



# Destrukce vláknenných struktur při obrábění kompozitních materiálů s uhlíkovou výztuží

## Diplomová práce

*Studijní program:*

*Autor práce:*

*Vedoucí práce:*

N0722A270001 Technologie plastů a kompozitů

**Bc. Jakub Flek**

doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.

Katedra materiálu





## Zadání diplomové práce

# Destrukce vlákenných struktur při obrábění kompozitních materiálů s uhlíkovou výztuží

*Jméno a příjmení:* **Bc. Jakub Flek**  
*Osobní číslo:* S20000243  
*Studijní program:* N0722A270001 Technologie plastů a kompozitů  
*Zadávací katedra:* Katedra materiálu  
*Akademický rok:* **2021/2022**

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny a možnostmi jejich obrábění.
2. Proveďte rešerši k dané problematice, zejména k problematice destrukce vlákenných struktur a uvolňování uhlíkových vláken z materiálu při obrábění.
3. Navrhněte metodiku experimentů – příprava kompozitních vzorků, technologie a podmínky obrábění, rezné podmínky a nástroj, hodnocení obroběných vzorků (povrch vzorku, tříska, uvolněná vlákna).
4. Realizujte navržené experimenty.
5. Vyhodnoťte a diskutujte získané výsledky.
6. Formulujte závěry.

Rozsah grafických prací:  
Rozsah pracovní zprávy:  
Forma zpracování práce:  
Jazyk práce:

tištěná/elektronická  
Čeština



### Seznam odborné literatury:

1. Kocman, K., Prokop, K. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
2. Bilík, O. *Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská – TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
3. Mádl, J., Jersák, J., Holešovský, F., kol. *Jakost obráběných povrchů*. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 179 s. ISBN 80-7044-539-4.
4. Komanduri, R. (1997). *Machining of Fiber-Reinforced Composites. Machining Science and Technology*, 1(1), 113–152. doi:10.1080/10940349708945641
5. Caggiano, A. *Machining of Fibre Reinforced Plastic Composite Materials. Materials (Basel)*. 2018;11(3):442.
6. Uhlmann, E., Sammler, F., Richarz, S., Reucher, G., Hufschmied, R., Frank, A., Protz, F. (2016). *Machining of Carbon and Glass Fibre Reinforced Composites. Procedia CIRP*, 46, 63–66.
7. Altin Karataş, M., & Gökkaya, H. (2018). *A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. Defence Technology*, 14(4), 318–326. doi:10.1016/j.dt.2018.02.001
8. Azmi, A. I. (2013). *Chip formation studies in machining fibre reinforced polymer composites. International Journal of Materials and Product Technology*, 46(1), 32. doi:10.1504/ijmpt.2013.052790
9. Kehren et al. (2019) *Release of Respirable Fibrous Dust from Carbon Fibers Due to Splitting along the Fiber Axis. Aerosol and Air Quality Research*, 19, 10 1–11, doi:10.4209/aaqr.2019.03.0149

Vedoucí práce:

doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.  
Katedra materiálu

Datum zadání práce:

13. října 2021

Předpokládaný termín odevzdání: 3. února 2023

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

prof. Ing. Petr Louda, CSc.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

17. května 2022

Bc. Jakub Flek

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce paní doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D. za odbornou pomoc při zpracování této práce, ochotu a množství poskytnutých rad, které mi pomohly zcela pochopit problematiku mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinovi Švecovi, Ph.D. za umožnění přístupu k elektronovému mikroskopu, panu Ing. Tomášovi Knápkovi za pomoc při obrábění vzorků a panu Ing. Pavlovi Hanusovi, Ph.D. za pomoc s programem NIS Elements.

## **Abstrakt**

Předmětem této diplomové práce je zkoumání destrukce vlákněných struktur u CFRP při třískovém obrábění-broušení, frézování a vrtání. Teoretická část práce obecně pojednává o kompozitních materiálech s vlákněnou výztuží. Dále pojednává o strukturách vláken a třískovém obrábění kompozitních materiálů. Experimentální část popisuje způsob výroby vzorku, odběrů vzorků, a vyhodnocování délek uhlíkových vláken a submikroskopických uhlíkových částic. To bylo realizováno prostřednictvím programu NIS-elements 5.02 a získaných obrázků ze SEM (BSE). Dále byly jednotlivé vzorky zkoumány pomocí optického a elektronového mikroskopu. Z naměřených dat byla zjištěna hustota normálního rozdělení délek uhlíkových vláken a submikroskopických uhlíkových částic v závislosti na dané třískové technologii.

## **Klíčová slova:**

kompozit, uhlíková vlákna, destrukce, vrtání, frézování, broušení, CFRP

## **Abstract**

The subject of this diploma thesis is to investigate the destruction of fibrous structures in CFRP during machining-grinding, milling and drilling. The theoretical part of the work generally deals with composite materials with fiber reinforcement. It also discusses fiber structures and machining of composite materials. The experimental part describes the method of sample production, sampling, and evaluation of the lengths of carbon fibers and submicroscopic carbon particles. This was done through the NIS-elements 5.02 program and the SEM (BSE) images obtained. Furthermore, individual samples were examined using an optical and electron microscope. The density of the normal length distribution of carbon fibers and submicroscopic carbon particles depending on the given chip technology was determined from the measured data.

## **Keywords:**

composite, carbon fibers, destruction, drilling, milling, grinding, CFRP

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>15</b>
<b>1 Teoretická část</b>	<b>16</b>
1.1 Kompozitní materiály . . . . .	16
1.1.1 Matrice . . . . .	17
1.1.2 Mezifáze . . . . .	18
1.1.3 Vláknová výztuž . . . . .	19
1.1.4 Výroba kompozitních materiálů . . . . .	26
1.2 Třískové obrábění kompozitních materiálů s polymerní matricí vy- ztuženou uhlíkovými vlákny . . . . .	31
1.2.1 Nástroje a materiály pro obrábění CFRP . . . . .	32
1.2.2 Frézování . . . . .	32
1.2.3 Vrtání . . . . .	34
1.2.4 Broušení . . . . .	35
1.3 Poruchy vlákněných struktur u FRP . . . . .	36
1.3.1 Struktury a mechanické vlastnosti vláken . . . . .	37
1.3.2 Mechanismus porušení vláken . . . . .	40
<b>2 Experimentální část práce</b>	<b>43</b>
2.1 Metodika experimentu . . . . .	43
2.2 Příprava kompozitních vzorků . . . . .	43
2.2.1 Obrábění vzorků . . . . .	46
2.2.2 Odběr a analýza vzorků . . . . .	49
2.3 Hodnocení vzorků vláken a vlákněných částic . . . . .	51
2.3.1 Vyhodnocení délek vláken pomocí optické a elektronové rastro- vací mikroskopie . . . . .	53
<b>3 Diskuse</b>	<b>70</b>
<b>4 Závěr</b>	<b>74</b>



## Seznam obrázků

1.1	Rozdělení kompozitních materiálů [23]	16
1.2	Synergický efekt [vlastní]	17
1.3	Schématické zobrazení mezifáze v kompozitním materiálu [9].	18
1.4	Typy tkanin [10].	20
1.5	Znázornění grafitické mikrostruktury uhlíkového vlákna [5].	21
1.6	Ukázka mikrostruktury uhlíkových vláken na bázi PAN a pitch prekurzorů [29].	22
1.7	Popis schématické výroby uhlíkových vláken z prekurzoru PAN [14].	23
1.8	Popis schématické výroby aramidových vláken [10]	25
1.9	Popis schématické výroby skelných vláken [10].	26
1.10	Modelový postup při výrobě kompozitních dílů [vlastní].	27
1.11	Schématická ukázka metody ručního kladení [30].	28
1.12	Schématická ukázka metody lisování za studena i za tepla [30].	29
1.13	Princip vakuového lisování [1].	29
1.14	Schématická ukázka metody vakuového lisování [1].	30
1.15	Mechanismus opotřebení nástroje při obrábění GFRP, (a) abraze, (b) mikrochipping, SEM [4].	32
1.16	Popis základních způsobů frézování [32].	33
1.17	Schématický popis vrtání, (1)-řezný pohyb, (2)-axiální posuv [31].	34
1.18	Schématický popis technologie broušení [15].	35
1.19	Mechanismy porušení vláknových laminátů, dle místa porušení [13].	36
1.20	Základní makro konformace polymerů (a) metastabilní amorfní (náhodné klubko), (b) metastabilní lamelární se skládanými řetězci, (c) stabilní lamelární krystal s napjatými řetězci [26].	37
1.21	Příklady křehkých lomů vláken (1)-skleněné vlákno, (2)-keramické vlákno, (3)-panCF [26].	41
1.22	Příklady houževnatých lomů u PES vláken [26].	41
1.23	Granulární lom u lyocelových vláken [26].	42
1.24	Axiální štěpení vláken (1)-Kevlar, (2)-Nomex [26].	42
2.1	Nanášení vrstev uhlíkové tkaniny, a prosycování pryskyřičným systémem pomocí vláčečku a štětce.	44

2.2	Nekonsolidovaná deska při nanesených 110 vrstvách uhlíkové tkaniny.	44
2.3	Nekonsolidovaná deska se strhávací fólií. . . . .	44
2.4	Nekonsolidovaná deska s navrstvenými uhlíkovými tkaninami a oce- lou destičkou. . . . .	44
2.5	Nekonsolidovaná deska při zapnuté vakuové pumpě. . . . .	45
2.6	Vyjmutá laminátová deska z formy. . . . .	45
2.7	Zarovnání hran konsolidovaného vzorku pásovou pilou ARPG 600 Plus H.F. . . . .	46
2.8	Zarovnaná laminátová deska z CFRP o rozměrech 175x170x29 mm. .	46
2.9	Vyobrazení technologie broušení laminátové desky z CFRP. . . . .	46
2.10	Vyobrazení technologie frézování laminátové desky z CFRP. . . . .	47
2.11	Vyobrazení technologie vrtání laminátové desky z CFRP. . . . .	48
2.12	Nevypálené vzorky s epoxidovou pryskyřicí. . . . .	49
2.13	Vypálené vzorky bez epoxidové pryskyřice. . . . .	49
2.14	Ukázka oddělení vláknenné částice (v levo dole) a zobrazení smykového lomu (v pravo nahoře) uhlíkového vlákna, vrtání-5-1500/pryskyřice, SEM (BSE). . . . .	51
2.15	Zobrazení granulárního lomu uhlíkového vlákna, broušení-0,2-2400/prys- kyřice, SEM (BSE). . . . .	51
2.16	Zobrazení náhodně vybraného odštípnutého vlákna s odštíplou povr- chovou vrstvou (horní část odděleného vlákna), SEM (BSE)/pryskyřice, broušení-0,2-2400. . . . .	53
2.17	Zobrazení náhodně vybraného odštípnutého vlákna s viditelnými dráž- kami (bazálními stuhami), frézování-1-1000/pryskyřice, SEM (BSE). .	53
2.18	Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna větší než 10 $\mu\text{m}$ , brou- šení-0,2-2400, OM. . . . .	54
2.19	Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna menší 10 $\mu\text{m}$ , broušení- -0,2-2400, SEM (BSE). . . . .	54
2.20	Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna větší než 10 $\mu\text{m}$ , broušení-0,2-2400. . . . .	55
2.21	Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna menší než 10 $\mu\text{m}$ , broušení-0,2-2400. . . . .	55
2.22	Hustota normálního rozdělení pro uhlíkové vláknenné částice menší než 5 $\mu\text{m}$ , broušení-0,2-2400. . . . .	56
2.23	Zobrazení náhodně vybrané oblasti pro měření délek uhlíkových vlá- kenných částic menších než 5 $\mu\text{m}$ , SEM (BSE), broušení-0,2-2400. . .	56

