

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**  
**KATEDRA TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Obrábění kompozitních materiálů**

Autor:

Radek Sýkora

Vedoucí práce:

Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.

ČERVEN 2012

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojí 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.....

## **Upozornění**

Využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi je možné pouze na základě autorské smlouvy a souhlasu Fakulty strojí Západočeské univerzity v Plzni.

## **Poděkování**

Na prvním místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D., který mi svým ochotným přístupem, radami a připomínkami pomohl k vytvoření této práce. Dále bych chtěl poděkovat firmám CompoTech PLUS s.r.o. v Sušici a Hofmeister s.r.o. v Plzni za poskytnutí svých prostředků, které mi napomohly k realizování této práce.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině a blízkým, kteří mě podporovali po celou dobu studia.

Radek Sýkora

## **Obrábění kompozitních materiálů**

### **ANOTACE**

Cílem této bakalářské práce je charakterizovat kompozitní materiály, popsat metody obrábění a používané nástrojové vybavení.

První část bakalářské práce obsahuje základní pojmy, charakteristiku a rozdělení kompozitů. Druhá část se zabývá jednotlivými technologiemi obrábění kompozitních materiálů, používanými nástroji a problematikou obrábění těchto materiálů. K práci jsou přiloženy experimenty z praxe.

### **KLÍČOVÁ SLOVA**

kompozitní materiály, výztuž, matrice, vlákno, obrábění kompozitů, řezné nástroje, řezné materiály, nekonvenční metody obrábění

## **Composite materials machining**

### **ANNOTATION**

The aim of this Bachelor thesis is to describe composite materials, methods of machining and used tools.

The first part of bachelor thesis includes basic concepts, characteristic and distribution of composites. The second part deals with various technologies machining of composite materials, used tools and problems of machining these materials. The practical experiments are attached to the Bachelor thesis.

### **KEYWORDS**

composite materials, reinforcement, matrix, fibre, machining of composites, cutting tools, cutting materials, non-conventional methods of machining

## Obsah a seznam příloh

1	Úvod.....	10
2	Rozbor současného stavu.....	11
2.1	Charakteristika kompozitních materiálů .....	11
2.2	Vlastnosti kompozitu .....	11
2.3	Rozdělení kompozitních materiálů .....	13
2.3.1	Částicové kompozity.....	14
2.3.2	Vláknové kompozity.....	14
2.3.3	Rozdělení vyztužujících vláken kompozitu podle materiálu .....	15
2.3.4	Rozdělování kompozitu podle materiálu matrice .....	17
2.3.5	Sendviče.....	18
3	Obrábění kompozitů .....	19
3.1	Třísky .....	19
3.2	Chlazení.....	20
3.3	Ortogonální obrábění .....	20
3.4	Obecné obrábění.....	21
3.4.1	Soustružení.....	22
3.4.2	Vrtání, vyvrtávání .....	24
3.4.3	Frézování .....	27
3.4.4	Broušení .....	29
3.4.5	Dělení kompozitů.....	29
3.5	Nekonvenční metody obrábění .....	30
3.5.1	Elektroerozivní obrábění.....	30
3.5.2	Obrábění laserem .....	31
3.5.3	Řezání vodním paprskem s abrazivem .....	31
3.6	Kvalita obrobeneho povrchu po obráběcích operacích.....	32
3.7	Vady obrobku.....	37
3.8	Zdravotní rizika při práci s kompozity.....	39
4	Používané nástrojové vybavení .....	40
4.1	Nástroje pro soustružení.....	41
4.2	Nástroje pro vrtání.....	42
4.3	Nástroje pro frézování.....	44
5	Směr budoucího vývoje .....	46

6	Závěr .....	48
7	Seznam použité literatury .....	49
8	Seznam příloh .....	51

## Seznam zkratek a symbolů

### *Zkratky použité v textu*

- PMC – Plastic Matrix Composite (kompozity s plastickou maticí)  
MMC – Metal Matrix Composite (kompozity s kovovou maticí)  
CMC – Ceramic Matrix Composite (kompozity s keramickou maticí)  
FRP – Fibers Reinforcement Plastic (vlákny vyztužené plasty)  
GFRP, CFRP, AFRP – Glass (Carbon, Aramid) Fibers Reinforcement Plastic  
EDM – Electro Discharge Machining (elektroerozivní obrábění)  
AWJM – Abrasive Water Jet Machining (obrábění vodním paprskem s abrazivem)  
BOZP – Bezpečnost a ochrana zdraví při práci  
SK – Slinutý karbid  
PKD – Polykrystalický diamant  
HSS – High speed steel (rychlořezná ocel)  
RO – rychlořezná ocel  
KNB – kubický nitrid boru  
VBD – Vyměnitelná břitová destička

### *Symbole použité v textu*

Symbol	Název	Jednotka
D,d	Průměr trubky	[m], [mm]
p	Tlak	[MPa]
$\sigma$	Napětí v tahu	[MPa]
r	Poloměr trubky	[m], [mm]
S	Plocha	[m <sup>2</sup> ]
L	Délka	[m]
$\varepsilon$	Poměrné prodloužení	[1]
V <sub>f</sub>	Objem výztuhy/objem kompozitu	[1]



Symbol	Název	Jednotka
$V_m$	Objem matrice/objem kompozitu	[1]
$\rho$	Hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda_s$	Úhel sklonu ostří	[°]
$v_c$	Řezná rychlost	[m/min]
$v_f$	Posuvná rychlost	[m/min]
$v_e$	Rychlost řezného pohybu	[m/min]
$f$	Posuv	[mm/ot]
$P_{fe}$	Pracovní boční rovina	[1]
$\varphi$	Úhel posuvového pohybu	[°]
$\eta$	Úhel řezného pohybu	[°]
$f_v$	Frekvence vibrací	[Hz]
$I_T$	Řezná vzdálenost během jedné periody vibrace nástroje	[mm]
$F$	Síla	[N]
$F_i$	Celková řezná síla	[N]
$F_{ei}$	Řezná síla	[N]
$F_{eNi}$	Kolmá řezná síla	[N]
$F_{fi}$	Posuvová síla	[N]
$F_{fNi}$	Kolmá posuvová síla	[N]
$R_A$	Střední aritmetická úchylka rozměru	[μm]
$D_C$	Průměr vrtáku	[mm]
$n$	Otáčky	[ot/min]

## 1 Úvod

Žijeme v době rychlého rozvoje nových technologií a moderních materiálů. Tento stav si žádá zkoumání a nahrazování stávajících konvenčních materiálů novými materiály, kterými mohou být i kompozity. Materiály dříve používané především pro zbrojní průmysl a speciální odvětví výzkumu se dostávají do kontaktu s produkty používanými v normálním běžném životě. Kompozitní materiály se dnes s oblibou používají v konstrukčních aplikacích a v produktech v mnoha průmyslových oblastech. Využívá se jich především pro jejich vysoké hodnoty specifických vlastností jako pevnosti a pružnosti vztažené na jednotku hmotnosti, kterým nemůže žádný konvenční materiál konkurovat. Ačkoliv jsou materiály vyráběny obvykle do finálních tvarů a rozměrů, zvyšující se požadavky na jakost, funkčnost a estetické vlastnosti vedou k aplikování technologií obrábění. Obrobitelnost těchto materiálů je však velice problematická, a proto závisí na používaných nástrojových materiálech, geometrii a způsobu provádění obráběcích operací.

První část bakalářské práce se zabývá rozbořem současného stavu, charakteristikou kompozitních materiálů a dává nám přehled o rozdělení těchto materiálů a jejich vlastností. Další část je zaměřena na problematiku obrábění kompozitních materiálů, chování nástrojů a obráběných materiálů, především vláknových kompozitů, při různých obráběcích procesech. Následující kapitola popisuje používané nástrojové vybavení a směr budoucího vývoje, které nám odpovídají na otázku, jaké materiály a specifika nástrojů jsou pro obrábění nejvhodnější a jaké jsou předpoklady pro budoucnost zpracování a používání kompozitních materiálů.

V poslední části jsou uvedeny praktické experimenty, které byly uskutečněny na stáži při obrábění karbonových a skleněných kompozitů. Jejich výsledky kvality povrchu a stav obroběného povrchu po delaminaci byly zkoumány na digitálním drsnoměru a na optickém třídimenzionálním mikroskopu Alicona Infinite Focus. Všechny pořízené fotografie modelů a výsledků měření jsou uloženy na příloženém CD.

## 2 Rozbor současného stavu

### 2.1 Charakteristika kompozitních materiálů

Pojem kompozitní materiál znamená materiál vytvořený či složený ze dvou nebo více částí. Jedná se tedy o složený materiál. Jednotlivé složky se označují jako fáze. Pokud je heterogenní materiál složený ze dvou nebo více fází, které se vzájemně výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi a tedy i vlastnostmi výsledného složeného materiálu, jsou značně odlišné od vlastností jednotlivých fází a pokud je mezi jednotlivými fázemi zřetelné rozhraní, definujeme takovýto materiál jako kompozit. Tyto vlastnosti výsledného kompozitu nelze získat z jakéhokoliv jednoho materiálu.

Podle předchozího tvrzení nemůžeme mezi kompozity řadit například běžné kovy nebo plasty. Kovy obvykle obsahují nečistoty, popř. legující prvky. Tyto prvky nemají obvykle vlákněný charakter, jejich objemový podíl vůči základní složce je zanedbatelný. Jednotlivé složky v kovech mají téměř identické vlastnosti jako např.: modul pružnosti. Stejně tak plasty nemohou být kompozitem, jelikož obsahují plniva a malé množství apertur, pohlcovačů ultrafialového záření a jiných příměsí pro usnadnění výrobních procesů, které nemají podstatný vliv na fyzikálně mechanické vlastnosti.

Naopak nejběžnějším příkladem kompozitu je dřevo, které je tvořeno silnými a pružnými celulóзовými vlákny a lignitem. Ten slouží jako pojivo a dodává dřevu především pevnost v tlaku. Ze skupiny kovů patří mezi kompozity například perlitická ocel, jejíž mikrostruktura je tvořena vrstvou feritu a cementitu. Feritová fáze je měkká a tažná, kdežto cementit je tvrdý a křehký. Výsledné vlastnosti perlitické oceli jsou odlišné od vlastností jednotlivých fází.

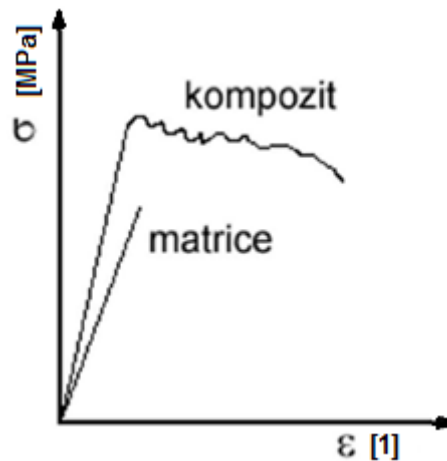
### 2.2 Vlastnosti kompozitu

Kompozitní materiály mají uplatnění kvůli svým významným vlastnostem převážně v průmyslových oblastech, kde nejsme schopni uspokojit požadavky na materiál vlastnostmi konvenčních slitinových materiálů, keramických nebo polymerních materiálů. Většinou požadujeme od materiálů kombinaci vlastností, které připadají v úvahu právě vytvořením kompozitního materiálu.

Ten je vyráběn mechanickým mísením jednotlivých fází v jeden materiál. To je podmínkou charakteristiky pro kompozity. Jedna z fází v kompozitu bývá obvykle tužší a tvrdší. Tato fáze je nespojitá a nazýváme ji výztuž. Ta zajišťuje vysoké mechanické vlastnosti, tj. určuje pevnost, tuhost, ale i elektrické vlastnosti budoucího kompozitu, a posiluje matici v preferenčních směrech. Podíl výztužné fáze v materiálu musí být větší než 5%. Podle množství použité výztužné fáze se zajišťuje intenzita zlepšení mechanických vlastností (modul pružnosti, pevnost, tuhost).

Druhé fázi, které je spojitá, říkáme matrice. Má funkci pojiva a většinou bývá poddanější. Její úlohou je chránit zpevňující fázi, rozložit napětí do vyztužujících složek, a dále zajišťuje finální podobu kompozitní součásti. Při spojování matrice s výztuží je třeba zajistit správné rozmístění výztuže v příčném řezu tak, aby byly zajištěny dobré mechanické vlastnosti. Podle druhu matrice je možné získat další vlastnosti jako odolnost proti korozi, elektro-izolační vlastnosti a odolnost proti teplotě a ohni.

Jedna z největších předností kompozitu je tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou vyšší než poměrný součet vlastností jednotlivých složek. Synergismus má velký význam, protože přispívá k získávání materiálů nových vlastností. Příkladem může být kompozit složený z keramické matrice vyztužený keramickými vlákny. Samostatné fáze jsou velmi křehké, ale výsledný kompozit se vyznačuje odolností proti křehkému porušení a mírnou houževnatostí. Důkazem je porovnání tahových digramů kompozitu a matrice.



Obr. 2-1 Porovnání tahových diagramů křehké keramické matrice a kompozitu z této matrice a křehkých keramických vláken [8]

Chování uvedeného keramického kompozitu je odůvodněno tím, že šířící se trhlina lomu je brzděna na hranici matrice a výtzuže. Dochází zde k vzájemnému tření mezi maticí a vytahujícími se vlákny a směr šíření trhlin je odkláněn. Kvalita kompozitu je tedy závislá na rozhraní mezi maticí a výtzužnými vlákny.

Vlastnosti kompozitu jdou výrazně ovlivňovány rozložením a interakcemi mezi jednotlivými složkami. Proto je důležité vzít v úvahu geometrii výtzužení vzhledem k systému, koncentraci, koncentrační distribuci a orientaci výtzužení.

**Geometrie systému** - je popsána tvarem, velikostí a způsobem vrstvení.

**Koncentrace** - udává relativní obsah fází v objemovém nebo hmotnostním podílu. Je považována za nejdůležitější parametr, který ovlivňuje vlastnosti kompozitu, a také za snadno kontrolovatelný parametr používaný pro úpravu vlastností kompozitu.

$$V_f + V_m = 1$$

Kde:  $V_f$  - (objem výtzuhy) / (objem kompozitu)

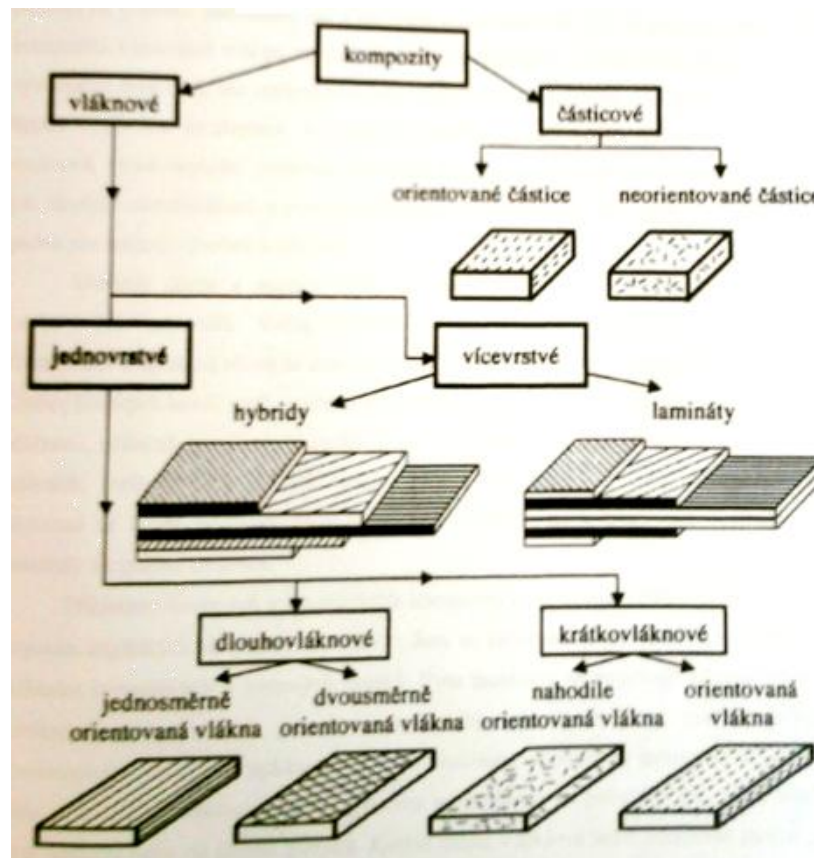
$V_m$  - (objem matrice) / (objem kompozitu)

**Koncentrační distribuce** - je míra homogenity systému. Homogenita je vlastnost určující rozsah, ve kterém se určitý objem materiálu může lišit fyzikálními a mechanickými vlastnostmi od průměrných vlastností materiálu. Nerovnoměrnosti v systému zhoršují vlastnosti a jsou řízeny nejslabším článkem. V případě, že je materiál nehomogenní, je pravděpodobnost vzniku lomu v oblasti s nejmenší pevností.

**Orientace výztuže** - ovlivňuje izotropii systému. Pokud jsou v kompozitu vyztužující částice přibližně stejné tvarově a rozměrově, ve všech směrech (rovnoosé), je materiál izotropní – vlastnosti jsou nezávislé na směru. Pokud jsou rozměry vyztužujících částic nestejně a náhodně uspořádané, může se materiál chovat jako anizotropní. V ostatních případech se chová materiál s anizotropií a může dojít k lomu, působíme-li ve směru nejhorsích fyzikálně mechanických vlastností. Opakem je možnost navrhnout extrémně lehké a pevné konstrukce, které dokážou odolávat vysokým namáháním ve směru nejlepších fyzikálně mechanických vlastností.

### 2.3 Rozdělení kompozitních materiálů

Většina kompozitů je vyráběna za účelem zlepšení mechanických vlastností, jako je pevnost, tažnost, tuhost či odolnost proti vysokým teplotám. Vlastnosti kompozitu jsou závislé na povaze výztuže, povaze matrice, ale hlavně na geometrii vyztužení. Základní rozdělení je tedy na vláknové kompozity a částicové (partikulární) kompozity. Podle velikosti příčného rozměru výztuže jsou rozděleny na mikrokompozity, makrokompozity a nanokompozity.



Obr. 2-2 Základní rozdělení kompozitních materiálů [3]

### 2.3.1 Částicové kompozity

Částicové neboli partikulové kompozity mají tvar výztuže definovaný jako nevlákenný. Nejsou tedy rozměrově dlouhé. Jeden rozměr útvarů výztuže nepřesahuje výrazně rozměr ostatních. Tvar vyztužujících částic může být kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý nebo tvarově nepravidelný. Hodnota velikosti částic určuje míru podílení se výztuže na celkových vlastnostech kompozitu. Částice v kompozitu vlivem své vlastní tvrdosti omezují rozvoj plastických deformací v matici a podílejí se na přenosu namáhání. To má za následek zvýšení tuhosti. Naproti tomu jsou méně účinné při odolnosti vůči lomu.

Jako přísady, plniva či aditiva, se běžně označují činidla, která se přidávají do matrice kompozitního materiálu. V závislosti na jejich účinnosti je dělíme na přísady redukující cenu, přísady ovlivňující výrobní proces a přísady ovlivňující funkce. Činidla jsou široce využívána pro zlepšení tepelné a elektrické vodivosti, vysokoteplotní odolnosti, obrobitelnost, zvýšení povrchové tvrdosti a odolnosti vůči opotřebení. Používají se převážně u plastů.

Volba materiálu je dána pouze požadovanými výslednými vlastnostmi. Například olovo se běžně mísí se slitinami mědi a oceli pro lepší obrobitelnost, wolfram a molybden se přidávají pro vysokoteplotní odolnost. Pro vysokou povrchovou tvrdost je příznačné přidávání karbidu wolframu do kobaltové matrice. V praxi se kompozit využívá pro přesná měřidla, nebo na průvlaky pro tažení drátů.

Příkladem částicových kovových a keramických kompozitů jsou cermety (odvozeno z anglického spojení „ceramic metal“). Je to žáruvzdorný materiál vyráběný spékáním keramických a kovových prášků. Hojně se využívá při vysokorychlostním obrábění, na pouzdra termočlánků a na vývody pecí.

Speciálním případem částicových kompozitů je tzv. vločková výztuž, která má ve všech směrech stejnou pevnost a výbornou elektrickou vodivost. Bohužel tyto kompozity se využívají z důvodu náročnosti výroby jen málo.

### 2.3.2 Vlákenné kompozity

Vlákenné kompozitní materiály se cíleně využívají již řadu let. Příkladem jednoduchých umělých kompozitů mohou být dřívě vyráběné cihly vyztužené celulozovými vlákny či dnes železobeton. Hlavním tahounem vývoje kompozitů však byla vojenská technika.

Vlákenné kompozity lze třídit na jednovrstvé a vícevrstvé. Útvary výztuže tvoří vlákna. Kompozity se podle vláken dle *obr. 2* dělí na dlouhovláknové (vlákna - vyztužená dlouhými neboli spojitými vlákny) a krátkovláknové kompozity (vyztužené diskontinuálními vlákny). Vlastnosti jsou dány orientací vláken a směrem vyztužení. Orientace krátkých vláken nelze tak snadno řídit. Většinou je orientace náhodná, popřípadě lze zařídit orientaci vláken orientovanou. Délka krátkých vláken a orientace určují vlastnosti těchto materiálů.

V kompozitech vyztužených spojitými vlákny mají vlákna funkci hlavní nosné složky a zatížení působí přímo na ně. Způsob porušení je dáno vlastnostmi vláken. Kompozit je vyráběn vkládáním vláken a následným prosycením pryskyřice, která udržuje vlákna v dané poloze. Formy, které předimpregují vlákna, se nazývají *prepregy*. Kompozit, kde jsou vlákna vkládaná rovnoběžně v jednom směru, je označován jako jednosměrný. Tyto kompozity mají vysokou pevnost ve směru vláken, avšak podstatně menší ve směru kolmém na vlákna. Prepregy se proto vkládají ve dvou nebo třech kolmých směrech. Pevnost je poté ve všech směrech stejná. Počet



směrů není vcelku omezen. Vlákna jsou navíjena ve formě rovingu, kdy výztuž je nekonečně dlouhé vlákno odvíjené ze špulky, nebo jsou spřádána do pletenin, rohoží, tkanin a podobně.

Význačnými rysy orientace vláken může být takzvaná specifická pevnost, kdy předpokládáme zatížení pouze v jednom směru, a proto je výztuž pouze jednosměrná. Cílem je velmi malá hmotnost kompozitního dílu s vysokou pevností v požadovaném směru. Řízená anizotropie znamená vědomé ovlivnění návrhu a výroby kompozitu. Příkladem může být pro představu pružné ohýbání luků a lyží, kde je směr vedení vláken úmyslně kolmý k zatěžování.

