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf
- [6] KOŘÍNEK, Zdeněk, CSc. MUJWEB.CZ. *Matrice* [online]. [cit. 2014-06-24]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/matrice.pdf>
- [7] SHEIKH-AHMAD, Jamal Y. THE PETROLEUM INSTITUTE. *Machining of Polymer Composites*. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2009. ISBN 978-0-387-35539-9.
- [8] STRONG, A. Brent. *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications*. Second edition. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing engineers, 2008. ISBN 978-087263854-9. Dostupné z: www.sme.org/store
- [9] Fiber-Hair. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-06-24]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cfaser_haarrp.jpg
- [10] RICHT, Christer. Další krok v obrábění kompozitních materiálů. *Metalworking World* [online]. 2010, 1/10 [cit. 2014-06-24]. Dostupné z: www.sandvic.coromant.com
- [11] TETI, R. CIRP Annals - Manufacturing Technology. *Machining of Composite Materials* [online]. 2002, Issue 2 [cit. 2014-06-24]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61703-X. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785060761703X>
- [12] JAN, Sedláček. Problémy při obrábění kompozitních materiálů. In: *MM Průmyslové Spektrum* [online]. VUT v Brně, 2007 [cit. 2014-06-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [13] JAN, Sedláček. Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů. In: *MM Průmyslové Spektrum* [online]. VUT v Brně, 2006 [cit. 2014-06-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [14] HUFCHMIED.NET. *HUFCHMIED ZERSPANUNGSSYSTEME* [online]. Germany, 2011 [cit. 2014-06-24]. Dostupné z: <http://www.hufschmied.net/media/HUF-Neuheiten-2012.pdf>
- [15] CNCSHOP.CZ. *Katalog produktů* [online]. Opava [cit. 2014-06-24]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/kress-fme1050-1-vysokootackova-frezka-1050w>
- [16] AVYAC-MACHINES.COM. *Catalogue* [online]. 2013 [cit. 2014-06-24]. Dostupné z: <http://www.avyac-machines.com/pc500-multicheck-for-england.html>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Synergické chování složek kompozitu [4].....	12
Obrázek 2: Složení kompozitu	13
Obrázek 3: Schematické rozdělení napětí v křivkách	14
Obrázek 4: Porovnání rozměru lidského vlasu s uhlíkovým vláknem[5]	16
Obrázek 5: Skelné vlákno dodávané v textilní roli	17
Obrázek 6: Uhlíkové vlákno povlakované epoxidovou pryskyřicí	18
Obrázek 7: Metoda navíjení[8]	19
Obrázek 8: Tvary třísek při obrábění CFRP	20
Obrázek 9: Vliv natočení vláken vůči směru obrábění	21
Obrázek 10: Schéma orientace vláken při vrtání jednosměrných kompozitů [7]	25
Obrázek 11: Schéma delaminace – 2 fáze[7]	28
Obrázek 12: Typy delaminace a jejich rozměry [7]	29
Obrázek 13: Schematický popis výpočtu delaminačního faktoru [7]	30
Obrázek 14: Různé úhly špičky vrtáků	31
Obrázek 15: Vliv orientace vláken při frézování jednosměrných kompozitů [7]	34
Obrázek 16: Řezné síly při nesousledném frézování	35
Obrázek 17: Fréza Hufschmied WD 108 [14]	37
Obrázek 18: CNC frézka	38
Obrázek 19: Vřeteno Kress – FME 1050-1 [15]	38
Obrázek 20: Upnutí obrobku	39
Obrázek 21: Dráha frézy – frézování do šroubovice	40
Obrázek 22: Mikroskop pro měření vnitřních průměrů	41
Obrázek 23: Mikroskop Multicheck PC 500 [16]	42
Obrázek 24: Varianta E – Vnitřní plocha - Nesousledně	43
Obrázek 25: Varianta E – Vnitřní plocha - Sousledně	43
Obrázek 26: Varianta C – Vnitřní plocha - Sousledně	44
Obrázek 27: Varianta H – Vnitřní plocha - Sousledně	44
Obrázek 28: Varianta C – Spodní vrstva – Sousledně	45
Obrázek 29: Varianta E – Spodní vrstva - Sousledně	46
Obrázek 30: Varianta H – Spodní vrstva - Sousledně	46
Obrázek 31: Varianta C – Vrchní vrstva – Nesousledně	47

Obrázek 32: Varianta H – Vrchní vrstva - Nesousledně	47
Obrázek 33: Varianta X – Spodní vrstva – Nesousledně	48

Seznam grafů

Graf 1: Závislost posuvové síly a řezného momentu na úhlu natočení vrtáku při obrábění CFRP kompozitu[7].....	26
Graf 2: Řezné síly proměnné v čase při vrtání CFRP nepovlakovaným nástrojem	27
Graf 3: Vztah mezi opotřebením a delaminačním faktorem na počtu vyvrtaných děr a řezné rychlosti	32
Graf 4: Porovnání sousledného a nesousledného obrábění	34
Graf 5: Závislost drsnosti na řezné rychlosti a posuvu [7]	36

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vlastnosti zohledňující výběr polymerní matrice[6]	14
Tabulka 2: Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních materiálů[3].....	16
Tabulka 3: Složení obráběného kompozitu	37
Tabulka 4: Řezné podmínky při frézování	40
Tabulka 5: Naměřené průměry děr po frézování	41