2.24	Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna větší než 10 $\mu\text{m}$ , frézování-1-1000. . . . .	57
2.25	Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna větší než 10 $\mu\text{m}$ , frézování-1-1000, OM. . . . .	57
2.26	Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna menší než 10 $\mu\text{m}$ , frézování-1-1000, SEM (BSE). . . . .	57
2.27	Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna menší než 10 $\mu\text{m}$ , frézování-1-1000. . . . .	58
2.28	Hustota normálního rozdělení pro uhlíkové vlákenné částice menší než 5 $\mu\text{m}$ , frézování-1-1000. . . . .	58
2.29	Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna větší než 10 $\mu\text{m}$ , frézování-2-1000. . . . .	59
2.30	Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna větší než 10 $\mu\text{m}$ , frézování-2-1000, OM. . . . .	59
2.31	Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna menší než 10 $\mu\text{m}$ , frézování-2-1000, SEM (BSE). . . . .	59
2.32	Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna menší než 10 $\mu\text{m}$ , frézování-2-1000. . . . .	60
2.33	Hustota normálního rozdělení pro uhlíkové vlákenné částice menší než 5 $\mu\text{m}$ , frézování-2-1000. . . . .	61
2.34	Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna větší než 10 $\mu\text{m}$ , vrtání-9,8-500, OM. . . . .	61
2.35	Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna menší než 10 $\mu\text{m}$ , vrtání-9,8-500, SEM (BSE). . . . .	61
2.36	Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna větší než 10 $\mu\text{m}$ , vrtání-9,8-500. . . . .	62
2.37	Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna menší než 10 $\mu\text{m}$ , vrtání-9,8-500. . . . .	62
2.38	Hustota normálního rozdělení pro uhlíkové vlákenné částice menší než 5 $\mu\text{m}$ , vrtání-9,8-500. . . . .	63
2.39	Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna větší než 10 $\mu\text{m}$ , vrtání-9,8-1000. . . . .	63
2.40	Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna větší než 10 $\mu\text{m}$ , vrtání-9,8-1000, OM. . . . .	64
2.41	Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna menší než 10 $\mu\text{m}$ , vrtání-9,8-1000, SEM (BSE). . . . .	64

2.42	Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna menší než 10 $\mu\text{m}$ , vrtání-9,8-1000. . . . .	64
2.43	Hustota normálního rozdělení pro uhlíkové vlákenné částice menší než 5 $\mu\text{m}$ , vrtání-9,8-1000. . . . .	65
2.44	Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna větší než 10 $\mu\text{m}$ , vrtání-5-1500. . . . .	65
2.45	Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna větší než 10 $\mu\text{m}$ , vrtání-5-1500, OM. . . . .	66
2.46	Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna menší než 10 $\mu\text{m}$ , vrtání-5-1500, SEM (BSE). . . . .	66
2.47	Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna menší než 10 $\mu\text{m}$ , vrtání-5-1500. . . . .	66
2.48	Hustota normálního rozdělení pro uhlíkové vlákenné částice menší než 5 $\mu\text{m}$ , vrtání-5-1500. . . . .	67
2.49	Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna větší než 10 $\mu\text{m}$ , vrtání-5-2000. . . . .	67
2.50	Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna větší než 10 $\mu\text{m}$ , vrtání-5-2000, OM. . . . .	68
2.51	Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna menší než 10 $\mu\text{m}$ , vrtání-5-1500, SEM (BSE). . . . .	68
2.52	Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna větší než 10 $\mu\text{m}$ , vrtání-5-2000 . . . . .	68
2.53	Hustota normálního rozdělení pro uhlíkové vlákenné částice menší než 5 $\mu\text{m}$ , vrtání-5-2000. . . . .	69
2.54	Zobrazení náhodně vybrané oblasti pro měření délek uhlíkových vlákenných částic menších než 5 $\mu\text{m}$ , SEM (BSE), vrtání-5-2000. . . . .	69
3.1	Distribuce oddělených uhlíkových vláken a vlákenných částic (WHO-fibers) pro (A) panCFRP, (B) pitchCFRP, které byly nalezeny po abrazivním experimentu (frézování) [20] . . . . .	72
3.2	Schémetické znázornění naorientovaných grafitických vrstev (a) grafenové vrstvy rovnoběžně s osou vlákna, (b) grafenové vrstvy kolmo na osu vlákna [2] . . . . .	73

## Seznam tabulek

1.1	Pozitivní a negativní parametry vybraných druhů matric [27]. . . . .	18
1.2	Vlastnosti některých typů skel [24] . . . . .	26
2.1	Řezné podmínky při broušení. . . . .	47
2.2	Specifikace frézky FNG 32 . . . . .	47
2.3	Řezné podmínky při frézování. . . . .	47
2.4	Řezné podmínky při vrtání. . . . .	48
2.5	Navážka vypálených vzorků. . . . .	50
2.6	Přehled vzorků. . . . .	51
3.1	Vyhodnocené průměrné délky analyzovaných vláken a vlákných částic ze všech měření (oblast 3 je měřená v jednotkách nm). . . . .	71
3.2	Vyhodnocené maximální a minimální délky analyzovaných vláken a vlákných částic ze všech měření. . . . .	71

## Seznam zkratek

Tc - kritická (přechodová) teplota [K]

SEM - rastrovací elektronová mikroskopie (scanning electron microscopy)

CFRP - kompozitní materiály vyztužené uhlíkovými vlákny a polymerní matricí (carbon fibers reformed polymer)

BSE - zpětně odražené elektrony (back – scattered electrons)

FRP - kompozitní materiály vyztužené vlákny a polymerní matricí (carbon fibers reformed polymer)

PAN - polyakrylonitril

panCF - uhlíková vlákna vyrobená z prekurzoru PAN

PES - polyester

PTT - polytrimetylentereftalát

PBT - polybutyilentereftalát

PEN - polyetylnaftalát

PBO - poly(p-fenylene-benzobisoxazol)

# Úvod

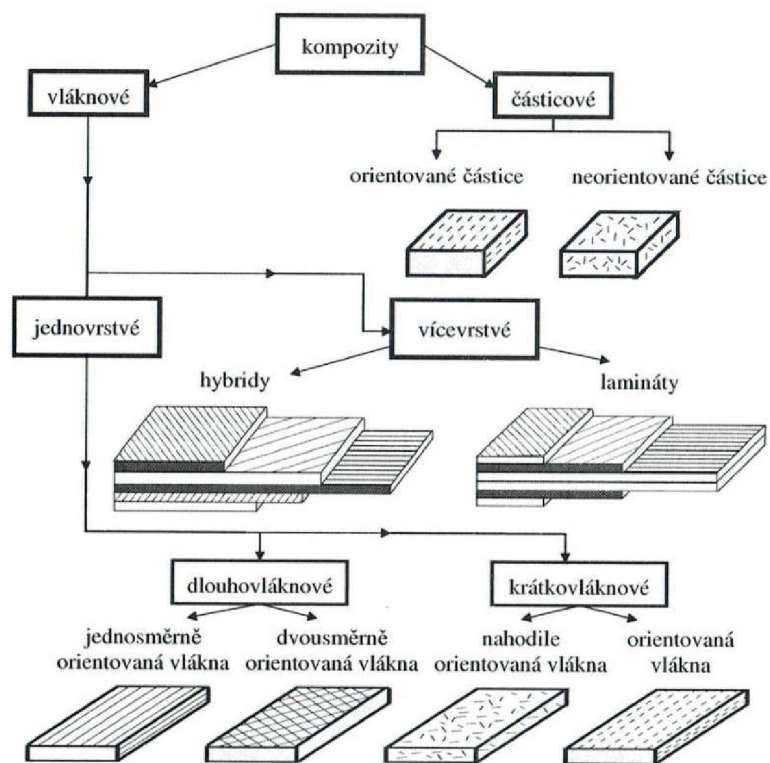
Jedny z nejvíce využívaných kompozitních materiálů jsou polymery vyztužené uhlíkovými vlákny (CFRP-carbon fiber-reinforced plastic) a skleněnými vlákny (GFRP-glass fiber-reinforced plastic), ať už krátkými či dlouhými. Sklená vlákna jsou spíše využívána kvůli poměru cena/výkon, ale pokud vyžadujeme od konečného dílu vynikající mechanické vlastnosti a nízkou hmotnost, jsou využívána spíše uhlíková vlákna, i za cenu vyšších nákladů. Značná část kompozitních dílů vyžaduje ke své finalizaci dokončovací operace jako je broušení, frézování nebo vrtání. V leteckém průmyslu je na jednom malém letadle vyvrtáno více jak sto tisíc děr a více jak milion děr na větších letadlech [3].

Při třískovém obrábění dochází k porušování kompozitních materiálů, respektive vláken, která se lámou na větší či menší části. Dle WHO (WHO, 1997) jsou vlákna s aspektním poměrem  $\geq 3$  vdechovatelná. Vzhledem k jejich chemickému složení a morfologii uhlíkových vláken jsou tato vlákna a jejich segmenty v organismu neodstranitelná a jejich přítomnost může způsobovat chronické obtíže [20]. Cílem diplomové práce bylo připravit vhodné kompozitní vzorky, zrealizovat vybrané procesy obrábění a zhodnotit destrukci uhlíkových vláken s využitím optické a elektronové mikroskopie.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Kompozitní materiály

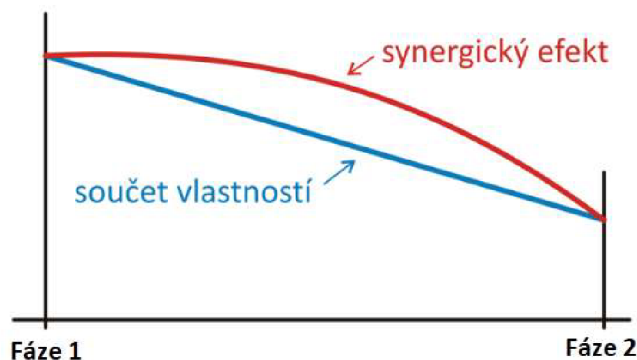
Kompozitní materiály jsou charakteristické nízkou hmotností, vyšší pevností, odolností vůči korozi a agresivnímu prostředí. Kompozitní materiály můžeme rozdělit dle typu výztuže nebo typu matrice. Kompozitní materiály s plastovou matricí (PMC) jsou nejvíce využívané v praxi, existují ale kompozitní materiály s kovovou matricí (MMC) nebo s keramickou (CMC) matricí, ale též se můžeme setkat se speciálními typy matric, jako je například skleněná matrice. Přehlednější rozdělení kompozitních materiálů je uvedeno na obrázku 1.1 [17].