### 2.3.3 Rozdělení vyztužujících vláken kompozitu podle materiálu

- |  |   |
|--|---|
| - Skleněná                             | - Borová                                    |
| - Uhlíková                             | - Přírodní (rostlinná, azbestová, čedičová) |
| - Polymerní (aramid, APA, PI, PET,...) | - Proteinová                                |
| - Keramická                            | - Piezoelektrická                           |

#### *Skleněná vlákna*

Textilní výrobky ze skla se používají především na izolace a zpevnění jiných materiálů. Sklo se vyznačuje poměrně vysokou pevností, odolností proti abrazi a nízkým modulem pružnosti. Výhodou je odolnost proti ohni a chemikáliím. Nežádoucí pro vlákna je vlhkost, která snižuje pevnost. Podle obsahu jednotlivých složek a chemických prvků jsou vyráběna různá skleněná vlákna, která se odlišují svými vlastnostmi.

#### *Uhlíková vlákna*

Od ostatních textilních vláken se odlišují především svou křehkostí. Jinak mají nejširší spektrum mechanických vlastností při poměrně malé hustotě. Vyznačují se svou vysokou pevností, modulem pružnosti a abrazivními schopnostmi. Například nanovláknem 0,2  $\mu\text{m}$  se vyznačuje pevností v tahu až 7 000 MPa a modulem pružnosti 600 GPa. Hlavním důvodem k získání materiálů se super vlastnostmi je princip výroby. Uhlíková vlákna se dnes vyrábějí především z polyakrylonitrilových vláken (PAN) a nově také z vláken novoloidu – vláken fenol-aldehydových. Nevýhodou je vysoká cena. Při styku s kovem dochází k elektrochemické korozi kovu.

#### *Aramidová vlákna*

Největší předností polymerních vláken je nízká hustota a vysoká poměrná pevnost v tahu. Jako jedny z mála vláken nejsou křehké. Nejznámější produkty polymerních vláken jsou z aromatických polyamidů (aramidy, APA) od firmy Du Pont, která vyrábí produkty Kevlar a Nomex. Produkty z Kevlaru, jichž je mnoho druhů, jsou vyráběny díky svým vlastnostem především pro armádní, letecký a lodní průmysl, a pro mnoho jiných oblastí, kde je vyžadována vysoká pevnost. Materiál Nomex je využíván především pro výrobu voštin, nehořlavých oděvů a rukavic kvůli odolnosti proti vysokým teplotám, hořlavosti a chemikáliím.

Materiál	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
Ocel	cca 210	800 až 1100	7850
Hliníkové slitiny	cca 73	cca 400	2780
Uhlíkové vlákno, běžná kvalita	cca 200 až 230	3100	1750
Skleněné vlákno, běžná kvalita	cca 70 až 80	2000 až 4000	2500
p-aramid (Kevlar 29)	83	3600	1440
p-aramid (Kevlar 49)	131	3600 až 4100	1440
p-aramid (Kevlar 129)	186	3400	1470
Epoxidová matrice	cca 3,5 (zanedbatelné vůči vláknu)	70 (zanedbatelné vůči vláknu)	1150
Jednosměrový kompozit, 50 % objemu vlákno	cca 100	cca 1500	1875
Kompozit s ortogonální vazbou výztuže, 50 % objemu vlákno	cca 48	cca 530	1875

Tabulka 2-1 Vlastnosti vybraných materiálů [6]

Protože jsou jednotlivá vlákna velmi malá, jsou spřádána do svazků, se kterými se později pracuje jako s výztuží. Vlákna mohou být zpracována několika způsoby.

**Roving (pramence)** – vyrábí jako přímý, skaný v družení nebo smyčkový například technologií tažením (pultruzí), který dodává profilům příčnou pevnost a odolnost proti abrazi. Obvykle se jedná o nekonečné vlákno dodávané na cívkách s vnitřním nebo vnějším odtahem.

**Tkanina** – jedná se o tkanou výztuž z rovingů jako běžná textilie. Pramencové tkaniny se poté tkají s vazbovou, keprovou nebo atlasovou vazbou v různých gramážích. Čísla textilií označují jemnost vlákna.

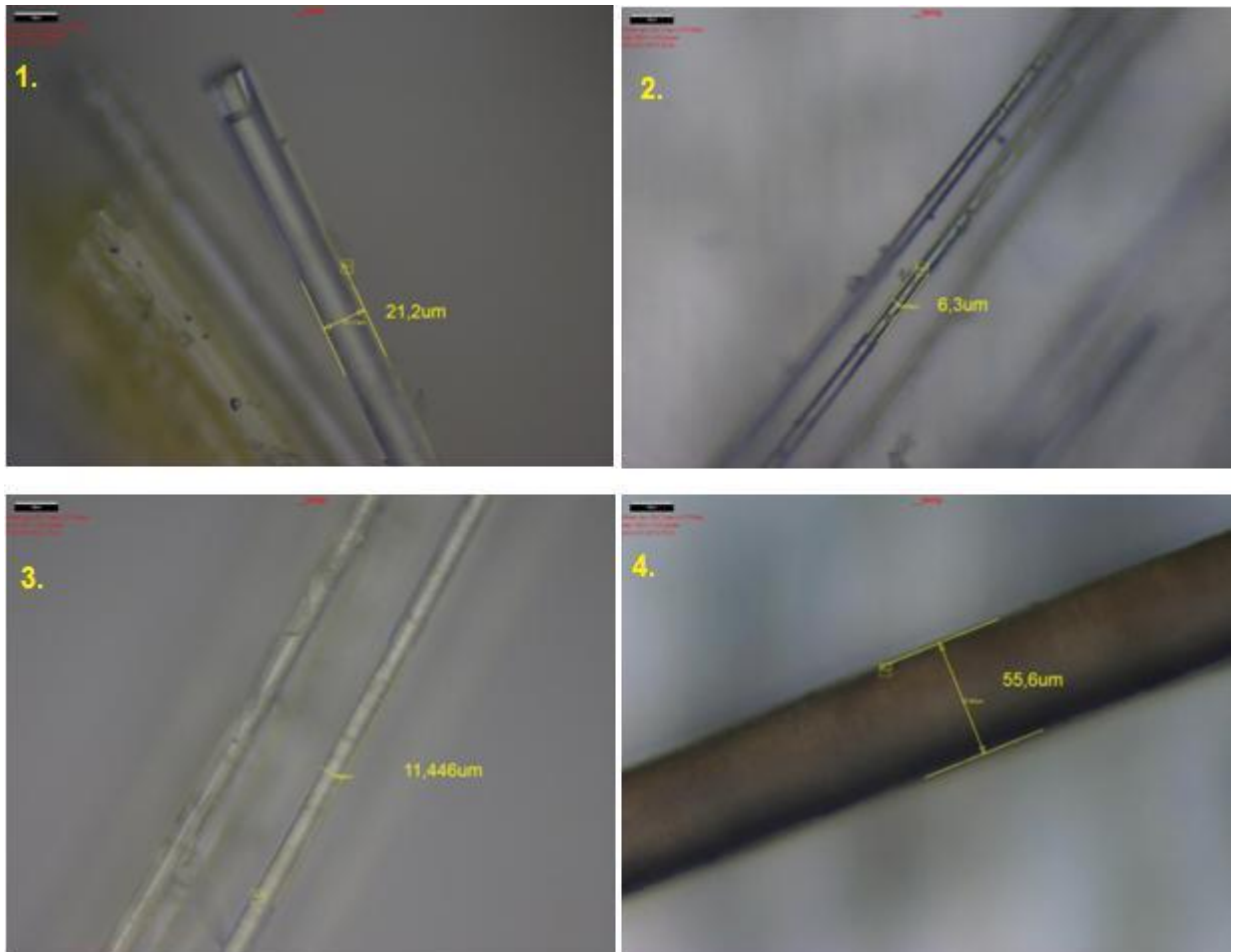


Obr. 2-3 Typy tkaní [9]



**Rohože** – vznikají ukládáním nepravidelně orientovaných vláken sekaných pramenců a dlouhých vláken. Jsou prosycovány práškovým pojivem nebo emulzí a spojovány do ploché kontinuální rohože. Jsou také používány pro tvarově složitější dílce.

Na *obrázcích 2-4* jsou porovnány rozměry jednotlivých druhů vláken s rozměrem vlasu.



Obr. 2-4 Velikost jednotlivých vláken v porovnání s vlasem, měřeno na mikroskopu Alicona, 500x zvětšeno  
1. Skleněné vlákno, 2. Uhlíkové vlákno, 3. Aramidové vlákno, 4. Vlas

### 2.3.4 Rozdělování kompozitu podle materiálu matrice

- *kompozity s plastickou maticí (PMC – Plastic Matrix Composite)*

Jedná se o vlákna vyztužené plasty (FRP). Podle vyztužujícího materiálu se odvíjí následující písmenové značení GFRP, CFRP, AFRP (G – Glass, C – Carbon, A – aramid). Matrice je obvykle z termosetů (PE, Epoxid) nebo termoplastů (PA, PEEK).

- *kompozity s kovovou maticí (MMC – Metal Matrix Composite)*

Můžou obsahovat dlouhá, krátká vlákna – whiskery (fousy) a částicové vyztuže z SiC, C, Al. Matrice je nejčastěji z Al, Mg, Ti. Kompozity jsou vhodné pro vyšší provozní teploty.

- **Keramické kompozity (CMC – Ceramic Matrix Composite)**

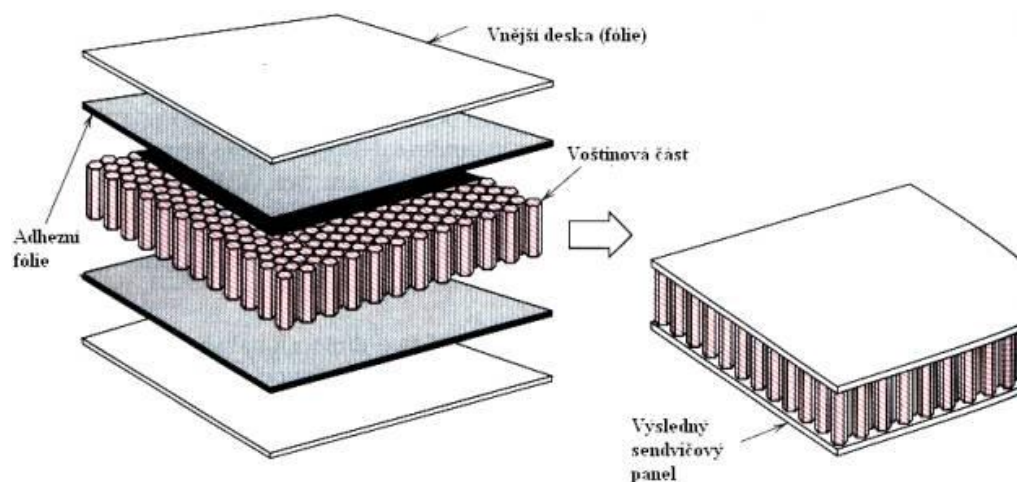
Jsou vyvíjeny pro zlepšení lomové houževnatosti a vyšší mechanické vlastnosti při vysokých teplotách. CMC jsou vyztužovány SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

### 2.3.5 Sendviče

Zvláštním druhem vícevrstvého laminárního kompozitu jsou tzv. sendviče. Tento kompozit se skládá ze dvou vnějších vrstev (potahů, plášťů), které překrývají jádro ve středu materiálu (mezivrstvu) z lehkého materiálu. Vnější vrstvy jsou tenké ale tuhé, oproti tomu vnitřní část je obvykle tlustší a je zpravidla z méně pevné hmoty. Takovýto sendvičový panel se oproti jednoduchým laminátům vyznačuje vyšší tuhostí, izolačními vlastnostmi a přibližně poloviční vahou. Na vnější vrstvy sendviče působí tlakové a tažné síly. Proto jsou na vnější vrstvy používány lamináty vyztužené skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. Pro některé účely také kovové folie. Vnitřní distanční materiál (jádro) musí snášet smyková napětí a udržet si velikost průřezu. Sendviče se uplatňují obdobně jako I (“íčkový“) kovový profil. Jako jádra se nejčastěji používají například voštiny, balza – lehké dřevo se speciální strukturou a orientací vláken lignitu, či polymerní pěny na bázi PVC, polyuretanu nebo polystyrenu. Výroba spočívá v nanášení pryskyřice na vnější vrstvy kompozitu a následného spojení s jádrem. Pro optimální spojení je kompozit zatížen hydraulickým lisem. Využití je široké od trupů lodí, letadel až po díly ve stavebnictví, k rotorům větrných elektráren.

#### Voštiny

Voštiny se vyrábějí různými technologiemi, kdy se formují z plošného materiálu na šestihranné tenkostěnné plásky. Výchozími materiály jsou tenké hliníkové plechy, Nomex – prosyčené aramidové tkaniny epoxidovou pryskyřicí, ale také papír nebo textilie prosycené polyesterovou nebo fenolovou pryskyřicí. Vyznačují se šestihrannou nebo např. pyramidovou strukturou.



Obr. 2-5 Složení sendvičového kompozitu s voštinovým jádrem [10]

### 3 Obrábění kompozitů

Ačkoliv je mnoho výrobků z kompozitních materiálů vyráběno do finálních rozměrů, zvyšující se požadavky na jakost, funkčnost a estetické vlastnosti vedou k aplikování technologií obrábění. Z důvodu objemu informací je práce zaměřena především na obrábění FRP kompozitu.

Obrábění kompozitních materiálů se výrazně liší v mnoha aspektech od obrábění konvenčních kovů a jejich slitin. Při obrábění kompozitu je chování nehomogenní a anizotropní. Hlavním rozdílem je, že břit nevytváří třísku stříhem, ale materiál odlamuje. V řezu břit nástroje naráží střídavě na matrici a výztuž. V praxi to znamená, že dochází k odřezávání poměrně měkké pryskyřice a zároveň k řezání či odlamování tvrdých vláken výztuže. Z hlediska struktury materiálu záleží na druhu výztuže, vlastnostech matrice, ale především na objemovém množství jednotlivých složek. Reakce na obráběcí nástroj může být zcela odlišná. Při obrábění kompozitu je kladen velký důraz na volbu geometrie a odolnosti proti opotřebení nástrojů, tj. zajistit vytváření správného řezu a výběr nástroje.

#### 3.1 Třísky

U obrábění kompozitních materiálů nastává problém s obroběným materiálem, tj. třískami. Hlavním rozdílem od obrábění kovů je, že při procesu nevznikají plynulé třísky, ale dochází k odlamování materiálu břitem ve formě prachu a jemných měkkých třísek. Tento prachový odpad a třísky musí být odstraněny z místa řezu odsávacím zařízením. Odsávací zařízení jsou poměrně výkonná, aby prach nebyl rozvířen do okolí.



Obr. 3-1 Porovnání kompozitových (karbonových) a kovových třísek

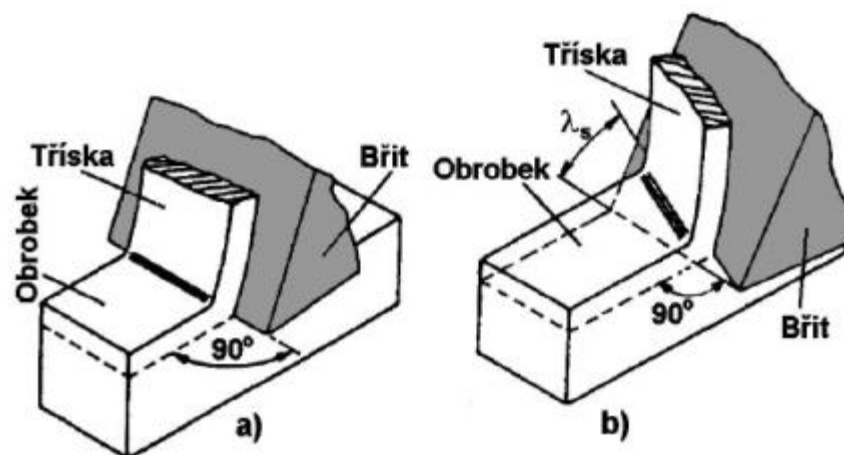
Při obrábění sklolaminátů je důvodem odsávání nejen čistota, ale především i zdravotní důvody. Při obrábění karbonu je odsávání prachu nutné z důvodu silných abrazivních účinků uhlíkového prachu na styčných plochách (ložích a posuvných ploch), ale také z důvodu elektrické vodivosti. Uhlíkový prach v elektroinstalaci může způsobit zkrat a následně poškodit obráběcí stroj.

### 3.2 Chlazení

Chlazení při obrábění kompozitu je ve většině případů nemožné z důvodu nasákivosti materiálu. Kompozitní materiály jako například karbon jsou velmi porézní. Olejové emulze zasychají a zůstávají v pórech kompozitu a následné lepení materiálů není možné. Při použití chladicí kapaliny s olejovou příměsí při obrábění, je možné poté mastnotu z materiálu jen těžce odstranit. Pokud obráběcí proces vyžaduje chlazení v místě řezu, například z důvodu snížení pevnosti matrice v místě řezu, je možné použít chlazení vodou, speciálními roztoky nebo vzduchem. Oproti tomu kompozity s kovovou maticí je nutné při obrábění chladit.

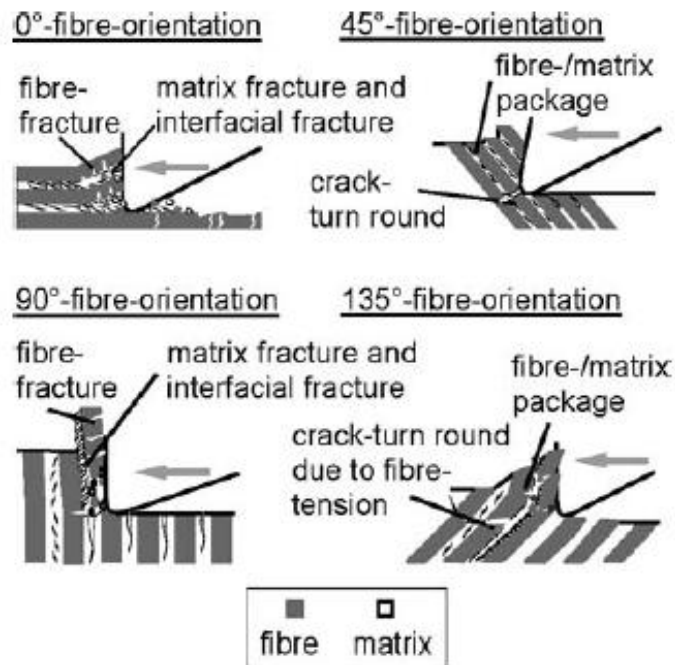
### 3.3 Ortogonální obrábění

Při procesu ortogonálního obrábění je ostří nastaveno kolmo na směr řezného pohybu a daná problematika je řešena v rovině. Typickým příkladem ortogonálního řezání materiálu je proces zapichování, frézování nástrojem s přímými zuby, protahování apod. Proces je schematicky zobrazen na *obr. 3-2 a*).



Obr. 3-2 Realizace řezného procesu: a) ortogonální řezání, b) obecné řezání [11]

Při obrábění FRP kompozitů může nastat několik způsobů odebrání třísek. Záleží na orientaci vláken v obráběném materiálu. Podle úhlové orientace vláken mohou nastat 4 způsoby styku obráběného materiálu s břitem nástroje.



Obr. 3-3 Princip řezání FRP kompozitů [2]

Pokud je orientace vláken pod úhlem  $0^\circ$ , je laminát vystaven napětí rovnoběžně s vlákny a kromě toho je povrch pod ostrím stlačován. K selhání materiálu dochází před ostrím břitu. Dochází k delaminaci a praskání matrice či k praskání na rozhraní mezi vyztužujícími vlákny a matricí před břitem. Viditelné jsou i lomy vláken a matrice na povrchu pod ostrím, které zůstávají na opracovaném povrchu.

Jak se úhel mezi směrem řezání a orientací vláken zvětšuje, vlákna jsou stlačována a namáhána na ohyb. To má za následek fraktury materiálu, které sahají do neobrobeného povrchu. Nejméně příznivé zátěžové směry pro obrábění FRP jsou zejména kompozity s úhly  $30^\circ$  a  $60^\circ$  směru vláken, kde se odráží ve špatné kvalitě povrchu.

Pro kompozity s orientací vláken  $90^\circ$  směru vláken jsou vystaveny namáhání na ohyb a stříh. Na rozdíl od materiálů s úhlem  $0^\circ$  je řezáno každé vlákno zvlášť. Tlaková deformace kolmo na vlákna vytváří problémy mezifázové fraktury rozšířené do neobrobeného povrchu.

Nejvýhodnější způsob obrábění je pod úhlem  $135^\circ$ . Vlákna jsou vystavena na ohyb a tah a praskají ve svazcích. Problémy však vznikají ze skutečnosti, že jednotlivá vlákna mohou být vytahována z důvodu nedostatečné přilnavosti k matrici.

V příloze je uveden experiment ortogonálního obrábění. Jedná se o soustružení zápichu do obvodu karbonového kompozitu. (Příloha č. 1)

### 3.4 Obecné obrábění

Řezný proces je řešen v prostoru. Příkladem obecného řezání je podélné soustružení, vrtnání, frézování nástrojem se zuby ve šroubovici apod. Ačkoliv je obrábění FRP jen zřídka žádoucí, nemůžeme se tomuto procesu vyhnout z důvodu konečné geometrie, kvality povrchu a rozměrové přesnosti vyráběných dílů. Soustružení, řezání, vrtnání a frézování patří k nejdůležitějším technologiím obrábění FRP.

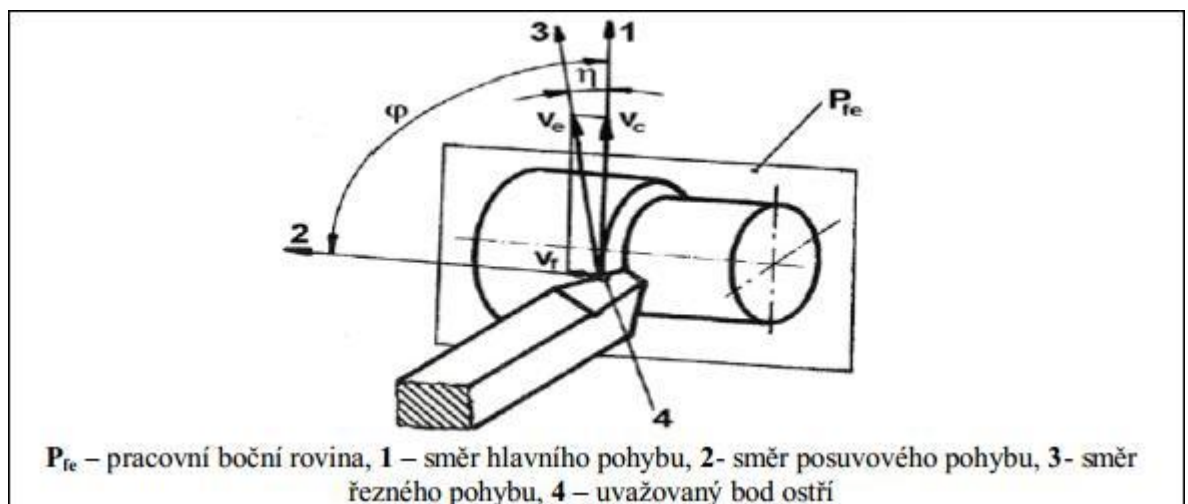


### 3.4.1 Soustružení

Soustružení je metoda obrábění jednobřítým nástrojem za současného otáčení obrobku, která se používá pro zhotovení rotačních součástí. Je to univerzální metoda obrábění velmi využívaná ve strojírenství. Soustružením lze obrábět vnější a vnitřní válcové plochy, rovinné čelní plochy, kuželové i tvarové plochy nebo zápichy. Dále je možné na soustruzích zhotovit vrtané díry, závity nebo provést povrchovou úpravu na válcové ploše.

#### *Kinematika obráběcího procesu*

Hlavní pohyb koná rotační pohyb obrobku, přičemž rychlost pohybu je současně řeznou rychlostí  $v_c$ . Řezný nástroj vykonává posuvný pohyb, který je přímočarý nebo obecný a má rychlost posuvového pohybu  $v_f$ . Řezný pohyb je realizován po šroubovici, při čelním soustružení po Archimédově spirále a při soustružení rotační plochy po obecné prostorové křivce. Rychlost řezného pohybu se značí  $v_e$ .



Obr. 3-4 Kinematika podélného soustružení válcové plochy [4]

#### *Soustružení kompozitů*

Operace soustružení je aplikována především na rotační symetrické díly, jako jsou ložiska, vřetena nebo jiné válcové součásti z kompozitních materiálů. Liší se od frézování tím, že dochází téměř ke konstantnímu řezání. Kromě kolísavého napětí způsobeného různým chováním vláken a matrice, vzniká během obrábění FRP kvazi-kontinuální stříh. Obrobitelnost je tedy primárně určena fyzikálními vlastnostmi vláken a matrice, stejně jako orientace vláken a objemový podíl jednotlivých fází. Navíc obrábění kompozitu s krátkými vlákny je mnohem jednodušší než obrábění jednosměrných FRP. Zatímco vlákna skla a uhlíku jsou při namáhání v ohybu křehká a praskají, aramidová vlákna praskají až po velkém tlaku a deformaci v ohybu.

Pro správné soustružení kompozitních materiálů je nutné zajistit vhodné řezné podmínky. K soustružení CFRP a GFRP je nejvíce využíváno nástrojů s vyměnitelnými destičkami. Nejpoužívanějšími jsou destičky z SK nebo destičky z SK povlakované vrstvou z PKD. Pro soustružení jsou nejvhodnější nástroje s kladnou geometrií s velmi tvrdým a ostrým břitem, aby docházelo k řezání silně abrazivních vyztužujících vláken. Při obrábění CFRP je vhodné zajistit kontinuální řez karbidickým nástrojem, neboť u přerušovaného řezu dochází k vyššímu opotřebení. Pro zvýšení životnosti je třeba zkorigovat na každém nástroji úhel hřbetu. S narůstajícím úhlem hřbetu je nástroj ostřejší. Musíme ale poznamenat, že se vzrůstajícím úhlem hřbetu je zeslabováno ostří (úhel břitu) a nástroj je náchylnější na lom. Díky rázům může dojít k odštípnutí nebo ulomení části břitu.



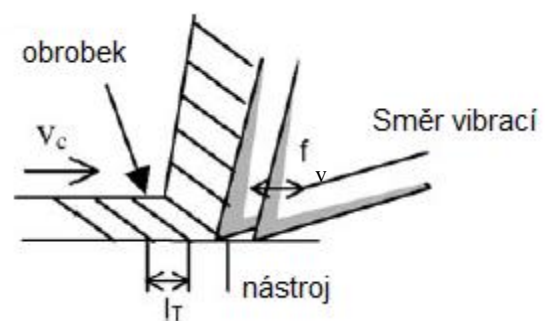
Obr. 3-5 Podélné soustružení sklolaminátu

Při soustružení kompozitních materiálů nemá orientace vláken tak výrazný vliv na sledované hodnoty drsnosti povrchu. Pro orientaci vláken  $0^\circ$ , tj. podélně navíjená vlákna, jsou při styku s řeznou špičkou nástroje namáhána kolmo pod úhlem  $90^\circ$ . Vlákna jsou namáhána na ohyb a dochází k přelamování vláken kolmo na vedení. Dochází k silné delaminaci, roztřepení a vylamování vláken z povrchu materiálu. Obrobený povrch je hrubší. Při podélném soustružení dochází k roztřepení na rozhraní mezi obrobeným a neobrobeným povrchem. Na přechodu jsou vlákna vytahána do obrobeného povrchu.

Soustružením vrstvy s orientací vláken  $90^\circ$  dochází k vyřezávání celých vláken po obvodu obrobku. Vlákna jsou namáhána na tlak a břit způsobuje praskání materiálu na rozhraní fází. Výsledný povrch se zdá být vroubkovaný.

Je-li obráběna vrstva materiálu s vlákny pod úhlem  $45^\circ$  či  $135^\circ$ , jsou vlákna namáhána na ohyb a tlak. Kvalita povrchu a průběh obrábění šikmo navíjených vláken je zcela nejlepší.

Protože je obtížné obrábět CFRP s vysokou účinností, je možné použít ultrazvukové vibrační soustružení s použitím nástroje z PKD. Ultrazvukové vibrační řezání umožňuje získat dobrý kvalitní povrch u složitě obrobitelných materiálů. Vibrace umožňují vyhnout se nepřetržitému kontaktu mezi obrobkem a břitem nástroje. Cílem je dosáhnout stříhu samostatně jednotlivých vláken a matrice. To je dáno řeznou vzdáleností během jedné periody vibrace nástroje  $I_T$ . Princip postupu ultrazvukového vibračního řezání je na obrázku vpravo.

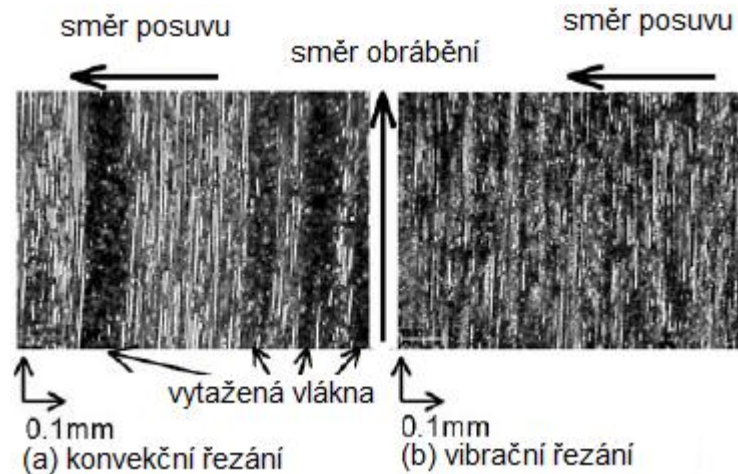


Obr. 3-6 Mechanismus ultrazvukového vibračního řezání [2]

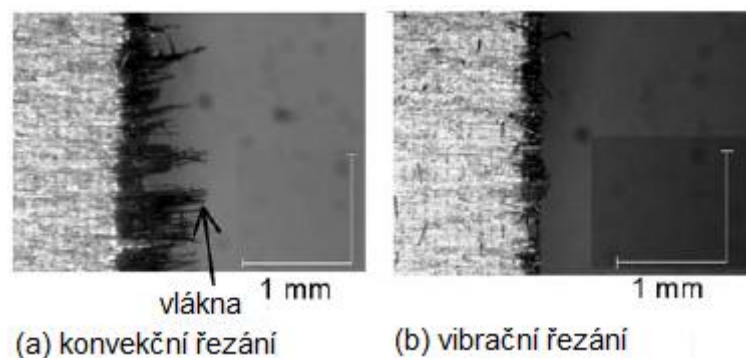
$V_C$  – řezná rychlost;  $f_v$  – frekvence vibrací;  $I_T$  – řezná vzdálenost během jedné periody vibrace nástroje

Porovnání mezi konvenčním soustružením a ultrazvukově vibračním soustružením je na snímkách pořízených z mikroskopu. Povrch po vibračním soustružení u materiálu s menším

průměrem vláken je výrazně lepší. U materiálů s většími průměry vláken je drsnost povrchu podobná.



Obr. 3-7 Mikroskopické snímky obroběného povrchu s orientací vláken 0° [2]



Obr. 3-8 Mikroskopické snímky na hraně s orientací vláken 90° [2]

V příloze je uveden experiment podélného soustružení v jednotlivých vrstvách struktury kompozitu. (Příloha č. 2)

### 3.4.2 Vrtání, vyvrtávání

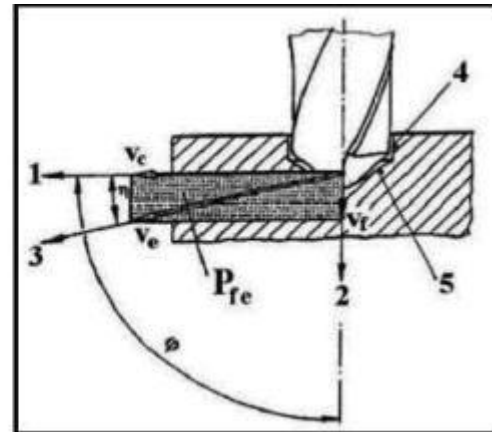
Vrtání je výrobní metoda pro zhotovení díry v plném materiálu nebo zvětšení již vyrobené díry. Tím jsou myšleny díry předvrtané nebo předlité. Vrtání může být prováděno na vrtačkách nebo na soustruzích.

#### *Kinematika obráběcího procesu*

Hlavní rotační pohyb koná obvykle nástroj (vrták), který vstupuje do materiálu pomocí vedlejšího pohybu (posuvu)  $v_f$  ve směru osy. Vrtání probíhá obvykle kolmo do materiálu, ale může nastat i případ, kdy je otvor vyvrtáván šikmo do materiálu nebo do křivé plochy, např.: vrtání do koule.



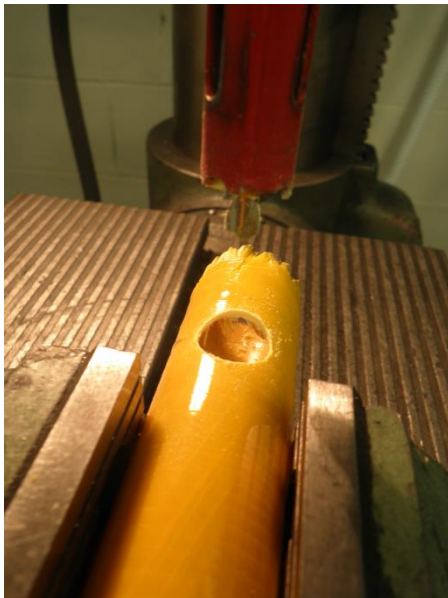
- 1 – směr hlavního pohybu,
- 2 – směr posuvového pohybu,
- 3 – směr řezného pohybu,
- $v_c$  – řezná rychlost,
- $v_f$  – posuvová rychlost,
- $v_e$  – rychlost řezného pohybu,
- $P_{fe}$  – pracovní boční rovina,
- $\varphi$  – úhel posuvového pohybu,
- $\eta$  – úhel řezného pohybu. [3]



Obr. 3-9 Kinematika obráběcího procesu vrtání [4]

### Vrtání kompozitů

Obrábění kruhových otvorů je důležitá operace k následujícímu výrobnímu procesu. Vrtané otvory jsou využívány pro zavádění jiných částí, spojovacích elementů nebo pro manipulaci. Další části výrobků bývají často z odlišných materiálů například kovů, než je základní část. Potom se tyto dvě části mohou spojovat například kompozitovou textilií.

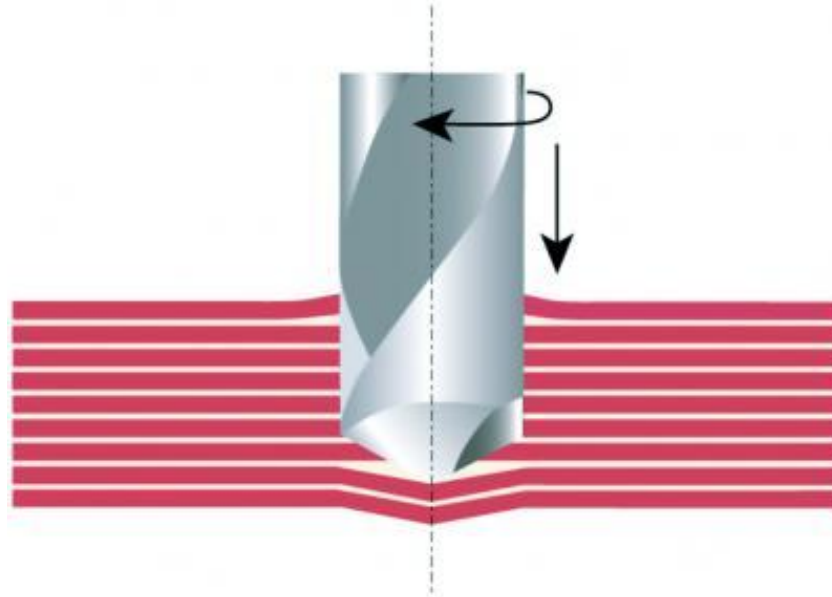


Obr. 3-10 Vrtání sklolaminátu bimetallickou korunkou

vrchu vrtané díry tedy závisí výhradně na geometrii ostří a řezných podmínkách. V příloze je uveden experiment vrtání (Příloha č. 3)

Obráběcí proces vrtání způsobuje při obrábění vláknových kompozitů největší problémy. Tento problém je v odborné literatuře nazýván delaminace. Delaminaci můžeme charakterizovat jako odlupování povrchové vrstvy při vstupu do materiálu a při výstupu jako odlupování neobrobené vrstvy pod nástrojem, která je nástrojem vytlačena. To je způsobeno tlakovou silou od špičky ostří nástroje (vlivem posuvu) a otáčivým momentem (otáčkami) nástroje. Proto je třeba navrhnout optimalizované řezné podmínky. Protože jsou vlákna v kompozitu silně abrazivní, vzrůstá opotřebení nástroje. S ním stoupá i odpor materiálu proti přítlačné síle a otáčkám, což má za následek vzrůstající teplotu v místě řezu. Z těchto důvodů jsou pro obrábění nejvhodnější abrazi odolné řezné materiály s dobrou tepelnou vodivostí.

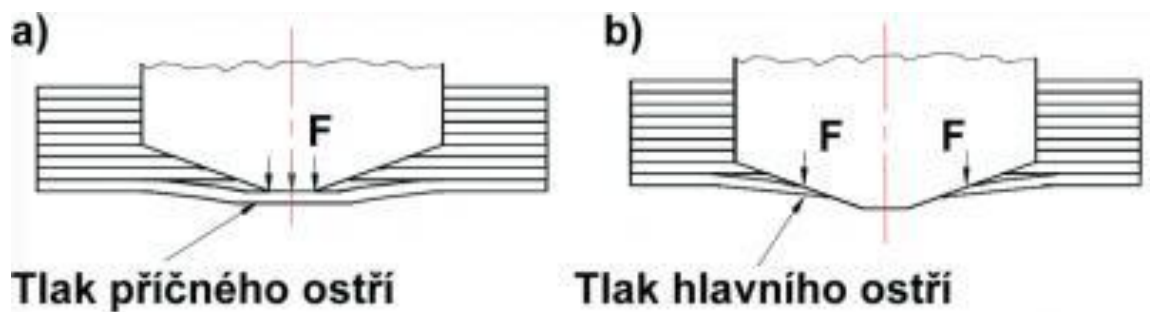
Při vrtání desky kolmo k vrstvám kompozitu nezáleží na směru vedení vláken. Dochází k obrábění všech směrů vláken najednou, tj. obráběcí proces je nestálý, a proto není možné přesně určit průběh obrábění. Kvalita a drsnost po-



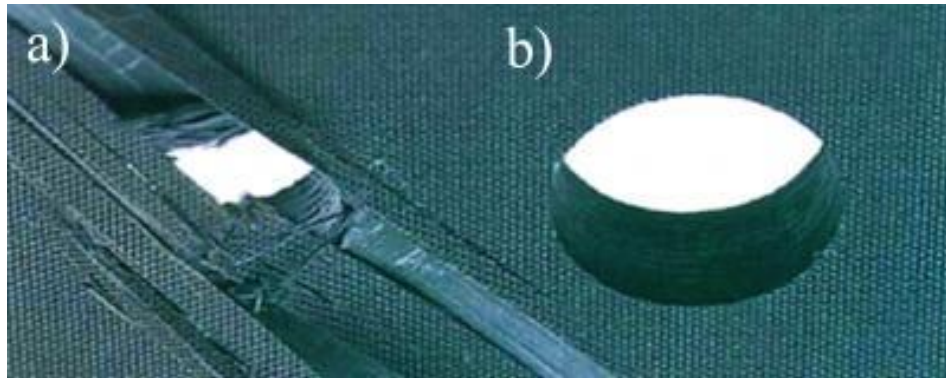
Obr. 3-11 Princip delaminace [12]

### *Analýza delaminace*

Delaminace vzniká mezi jednotlivými vrstvami laminátu. Její průběh probíhá ve dvou etapách. Pokud budeme vrtat klasickým šroubovým vrtákem, delaminace v první fázi probíhá na příčném ostří, které působí tlakovou silou na dosud neobrobený materiál (na první vrstvu materiálu), kde dosáhne kritické hodnoty. Na této hodnotě setrvává, dokud nepronikne příčné ostří opět ven. Deformace nastanou malým vydutím v okolí osy vrtání a dále se šíří ve směru vláken v povrchové vrstvě. V okamžiku, kdy vyboulení dosáhne kritické hodnoty, se vrstva rozevře. Po té co pronikne příčné ostří ven, následuje druhá etapa. Delaminace se v důsledku otáčení hlavního ostří a tlaku dále rozvíjí. Klíčovou roli při procesu sehrává velký negativní úhel na příčném ostří, který se zařezává do materiálu obrobku a tvoří 50% posuvové síly. V momentě, kdy příčné ostří projde materiálem ven, delaminace dosáhne své konečné velikosti.



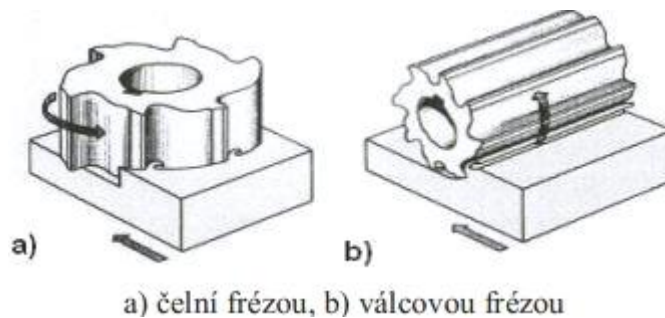
Obr. 3-12 Fáze vzniku delaminace [12]



Obr. 3-13 Díry vyvrtané do kompozitu – a) díra s delaminací, b) správně vyvrtaná díra [12]

### 3.4.3 Frézování

Frézování je metoda obrábění, při které otáčející se nástroj (fréza) odebrává břitem třísky z obrobku. Posuv obvykle koná obrobek ve směru kolmém na nástroj. U moderních frézovacích strojů je možné plynule realizovat a měnit posuvy ve všech směrech najednou. Řezný proces je přerušovaný, kdy každý zub frézy odřezává malé třísky s proměnou tloušťkou. Z technologického hlediska, podle aplikovaného nástroje, rozlišujeme frézování válcové (obvodem) a frézování čelní (čelem frézy).



Obr. 3-14 Způsoby frézování [4]

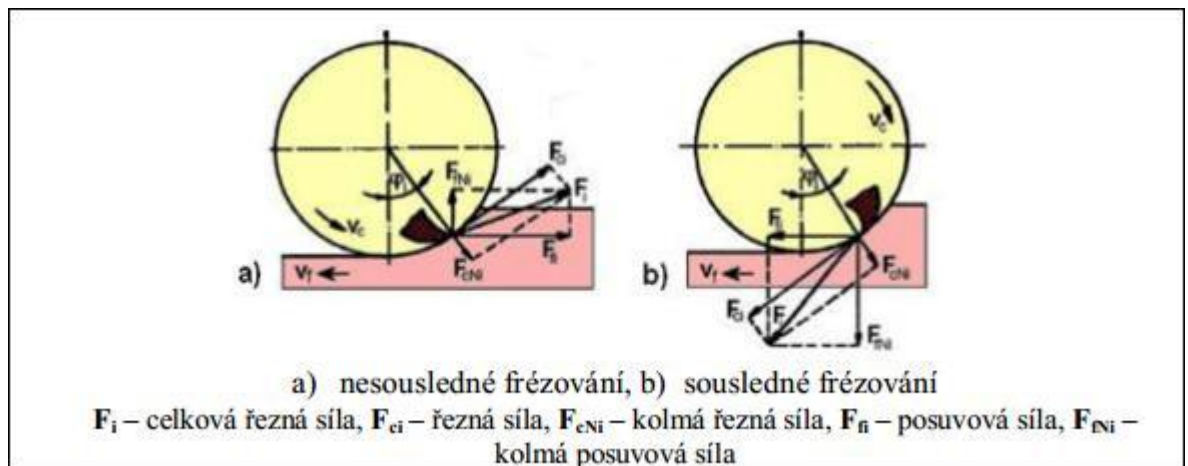
#### *Kinematika a řezné síly obráběcího procesu*

V závislosti na kinematice obráběcího procesu rozdělujeme frézování na sousledné (sousedné) a nesousledné (protisměrné).

Při **sousledném frézování** se nástroj otáčí ve směru posuvu obrobku. Při vnikání zubů frézy do obrobku zabírá břit maximální tloušťku třísky a obrobená plocha vzniká při výstupu zubu ze záběru. Řezné síly působí obvykle dolů do stolu stroje. Výhodami sousledného frézování jsou vyšší trvanlivost břitů, což umožňuje použití vyšších řezných rychlostí a posuvů, menší potřebný řezný výkon, jednodušší upínání obrobků (řezné síly působí do stolu), menší sklon k tvorbě nárůstku a v neposlední řadě menší drsnost obrobené plochy.