Obrázek 1.1: Rozdělení kompozitních materiálů [23]



Specifikem kompozitních materiálů je tzv. synergický efekt (jev), neboli spojující efekt, který naznačuje, že poměrový součet vlastností je menší, než jsou skutečně dosažené vlastnosti. Při výrobě kompozitního materiálu se vždy snažíme docílit co nejvyššího synergického efektu.



Obrázek 1.2: Synergický efekt [vlastní]

### 1.1.1 Matrice

Matrici považujeme za spojitou fázi, která drží kompozit pohromadě. Též jí můžeme nazývat pojivem. Matrice zajišťuje tvarovou stálost, přenos sil mezi vystužujícími prvky, a ochranu před okolními vlivy. Důležitými funkcemi matrice je dobrá smáčivost, koheze a adheze k vláknům. Smáčivost je schopnost kapaliny udržovat kontakt s pevným povrchem, která vyplývá z mezimolekulárních interakcí. Stupeň smáčení je dán adhezními a kohezními silami. Smáčivost je podstatným jevem při lepení a přilnavosti dvou povrchů. Adheze (přilnavost) je schopnost dvou různých materiálů přenést tečné síly ve styku dvou povrchů bez znatelného pohybu. Koheze (soudržnost) je fyzikální síla, která drží při sobě atomy či molekuly, nebo různé látky a tělesa [27].

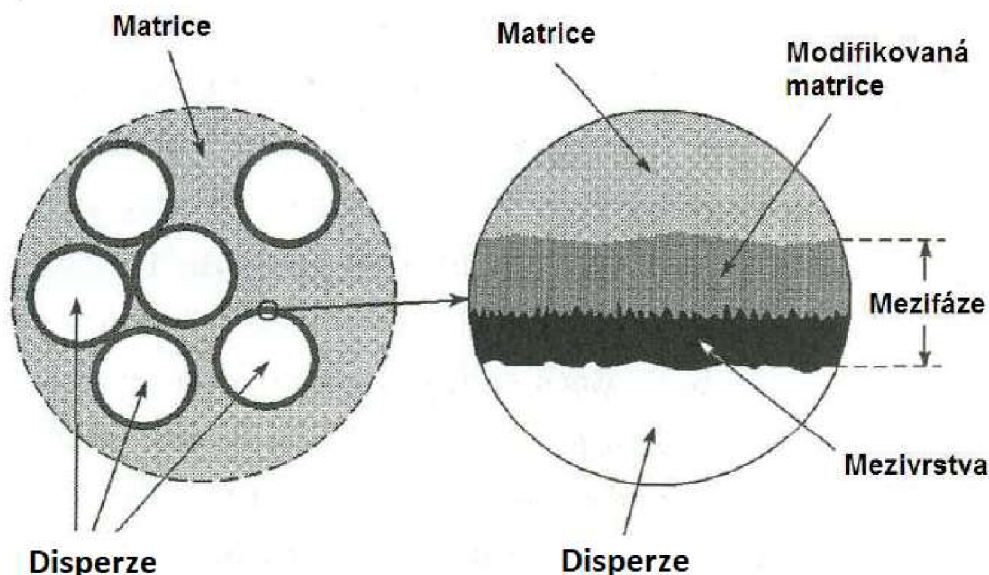
Jak bylo zmíněno výše, využívá se několik základních druhů matic, a to polymerní, kovová nebo keramická matrice. Každá tato matrice má svá pozitiva i negativa, vůči ostatním druhům matic, viz tabulka 1.1.

Tabulka 1.1: Pozitivní a negativní parametry vybraných druhů matic [27].

Typy matrice	Pozitivní parametry	Negativní parametry
Reaktoplast	Levná technologie	Křehkost
Termoplast	Tuhost Tvárnost	Vysoká Cena Obtížná technologie
Uhlík	Termická stabilita	Vysoká cena
Lehké kovy	Vodivost Termická stabilita	Reakce s disperzí
Superslitiny	Odolnost vůči oxidaci	Vysoká hmotnost
Sklo	Nízká teplotní roztažnost Odolnost vůči korozi	Křehkost
Sklo/Keramika	Odolnost vůči korozi Termická stabilita	Křehkost Vysoká cena
Keramika	Vysokoteplotní odolnost	Vysoká cena

### 1.1.2 Mezifáze

Oblast kompozitního materiálu mezi maticí a povrchem disperze se nazývá mezifáze (mezifázové rozhraní). Její složení, struktura a vlastnosti mohou být různé napříč celou oblastí a též odlišné od složení, struktury a vlastností obou složek kompozitního materiálu. Grafické znázornění mezifáze je na obrázku 1.3.



Obrázek 1.3: Schématické zobrazení mezifáze v kompozitním materiálu [9].

Mezifáze má za úkol přenášet napětí z matrice na disperzi. Schopnost přenosu napětí je závislá na síle mezifázového rozhraní a adhezních silách mezivrstev kompo-

zitního materiálu. Na mezifázovém rozhraní se může uplatnit několik typů adhezních sil, jako například mechanické, fyzikální a chemické vazby. Mechanická vazba je vlastně mechanické zaklínění, které souvisí se složitostí povrchu. Fyzikální vazba vždy působí na vzdálenost 0,3 až 0,5 nm a je podmíněná smáčivostí obou povrchů. Chemická vazba vzniká pokud spolu mohou oba materiály (matrice a disperze) chemicky reagovat. Charakter a kvalita adhezních sil je důležitým faktorem pro dosažení co nejvyšších mechanických vlastností v kompozitním materiálu. Pokud bychom vložili do matrice například vláknitou disperzi, která bude na povrchu vykazovat nízkou drsnost, tak by nedošlo k dobré adhezi v kompozitním materiálu. Mohlo by docházet k tomu, že kvůli nedostatečnému spojení mezi maticí a disperzí by docházelo k "prokluzování" disperze, a tudíž by nemohlo dojít k přenosu mechanických sil. Pokud bychom předem vlákno upravili například chemicky, a to pomocí silanů, a vytvořilo by se na povrchu vlákna lepší mezifázové rozhraní, a došlo by k lepšímu spojení mezi maticí a disperzí abychom mohli lépe přenášet napětí v kompozitním materiálu.

### 1.1.3 Vláknová výztuž

Vláknová disperze je materiál ve formě vláken, který se jako samostatný konstrukční prvek využívá jen velmi zřídka. Vláknová výztuž se pro technické aplikace využívá především v kompozitních materiálech. Vlákná se vyznačují tím, že jeden rozměr je výrazně větší oproti zbylým dvěma. Pokud je délka vlákna stokrát větší než jeho průměr, tak tato vlákna označujeme jako dlouhá vlákna. Pokud je tomu naopak, a tedy že, délka vlákna je menší než stonásobek průměru, tak se tato vlákna označují, jako krátká vlákna. V kompozitních materiálech, které jsou vyztuženy vlákny, mají tato vlákna většinou až o 2 řády vyšší pevnost a tuhost s porovnání s maticí. Vlákná uložená v maticí mají význačný vliv na ohybové a tahové pevnosti kompozitu. Tyto vlastnosti značně ovlivňuje množství vláken v maticí, jejich orientace, a též materiál vláken. Nejvyšší pevnosti je dosaženo ve směru vláken. Vlákná v kompozitním materiálu mohou být uspořádána v jednom směru, ve dvou směrech nebo zcela nahodile [16]. Sjednocená elementární vlákna jsou sdružená do pramenců, které se dále zpracovávají do polotovarů ve formě sekaných pramenců, rovingů, rohoží, prepregů, a nebo tkanin. Asi nejpoužívanější jsou tkaniny nebo rovingy. Roving je svazek nekonečně dlouhých vláken bez zákrutu, tyto svazky se dodávají navinuté na cívkách. Tkaniny mohou mít rozmanitou textilní vazbu. Rozlišujeme tři základní typy vazeb, a to plátňovou, keprovou a atlasovou vazbu, viz obrázek 1.4 [10].



Obrázek 1.4: Typy tkanin [10].

Při rostoucí délce zatěžovaného vlákna výrazně klesá jeho pevnost. K přírůstku pevnosti přispívá jak zmenšení průměru vlákna, tak i zkrácení jeho zatěžované délky. To lze vysvětlit tím, že v objemu vlákna se oproti objemu kompaktní hmoty vyskytuje menší množství poruch a jejich vliv je tudíž menší. Místní poruchy se méně projevují a pevnost vláken je lépe využita. Kompozity vyztužené vlákny vykazují dobré mechanické vlastnosti a jejich poměr pevnosti a hmotnosti vyniká nad většinou kovových slitin.

Značnou pevnost a tuhost poskytuje kompozitnímu materiálu vyztužující složka, zatímco dobrou zpracovatelnost umožňuje použitá matrice. Vlákna se vyrábí většinou od průměru pěti mikrometrů, protože další zmenšení průměru vlákna vede k technologickým a dalším komplikacím. Vlákna s větším průměrem než 5 mikrometrů také působí kladně na tuhost při zatížení tlakem [17].

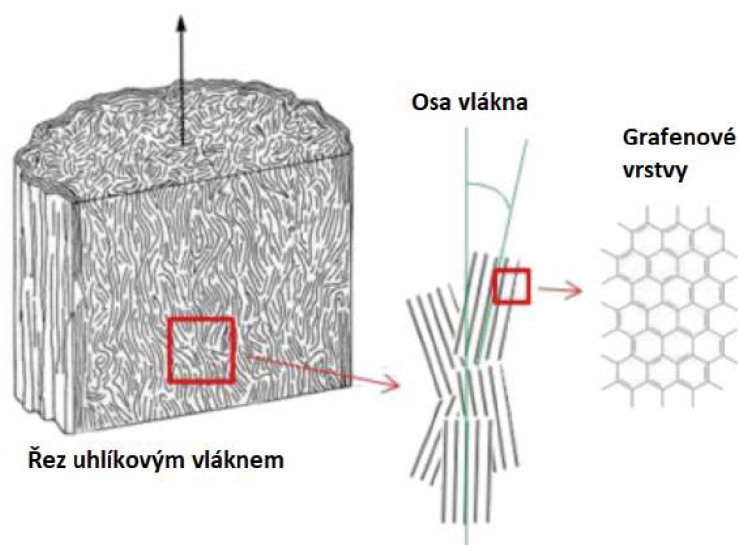
### Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (CF-carbon fibers) jsou primárně preferována pro použití v kompozitních materiálech s polymerní matricí, díky svým vynikajícím vlastnostem, jako je vysoká měrná pevnost, tuhost, vysoká tepelná stabilita, vysoká vodivost, odolnost proti korozi a též nízké hmotnosti. Důležitou předností uhlíkových vláken je snížení hmotnosti zařízení, díky dobrému poměru pevnosti ku hmotnosti.