Při **nesousledném frézování** dochází k otáčení nástroje v protisměru posuvu obrobku. Tloušťka třísky při záběru se mění z nulové hodnoty na hodnotu maximální. K oddělování třísky dochází po určitém skluzu břitu po ploše vytvořené předcházejícím zubem. Při tomto procesu vznikají silové účinky a deformace, způsobující zvýšené opotřebení břitu. Řezná síla působí

směrem nahoru a odtahuje obrobek od stolu stroje. Výhodami jsou lepší záběr zubů frézy při jejich vřezávání na hloubce řezu a menší opotřebení šroubů a matice. Navíc trvanlivost nástroje nezávisí na povrchu obrobku (okuje, písčité povrch).



Obr. 3-15 Řezné síly při frézování [4]

### Frézování kompozitů

Frézovací operace prováděné na vláknových kompozitech, na rozdíl od kovových materiálů, se vyznačují nízkým poměrem odebraného materiálu z celkové části objemu. Frézování je používáno zpravidla jako korektivní dokončovací operace obrábění nebo k výrobě definované pro vysokou kvalitu povrchu. Nejdůležitějšími faktory, jimiž se řídí výběr nástroje a nastavení obráběcích parametrů, jsou typ vláken výztuže, struktura a objemový podíl matrice. V případě skleněných a uhlíkových vláken, díky abrazi, určuje výběr nástroje řezný nástrojový materiál, který musí mít vyšší tvrdost a pevnostní vlastnosti pro řezání tvrdých vláken. V případě aramidových vláken je to geometrie nástroje, která určuje výběr nástroje. Protože aramidová vlákna musí být řezána za současného předpětí vláken.

Chování materiálu při frézovacích operacích je stanoveno především vlastnostmi vláken výztuže v kompozitu. Tento jev má hlavní vliv na proces výběru parametrů nebo vhodnosti nástrojových konceptů. Vzhledem k tomu, že při frézování dochází k obrábění více směrů vláken najednou, je potřeba vhodně zvolit řezné podmínky.



Obr. 3-16 Frézování kompozitu dvoubřítou frézou [13]



### 3.4.4 Broušení

Metoda obrábění broušením kompozitů se používá, stejně tak jako u broušení kovových částí, převážně pro získání požadovaného hladkého povrchu nebo lepší rozměrové přesnosti. Pro získání kvalitnějšího povrchu se používají klasické brusné papíry, kotouče či jiné brusné elementy.

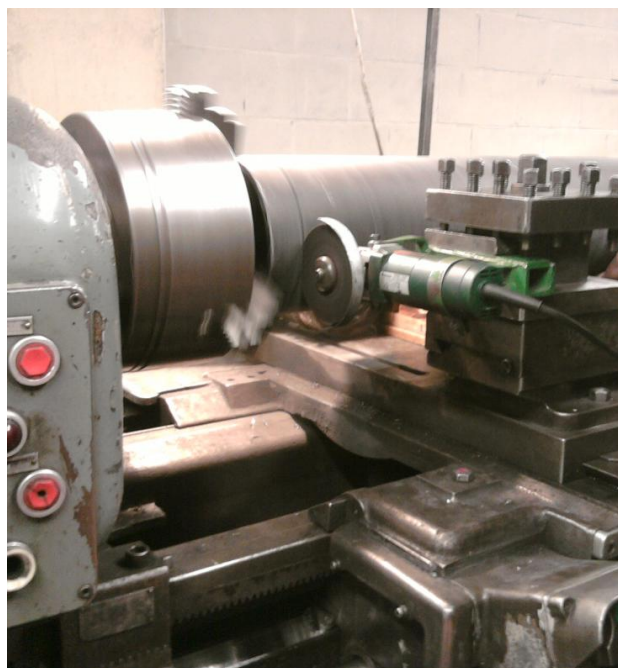
Jiným důvodem broušení těchto materiálů je získání povrchu pro následné nanesení barvy nebo přebroušení nanesené barvy před následným lakováním. Pro brusný proces se využívá rotačních brusných kartáčů. Jednotlivé kartáče jsou vsazovány do brusné hlavy, která koná rotační pohyb. Výhodou používání kartáčů je stejnoměrné vybroušení tvarových profilů. Kartáč se totiž chová jako brusivo přitlačované rukou. Trvanlivost brusiva je přitom delší než u použití tradičních postupů.



Obr. 3-17 Broušení rotačními kartáči [14]

### 3.4.5 Dělení kompozitů

K dělení kompozitních materiálů se doporučuje používat rozbrusných kotoučových nástrojů. Důvodem je přebroušení (přeřezání) vyztužujících vláken. Tím dosáhneme čistého řezu bez delaminace, trhlin a jiných vad v koncové části materiálu. Z tohoto důvodu, stříhací nástroje, nůžky nebo kleště nejsou většinou vhodné k dělení kompozitů, protože obvykle rozdrťí konce v místě dělení materiálu. Jinými metodami dělení materiálů jsou například upichování, frézování nebo jiné metody klasického obrábění, jimiž rozdělíme materiál na požadovaný počet částí.



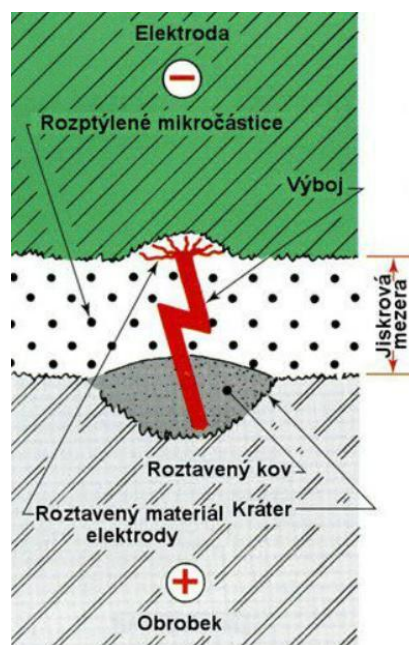
Obr. 3-18 Řezání karbonu rozbrusným kotoučem

### 3.5 Nekonvenční metody obrábění

Rostoucí podíl těžkoobrobitelných materiálů si vyžaduje důvody stále rozšiřujícího zavádění fyzikálních technologií do průmyslu. Nekonvenční metody obrábění jsou využívány především tam, kde není možné využití standardních metod obrábění. To se týká především obrábění nepravidelných, tvarově složitých nebo rozměrově přesných dílů, obrobků z těžkoobrobitelných materiálů nebo výroby přesných miniaturních součástek. Vláknové kompozity s polymerickou maticí, vzhledem k malé tepelné odolnosti, není možné obrábět některými metodami, které pracují za vysokých teplot. Chemické obrábění je vzhledem k nasáklivosti a snížení vlastností vláken obtížné. Netradičními metodami se obrábějí především materiály s kovovou nebo keramickou maticí nebo sendvičové kompozity.

#### 3.5.1 Elektroerozivní obrábění

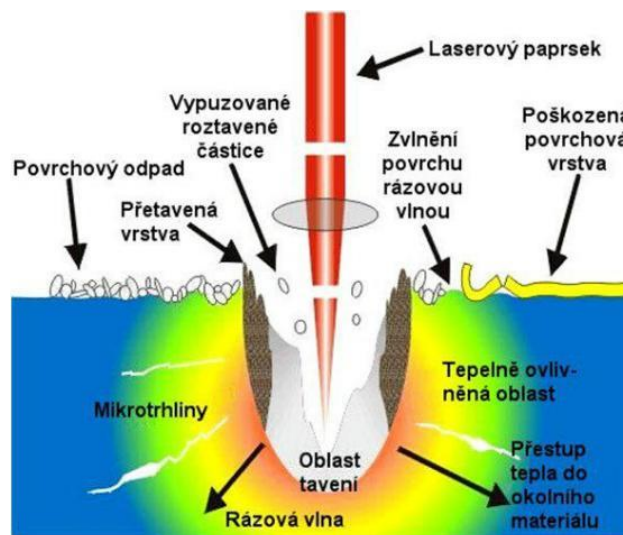
Navzdory nízké elektrické vodivosti a vysoké tepelné odolnosti některých částic v kompozitu lze obrábět pomocí elektroerozivního obrábění – EDM (Electro Discharge Machining). Proces EDM je však pomalý s malým úběrem. Úběr může být zvyšován s rostoucím vybíjecím proudem a zvýšením trvání impulsu až na optimální hodnotu. Ta je však rozdílná z důvodu rozdílného chemického složení kompozitů. Povrch obrobeného materiálu je dobrý s pouze malým množstvím dílčích poškození na povrchu řezné plochy.



Obr. 3-19 Princip elektroerozivního obrábění [15]

### 3.5.2 Obrábění laserem

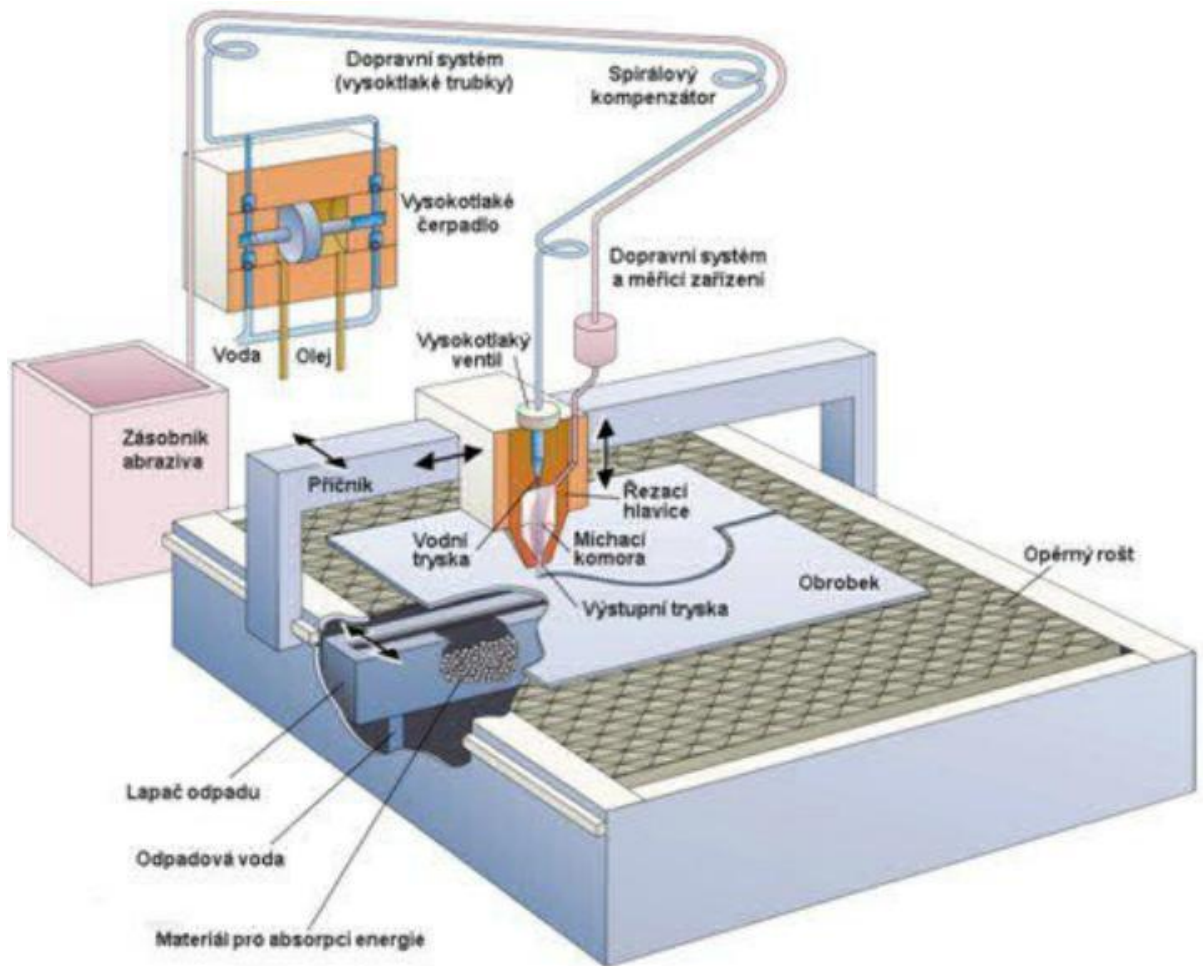
Dříve byly kompozity s kovovou maticí - MMC (metal matrix composites) používány při výrobě relativně silných dílů. V poslední době se však tento materiál používá spíše k výrobě tenkých plechů. Konvenční obrábění s diamantovými nástroji je nákladné a technicky obtížné. Vzhledem k tomu, že elektroerozivní obrábění – EDM je poměrně pomalé, řezání laserem je považováno za možnou alternativu. Řezání je velmi rychlé, posuvy až 3000 m/min. Nicméně, kvalita povrchu po laserovém řezu je obvykle relativně špatná. Nežádoucí je výskyt povrchového pruhování. K tomu dochází v důsledku přerušovaného toku roztaveného materiálu při řezání. Tyto mikrostrukturní změny, vlivem indukovaním vysoké teploty a otřepy na výstupu, jsou nevýhodami.



Obr. 3-20 Obrábění laserem [15]

### 3.5.3 Řezání vodním paprskem s abrazivem

Obrábění vodním paprskem s abrazivem - AWJM (Abrasive Water Jet Machining) má mnoho výhod oproti jiným technologiím obrábění. V porovnání s tepelným obráběním (laser, EDM) AWJM nevyvolává při obráběcím procesu vysoké teploty a v důsledku toho nevzniká v místě řezu tepelně ovlivněná zóna. Je vhodný stejně jako laser pro hrubý stříh a díky vysoké rychlosti posuvu (450 m/min) lze považovat za velmi efektivní způsob obrábění. Výhodný je pro obrábění kompozitů s polymerní maticí. Tradiční metoda zpracování, jako řezání na pásové pile, je výsledkem nejen špatné kvality řezu, ale i malé produktivity. Oproti tomu AWJM nezpůsobuje žádné tepelné deformování. Vysoká všestrannost obrábění, vysoká flexibilita a malé řezné síly nabízí velký potenciál k používání této metody. Jednou z nevýhod tohoto procesu je drsný povrch vlivem vroubkovaného povrchu na horní části řezané plochy a hrany. Hladší povrch může být získán snížením rychlosti posuvu.



Obr. 3-21 Řezání vodním paprskem s abrazivem [15]

### 3.6 Kvalita obrobeného povrchu po obráběcích operacích

Kvalita a drsnost obrobeného povrchu je jedním z hlavních cílů při obrábění materiálů. Pro získání příznivých výsledků je potřeba optimalizovat výrobní procesy, tak abychom uspokojili požadavky zákazníka za co nejméně vynaložené práce a finančních prostředků.

Obrobené vzorky z experimentů soustružení a vrtání karbonu a sklolaminátu, které jsou uvedeny v příloze, byly prověřeny na digitálním drsnoměru Mitutoyo. Poté byl jejich povrch zkoumán na optickém 3D mikroskopu Alicona Infinite Focus. Alicona je optický mikroskop, který dokáže měřit povrch plochy v 3D měření, drsnosti, rozměry, měření strmých boků a malých poloměrů a v neposlední řadě umožňuje vykreslovat mikrovady v povrchu obrobků.



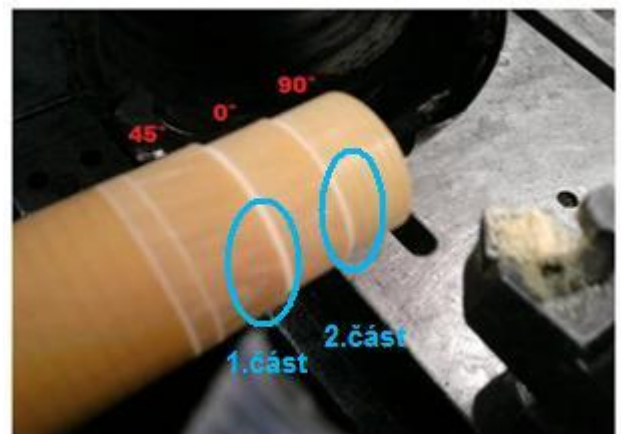


Obr. 3-22 Alicona Infinite Focus [16]

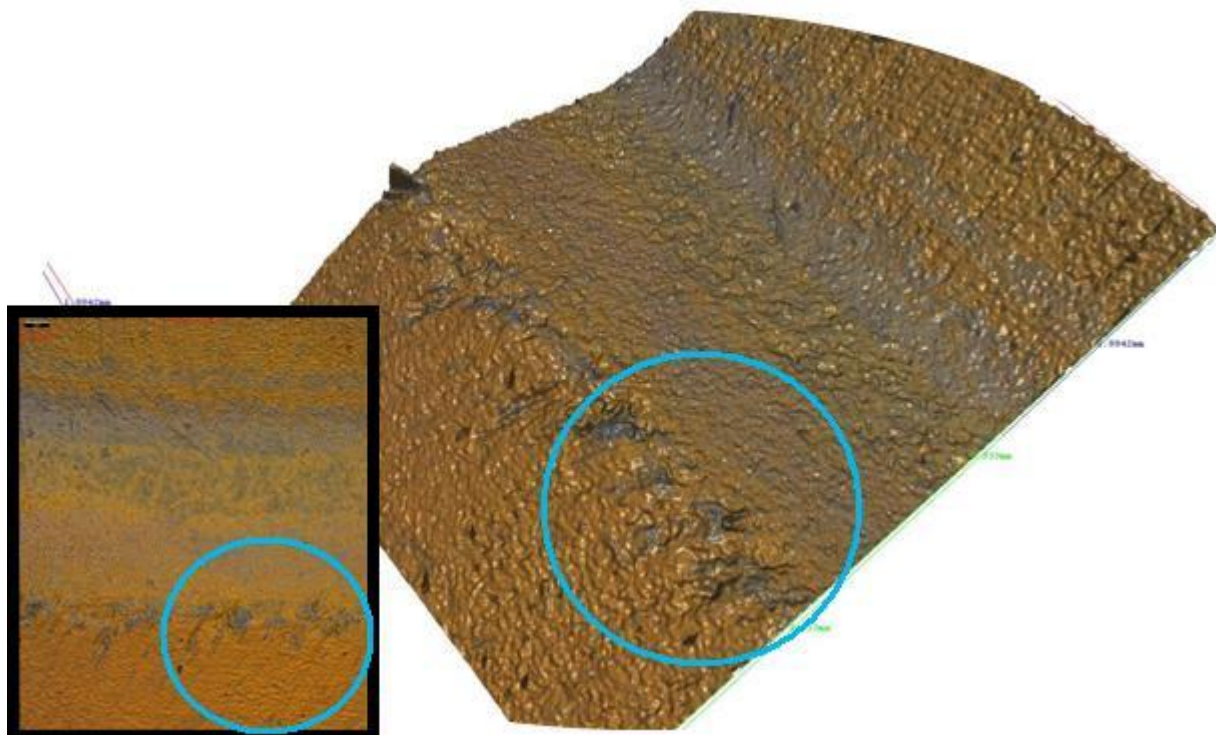
### *Soustružení*

První experiment spočíval v obrábění šesti různých druhů materiálů. Soustružené jmenovité průměry byly navrženy tak, aby výsledný obrobený povrch ukazoval jednotlivé směry vláken ve vrstvě, které jsou předem dané v protokolu design data. Přestože se vlákna pod různým úhlem řezání chovají jinak, naším měřením na digitálním drsnoměru Mitutoyo se střední aritmetická úchylka rozměru  $R_a$  pohybovala přibližně na stejných hodnotách kolem  $R_a 1,6 \mu\text{m}$  až  $R_a 3,2 \mu\text{m}$ , bez ohledu na směr navíjených vláken. Přesto se vady obrobeného povrchu a různé chování vláken projevilo v místě mezi obrobenou a neobrobenou plochou. Tyto vady byly pozorovatelné pouhým okem a poté naskenovány optickým 3D mikroskopem.

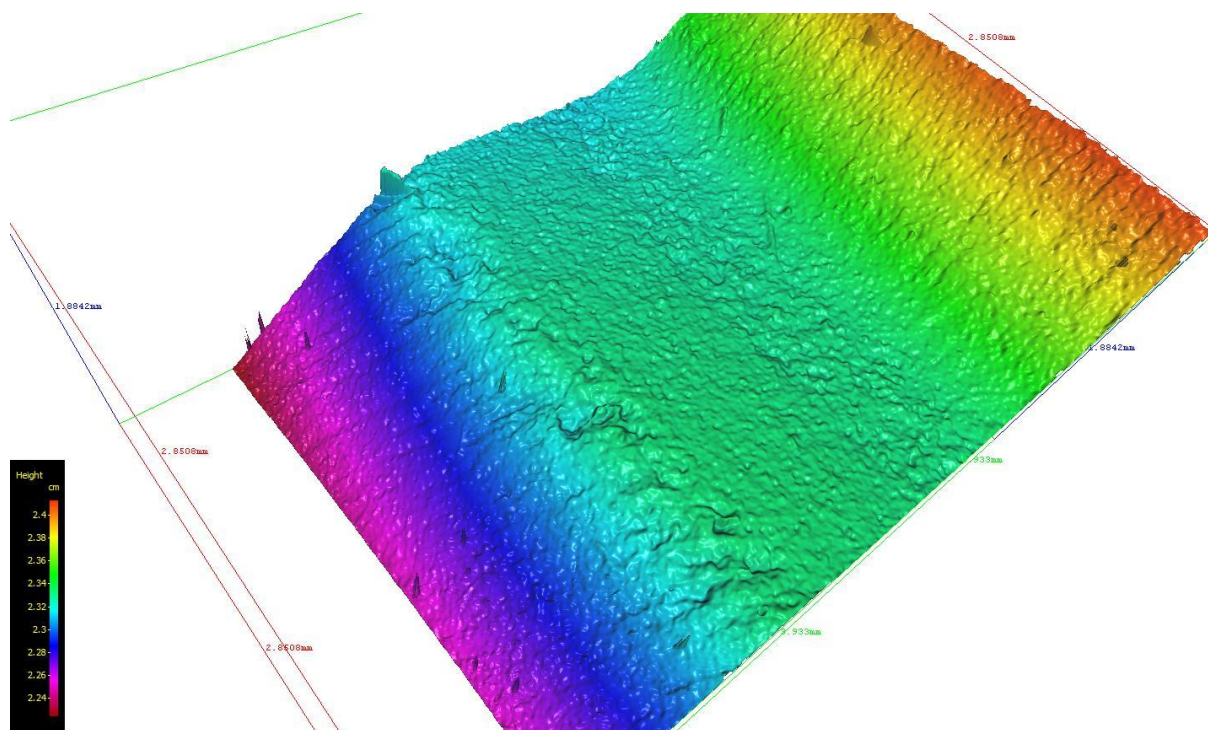
Při podélném soustružení povrchu skleněného laminátu po jednotlivých vrstvách byly patrné poruchy vylomení vláken ve vrstvě se šikmými vlákny na přechodu mezi obrobenou a neobrobenou plochou. Sklolaminát byl soustružen určitým nástrojem za použití určitých řezných podmínek uvedených v příloze soustružení kompozitů. Řezné podmínky a geometrie nástroje mají hlavní vliv na výsledcích. Jmenovaný přechod se nachází v měřené části 1 a jedná se o přechod šikmých vláken pod úhlem přibližně  $45^\circ$  a rovných vláken ( $0^\circ$ ). Na obrázku 3-24 jsou patrná vytrhaná vlákna na snímku z mikroskopu a v prostorových simulacích v barvě materiálu a v barevném spektru pro zviditelnění vad. Tato vada je způsobena stykem hrany břitu obráběcího nástroje s vlákny pod úhlem  $-45^\circ$  ( $135^\circ$ ). Ty jsou tlakovým a ohybovým namáháním vylamovány z matrice materiálu. Vlákna pod úhlem  $+45^\circ$  jsou namáhána tahem, ohybem a jsou přerušena čistým řezem.



Obr. 3-23 Přechody na podélně soustruženém CFRP



Obr. 3-24 Snímek a prostorová simulace vytrhaných vláken na přechodu GFRP 45° vs 0°

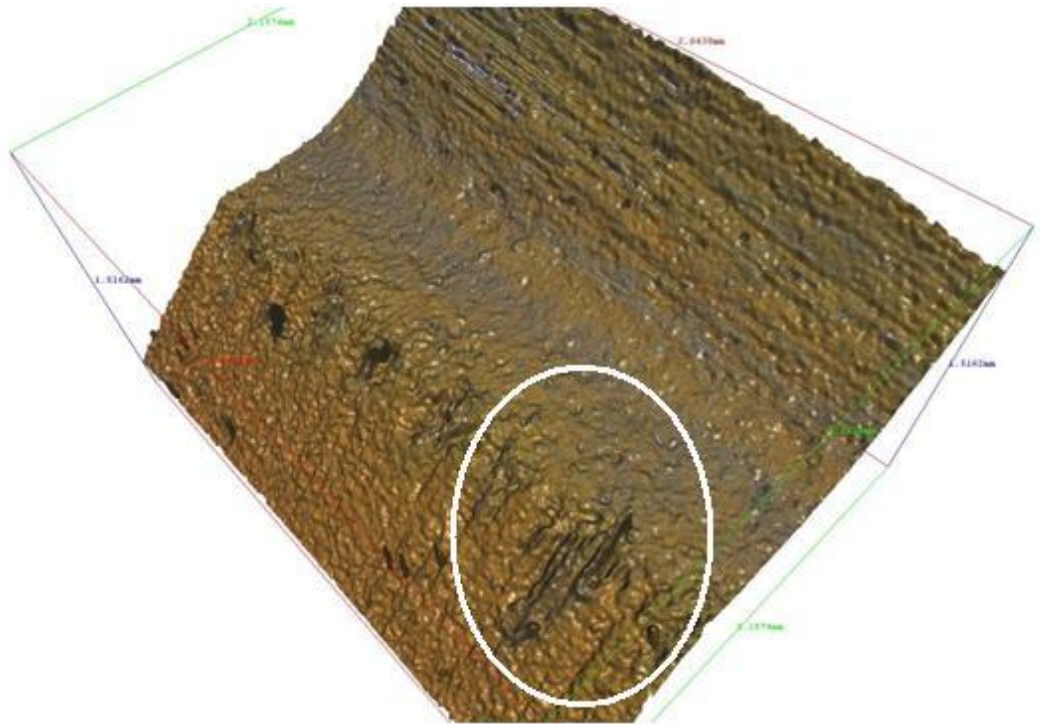


Obr. 3-25 Prostorová simulace vytrhaných vláken na přechodu GFRP 45° vs 0° v barevném spektru

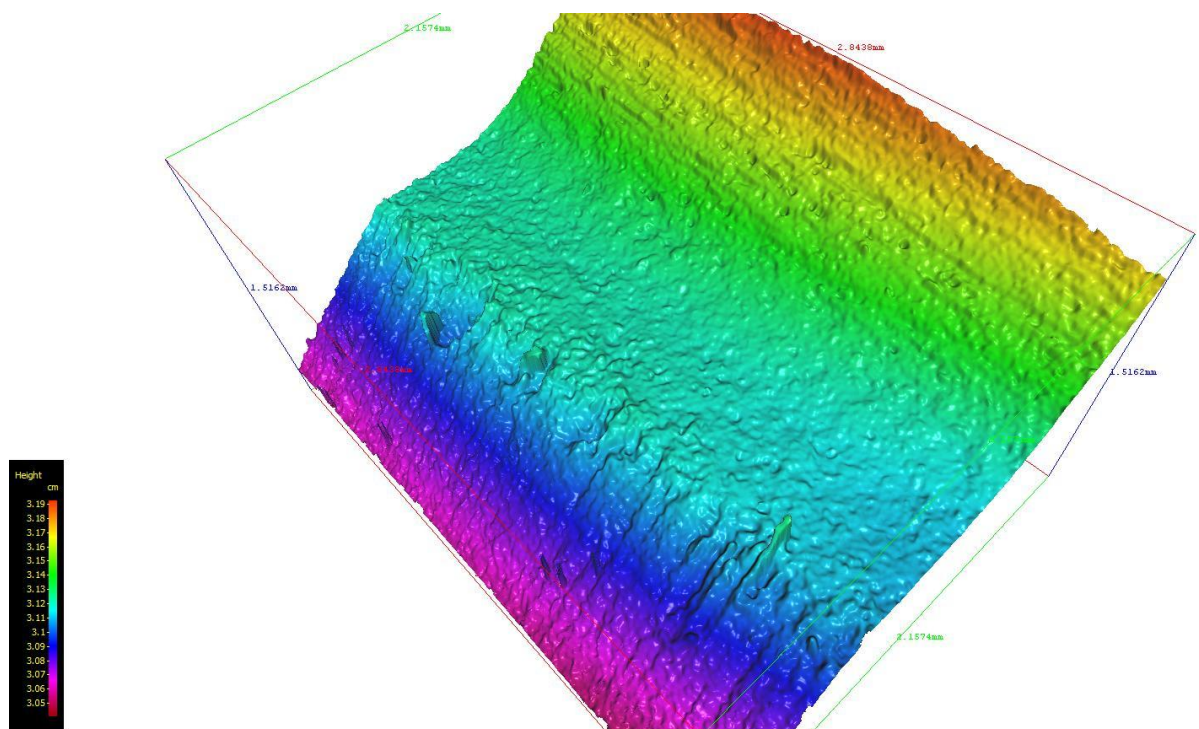
Tento stejný materiál byl zkoumán také na 2. části přechodu, kde byla obráběna vrstva s příčnými vlákny (90°). Daný přechod je zkoumán mezi rovnými (0°) a příčnými (90°) vlákny. Vlákna v podélné (0°) vrstvě jsou vylámána. Při soustružení dochází k ohybu vláken a po pře-



soustružení průměru se na přechodu objevuje chlupatý povrch s vlákny vytahanými do obrobeneho materiálu. Po začištění brusným papírem jsou vidět na prostorových snímkách vytrhaná vlákna v podélné vrstvě.



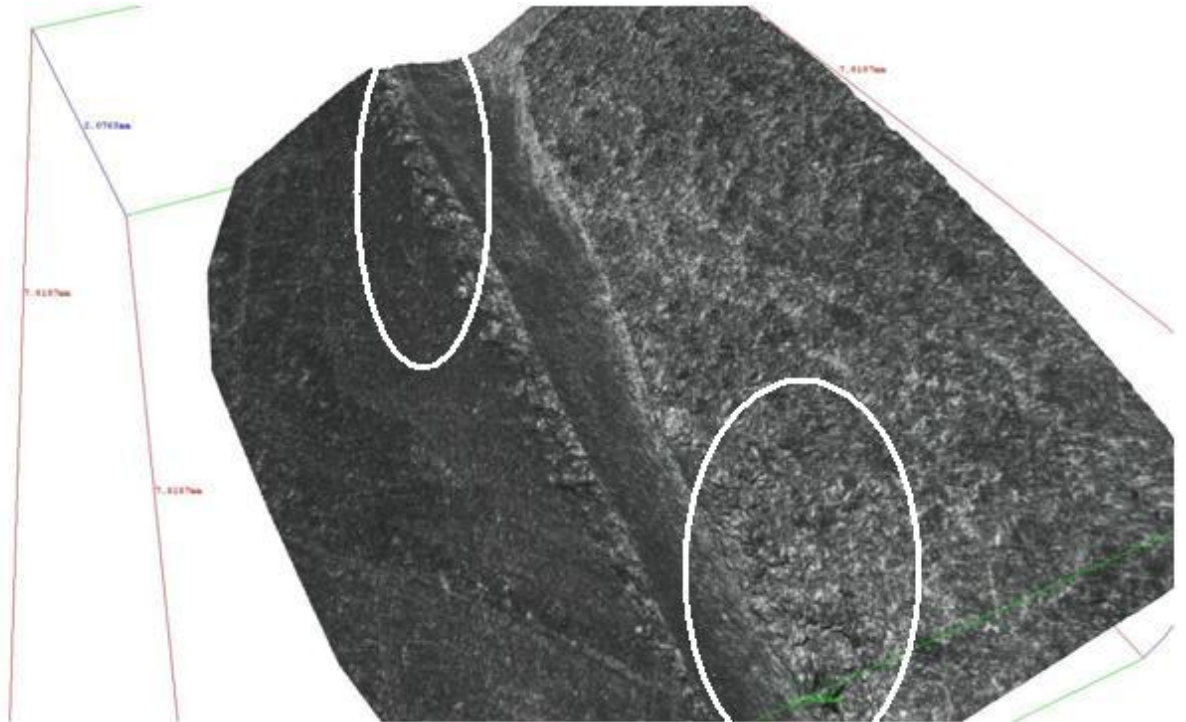
Obr. 3-26 Prostorová simulace vytrhaných vláken na přechodu GFRP 0° vs 90°



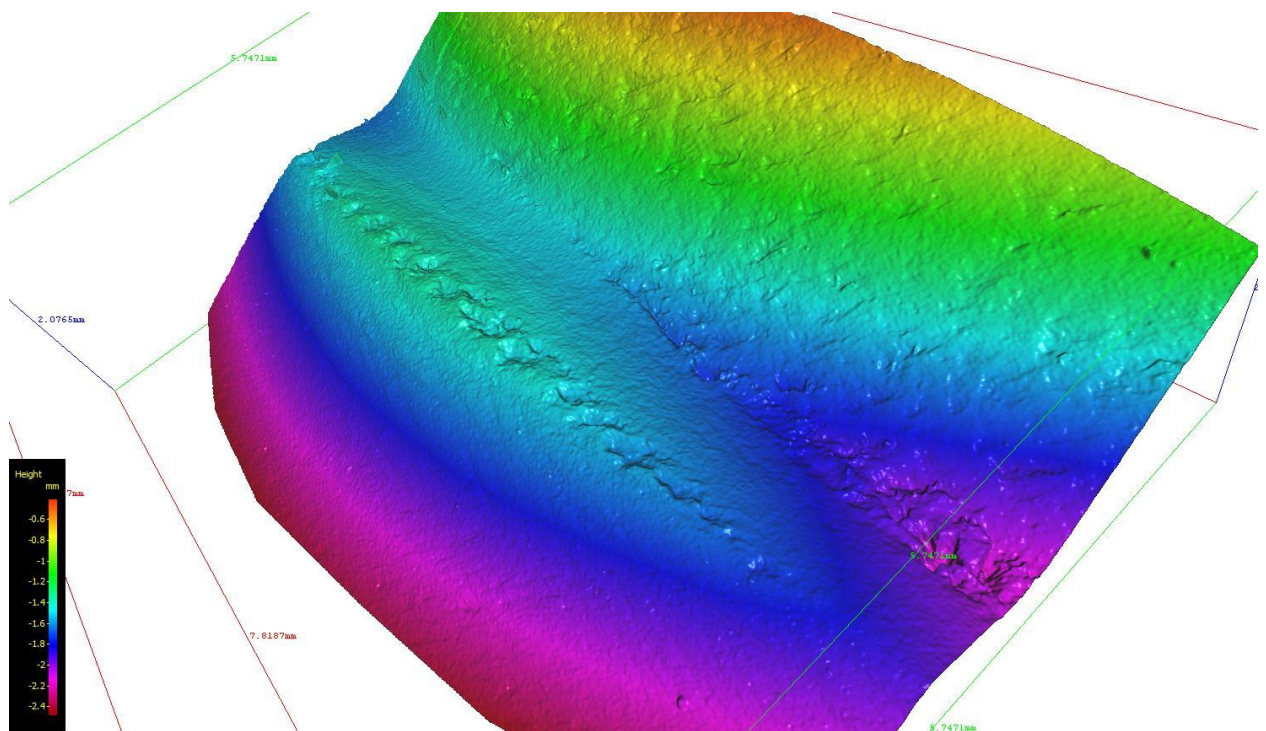
Obr. 3-27 Prostorová simulace vytrhaných vláken na přechodu GFRP 0° vs 90° v barevném spektru

Zajímavý důkaz toho, že šikmo navíjená vlákna se chovají rozdílně soustružením pod úhlem 45° a 135°, ukazuje obrázek 3-28. Podélným soustružením uhlíkového kompozitu byly

soustruženy opět jednotlivé vrstvy materiálu podle protokolu design data. Při obrábění přechodu, vlákna navinutá pod úhlem  $135^\circ$  ( $-45^\circ$ ), jsou vlivem tlakového a ohybového zatížení vytrhávána z matrice kompozitu. Vlákna pod úhlem  $45^\circ$  se na prostorových snímkách vyznačují čistým řezem.



Obr. 3-28 Prostorová simulace vytrhaných vláken  $45^\circ$  a  $135^\circ$  na přechodu CFRP



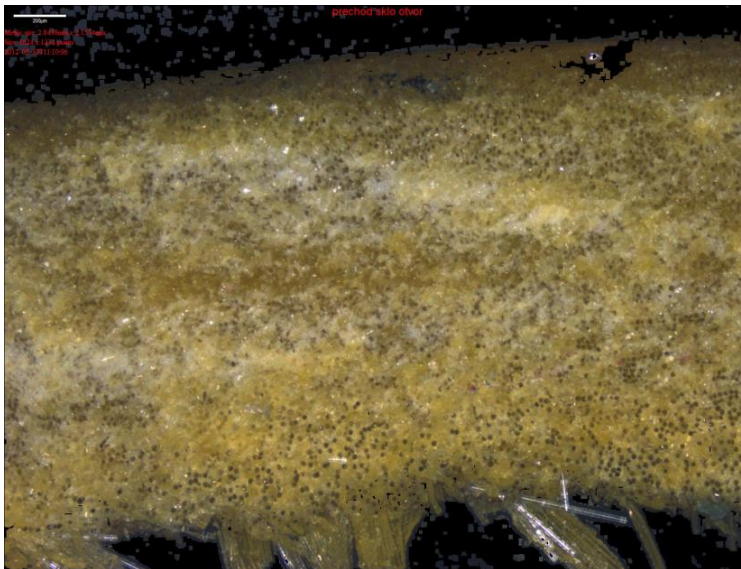
Obr. 3-29 Prostorová simulace vytrhaných vláken  $45^\circ$  a  $135^\circ$  na přechodu CFRP v barevném spektru



Naším měřením bylo zjištěno chování vláken na přechodu mezi obrobenou a neobrobenou plochou. Z pořízených výsledků prostorových snímků je dokázáno, že vhodnější metoda obrábění vláken je pod úhlem  $45^\circ$ . Získané hodnoty měření mohou inspirovat další vývoj a výrobu nástrojů pro obrábění kompozitních materiálů a v neposlední řadě mohou ovlivnit smysl uspořádání vláken v materiálu kompozitu.

### *Vrtání*

Druhý experiment spočíval v obrábění průchozích děr do trubkového materiálu. Tři zkoušené materiály byly vyrobené z karbonu a tři ze sklolaminátu. K vrtání děr bylo použito bimetalické korunky. Do každého materiálu byly vyvrtány 4 stejné otvory za různých otáček nástroje. Podrobnější informace jsou uvedeny v příloze experiment vrtání otvorů. Po vyvrtání děr byly patrné různé stupně delaminace především na výstupu vrtané díry. Na *obrázcích 3-30 a 3-31* jsou zobrazeny vnitřní povrchy otvorů.



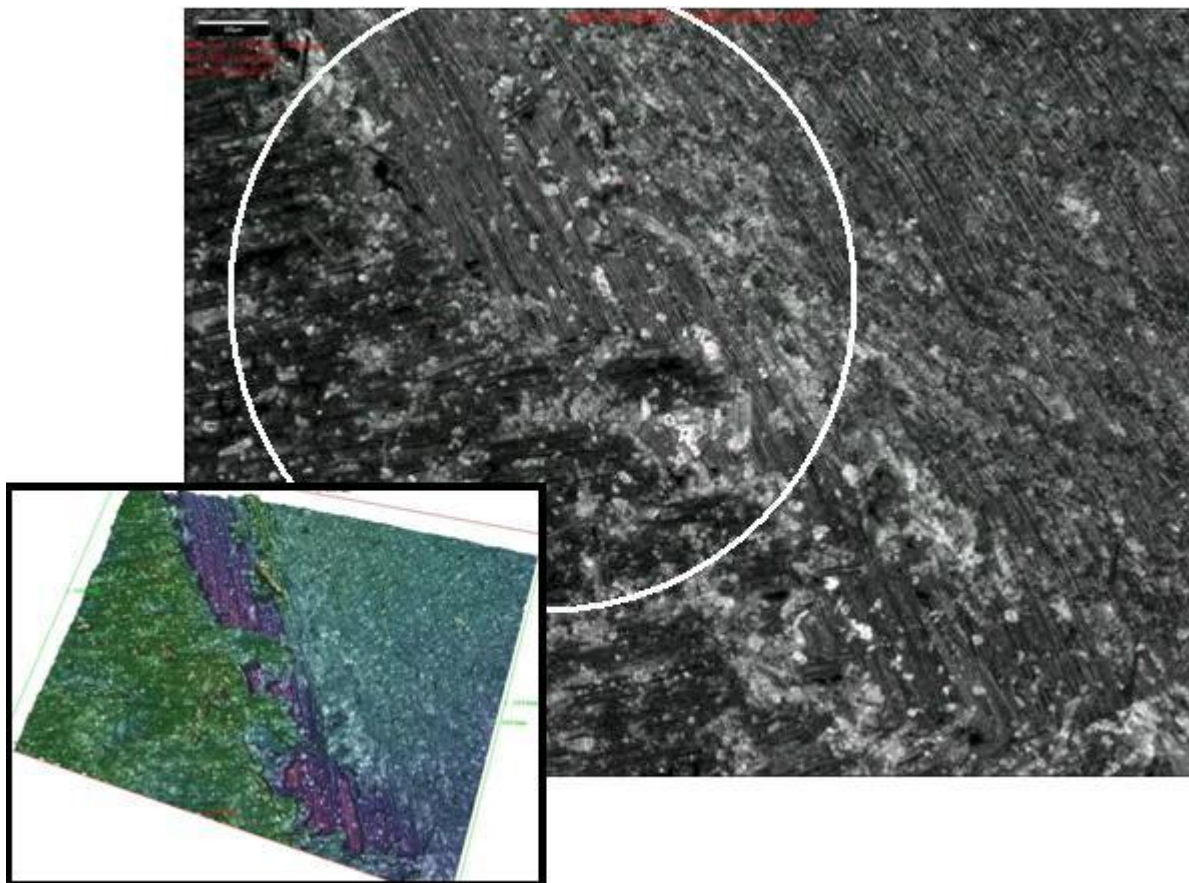
Obr. 3-30 Vnitřní povrch vrtané díry GFRP s delaminací na výstupu (vlevo)



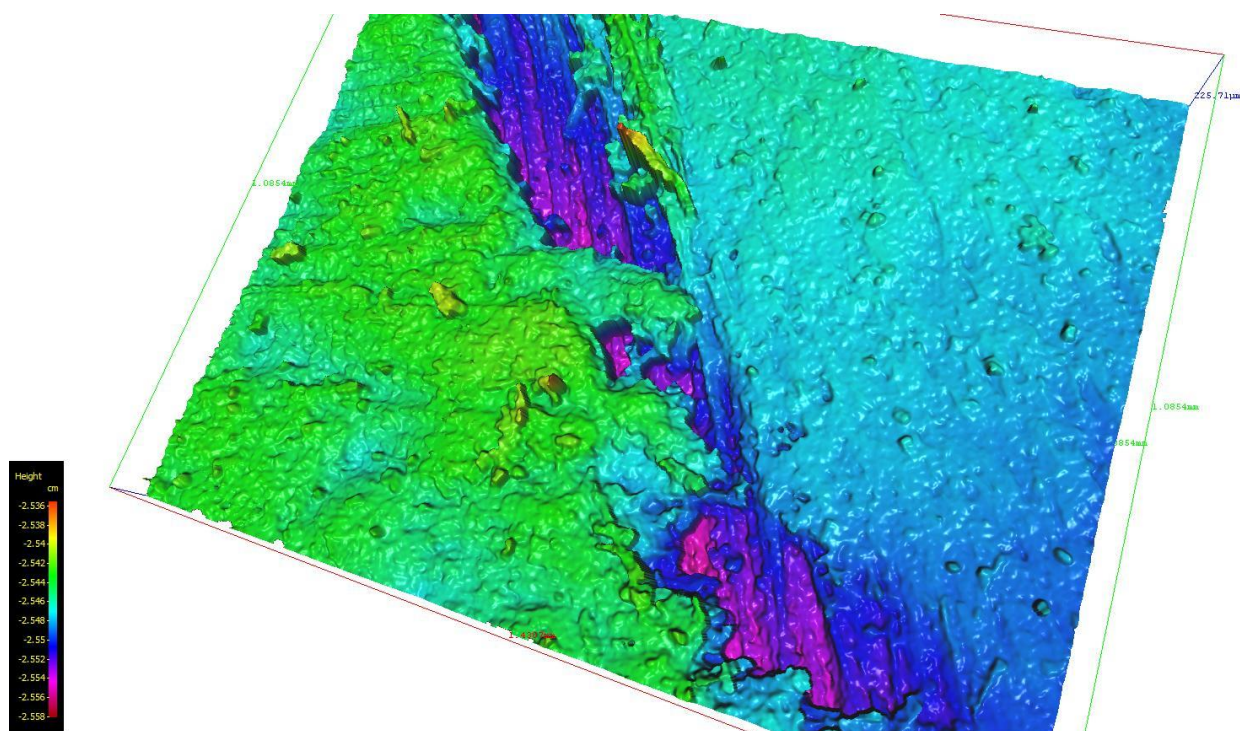
Obr. 3-31 Vnitřní povrch vrtané díry CFRP s delaminací na výstupu (vpravo)

### **3.7 Vady obrobku**

Při obrábění karbonu byla zjištěna vada na povrchu obráběné součásti. Tato vada mohla vzniknout již při výrobě trubky, ale více pravděpodobné je vytvoření vady při obráběcím procesu vlivem špatně zvolených řezných podmínek nebo řezného nástroje.