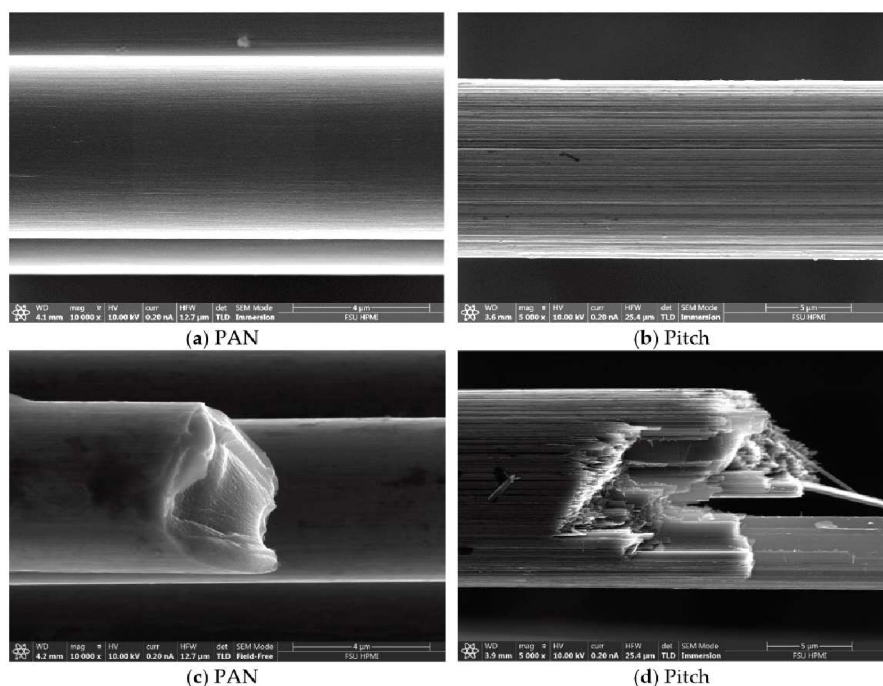
Za otce uhlíkových vláken je považován Thomas Alva Edison, který jako první publikoval svůj vynález žárovky z karbonizovaných bambusových vláken. Počátkem šedesátých let minulého století začaly úspěšné pokusy o karbonizaci dalších organických vláken. Za nejlepší prokurzor byl považován polyakrylonitril (PAN). Následo-

valy další experimenty na vylepšování kvality PAN, či smolných (izotropních nebo mezifázových) prekurzorů se současným zvyšováním mechanické pevnosti vláken. Tyto experimenty byly umožněny vývojem katalytických vlivů přechodových kovů na kvalitu růstu vláken. Technologický vývoj v oblasti uhlíkových vláken pokračuje neustále dál k vyšším mechanickým vlastnostem a lepším užitným vlastnostem [14].

Uhlíková vlákna získávají své vlastnosti díky své morfologické mikrostruktúře vláken, která jsou založená na přítomnosti grafenových vrstev, které jsou převážně uspořádány ve směru osy vlákna. Tyto vrstvy jsou dále tvořeny uhlíky, které jsou uspořádány do šestiúhelníkových struktur v jedné vrstvě. Takto uspořádané uhlíky jsou mezi sebou propojeny kovalentními vazbami. Uhlíky jsou uspořádány ve vrstvách a jsou spojeny pomocí slabých Van der Waalových sil, které jsou kolmé na osu vlákna [12], viz obrázek 1.5. Prekurzor PAN (panCF) a prekurzor smol (pitchCF) se od sebe odlišují mikrostrukturou a materiálovými vlastnostmi, viz obrázek 1.6. Uhlíková vlákna ze smol se používají na hodnotné a specializované aplikace, které vyžadují specifické vlastnosti materiálu, například pro energetiku. Od panCF můžeme očekávat vyšší tepelnou vodivost, nižší tažnost při přetržení a horší mechanické vlastnosti [20].



Obrázek 1.5: Znázornění grafické mikrostruktury uhlíkového vlákna [5].



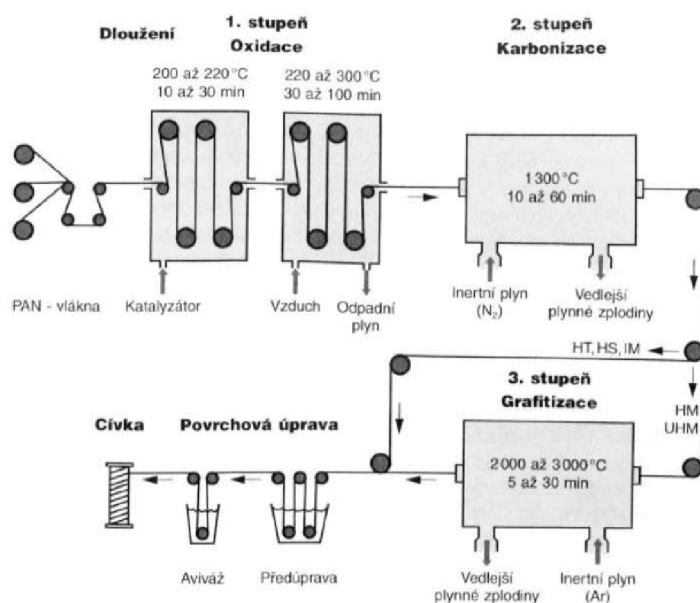
Obrázek 1.6: Ukázka mikrostruktury uhlíkových vláken na bázi PAN a pitch prekurzorů [29].

Postupným vývojem byly získány nové druhy uhlíkových vláken se speciálními vlastnostmi. Za speciální vlastnosti můžeme považovat vyšší pevnost v tahu, modul pružnosti, elektrickou a tepelnou vodivost. Z toho vyplývá, že v současné době, lze rozlišovat vlákna na:

**Uhlíková vlákna nižších parametrů** s pevností v tahu menší než 1000 MPa, a modulem pružnosti menší než 100 GPa. Tato uhlíková vlákna jsou obvykle připravována přímo ve formě textilních tkannin či pásek. Prekurzorem těchto uhlíkových vláken je viskóza nebo izotropní smoly.

**Uhlíková vlákna s vysokými mechanickými parametry** (high performance carbon fibers) s pevností v tahu kolem 3500 až 7000 MPa, a modulem pružnosti 230 až 930 GPa. Do této skupiny řadíme uhlíková vlákna připravená z polyakrylonitrilové suroviny, mezofázových smol a vlákna charakteru whiskerů připravených katalytickým rozkladem plyných uhlovodíků. Dále se tato uhlíková vlákna mohou dělit, dle konkrétních mechanických vlastností na vysokopevná vlákna (high tensile or high tenacity-HT fibers), vysokomodulová uhlíková vlákna (high modulus-HM fibres), středně modulová vlákna (intermediate modulus-IM fibers), a vlákna se supervysokým modulem pružnosti (ultrahigh modulus-UHM fibers) [14].

Výroba uhlíkových vláken se většinou provádí ze 3 materiálů, a to z celulózy, PAN vláken nebo tažením různých smol. Při výrobě dochází ke kontaminaci výsledného materiálu, proto se připravená vlákna musí zbavit všech nežádoucích prvků (většinou dusík, kyslík a vodík). Asi nejvíce zastoupená výroba uhlíkových vláken je z PAN vláken. PAN vlákna s vysokou krystalinitou jsou dloužena, a následně v dalším stupni zpracování probíhá stabilizace pomocí nízkoteplotní oxidace při teplotě 200 až 300 °C za přítomnosti vzduchu, za daný čas. V dalším stupni výroby probíhá karbonizace vláken v inertní atmosféře při teplotě 1000 až 1500 °C. Jako další stupeň výroby je grafitizace, která též probíhá v inertní atmosféře, ale za vyšších teplot, a to 2000 až 3000 °C. Po tomto zpracování následuje povrchová úprava uhlíkových vláken a navíjení na cívku, viz obrázek 1.7.



Obrázek 1.7: Popis schématické výroby uhlíkových vláken z prekursoru PAN [14].

Jedním z problémů mohou být zdravotní potíže v závislosti na výrobě vláken, recyklaci nebo jejich zpracovávání na kompozitní bázi. Při recyklaci nebo nedokonalém spalování může docházet u CFRP k degradaci povrchu a to vede ke ztenčování uhlíkových vláken. U těchto procesů může docházet ke změně integrity vlákna, tvaru vlákna a změně vlastností. Tato porézní a křehká vlákna jsou důsledkem tepelné degradace za přítomnosti zbytkového kyslíku. Světová zdravotní organizace (WHO) považuje vlákna s délkou  $\geq 5 \mu\text{m}$ , průměrem  $\leq 3 \mu\text{m}$  a poměrem stran tzv. aspektním poměrem  $\geq 3$  jako vdechovatelná a jejich vdechnutím může dojít k ohrožení člověka a jeho okolí. Taková vlákna můžeme nazývat, jako WHO-vlák-

na (WHO-FIBERS, 1997). Koncentrace WHO-vláken se vyjadřuje v závislosti na prostoru, většinou v  $m^3$  [20].

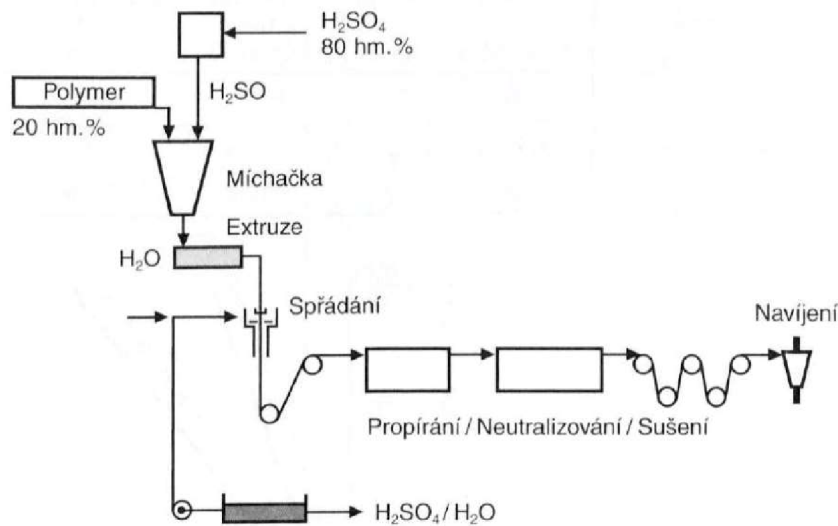
## **Polymerní vlákna**

Polymerní vlákna jsou získávána jako přírodní nebo uměle vytvořená syntetická vlákna. Mezi základní vlastnosti polymerních vláken patří malá hustota a střední či vysoká pevnost (záleží na polymeru).