Obr. 3-32 Vada na soustruženém povrchu karbonového kompozitu



Obr. 3-33 Prostorový snímek vady na soustruženém povrchu karbonového kompozitu v barevném spektru



### **3.8 Zdravotní rizika při práci s kompozity**

Tak jako veškerá výroba a zpracování materiálů obráběním může mít zdravotní rizika, není tomu výjimkou ani v případě výroby a obrábění kompozitních materiálů. Již při výrobě těchto moderních materiálů musíme pečlivě dbát na bezpečnost práce na pracovišti, dodržovat BOZP a využívat bezpečnostních pomůcek.

#### ***Pryskyřice***

Při samotné výrobě kompozitů pracujeme s pryskyřičnou matricí v tekutém stavu. V této formě jsou pryskyřice velmi jedovaté včetně jejich výparů. Je s ní třeba zacházet opatrně s ochrannými rukavicemi. Je vhodné používání respirátorů nebo s nimi pracovat ve větraných prostorách. Při kontaktu s kůží způsobují dlouhodobé kožní problémy vlivem poleptání a alergie. Vdechování výparů způsobuje leptání dýchacích cest.

Řežeme-li, brousíme či jinak obrábíme kompozity, dochází k roztřepení konců vláken, která se velmi snadno lámou a jejich drobné části se ve formě prachu rozptylují do vzduchu. Miniaturní jehličky se poté snadno zapichují do kůže, vnikají do očí nebo je vdechujeme do plic. V takovém případě je používání ochranných pomůcek jako rukavic, brýlí a respirátorů nezbytné.

#### ***Uhlíková vlákna***

Z dosavadních zjištění není patrné, že by opakované působení uhlíku na člověka působilo významnější nepříznivé změny. Zdravotní rizika uhlíkového prachu negativně působí na oči, kde drobné částice prachu způsobují podráždění očí nebo mohou způsobit mechanické poranění rohovky podobně jako u každých jiných druhů třísek. Vdechování uhlíkového prachu může způsobit podráždění horních cest dýchacích. Nikdy bychom se neměli dotýkat holou rukou broušené plochy, například rukou posuzovat hladkost povrchu. Obnažené konce vláken jsou dostatečně pevné, aby snadno pronikly do kůže. Uhlíkový prach na kůži může způsobit v ojedinělých případech alergie. Většinou však dochází k poranění mechanickou cestou. Vstřebávání částíček kompozitu do kůže je nepravděpodobné vzhledem k fyzikálním vlastnostem materiálu.

#### ***Skleněná vlákna***

Skleněná vlákna, jak už víme z dob, kdy se používali skelné vaty na zateplování budov, jsou při špatném zacházení velmi zdravotně negativní. Na mnoha místech je používání skleněných vláken a například jeho obrábění zcela zakázáno. Platí pro ně velmi přísné bezpečnostní opatření jak s těmito materiály zacházet. Miniaturní jehličky skleněných vláken naše tělo neumí vstřebat. Při kontaktu (zapichování jehliček do kůže) může vyvolat nežádoucí účinky jako například záněty kůže způsobené mechanickým poraněním, alergické reakce nebo podráždění očí či zánět spojivek. Ochranné pomůcky jsou při zacházení s těmito materiály nezbytné. Z principu u všech inhalovatelných vláken, pokud překračují určité meze, podstupujeme riziko vzniku rakoviny. U vdechování skleněného prachu se zvyšuje riziko vzniku zánětů v dýchacím ústrojí, pokles plicních funkcí, astma, alergie, dráždivého kašle a v neposlední řadě nádorových onemocnění.

## 4 Používané nástrojové vybavení

Výroba a spotřeba moderních pokrokových kompozitů, která je poháněna silnou poptávkou z leteckého, lodního, automobilového a medicínského průmyslu, soustavně vzrůstá. Zároveň jsou zvyšovány požadavky na nové výrobní metody, které zaručují vysokou produktivitu výroby s požadovanou kvalitou. Většina kompozitních materiálů je silně abrazivních. Při tvorbě třísek nastává zásadní problém při odvodu vzniklého tepla v místě řezu. Na vstupu a výstupu nástroje z materiálu vzniká zase problém s delaminací. Materiály, které jsou složeny z více vrstev odlišných vlastností a mají mnohdy protichůdné předpoklady pro třískové obrábění, to jsou výzvy, se kterými se potýkají výrobci nástrojů.



Obr. 4-1 Nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami z PKD [17]

Pro obrábění kompozitních materiálů se používají dva typy nástrojových materiálů. První a levnější variantou jsou nástroje či vyměnitelné břity z jemnozrnných slinutých karbidů. Cena SK destiček je přibližně pětinašobně menší než u PKD. Obráběcí nástroje z SK se vyznačují dostatečnou tvrdostí, avšak abrazivní účinky skla a uhlíku velmi snižují trvanlivost těchto nástrojů. Druhou variantou jsou nástroje z SK substrátů pokryté tenkou otěruvzdornou vrstvou polykrystalického diamantu nebo břity z PKD připevněné nebo připájené na tuhém nástroji. PKD se vyznačuje dlouhou trvanlivostí, vzhledem k vysoké tvrdosti a odolnosti proti abrazi. Díky jeho tepelné vodivosti lze použít za vyšších řezných rychlostí. Tuto rychlost snižuje pouze tepelná odolnost substrátu. Přestože tvrdý ostrý břit zamezuje čistým řezem vzniku tepla v místě řezu. Nevýhodou je použití PKD při přerušovaném řezu a vzniku rázů. Při uštipnutí části řezné hrany je škoda nákladnější než u levnějších variant břitů. I přes vysokou pořizovací cenu je z ekonomického hlediska, vyšší trvanlivostí, a tvrdosti výhodnější variantou nástroj z PKD.



#### 4.1 Nástroje pro soustružení

Aspekty opotřebení při soustružení FRP umožňují vyvíjet a korigovat řezné nástroje. Mezi opotřebením nástrojů patří abraze, adheze, tribooxidace a poškození povrchu. Opotřebení souvisí s fyzikálními a mechanickými vlastnostmi vlákně-matricových soustav. Sklo a uhlík jsou od přírody extrémně drsné a jejich chování se přirozeně vyznačuje silnými abrazivními účinky. Proto se vyměnitelné břitové destičky vyrábějí především ze slinutého karbidu (SK). Ještě více se používají destičky z SK substrátu povlakované tenkou vrstvou otěruvzdorného polykrystalického diamantu (PKD). Jiné materiály se pro soustružení kompozitů v dnešní době téměř nepoužívají.



Obr. 4-2 Vyměnitelná břitová destička z PKD [18]

Pro tvrdá abrazivní vlákna je nutné použití odolných nástrojů s povrchovou úpravou polykrystalického diamantu. Geometrie řezné hrany by měla být pozitivní a velmi ostrá. Zajistíme tím čistý řez třísky z materiálu a zamezíme zvyšování teploty v místě řezu. Zvětšování úhlu hřbetu je pro obrábění kompozitů příznivější. Břit se lépe zařezává do materiálu, ale větším snižováním úhlu břitu je břit tenčí a náchylnější na ulomení.



Obr. 4-3 Břity vyrobené z PKD [19]

Oproti tomu aramidová vlákna poškozují nástroje, vzhledem k nízké tepelné vodivosti a tvárnému chování. Aramidová vlákna praskají až při velkém tlaku a deformaci v ohybu. Proto je třeba přizpůsobit optimalizaci nástroje především geometrii a ostrosti řezné hrany, abychom zamezili zbytečnému tření špičky o obráběný materiál a následnému vzniku vysokých teplot v místě řezu. Při soustružení při vysokých teplotách dochází k nalepování materiálu na čelo břitu a se zhoršujícími se parametry řezání dochází k nedokonalému řezu. Vlivem zvětšování řezných sil dochází k následnému porušení řezné části, například odštípnutí části řezné hrany.

## 4.2 Nástroje pro vrtání

Při vrtání kompozitů je vzhledem k odlupování první a poslední vrstvy, tj. delaminaci, důležitý výběr vhodného vrtacího nástroje. V dnešní době je využíváno především nástrojů z PKD, které mají speciální geometrii přizpůsobenou k vrtání do kompozitních materiálů. Další variantou je používáno bimetalických korunek se středícím šroubovitým vrtákem z HSS, nebo čelních fréz. Z hlediska životnosti je nejvhodnější alternativou použití PKD vrtáků kde ilustruje ochranný účinek diamantová vrstva. Kromě ochrany proti abrazivnímu opotřebení, diamantová vrstva také chrání proti teplotnímu opotřebení. Hodnota životnosti je zvyšována použitím vyšších řezných rychlostí.

Vysoké hodnoty řezných rychlostí si však nemůžeme dovolit z hlediska tepelného selhání karbidového substrátu materiálu. Degradace a snížení adheze diamantové vrstvy způsobuje zvyšování teploty řezání, které je způsobeno neoptimálními podmínkami řezání a zvýšením řezného odporu. Zvyšující se síly při vrtání zamezují čistému řezu a zvyšuje se riziko delaminace ve výstupní vrstvě laminátu. Přestože je trvanlivost nižší, cena SK vrtáků je několikanásobně menší než vrtáky povlakované PKD, jsou z ekonomického hlediska a kvality stále výhodnější variantou diamantové vrtáky.

Hlavním faktorem k zamezení vzniku delaminace a otřepů je geometrie nástroje. Velmi důležité je velmi ostré ostří, které umožňuje plynulé řezání tvrdých vyztužujících vláken a zlepšuje kvalitu vrtané díry. Pokud přizpůsobíme nástroje tak, aby vyrobily díru v požadované kvalitě povrchu, a to na jednu operaci, zkrátí se nám nebo úplně odpadnou následující operace. Tím se prodlužuje trvanlivost břitů nástroje a zkracuje čas o neprovedené operace. K vrtání se obvykle používají optimalizované speciální negativní geometrie vrtáku s velmi ostrým ostřím. Takovéto geometrie mají vrtáky označené FISHTAIL, které odřezávají materiál po obvodu vrtané díry. Pro vrtání FRP je také využíváno čelních fréz, vrtacích hlav s vyměnitelnými PKD břity nebo vrtáků se speciální geometrií pro různé materiály.

Jinou a pravděpodobně levnější alternativou je využití vrtacích bimetalických korunek. Cílem správného vyvrtání díry je, aby vlákna na obvodu otvoru byly přeřezána a zamezilo se tak roztržení a vylamování částí vláken. Nástroj se skládá z držáku, vodícího vrtáku z RO a řezné korunky. Vodící vrták z rychlořezné oceli je obvykle malého průměru a je upnut do držáku. Průměr korunky poté určuje průměr vrtané díry. Tento typ nástroje je určen výhradně pro vyvrtávání průchozích děr.



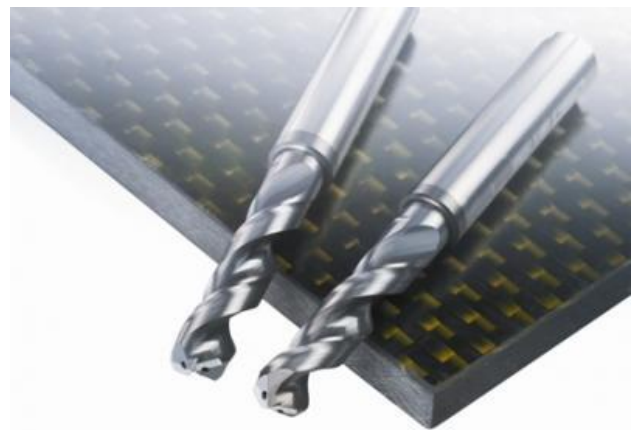
Obr. 4-4 Vrták FISHTAIL a vrtáky se geometrií pro vrtání FRP [20]



Obr. 4-5 Vrtací bimetalická korunka [21]

#### *Varianty vrtáku pro obrábění kompozitů od firmy Sandvic Coromat*

Pro výrobu děr v materiálech s velkým podílem polymerní matrice, při nárocích spojených s delaminací a třepením, jsou speciálně navrženy geometrie a tvary vrtáků. Vrtáky CoroDrill jsou přizpůsobeny s ohledem na zvýšení kvality opracování na vstupu a výstupu vrtané díry s velkým podílem uhlíkových vláken. Malý úhel špičky a velký úhel čela pomáhá ke zvýšení kvality díry a snížení axiálních řezných sil, které především u tenkostěnných součástí dosahují kritických hodnot. Dosahované tolerance děr IT 8-9, drsnost Ra 1-5  $\mu\text{m}$ . Maximální hloubka vrtání  $4-5 \times D_c$ .



Obr. 4-6 Nástroje pro vrtání kompozitů [22]

**Vrták CoroDrill 854** – vrták s diamantovým povlakem se speciálně navrženou geometrií špičky tak, aby bránila třepení a vyštipování. Vhodný především na CFRP materiály s vysokým objemovým podílem vláken a vrstvené materiály CFRP/hliník.

**Vrták CoroDrill 856** – vrták s diamantovým povlakem, jehož konstrukční řešení je vytvořené s ohledem na omezení problémů s delaminací. Je vhodný především na CFRP materiály s vysokým objemovým podílem matrice, pro materiály odolné proti vysokým teplotám a kompozity vyztužené například skleněnými tkaninami.



Obr. 4-7 Úhly na vrtácích Sandvik CoroDrill [22]

### 4.3 Nástroje pro frézování

Tvrdost skla ale také uhlíkových vláken, jak už bylo psáno, má za následek vysokou úroveň opotřebení nástrojů během obrábění. Vzhledem k tomu, že opotřebení se projevuje především na ostří nástroje zaoblováním řezné špičky, musí mít nástrojový materiál vysoký stupeň odolnosti proti oděru a pevnost proti odštípnutí. Tedy jemnozrnné SK a PKD. Keramické materiály nejsou vhodné, protože jejich nízká tepelná vodivost neumožňuje odvod tepla vznikajícího při obrábění FRP. Vzhledem k nízké odolnosti proti opotřebení KBN, která je srovnatelně drahá jako břity z PKD, nepředstavují žádnou výhodu.



Obr. 4-8 Frézy s vyměnitelnými PKD břity [19]

Jelikož při frézování dochází k přerušování vláken ve všech směrech najednou, je důležité zvolit optimální řezné podmínky. Aby bylo zajištěno přerušování skleněných a uhlíkových vláken čistým řezem, je velmi důležité zajistit vysokou ostrot břitu. Vzhledem k výraznější náchylnosti křehkého lámání těchto vláken, geometrie nástroje přibližně odpovídá nástrojům používaných u obrábění kovů. Geometrie řezné špičky a řezné hrany by měla být s pokud možno nejmenším rádiusem. Pokud vzniká delaminace na horní vrstvě, třepení lze zabránit pomocí nástrojů se spirálou v protisměru hodinových ručiček. V první řadě závisí na tloušťce obráběného dílu. U tenkých laminátů jsou účinné protisměrné spirály. Síly se tak uvolňují z okrajových vrstev směrem ke středu obrobku.



**Obr. 4-9 Dvoubřítá fréza s PKD břity [19]**

Standardní geometrie nástroje nelze použít pro obrábění kompozitů vyztužených aramidovými vlákny (AFRP), protože jednotlivá aramidová vlákna mohou být oddělena pouze čistým řezem za současného předpětí. Proto geometrie nástroje musí umožnit předpětí vláken před začátkem řezného procesu. Dalšími požadavky jsou vysoká ostrost, malé utvářeče třísek a malý radius řezné špičky.

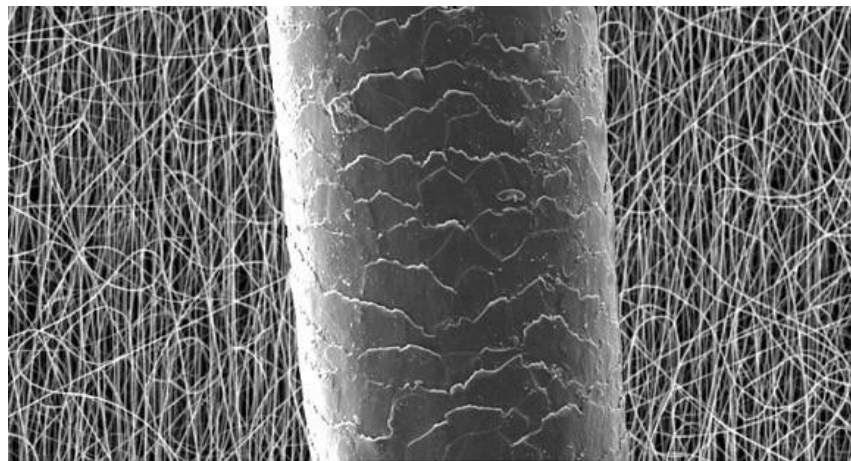


## 5 Směr budoucího vývoje

Hlavní příčinou rozvoje výroby kompozitních materiálů je otevření trhu s uhlíkovými vlákny. Ty totiž do nedávna nebylo možné do tuzemska dovážet vzhledem k jeho výjimečným vlastnostem, které se využívaly především v armádním průmyslu. I přesto je v dnešní době dovoz těchto vláken monitorován a firmy vyrábějící karbonové nebo kevlarové součásti musejí na zpracování uhlíku mít povolení. Díky tomu se kompozitní materiály rozvíjejí ve velkém měřítku do ostatních druhů průmyslu a je z nich vyráběno mnoho předmětů pro denní užívání. Vzhledem k jejich vlastnostem, které nelze nahradit žádnými jinými konvenčními materiály, jsou kompozity považovány za materiály budoucnosti.

### *Nové materiály*

Protože jsou kompozitní materiály stále ve vývoji a jedná se celkem o nové moderní materiály, jejich zkoumání a vývoj vede k vyvíjení moderních supermateriálů s velmi vysokými hodnotami vlastností. Takovéto materiály mohou být například nanovlákna. Nanovlákna jsou textilní výrobky s průměrem menším než 1  $\mu\text{m}$ . Surovinou pro výrobu lze použít asi 50 syntetických a přírodních polymerů, které se obvykle zpracovávají elektrostatickým zvlákněním. Nanovlákno často bývá označováno jako materiál třetího tisíciletí, který přinese revoluci v medicíně, elektronice, leteckém a automobilovém průmyslu, nanokompozitech, IT nebo třeba v ochraně životního prostředí. Jejich vlastnosti ukazují hodnoty modulu pružnosti 1000 GPa a pevnost v tahu dosahuje 10 až 100 GPa. Vytvoření těchto vláken je prozatím poměrně drahé. Další vývoj využití aramidových vláken vede k využití kevlaru pro průmysly vyrábějící produkty k denní užívání.



Obr. 5-1 Velikost vlasu v porovnání s nanovláknem [23]

### *Vývoj nástrojů a principu výroby*

Protože se požadavky na kvalitu a přesnost vyráběných součástí z kompozitních materiálů zvyšují, je stále více firem zainteresováno na vývoj nástrojů, které by byly dostatečně odolné pro obrábění kompozitů, a které by obráběly v požadované kvalitě. Důležitými faktory pro správné obrábění jsou vysoká pevnost materiálu, dobrá tepelná vodivost, optimalizovaná geome-

trie a vysoká ostrost bříty. Tedy jinými slovy se jedná o nástroje, které zaručují trvanlivost, produktivitu a ekonomičnost výroby.

Mnoho součástí je vyráběno do finálních rozměrů a tvarů. Tím odpadají veškeré obráběcí operace a náklady navíc spojené s obráběním. Avšak některé rozměrové přesnosti a tvary jako například přesnost průměrů díry a náboje, souměrnost nebo kruhovitost, nelze bez obráběcích operací uskutečnit a vyžadují použití obráběcího procesu. Jinou možností výroby v budoucnu může být přizpůsobení výroby vkládáním vláken do materiálu tak, aby po následném soustružení nebyli na povrchu materiálu přeřezaná vlákna, která mohou snižovat celkovou pevnost celé součásti. Vlákna by byla kladena v materiálu podle předem daného tvaru a obráběcí operací by byl proveden optimální požadovaný povrch.

### ***Recyklace kompozitních materiálů***

Žijeme v době průmyslového rozvojového růstu a výdělek z produkce vyrobených součástí bývá obvykle na prvním místě. Nové materiály a nové technologie jsou vyvíjeny bez ohledu na to, abychom se zamysleli nad následnou recyklací produktu. Proto hlavním problémem vývoje nových materiálů je nedostatečný zájem vývojových firem odpovědět na otázku, jak naložit s použitým materiálem a jak daný výrobek recyklovat. Kompozity jsou materiály složené ze směsi a jejich třídění a rozdělování na jednotlivé složky je velmi nákladné. Prakticky doposud jediné možné použití opotřebovaných materiálů je spalování, tedy použít opotřebované kompozitní materiály jako částečné topivo. Jiná alternativa, jako například chemické rozložení hydrolyzou, je sice technicky možná, avšak takovéto zpracování je naprosto neekonomické.

## 6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo charakterizovat kompozitní materiály, jejich rozdělení a popsat základní vlastnosti, kterými se tyto materiály vyznačují. Dalším úkolem bylo popsat technologie obrábění a používané nástrojové vybavení k obrábění kompozitů v současné době. Poslední část se zabývala budoucím vývojem kompozitních materiálů.

Kompozitní materiály jsou používány řadu let, především tedy používání přírodních kompozitů jako je například dřevo. Teprve na konci 20. století zaznamenává vývoj kompozitů prudký nárůst. To je umožněno objevením nových polymerních materiálů pro výrobu kompozitů s lepšími fyzikálními, mechanickými a chemickými vlastnostmi těchto materiálů, než nabízejí konvenční materiály. Se vzrůstajícími požadavky na tvarovou a rozměrovou přesnost, vzrůstá zájem o obrábění a vývoj nástrojů pro obrábění těchto materiálů.

V bakalářské práci jsou podrobně rozebrány vlastnosti a charakter kompozitních materiálů. Tyto znalosti byly čerpány nejen z literatury a internetových zdrojů, ale především z praxe ve firmě CompoTech PLUS s.r.o.. Firma se zabývá výrobou a částečně obráběním především karbonových a sklolaminátových kompozitních dílů.

V nejobsáhlejší části jsou popsány jednotlivé základní obráběcí procesy včetně kinematiky a řezných sil. Dále je v textu popsáno chování materiálů při obrábění, a jaké vlastnosti musí mít nástrojové materiály, aby docházelo k bezproblémovému obrábění bez vzniku delaminace. Jsou částečně popsány optimální geometrie nástrojů a vhodnosti použití pro určité materiály. V kapitole obrábění kompozitních materiálů jsou také uvedeny dosahované parametry při obrábění, které vyplívají částečně z experimentů uvedených v příloze. Jsou zde uvedeny také snímky z měření prováděné ve firmě Hofmeister s.r.o.. Na konci kapitoly jsou popsány rizika práce s kompozitními materiály.