**Polyesterová vlákna**, neboli PES vlákna je mezinárodní označení, které se používá pro skupinu polymerů s esterovou funkční skupinou. Do této skupiny patří polystyrentereftalát (PET), polybutylentereftalát (PBT), polyetylnaftalát (PEN) a polytrimetylentereftalát (PTT). Tato vlákna patří mezi nejpoužívanější textilní materiál, i jako filtrační media. Polyester je syntetický produkt, který byl poprvé použit během první světové války jako impregnační materiál. Průmyslově se poprvé začala polyesterová vlákna vyrábět od roku 1947. Polyester se vyrábí polykondenzací ze dvou komponent. Polyesterová vlákna jsou nejčastěji spojována s materiálem PET, ze kterého je velké množství vláken vyrobeno. Předností PES vláken jsou odolnost proti povětrnostním vlivům, světlostálost, nízká navlhavost, odolnost proti mikroorganismům. Též můžeme u textilního materiálu očekávat nemačkovost lehkost materiálu, či snadnou údržbu a čištění. Značnou nevýhodou polyesteru je jeho výroba. Při výrobě se spotřebuje značné množství vody, která je potřebná k chlazení výrobního procesu. Výroba polyesteru spotřebuje nejvíce energie ze všech textilních vláken, a výrazně se podílí na znečištění životního prostředí [8].

**Aramidová vlákna** patří mezi syntetické polymery, které vznikají polykondenzací chloridů dikarboxylových kyselin a aromatického diaminu. Makromolekula je tvořena benzenovými jádry, které jsou spojena kovalentními vazbami. Makromolekuly jsou mezi sebou vázány pomocí vodíkových můstků. Díky těmto vazbám dosahují aramidová vlákna vysokých pevností a též vysokého modulu pružnosti. Jsou taky odolné vůči oděru, a dobře odolávají žáru a plamenům. Aramidy netvoří taveninu, a z toho důvodu se aramidová vlákna vyrábí mokrým zvlákněním roztoku aramidu v koncentrované kyselině sírové v ledové vodě, viz obrázek 1.8. V současné době je na trhu mnoho aramidů pod obchodními názvy jako je Kevlar chemicky poly-para-fenyltereflamid, Nomex chemicky poly-metha-fenylizoftalamid nebo Twaron chemicky poly-parafenylene.





Obrázek 1.8: Popis schématické výroby aramidových vláken [10] .

### Skelná vlákna

Skelná vlákna jsou jedny z nejpoužívanějších vláken vzhledem k jejich dobrým, mechanickým vlastnostem a nízké ceně. Skelná vlákna mají většinou pravidelný kruhový průřez a skládají se z oxidu křemičitého, oxidu hlinitého, oxidu vápenatého, oxidu boritého a oxidu hořečnatého. Komerčně se obecně skla rozdělují do pěti základních skupin a to sklo typu A, E, C, D, R atd., a též jejich kombinace, viz tabulka 1.2. Nejpoužívanějším zástupcem pro výrobu skelných vláken je typ E. Sklo typu E je asi nejvíce používaným typem.

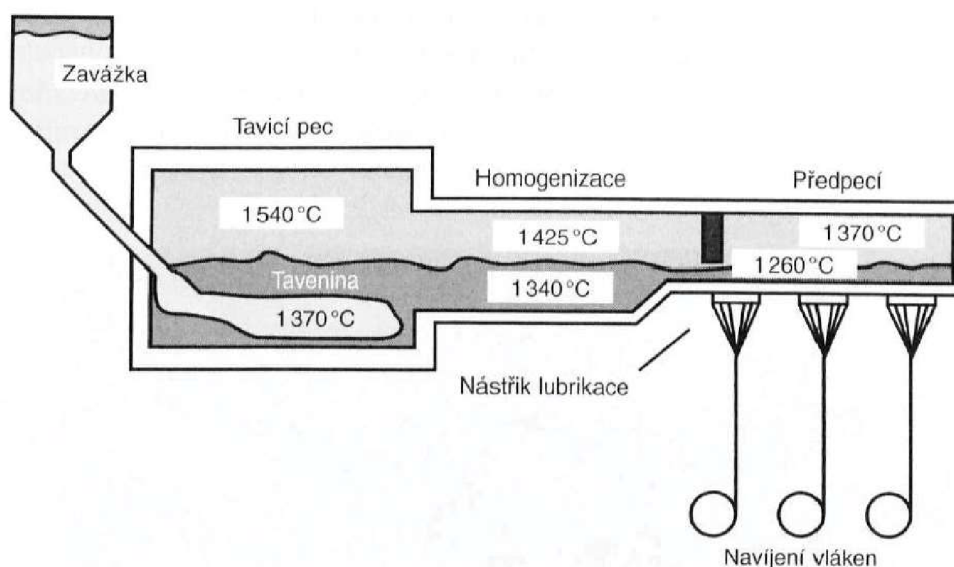
Skelná vlákna se připravují tažením z roztavené skloviny a následně jsou prudce ochlazena, tímto rychlým ochlazením získávají amorfní vlastnosti. Mezi jejich výhody také patří vysoká pevnost v tahu, vysoká odolnost proti tlaku, odolnost vůči vysokým teplotám a korozivnímu prostředí, a též dobrý estetický vzhled. Vybrané základní mechanické vlastnosti skel jsou uvedeny v tabulce 1.2. Průměrná hustota skelného vlákna je přibližně  $2500 \text{ kg.m}^{-3}$ , a bod tání přes  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , a dlouhodobě snáží teploty okolo  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ . Většinou jsou skelná vlákna zpracovávána na tkaniny. Tkaniny jsou dále využívány jako protipožární a protichemická izolace ve formě rohoží. Nevýhodou těchto skel je, že při dlouhém zahřívání při vysoké teplotě dochází ke krystalizaci, která má za následek nižší pevnost [24].

Výroba skelných vláken se provádí zvlákňováním z taveniny oxidu křemičitého a dalších oxidů. Nejběžnějšími oxidy jsou hliník, hořčík, bor a vápník s malým za-

Tabulka 1.2: Vlastnosti některých typů skel [24]

Vlastnosti	A-sklo	E-sklo	C-sklo	D-sklo	R-sklo
Hustota [g.cm <sup>-3</sup> ]	2,44	2,58	2,52	2,11	2,54
Pevnost [MPa]	3310	3445	3310	2415	4135
Tažnost [%]	4,8	4,8	4,8	4,6	4,8
Youngův modul pružnosti [GPa]	68,9	72,3	68,9	51,7	85,5

stoupením alkalických kovů jako je například dusík či draslík. Zvlákňování taveniny probíhá přes zvlákňovací hlavy, ze kterých je skelné vlákno odtažováno rychlostí přibližně 30 až 60  $m.s^{-1}$ . Při dlužení dochází až k 40 000 násobnému prodloužení, a zmenšení průměru z 2 mm na 10 až 14 mikrometrů. Po dlužení jsou skelná vlákna navíjena na cívky. Při navíjení by docházelo k adhezi mezi vlákny, a proto je třeba vlákna povrchově upravovat, viz obrázek 1.9.

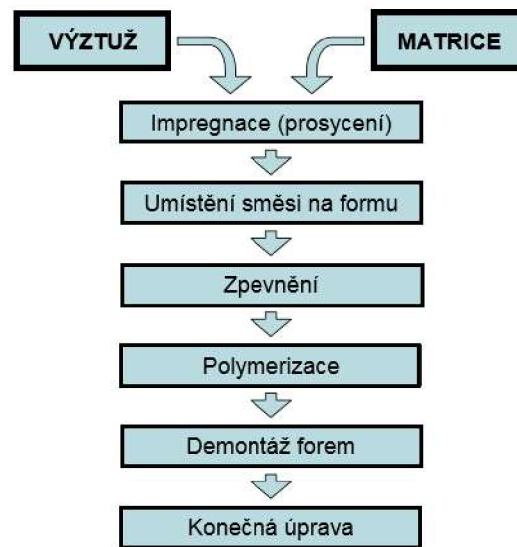


Obrázek 1.9: Popis schématické výroby skelných vláken [10].

### 1.1.4 Výroba kompozitních materiálů

Existuje velké množství technologií na zpracování kompozitních materiálů, které v dnešní době umožňují vyrábět díly různých tvarů, či velikostí. Pro volbu vhodné technologie je potřeba nahlížet na několik aspektů, a to jsou velikost a tvar dílu, pracnost, četnost a ekonomické posouzení. Dále záleží, zda chceme zpracovávat dlouhá či krátká vlákna, nebo jaký druh matrice použijeme, tedy PMC, MMC nebo CMC. Možné dělení technologií na zpracování kompozitních materiálů může být

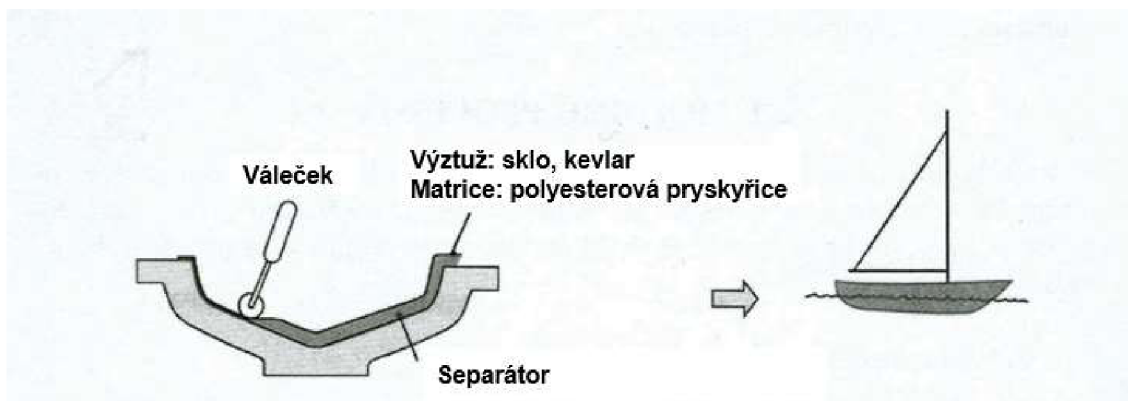
mnoho. Nejčastější dělení je dle formy, na otevřenou či zavřenou formu. Přibližný postup výroby kompozitních materiálů je znázorněn na obrázku 1.10.



Obrázek 1.10: Modelový postup při výrobě kompozitních dílů [vlastní].