Směr budoucího vývoje se zakládá na vývoji supermoderním materiálů s výjimečnými vlastnostmi. Nakonec je zde okrajově uvedeno recyklování kompozitního odpadu. Tato práce může posloužit jako inspirace a zdroj informací lidem, kteří se zabývají problematikou obrábění kompozitních materiálů.



## 7 Seznam použité literatury

- [1] Staněk, J., Metodika zpracování a úprava diplomových prací, ZČU v Plzni, 2000, ISBN 80-7043-363-9
- [2] Teti, R., Machining of Composite Materials, University of Naples Federico II, Italy
- [3] Motyčka, M., Technologie výroby kompozitních materiálů, ZČU v Plzni, 2007
- [4] Šebela, R., Obrábění těžkoobrobitelných materiálů, VUT v Brně, 2012
- [5] Vnouček, M., Kompozitní materiály- prezentace, ZČU v Plzni, 2009
- [6] Výzkum a vývoj pro letecký průmysl, Elektronický sborník VZLÚ, a. s., TRANSFER Č. 3, duben 2007, 2. Ročník, ISSN 1801-9315
- [7] Müller, F., Monaghan, J., Non-conventional machining of particle reinforced metal matrix composite, Trinity College, Dublin, Ireland, 1999

### *Internetové zdroje*

- [8] [http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy\\_II/kompozitni\\_materialy.pdf](http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf)
- [9] <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>
- [10] <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/FMkomplet3.htm>
- [11] [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_02.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_02.pdf)
- [12] <http://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [13] <http://www.secotools.com/cs/Global/Products/Composite-Machining/Jabro--Composites-JPD89-Series/>
- [14] <http://www.scandicsand.com/uk/composite-cz.htm>
- [15] <http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=33788&docGroup=4931&cmd=0&instance=2>
- [16] <http://www.machinery.co.uk/machinery-features/micro-machining-mm-live-event/36679/>
- [17] <http://www.walter-tools.com/>
- [18] <http://www.mapal.com/cz/vyrobky/vyrobkove-skupiny/pkd-nastroje/vymenitelne-pkd-desticky/>
- [19] <http://www.lpw.cz/show.php?show=55>
- [20] <http://www.morriswoodtool.com/ToolTips.htm>
- [21] <http://www.vrtaky-brusne-kotouce.cz/---akce---/bimetalova-derovka-vykruzovaci-vrtak.html>
- [22] [http://www.sandvik.coromant.com/cs-CZ/products/corodrill\\_854\\_856/Pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-CZ/products/corodrill_854_856/Pages/default.aspx)
- [23] <http://3pol.cz/1079-usmernovani-nanovlaken>

[24] <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/downloads/pages/search.aspx?q=Metal+Working+World>

[25] <http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>

## 8 Seznam příloh

PŘÍLOHA Č. 1: - Experiment soustružení zápichu

PŘÍLOHA Č. 2: - Experiment podélného soustružení v jednotlivých vrstvách

PŘÍLOHA Č. 3: - Experiment vrtání

PŘÍLOHA Č. 4: - CD s obsahem

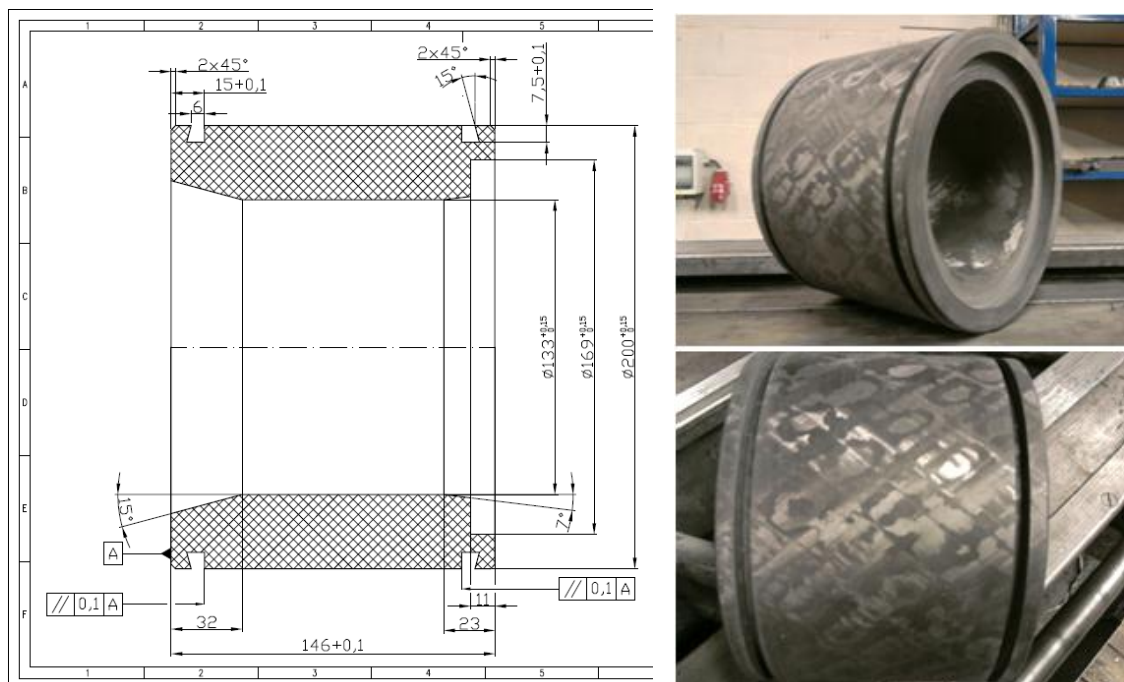
- elektronická podoba bakalářské práce ve formátu PDF
- elektronická podoba příložených experimentů ve formátu PDF
- Snímky z měření na mikroskopu Alicona Infinite Focus ve formátu JPEG
- Obrázky z obrábění kompozitů

## PŘÍLOHA Č. 1

# **Experiment soustružení zápichu do obvodu karbonového kompozitu**

## Experiment soustružení zápichu do obvodu karbonového kompozitu

Experiment spočíval v soustružení jednostranně šikmé drážky do obvodu válcové součásti. Ta bude později použita do stroje na vyvažování setrvačníků. Jedná se o části skličidla, na kterých budou přelepeny ostatní části z lehkých kovů jako například z duralu. Součásti se budou roztáčet na vysoké rychlosti až 6000ot/min, během krátkého času a bude zkoumána házivost setrvačnicku. Součást bude proto vyrobena z karbonu a cílem výroby této součásti je zhotovit součást s podobnými pevnostními vlastnostmi, s minimální vahou součásti. Vysoustružené zápichy na obvodu součásti slouží pro závaží, která budou dotažena šroubem na určitém místě, podle požadavku.



Obr. 8-1 Výkres a hotová součást

### *Postup výroby drážky*

Nejdříve byl vysoustružen zápich s rovnou stěnou v šířce 6 mm.

### *Použité nástroje:*

- zapichovací ocelový nůž s připájeným vidiovým plátkem.

### *Řezné podmínky:*

řezná rychlost  $v_c = 35 \text{ m/min}$

přísuv  $f = \text{ruční}$  – poměrně rychle, aby nedocházelo ke tření a otupení břitu

Povrch po soustružení byl dobrý, mírně chlupatý povrch v první vrstvě vlivem najetí břitem do povrchu a na dně drážky na  $\varnothing$  185 mm, protože vstupujeme do vrstvy s podélně kladenými vlákny pod úhlem  $0^\circ$ . Povrch byl začištěn jemným smirkovým papírem. Jednotlivé vrstvy na jmenovitém průměru jsou uvedeny v *Tabulce 8-1*.

Design data						Pozice a hodnoty				
Objemový podíl kompozitu	Číslo vrstvy	počet vláken ve svazku	počet jehliček	počet použitých jehliček	typ vláken	% pokrytí trubky	úhel navíjení vláken	tloušťka vrstvy	Dolní mezní průměr	Horní mezní průměr
VF		NL	NP	NPU	TF		AX	WT	XD	XDOD
%					specifický	%	$^\circ$	mm	mm	mm
57%	32-34	9	50	16	sts	46	58,4	1,67	165,50	168,84
57%	35	4	50	50	sts	74	0,0	1,20	168,84	171,23
57%	36-38	9	50	16	sts	46	59,3	1,66	171,23	174,54
57%	39	4	50	50	sts	72	0,0	1,16	174,54	176,86
57%	40-42	9	50	25	sts	47	41,0	1,70	176,86	180,25
57%	43-45	9	50	25	sts	46	41,5	1,68	180,25	183,61
57%	46	4	50	50	sts	69	0,0	1,10	183,61	185,81
57%	47-49	9	50	25	sts	46	42,4	1,65	185,81	189,11
57%	50-52	9	50	25	sts	45	42,9	1,64	189,11	192,38
57%	53	4	50	50	sts	65	0,0	1,05	192,38	194,48
57%	54-56	9	50	25	sts	45	43,7	1,61	194,48	197,71
57%	57-59	9	50	25	sts	44	44,1	1,60	197,71	200,90

**Tabulka 8-1** Hodnoty výskytu druhu vláken na obráběném průměru

Poté byla soustružena šikmá stěna drážky. Na zkušebním vzorku byly vyzkoušeny 2 nástroje. Nástroje měly nabroušenou hranu ostří pod úhlem  $15^\circ$ . Horní saně byly pootočeny o úhel  $75^\circ$ . Tříska byla odebírána přísuvem šikmo do materiálu.

***Použité nástroje:***

- zapichovací nůž RADEKO – obdélníkový HSS
- zapichovací nůž z nástrojové oceli s připájeným vidiovým plátkem

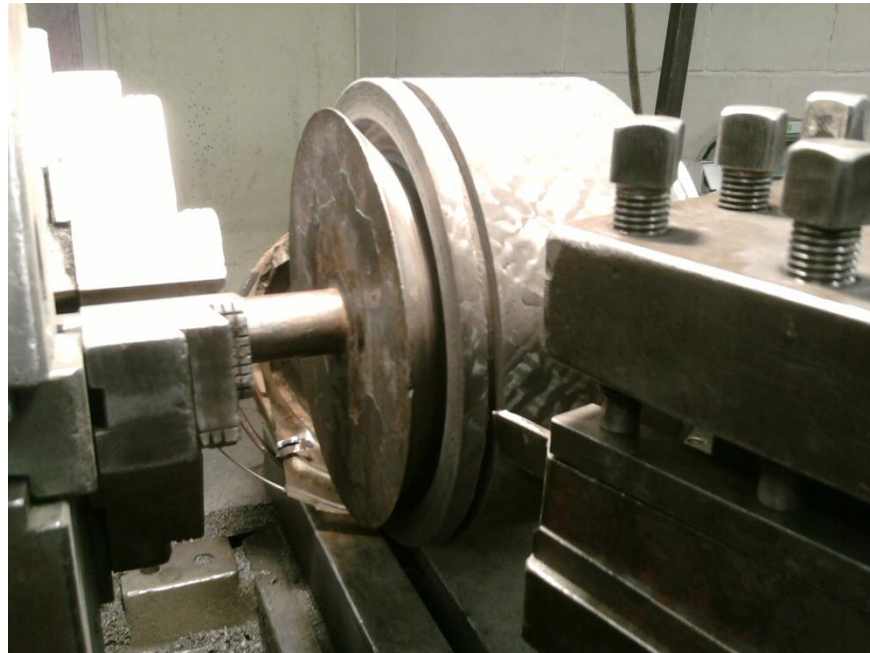
***Řezné podmínky:***

- pro oba nástroje stejné

řezná rychlost  $v_c = 35$  m/min

přísuv  $f =$  ruční – poměrně rychle, aby nedocházelo ke tření a otupení břitu

První nástroj upnutý v držáku RADEKO byl odporem v řezu ohýbán a odtlačován z řezu. Z tohoto důvodu byl úhel menší než požadovaných  $15^\circ$ . Nástroj byl také abrazivními účinky rychle otupen. Druhý nástroj s připájeným plátkem drážku spolehlivě obrobil. Povrch drážky byl dobrý.



Obr. 8-2 Obrábění šikmé hrany drážky



Obr. 8-3 Hotové části sklíčidel



## PŘÍLOHA Č. 2

# **Experiment podélného soustružení v jednotlivých vrstvách**

## Definice zkušebních materiálů

### *Materiál č.1*

Označení: FG 32/28 – 2000 V.3 140711A02

- Trubka o vnějším  $\varnothing$  32 mm, vnitřním  $\varnothing$  28 mm, výztuž – skleněné vlákno pr1200, barva trubky žlutá.

Design data						Pozice a hodnoty				
Objemový podíl kompozitu	Číslo vrstvy	počet vláken ve svazku	počet jehliček	počet použitých jehliček	typ vláken	% pokrytí trubky	úhel navíjení vláken	tloušťka vrstvy	Dolní mezní průměr	Horní mezní průměr
<b>VF</b>		<b>NL</b>	<b>NP</b>	<b>NPU</b>	<b>TF</b>		<b>AX</b>	<b>WT</b>	<b>XD</b>	<b>XDOD</b>
%					specifický	%	°	mm	mm	mm
60%	-	2	25	1	pr1200	89	86,4	0,29	28,00	28,59
60%	-	2	25	25	pr1200	131	0,0	0,88	28,59	30,35
60%	-	2	25	25	pr1200	133	21,7	0,90	30,35	32,14

Tabulka 8-2 Struktura materiálu 1

### *Materiál č.2*

Trubková spojka (výztuž)

- Trubka o vnějším  $\varnothing$  36 mm, vnitřním  $\varnothing$  32 mm, výztuž – skleněné vlákno, barva trubky červená, povrch obrobeneý.

### *Materiál č.3*

Trubka bílá tenkostěnná

- Trubka o vnějším  $\varnothing$  144 mm, vnitřním  $\varnothing$  141 mm, výztuž – skleněné vlákno pr1200, barva trubky bílá.

Design data						Pozice a hodnoty				
Objemový podíl kompozitu	Číslo vrstvy	počet vláken ve svazku	počet jehliček	počet použitých jehliček	typ vláken	% pokrytí trubky	úhel navíjení vláken	tloušťka vrstvy	Dolní mezní průměr	Horní mezní průměr
<b>VF</b>		<b>NL</b>	<b>NP</b>	<b>NPU</b>	<b>TF</b>		<b>AX</b>	<b>WT</b>	<b>XD</b>	<b>XDOD</b>
%					specifický	%	°	mm	mm	mm
59%	-	4	25	25	pr1200	42	48,3	0,56	141,00	142,12
59%	-	4	25	1	pr1200	42	88,5	0,28	142,12	142,68
59%	-	3	25	50	pr1200	55	0,0	0,55	142,68	143,78
59%	-	3	25	40	pr1200	56	38,1	0,56	143,78	144,90

Tabulka 8-3 Struktura materiálu 3

#### ***Materiál č.4***

Označení: WINDSURF MAST S75 IMCS 25 460 JOINING SLEEVE V2

- Trubka o vnějším  $\varnothing$  40 mm, vnitřním  $\varnothing$  28 mm, výztuž – uhlíkové vlákno sts, barva trubky bezbarvá.
- Poslední vrstva těsná 90°

#### ***Materiál č.5***

Označení: „TOFAS“ Bilsing CON 142(88)-132(72)-2x1500 V.7 R.0

- Trubka o vnějším  $\varnothing$  154 mm, vnitřním  $\varnothing$  132 mm, výztuž – uhlíkové vlákno cn-60-a2s a 34-700-24k, barva trubky bezbarvá.

Design data						Pozice a hodnoty				
Objemový podíl kompozitu	Číslo vrstvy	počet vláken ve svazku	počet jehliček	počet použitých jehliček	typ vláken	% pokrytí trubky	úhel navíjení vláken	tloušťka vrstvy	Dolní mezní průměr	Horní mezní průměr
<b>VF</b>		<b>NL</b>	<b>NP</b>	<b>NPU</b>	<b>TF</b>		<b>AX</b>	<b>WT</b>	<b>XD</b>	<b>XDOD</b>
%					specifický	%	°	mm	mm	mm
60%	1	3	25	20	cn-60-a2s	41	46,0	0,58	132,00	133,16
60%	2	3	25	20	cn-60-a2s	41	46,3	0,58	133,16	134,32
60%	3	6	25	25	cn-60-a2s	35	0,0	0,99	134,32	136,29
60%	4	6	25	25	cn-60-a2s	35	0,0	0,97	136,29	138,24
60%	5	3	25	20	cn-60-a2s	40	47,4	0,57	138,24	139,37
60%	6	3	25	20	cn-60-a2s	40	47,6	0,57	139,37	140,50
60%	7	3	25	20	cn-60-a2s	40	47,8	0,56	140,50	141,63
53%	8	12	25	1	34-700-24k	104	89,2	3,28	141,63	148,20
53%	9	12	25	1	34-700-24k	104	89,3	3,29	148,20	154,77

**Tabulka 8-4 Struktura materiálu 5**

### ***Materiál č.6***

Konec od 17 metrové trubky, parametry dle designu

- Trubka o vnějším  $\varnothing$  217 mm, vnitřním  $\varnothing$  200 mm, výztuž – uhlíkové vlákno sts a t700, barva trubky bezbarvá.

Design data						Pozice a hodnoty				
Objemový podíl kompozitu	Číslo vrstvy	počet vláken ve svazku	počet jehliček	počet použitých jehliček	typ vláken	% pokrytí trubky	úhel navíjení vláken	tloušťka vrstvy	Dolní mezní průměr	Horní mezní průměr
<b>VF</b>		<b>NL</b>	<b>NP</b>	<b>NPU</b>	<b>TF</b>		<b>AX</b>	<b>WT</b>	<b>XD</b>	<b>XDOD</b>
%					specifický	%	°	mm	mm	mm
57%	1	4	50	25	sts	45	46,0	0,73	200,00	201,46
57%	2	3	50	1	sts	122	89,4	0,73	201,46	202,93
57%	3	4	50	20	sts	23	46,4	0,58	202,93	204,08
57%	4	8	50	50	sts	61	0,0	1,97	204,08	208,03
57%	5	2	50	80	t700	89	47,1	0,59	208,03	209,21
57%	6	3	50	1	sts	122	89,4	0,73	209,21	210,68
57%	7	8	50	50	sts	59	0,0	1,91	210,68	214,51
57%	8	2	50	100	t700	105	45,3	0,69	214,51	215,89
57%	9	4	50	25	sts	42	45,4	0,67	215,89	217,23

**Tabulka 8-5** Struktura materiálu 6

### ***Materiál č.7***

Karbonová trubka vyztužená obrobenou laminátovou trubkou (materiál č.2)

- Vnější trubka o vnějším  $\varnothing$  42 mm, vnitřním  $\varnothing$  36 mm, výztuž – uhlíkové vlákno sts, barva trubky bezbarvá.
- Vnitřní trubka o vnějším  $\varnothing$  36 mm, vnitřním  $\varnothing$  28 mm, výztuž – skleněné vlákno, barva trubky červená, povrch trubky obrobený, (materiál č.2).

## Experiment podélného soustružení v jednotlivých vrstvách

### *Postup experimentu soustružení:*

Pro operaci soustružení bylo cílem experimentu podélné soustružení předem námi definovaných materiálů. Zkušební materiály byly zvoleny náhodně ze zbytků nebo odřezků výrobků. U těchto materiálů byly definovány hodnoty množství vyztužující fáze, počet a druh vláken a způsob navíjení ve vrstvách, tj. struktura vrstev kompozitu podle úhlu navíjení. Tři zkušební vzorky byly sklolaminátové materiály číslo 1 - 3 a tři vzorky byly vyrobeny z karbonu číslo 4 - 6.

Experiment byl prováděn na universálním soustruhu SCHAEERER UD 630 (r.v. 1974). Zkušební trubky byly podélně soustruženy v určitých strukturních vrstvách za určitých řezných podmínek. Odebírání materiálu bylo prováděno soustružnickým nožem s SK destičkou. Chlazení nástroje bylo nemožné z hlediska nasáklivosti olejových emulzí do pórovitého povrchu kompozitu. Prach a třísky se odváděly z místa řezu odsáváním.

### *Použité nástroje:*

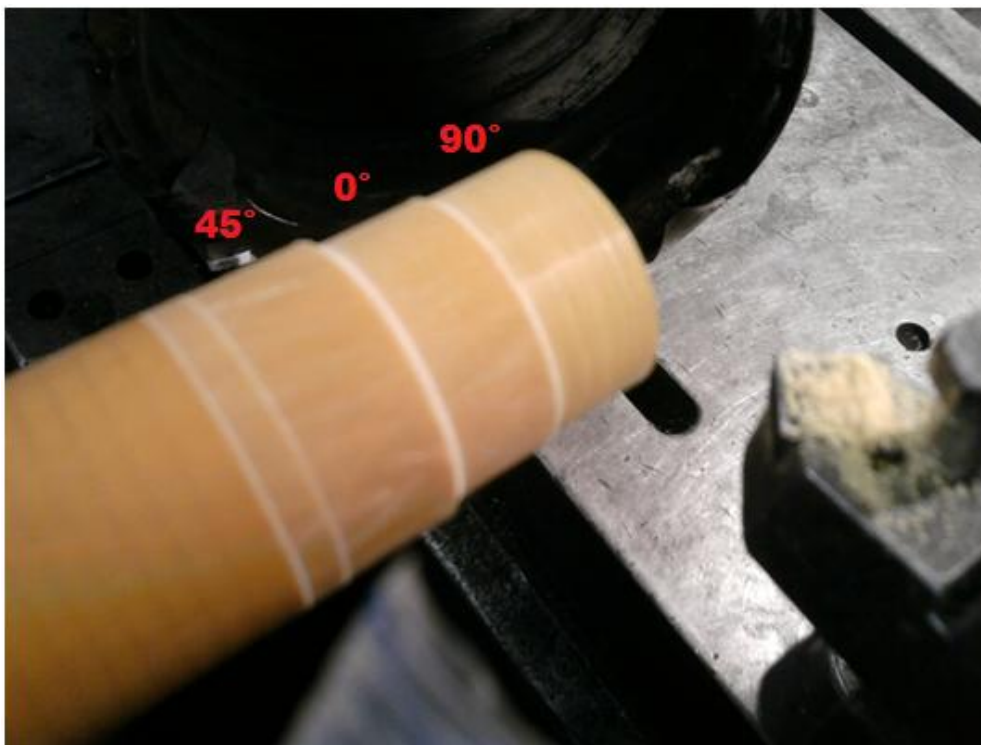
- Uběrací soustružnický nůž s SK VBD

### *Řezné podmínky při soustružení:*

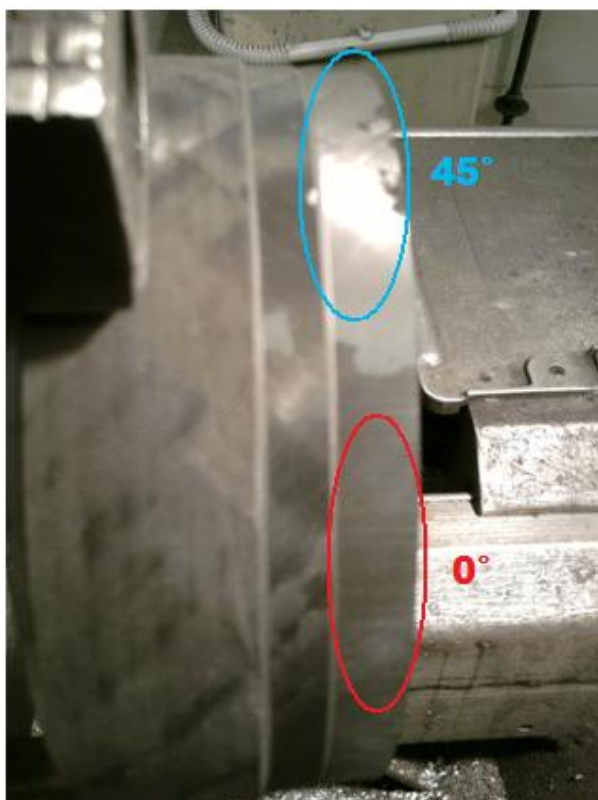
Řezná rychlost  $v_c = 35-40$  m/min

Posuv  $f = 0,21 - 0,23$  mm/ot

Experiment spočíval v podélném obrábění kompozitové trubky v předem určených vrstvách na jmenovitých průměrech, uvedených v design data. Cílem experimentu bylo zjistit, jak vypadá obrobený povrch ve vrstvách s úhlem vinutí vláken  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$ . Dále pak chování obráběného materiálu při řezu a v neposlední řadě drsnost obrobeného povrchu. Podle mnou zvoleného počtu otáček na stroji se hodnoty řezných rychlostí pohybovaly mezi 35 - 40 m/min. Hodnoty podélného posuvu činily  $f = 0,21 - 0,23$  mm/ot.