### Manuální kladení

Manuální kladení je taková technologie, u které nepotřebujeme generovat žádné velké působící síly, nebo velké množství energie do výsledného produktu. Jedná se o jednu z nejstarších a nejjednodušších technologií na zpracování kompozitních materiálů. Tato technologie se spíše hodí pro velké či tvarově jednoduché díly, též je k tomu potřeba určitá šikovnost a praxe operátora. Principem této metody je postupné kladení výztuže (tkaných rohoží) na předem připravenou formu, viz obrázek 1.11. Formu, na kterou budeme pokládat výztuž, je předem nutné opatřit separátorem, aby prosycená výztuž nepřilnula k formě. Každá tato vrstva položená na formu, by se měla prosytit předem namíchanou pryskyřicí s tvrdidlem v určitém poměru, který je většinou dán výrobcem pryskyřice. Prosyncování výztuže lze provádět štětcem, válečkem či sprejem. Po nanesení vrstvy prosycené pryskyřičným systémem je nutné dávat pozor, zda nejsou mezi vrstvami vzduchové bublinky. Tyto vzduchové bublinky je potřeba pomocí válečku či stěrky vytlačovat působícím tlakem na plochu vrstvy. Vzduchové bublinky snižují mechanické vlastnosti, a zhoršují vzhled výsledného dílu. Vytvrzování pryskyřice většinou probíhá při laboratorní teplotě, lze dotvrzovat i při vyšších teplotách, a to zejména pokud chceme urychlit a zdokonalit proces vytvrzování [30].



Obrázek 1.11: Schématická ukázka metody ručního kladení [30].

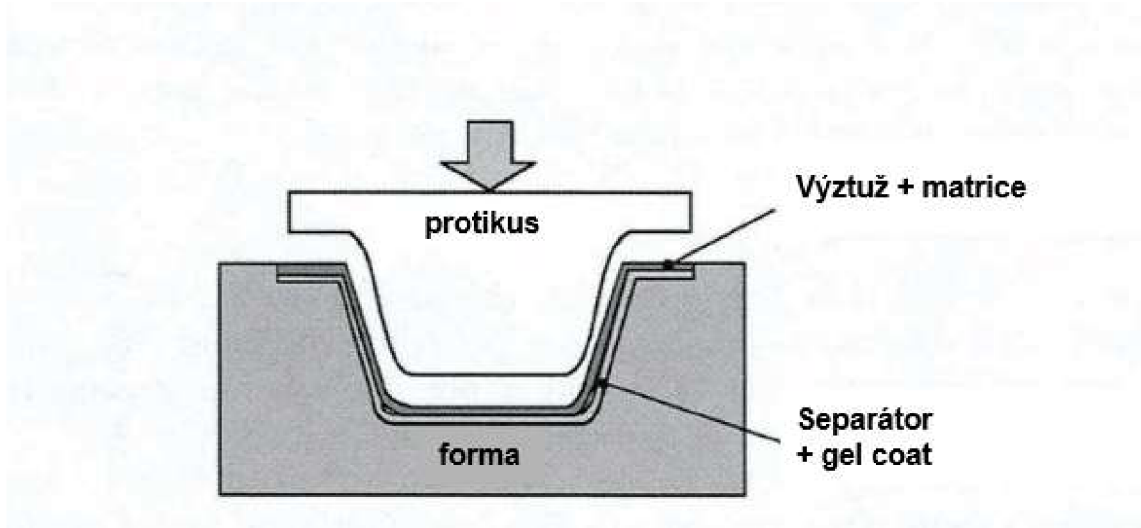
## Lisování

**Lisování za studena** se provádí při nízkém tlaku 0,03 až 1 MPa za normální teploty. Používají se dvojdílné formy, které nejsou vyhřívány, tudíž budou finančně nenáročné. Na konstrukci formy lze použít lamináty, plechy nebo dřevotřískové desky (OSB desky). Tlak na formu může být vyvozován pomocí šroubových svěrek nebo hydraulických válců, které jsou zabudovány v rámové konstrukci etážových nízkotlakých lisech. Tato technologie je vhodná pro finančně nenáročnou výrobu, v řádu 100-500 ks. Nejčastěji se pro tuto technologii využívají výztuže ve formě tkanin (GF, CF atd.). Jako matrice se nejběžněji používají epoxidové či polyesterové pryskyřičné systémy, které se vytvrzují za normálních teplot. Přibližný popis technologie na obrázku 1.12.

**Lisování za tepla a tlaku** se provádí za zvýšených tlaků a teplot. Zde jsou dvojdílné formy vyhřívány, a proto musí být z kovových materiálů. Pracovní plocha formy musí být leštěná nebo chromovaná. Vyhřívání formy může být realizováno elektrickým či topným médiem. Pracovní tlaky jsou od 1 až 30 MPa, a jsou vyvozeny hydraulickými lisami. Výchozím materiálem pro tuto technologii jsou prepregy (lisovací rohože-SMC-sheet moulding compounds), lisovací směsi (premixy-BMC-bulk moulding compounds) nebo lisovací těsta (DMC-dough moulding compounds), [30].

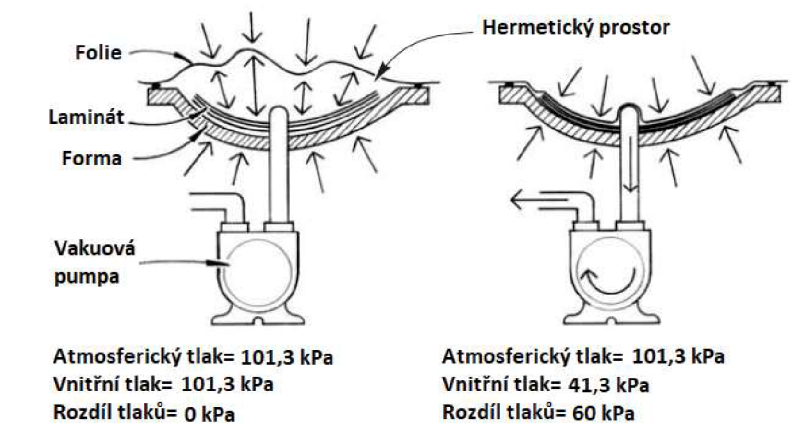
## Vakuové lisování (vacuum bagging)

Metoda vakuového lisování využívá hermetického prostoru uvnitř vzduchotěsného vaku či fólie. To umožňuje vytvořit vakuum/podtlak, které k sobě přitlačuje jednotlivé vrstvy. Přítlačná síla je vyvozena atmosférickým tlakem, tedy teoreticky nejvyšší možná přítlačná síla by se právě rovnala 101,3 kPa (hodnota atmosférického



Obrázek 1.12: Schématická ukázka metody lisování za studena i za tepla [30].

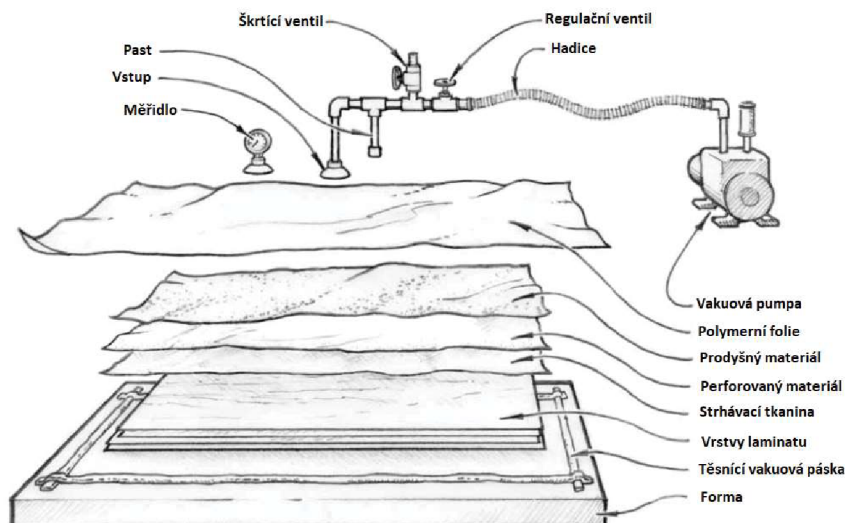
tlaku), pokud bychom byli schopni vytvořit stoprocentní vakuum v hermetickém prostoru, viz obrázek 1.13. V praxi se běžně využívají tlaky kolem 30 až 90 kPa. Tato technologie se hodí pro malé či středně velké sériové výroby. Nevyžaduje vysoké náklady (kromě počáteční investice do vakuové pumpy), a od konsolidovaných dílů můžeme očekávat oboustranně hladké povrchy a velmi dobré mechanické vlastnosti.



Obrázek 1.13: Princip vakuového lisování [1].

Technologie vakuového lisování využívá nepropustného vaku či fólie, která je utěsněna kolem jednostranné formy s nekonsolidovaným dílem. Z uzavřeného prostoru kolem formy je postupně odsáván vzduch pomocí vakuové pumpy, dokud nedojde k vytvrzení pryskyřičného systému s výztuží, který může trvat i několik hodin. Tato metoda je obdobná manuálnímu kladení, tedy že jsou postupně kladeny prosycené výztuže s pryskyřičným systémem na předem naseparovanou formu. Vrstvu po

vrstvě se válečkem odstraňují vzniklé vzduchové bubliny mezi vrstvami. Pokud jsou položeny všechny vrstvy dílu, tak se na konec navrství prodyšný materiál (odsávací rohož) a strhávací tkanina. Po dokončení všech vrstev se použije vzduchotěsná fólie, která se nastříhá na požadovaný tvar. Vzduchotěsná fólie opatřená otvorem pro vývod na vakuovou pumpu, či hadice od vakuové pumpy je vmáčknutá do těsnící vakuové pásky, do které se vtlačuje fólie k docílení hermeticky uzavřeného systému, viz obrázek 1.14.



Obrázek 1.14: Schématická ukázka metody vakuového lisování [1].

Tato metoda umožňuje vyrábět velkou škálu tvarově složitých dílů, díky variabilitě forem. Formy pro vakuové lisování musí být navrženy tak, aby splnily dvě funkce. Forma musí držet laminát ve specifickém tvaru, dokud polymerní systém v dílu nevytverdně a dále musí forma splňovat funkčnost vzduchotěsnosti, aby bylo zamezeno tlakovým ztrátám a zabránilo se slepení laminátu na ploše formy. Pokud jsou plněny oba dva požadavky, lze opravovat i různé konstrukce, které by měly zajišťovat vodotěsnost, vzduchotěsnost či pouze funkčnost dílu [1].

## 1.2 Třískové obrábění kompozitních materiálů s polymerní matricí vyztuženou uhlíkovými vlákny

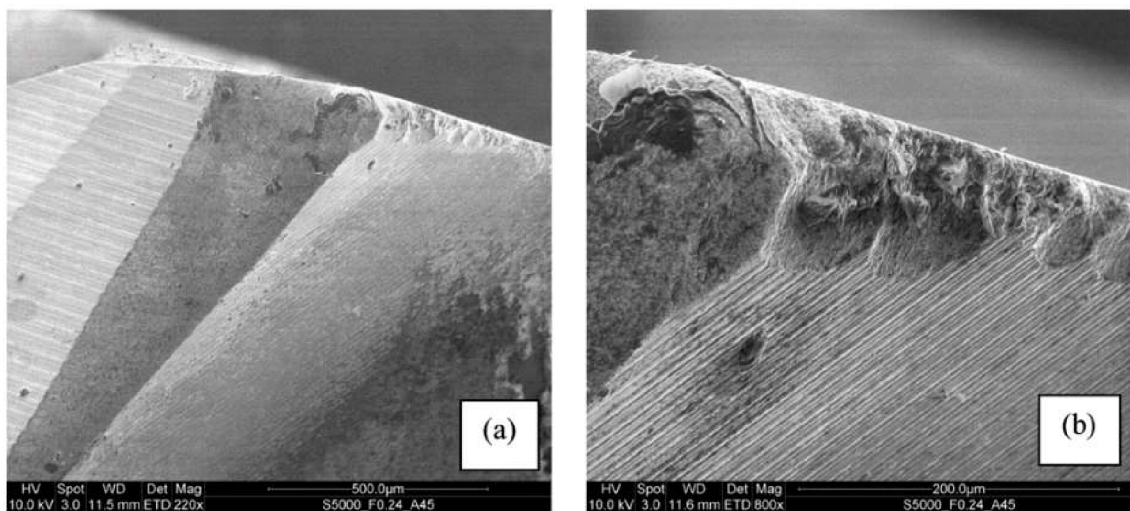
Kompozity jsou považovány za obtížně obrobitelné materiály, kvůli jejich heterogení struktuře. Typicky se používají při obrábění kompozitních materiálů konvekční metody, jako je frézování, broušení, vrtání atd. [3]. Vzhledem k jejich anizotropii a heterogením strukturám, dochází při obrábění konvenčními metodami k poruchám materiálu, jako je například vytahování vlákna, bobtnání, praskání matrice nebo delaminace (porucha povrchu díry) [11].

Problém nevzniká jen z důvodu heterogenního chování kompozitního materiálu, ale i ze zvolené metody a interakce mezi nástrojem a obráběným materiálem. Polymerní matrice s uhlíkovými vlákny (CFRP) špatně odvádí teplo z místa obrábění. To způsobuje, že uvolněné teplo proniká do řezného nástroje, a ne do třísky, jako je to u kovových materiálů. Dalším problémem CFRP je nízká tepelná odolnost kompozitního systému při zvýšených teplotách (100-300 °C). U CFRP nesmí být překročena tzv. kritická teplota, kdy může docházet ke spálení materiálu v blízkosti obráběné plochy. Z toho vyplývá, že teplota tání polymerní matrice často určuje u CFRP posuvy a řezné rychlosti. Vyšší teploty lze řešit pomocí procesní kapaliny, která je schopná odvádět teplo jak z nástroje, tak z materiálu. Třísky, které jsou obsaženy v procesní kapalině mohou znečišťovat filtry z důvodu velkého množství odštěpených vlákenných třísek. Procesní kapalinu nelze aplikovat na všechny typy materiálů kvůli nasákavosti některých druhů matric či výztuže [28].

V procesu výroby kompozitních materiálů můžeme očekávat velkou variabilitu vstupujících proměnných, které jsou způsobeny technologií, orientací nebo obsahem vláken v matrici. To způsobuje složitost sestavení tabulek či katalogů, které by pomohly se správnou volbou technologických parametrů a nástrojů.

### 1.2.1 Nástroje a materiály pro obrábění CFRP

Jedním z klíčových kritérií při obrábění CFRP je vhodná volba nástroje, který ovlivňuje delaminaci, snížení řezných sil a správné odřezávání výztuže a matrice. Nástroje musí být ostré, s malým poloměrem špičky a pozitivním úhlem čela a hřbetu. Nástroje musí být odolné vůči abrazivnímu otěru, který vzniká kvůli abrazivní vláknenné výztuži, která má vysokou pevnost a tvrdost. To má za důsledek, že uhlíková vlákna způsobují na hřbetu ostří škrábance, a při bližším pohledu je viditelné poškození mikrochippingem (mikroštipání), viz obrázek 1.15 [25].



Obrázek 1.15: Mechanismus opotřebení nástroje při obrábění GFRP, (a) abraze, (b) mikrochipping, SEM [4].

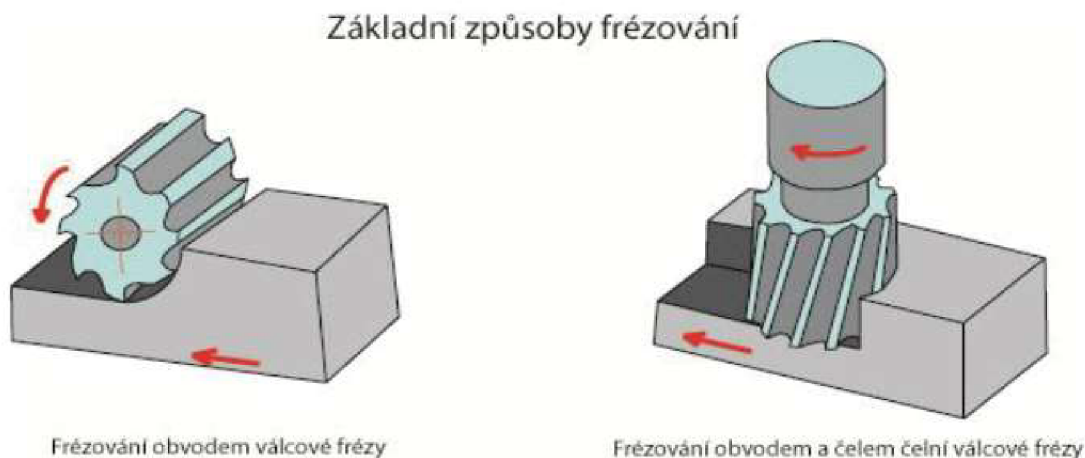
Jak bylo zmíněno výše, polymerní matrice špatně odvádí teplo, a většinový podíl tepla je odváděn nástrojem. To zapříčiňuje, že se musí volit nástroje s vyšší tepelnou vodivostí. Takové nástroje můžou být z materiálu jako jsou slinuté karbidy (SK), diamantem povlakované slinuté karbidy nebo polykrystalický diamant. Keramické nástroje jsou nevhodné pro obrábění FRP, a to z důvodu nízké pevnosti, nízké tepelné vodivosti a vysoké křehkosti, která je dělá citlivými na rázové a tepelné šoky a díky tomu dochází k ulamování břitů [25].

### 1.2.2 Frézování

Frézování patří mezi třískové obrábění, díky kterému můžeme odebírat rovinné či zakřivené plochy. Hlavní rotační pohyb je vykonáván vícebřitým nástrojem. Vedlejší pohyb je vykonávám stolem (obrobkem), který je přímočarý nebo kruhový. Roze-



znáváme dva základní typy frézování, a to frézování obvodem válcové plochy nebo frézování obvodem a čelem čelní válcové plochy, viz obrázek 1.16.



Obrázek 1.16: Popis základních způsobů frézování [32].

Frézování dílů z materiálů, jako jsou FRP se dostávají do popředí průmyslové aktivity. Tato technologie se obecně používá spíše jako dokončovací metoda, která se vyznačuje nízkým poměrem odebraného materiálu k celkovému objemu dílu ve srovnání s frézováním kovového dílu.

Volba vhodných řezných podmínek je základním předpokladem efektivního frézování CFRP. Řezná rychlost je frézovací dráha, kterou urazí hrana břitu každého zubu v metrech za minutu. Základní vzorec pro řeznou rychlost je uveden v rovnici 1.1. U CFRP kompozitů se osvědčily vyšší řezné rychlosti, které vedou ke snížení procesních sil, což prodlužuje životnost nástroje, a umožňuje zvýšení rychlosti posuvu [6]. Rychlost posuvu se spočítá podle vztahu 1.2.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [m \cdot min^{-1}] \quad (1.1)$$

D... průměr frézy [mm], n... otáčky nástroje [ot.min<sup>-1</sup>]

$$v_f = n \cdot f [m \cdot min^{-1}] \quad (1.2)$$

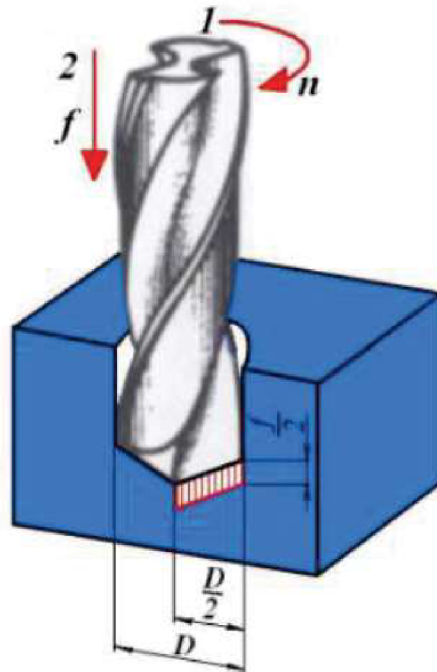
f... posuv na otáčku [mm.ot<sup>-1</sup>], n... otáčky nástroje [ot.min<sup>-1</sup>]

### 1.2.3 Vrtání

Technologie vrtání patří mezi třískové obrábění, které zhotovuje průchozí nebo neprůchozí otvory daného rozměru. Do technologie vrtání též patří dokončovací metody, jako je vyhrubování a vystružování. Hlavní rotační pohyb vykonává nástroj, tedy vrták, ve výjimečných případech obrobek. Vedlejší pohyb je též vykonáván nástrojem. Řezná rychlost  $v_c$  se při vrtání určuje z maximálního průměru nástroje, viz rovnice 1.3 [31].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [m \cdot min^{-1}] \quad (1.3)$$

D... průměr vrtáku [mm], n... otáčky nástroje [ot.min<sup>-1</sup>]



Obrázek 1.17: Schématický popis vrtání, (1)-řezný pohyb, (2)-axiální posuv [31].

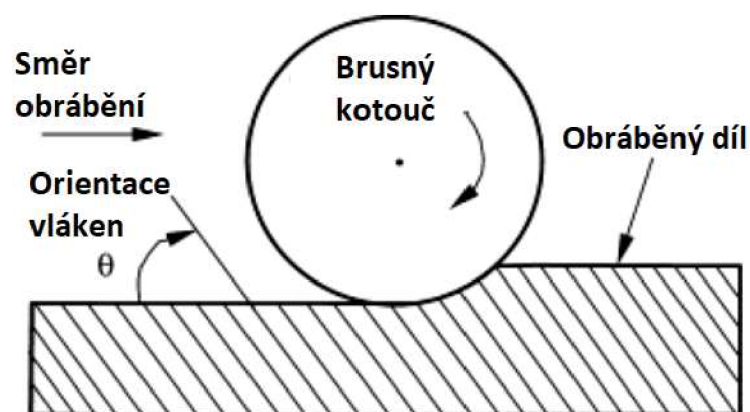
Při každém obrábění kompozitních materiálů s FRP je nutné zvolit správný nástroj, technologie vrtání není výjimkou. Mezi vhodné aspekty volby vrtáku patří snížení výrobních časů, působení axiálních a přítláčnicích sil, které mají vliv na celkovou integritu obrábění a delaminace. Mezi speciální vrtáky patří dvojhrotý spirálový vrták, svícnový atd..[25].