Obr. 8-4 Soustružení po vrstvách



Obr. 8-5 Přejímová oblast dvou vrstev



Obr. 8-6 Delaminace podélné vrstvy



Z hlediska úhlu vinutí vláken se nejlépe obráběl materiál s vlákny šikmo vinutými, tj. pod úhlem  $45^\circ$  a  $135^\circ$ . Obráběný povrch byl hladký a bez otřepů na rozhraní opracované a neopracované plochy. U vrstvy vláken pod úhlem  $90^\circ$  docházelo k vytrhávání celých vláken kolem obvodu obráběné trubky. Povrch byl s drobnými hrbolky. Při obrábění vrstvy pod úhlem vinutí  $0^\circ$  docházelo, při obrábění karbonu, k třepení a delaminaci na styku opracované a neopracované plochy. Tato plocha se poté musela začistit brusným papírem. Z hlediska kvality povrchu byla vlákna na povrchu vytrhána a celkově se zdál být povrch nejdrsnější. Na *obrázku 8-6* je vidět karbonová trubka s vlákny kladenými na povrchu pouze pod úhlem  $0^\circ$ . Po najetí rezným nástrojem do povrchu došlo k silnému roztržení a delaminaci.

### **Měření obrobků**

V první řadě byla na všech obrobených vzorcích změřena drsnost pomocí digitálního drsnoměru Mitutoyo. Měření bylo prováděno na třech místech průměru po  $120^\circ$ . Hodnoty drsností byly přibližně stejné, bez ohledu na směr vedení vláken. Drsnost se pohybovala kolem  $Ra1,6 \mu\text{m}$  až  $Ra3,2 \mu\text{m}$ . V *tabulkách 8-6 až 8-11* vidíme jednotlivé naměřené hodnoty.



**Obr. 8-7 Měření drsnosti**

*Naměřené hodnoty sklolaminátových materiálů*

Počet měření	soustružené průměry / směr vláken		
	1 (45°)	2 (0°)	3 (90°)
1	4,32	2,14	2,04
2	2,80	3,04	1,78
3	2,61	3,41	2,87
<b>průměr</b>	3,24	2,86	2,23

Tabulka 8-6 Drsnost materiálu č. 1

Počet měření	soustružené průměry / směr vláken			
	1 (90°)	2 (0°)	3 (45°)	4 (0°)
1	2,55	2,67	3,07	2,71
2	3,12	2,41	2,71	2,55
3	1,44	3,10	3,61	2,35
<b>průměr</b>	2,37	2,73	3,13	2,54

Tabulka 8-7 Drsnost materiálu č. 2

Počet měření	soustružené průměry / směr vláken			
	1 (45°)	2 (0°)	3 (90°)	4 (45°)
1	3,10	-	-	3,36
2	3,50	-	-	2,98
3	4,10	-	-	3,92
<b>průměr</b>	3,57	-	-	3,42

Tabulka 8-8 Drsnost materiálu č. 3

*Naměřené hodnoty karbonových materiálů*

Počet měření	soustružené průměry / směr vláken					
	1 (45°)	2 (45°)	3 (45°)	4 (45°)	5 (45°)	6 (0°)
1	2,13	1,63	2,55	2,40	1,27	1,67
2	1,91	1,95	2,26	2,11	2,04	1,99
3	2,01	1,85	1,90	2,28	1,61	1,47
<b>průměr</b>	2,02	1,81	2,24	2,26	1,64	1,71

Tabulka 8-9 Drsnost materiálu č. 4

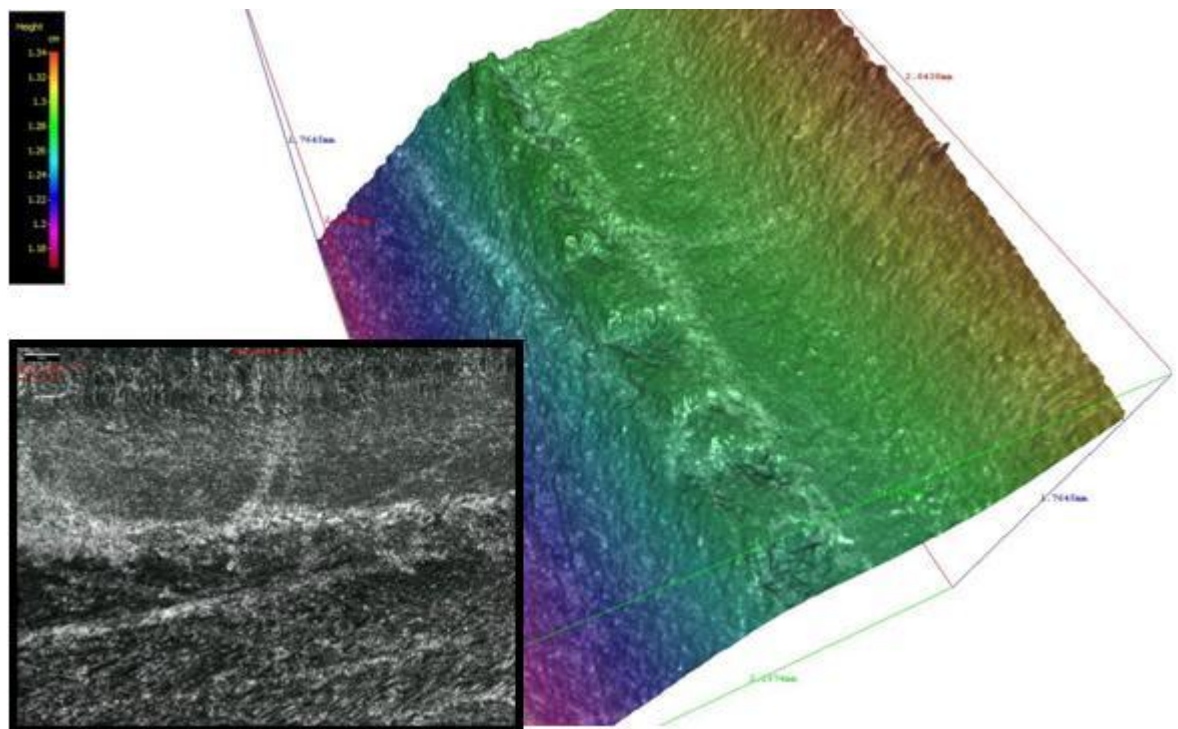
Počet měření	soustružené průměry / směr vláken	
	1 (45°)	2 (0°)
1	2,58	1,28
2	2,00	2,06
3	2,04	1,92
<b>průměr</b>	2,21	1,75

Tabulka 8-10 Drsnost materiálu č. 5

Počet měření	soustružené průměry / směr vláken	
	1 (45°)	2 (45°)
1	2,18	1,57
2	2,48	2,53
3	6,84	2,37
<b>průměr</b>	3,83	2,16

Tabulka 8-11 Drsnost materiálu č. 6

Další měření probíhaly na mikroskopu Alicona. Na zkoumaném povrchu byly objeveny vady obrobeného povrchu, úhly směru vláken nebo delaminace na přechodech mezi obrobeným a neobrobeným povrchem.



Obr. 8-8 Snímek a polobarevná prostorová simulace karbonu – přechod 45° vs 0°





***Zhodnocení výsledků experimentu:***

Přestože obrábění probíhalo ve vrstvách s různou orientací vláken, výsledné drsnosti se při soustružení příliš neliší. To dokazují průměrné hodnoty v tabulkách naměřených hodnot. Chyby a zkreslené hodnoty při měření drsnosti mohly být způsobeny prasknutím tenké stěny trubky, popřípadě opotřebením VBD při obrábění. Drsnosti některých průměrů nešly z důvodu malé podélné vzdálenosti změřit. Tento problém nastal například u materiálu číslo 3. Z naměřených výsledků se konečná drsnost obrobeneých povrchu rovnala přibližně Ra1,6  $\mu\text{m}$  až Ra3,2  $\mu\text{m}$ .

Měřený úhel mezi různě orientovanými vlákny byl vcelku souhlasný s hodnotami úhlů v design data. Měřené úhly, vzhledem k nerovnému čelu trubky, nebyly přesně určeny. Úhel na přechodu navinutých vláken na *obrázku 8-10*, mezi šikmými vlákny 45° a 135°, činil 105°.

Více snímků z měření na mikroskopu Alicona a z procesu obrábění je uvedeno v elektronické podobě na příloženém CD.



***Obráběcí stroj:***

**Popis zařízení**

Značka:	Schaerer
Výr. číslo:	16686/73
Typ označení:	UD 630
Rok výroby:	1974
Název zařízení:	universální soustruh
Max. točná délka:	3000 mm
Max. točný průměr:	420/730 mm
Max. výkon motoru:	15 kW / 380 V Motor je vybaven automatickým nastavováním výkonu dle zátěže
Otáčky elektromotoru:	1450 /min
Rozměry:	délka 5500 x výška 1300 x šířka 2100 mm
Váha:	cca 3600 kg

**Tabulka 8-12** Technické údaje stroje



**Obr. 8-11** Universální soustruh Schaerer UD 630

## PŘÍLOHA Č. 3

# **Experiment vrtání**

## Experiment vrtání

### *Postup experimentu vrtání:*

Experiment spočíval ve vrtání průchozích děr do různých kompozitních materiálů. Byla sledována tvorba delaminace při různých řezných rychlostech.

Vrtání bylo prováděno na sloupové vrtačce KA-ZANLIK. Do každého materiálu byly vyvrtány minimálně 4 průchozí otvory o  $\varnothing$  16 mm, za určitých řezných podmínek. Použitým vrtacím nástrojem byla vrtací korunka usředěná vodícím vrtákem. Chlazení nástroje bylo nemožné z hlediska nasáklivosti olejových emulzí pórovitého povrchu kompozitu. Prach a třísky byly odváděny z místa řezu odsávacím zařízením. Jednotlivé díry byly vrtány za různých otáček vřetene. V našem případě 265, 475, 850 a 1500 ot/min. Hodnoty otáček byly poté přepočítány na hodnoty řezné rychlosti. Rychlost penetrace byla prováděna manuálně.



do

Obr. 4 Vrtání do sklolaminátu



Obr. 8-13 Průběh experimentu

***Použité nástroje:***

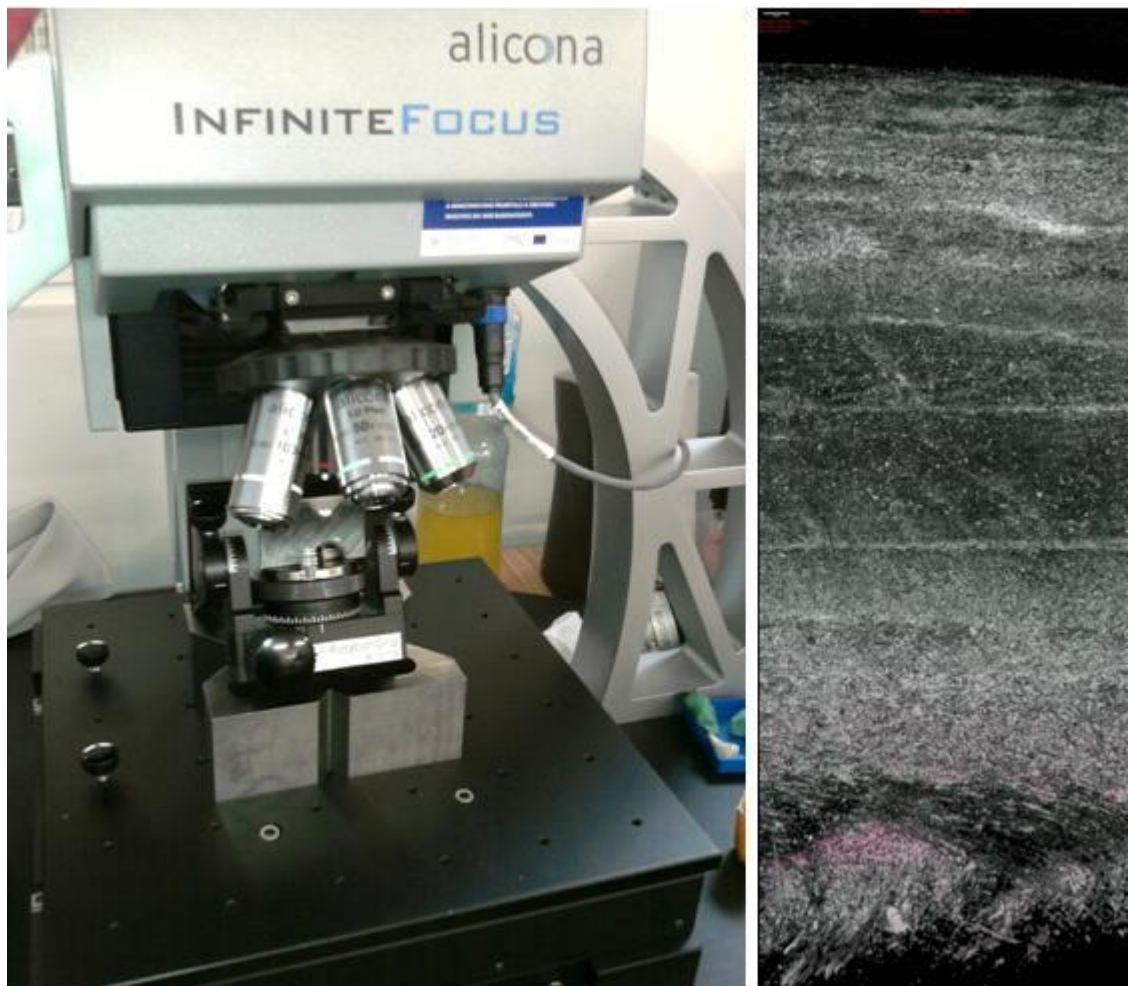
- vrták z HSS o  $\varnothing$  6,3 mm, úhle špičky  $90^\circ$
- vrtací bimetalická korunka  $\varnothing$  16 mm BI-METAL HSS

***Řezné podmínky při vrtání:***

Řezná rychlost  $v_c = 10 - 80$  m/min – podle možností stroje  
Posuv  $f =$  ruční

***Měření obrobků***

Na mikroskopu Alicona byly naskenovány snímky s povrchem stěny otvoru. Cílem měření bylo zjistit změny a vady ve vrstvách kompozitu. Z důvodu silné delaminace nemělo smysl měřit drsnost. Na snímku *obrázku 8-13* vpravo, je patrná vylomená vrstva na výstupu vrtáku z díry.



**Obr. 8-14 Průběh měření stěny otvoru**



**Zhodnocení výsledků experimentu:**

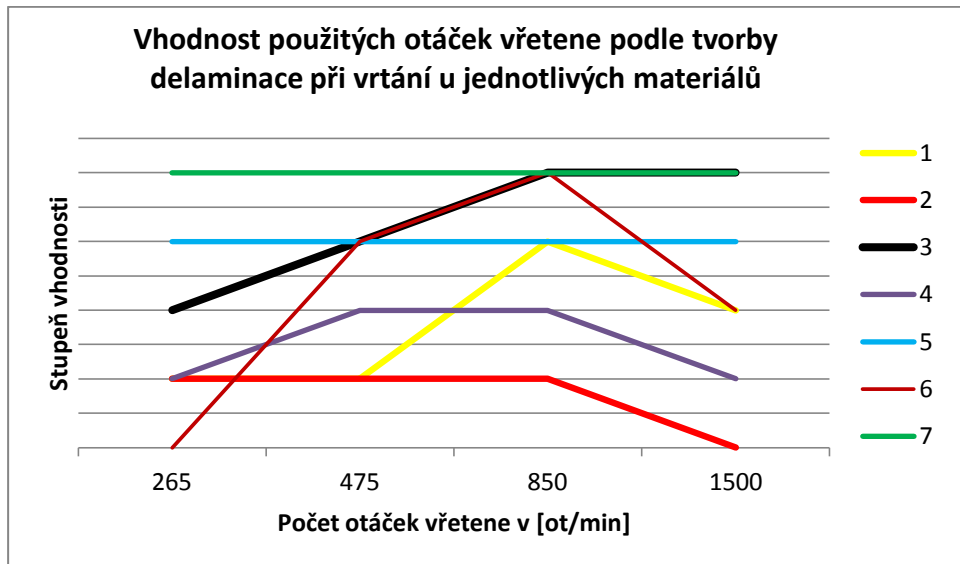
Cílem experimentu při procesu vrtání bylo sledovat tvorbu delaminace a zajistit vhodné režné podmínky při obrábění definovaným nástrojem, tj. za jakých otáček se bude materiál nejlépe obrábět a způsobí nejmenší delaminace. Výsledek experimentu je uveden v *tabulce 8-12*.

Materiál číslo	Počet otáček vřetene v [ot/min]			
	265	475	850	1500
1	silná delaminace na výstupu	silná delaminace na výstupu	slabá delaminace na výstupu	delaminace na výstupu
2	silná delaminace na výstupu	silná delaminace na výstupu	silná delaminace na výstupu	slabá delaminace na vstupu, silná na výstupu
3	propružila, delaminace na výstupu	slabá delaminace na výstupu	bez delaminace	bez delaminace
4	silná delaminace na výstupu	delaminace na výstupu	delaminace na výstupu	silná delaminace na výstupu
5	slabá delaminace na výstupu	slabá delaminace na výstupu	slabá delaminace na výstupu	slabá delaminace na výstupu
6	silná delaminace na výstupu	slabá delaminace na výstupu	bez delaminace	delaminace na výstupu
7	bez delaminace	bez delaminace	bez delaminace	bez delaminace

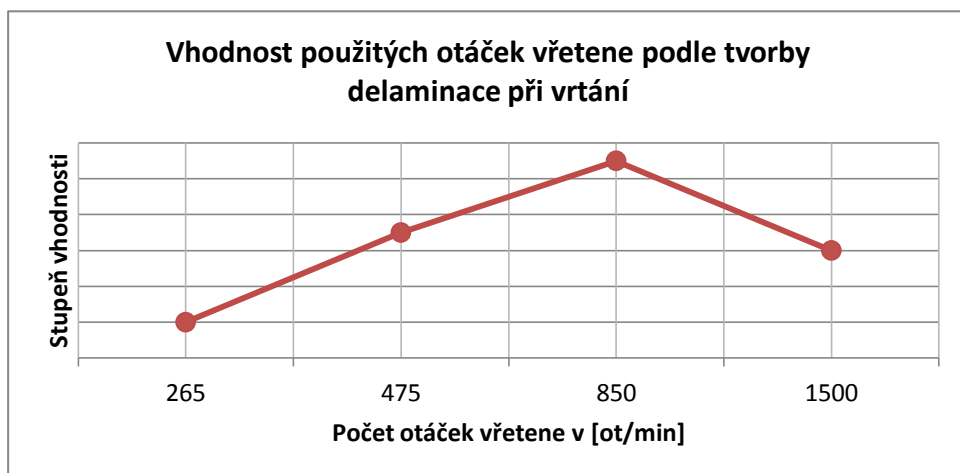
**Tabulka 8-13** Výsledné hodnoty experimentu

Chyby a nepřesnosti v experimentu byly způsobeny chováním materiálu při vrtání. Protože vrtání bylo prováděno také do trubek větších rozměrů o tenkých stěnách, trubka pružila a musela být vyztužena kotoučem vsazeným do vnitřního průměru trubky. Jiné nepřesnosti mohly vzniknout otupěním nástroje, vlivem abrazivních účinků materiálu či nerovnoměrným ručním posuvem. Vyvrtané díry byly poté začištěny brusným papírem a sledovala se velikost delaminace na vstupu a výstupu vrtané díry. Podle stupně delaminace je v grafech ukázáno, za jakých otáček se materiál nejlépe obráběl a způsobil nejmenší delaminaci. V *grafu 8-1*, je ukázána vhodnost použitých otáček pro jednotlivé zkoušené materiály. V *grafu 8-2*, je celková vhodnost pro všechny zkoušené materiály obecně.





Graf 8-1 Vhodnost použitých otáček - všechny materiály



Graf 8-2 Vhodnost použitých otáček – obecně

Z výsledků v grafu 8-2 bylo zjištěno, že nejkvalitnější díry byly vyvrtány při otáčkách  $n=850$  ot/min.

### Výpočet řezné rychlosti

$$v_c = \pi \times D \times n$$

$$v_c = \pi \times 0,016 \times 850$$

$$v_c = 42,73 \text{ m/min}$$

Pro vrtání bimetalickou korunkou o  $\varnothing 16$  mm, po dosazení do vzorce pro výpočet řezné rychlosti byla vypočtena nejvhodnější řezná rychlost  $v_c = 43$  m/min.

## Evidenční list

**Souhlasím** s tím, aby moje bakalářská práce byla půjčována k prezenčnímu studiu v Univerzitní knihovně ZČU v Plzni.

Datum:

Podpis:

Uživatel stvrzuje svým podpisem, že tuto bakalářskou práci použil ke studijním účelům a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

Jméno	Fakulta/katedra	Datum	Podpis