V leteckém průmyslu je nejvíce využívanou metodou vrtání. Na jedno malé letadlo je nutné vyvrtat více než sto tisíc děr. To představuje asi 40 procent všech obráběcích operací během montáže součástek (většinou nýtované a šroubové spoje). Asi největším problémem u vrtání do FRP je tvorba delaminace, která tvoří značné procento zmetkovitosti [3].

Zajímavou alternativní metodou pro tvorbu otvorů je orbitální vrtání, kde nástroj má menší průměr než průměr požadované díry. To znamená, že nástroj rotuje kolem své osy, nikoli kolem osy díry. Výhodou této technologie je nízká delaminace, snížení řezných sil, a potřeba pouze jednoho druhu vrtáku na různé průměry děr [7].

## 1.2.4 Broušení

Technologie broušení patří mezi třískové obrábění, které odebírá povrchové vrstvy těles pomocí nástroje, a vykonává rotační pohyb při vysokých rychlostech (až  $100 \text{ m.s}^{-1}$ ), a skládá z jemných brusných zrn, které jsou stmeleny pojivem. Výpočet řezné rychlosti je uveden v rovnici 1.18.



Obrázek 1.18: Schématický popis technologie broušení [15].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [\text{m.min}^{-1}] \quad (1.4)$$

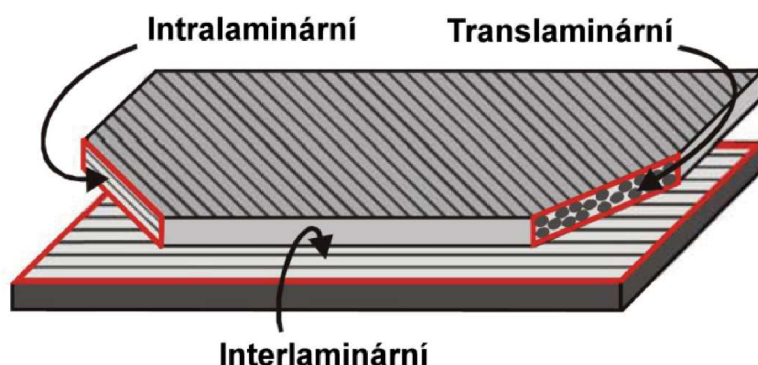
D... průměr brusného kotouče [mm], n... otáčky nástroje [ot.min<sup>-1</sup>]

Orientace vláken má vliv na drnost povrchu, tvorbu třísky, brusné síly a integritu povrchu. Nejnížší drsnost vykazují vlákna uložená pod orientací 0 až 90 stupňů. S přírůstkem hloubky záběru brusného kotouče se zvyšuje hloubka poškození pro všechny studované orientace vláken [15].

### 1.3 Poruchy vlákněných struktur u FRP

Kompozity jsou anizotropní materiály, které mohou podléhat mnoha druhům poruch. Poruchy závisí na druhu a orientaci zatížení. Druhy zatížení mohou být tah, tlak, smyk, ohyb, ráz nebo jejich kombinace. Též záleží, zda se jedná o statické či dynamické namáhání. Dalším vlivem porušení mohou být teplota, odlišná tuhost jednotlivých vrstev, rychlost zatížení, skladba laminátu, vlhkost a nebo další environmentální vlivy. Fraktografické znaky lomových ploch se zcela liší od izotropních materiálů, proto porušování kompozitních materiálů vedlo ke vzniku nových fraktografických technik [18].

Fraktografické analýzy lomů sledují porušení samotného vlákna s matricí, a až potom následné globální porušení. Dále se posuzuje rozhraní vlákna a matrice. Od tohoto rozhraní můžeme očekávat nejmenší vazebné síly v celém kompozitu. Proto se vyžaduje dobrá smáčivost matrice s vlákny, pokud chceme dosahovat vysokých pevností je nutná dobrá adheze. Šíření trhlin a lomů ve FRP jsou obecně velmi nestabilní procesy, protože uvolňují malé množství energie na plastickou deformaci, a tak je většina energie uvolněna do tvorby sekundárních poruch [19].



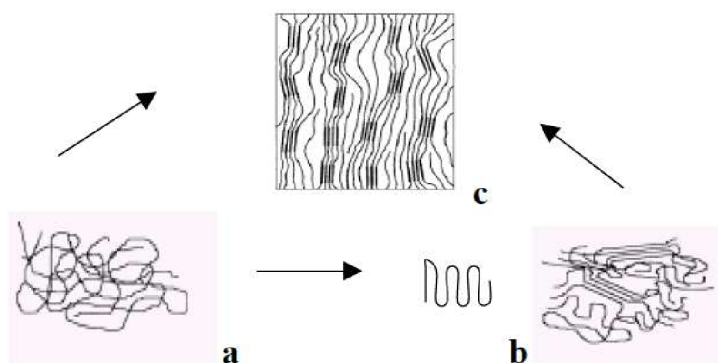
Obrázek 1.19: Mechanismy porušení vlákněných laminátů, dle místa porušení [13].

Translaminární vlákněné poruchy reprezentují porušení vrstvy vláken. Tento mechanismus se projevuje přetržením vlákna, zborcením vlákna ve zpěru, rozštěpením vlákna v podélném směru a lom vlákna v ohybu. Tato porušení jsou závislá na typu zatížení, a většinou je to doprovázeno i mezivlákněným lomem. Intralaminární mezivlákněný mechanismus začíná ve vrstvě, ale nastává porušení pouze matrice nebo rozhraní matrice s vlákem. Tato porucha nebývá viditelná pouhým okem, protože se oddělují vlákna pouze ve svazku. Při výskytu dutin v kompozitním materiálu se může měnit směr, nebo docházet k větvení poruch. Druhým mezivlákněným

mechanismem je interlaminární lom, neboli delaminace, která nastává mezi dvěma sousedícími vrstvami, a nezasahuje do svazků vláken ve vrstvě. Schématicky jsou všechny mechanismy porušení laminátů znázorněny na obrázku 1.19 [18].

### 1.3.1 Struktury a mechanické vlastnosti vláken

V polymerních vláknech se setkáváme se základními makrokonformacemi, které se rozdělují na metastabilní amorfní (náhodné klubko), metastabilní lamelární se skládánými řetězci a stabilní lamelární krystal s napjatými řetězci, viz obrázek 1.20.



Obrázek 1.20: Základní makro konformace polymerů (a) metastabilní amorfní (náhodné klubko), (b) metastabilní lamelární se skládánými řetězci, (c) stabilní lamelární krystal s napjatými řetězci [26].

Vyšší krystalické útvary jsou závislé na podmínkách krystalizace, jelikož je tuhost řetězců závislá na dané struktuře. Základním útvarem je lamela, která má destičkovitý tvar s oblými hranami. Neuspořádané struktury, jako jsou volné konce, smyčky, či zapleteniny tvoří asi 20 procent lamelární struktury. V izotropním prostředí, kde probíhá krystalizace vznikají lamelární komplexy s amorfní fází, které se nazývají sférolity. Lamelární struktury se vlivem dloužení a tepelné stabilizace transformují na fibrilární struktury. Základním útvarem je mikrofibrila, která se skládá z krystalické a amorfní oblasti, které se pravidelně střídají. Paralelně seskupené svazky mikrofibril, které jsou spojeny vaznými řetězci, tvoří vyšší útvar tzv. fibrilu. Tato fibrilní struktura tvoří skoro všechny známé vlákenné struktury.

Standardně se používá Peterlinův model, který tvoří 3 fáze, a to krystalickou, amorfní a fázi vazných řetězců, která tvoří asi 10 až 15 procent objemového podílu vlákenné struktury. Každá tato fáze má orientaci, objemový podíl a mechanické vlastnosti, jako je například modul pružnosti. Od vláken pro technickou praxi očeká-

váme dlouhodobou trvanlivost a rozměrovou stabilitu, tyto předpoklady jsou funkcí celé řady vlastností vláken [26].

Geometrické vlastnosti určují délku, jemnost, ohebnost a tvar příčného řezu. Pro textilní průmysl je důležitou vlastností vláken tzv. jemnost (fineness), tedy tloušťka vlákna. Jemnost  $T$  se vyjadřuje v jednotkách tex, viz rovnice 1.5. V technické praxi pro měření tloušťky vlákna se spíše používá metrický systém, nejběžněji v mikrometrech. Měrná hmotnost (hustota  $\rho$ ) se pohybuje u uvětšiny chemických a přírodních vláken kolem 900 až 1600  $kg.m^{-3}$ , Uhlíková vlákna dosahují hustoty od 1600 až 2100  $kg.m^{-3}$ , dle technologie výroby.

$$T = \frac{m}{l} = \frac{l.S.\rho}{l} = S.\rho [kg.m^{-1}] \quad (1.5)$$

S... plocha příčného řezu [ $m^2$ ],  $\rho$ ... hustota [ $kg.m^{-3}$ ], l... délka vlákna [ $m$ ]

Důležitým aspektem vláken je měrný povrch  $S_p$ , který je dán obecnou rovnicí 1.6, a pro kruhový průřez platí rovnice 1.7. U syntetických vláken je tvar povrchu dán výrobním procesem. Čím je vlákno členitější a jemnější, tím má větší měrný povrch. Hodnota jemnosti vláken ovlivňuje počet vláken v příži. Standardní jemnost chemických vláken je cca 1 až 5 dtex. Superjemná vlákna jsou menší než 0,1 dtex.

$$S_p = \frac{O_v}{S.\rho} [m^2.kg^{-1}] \quad (1.6)$$

S... plocha příčného řezu [ $m^2$ ],  $\rho$ ... hustota [ $kg.m^{-3}$ ],  $O_v$ ... obvod průřezu [ $m$ ]

$$S_p = \frac{2\pi.r.l}{\pi.r^2.l.\rho} = \frac{2}{r.\rho} = \frac{2\pi.r.l}{\pi.r^2.l.\rho} = \sqrt{\frac{4\pi}{T.\rho}} [m^2.kg^{-1}] \quad (1.7)$$

S... plocha příčného řezu [ $m^2$ ],  $\rho$ ... hustota [ $kg.m^{-3}$ ],  $O_v$ ... obvod průřezu [ $m$ ]

Délka vláken rozhoduje o pevnosti v příži a též je závislá na technologii výroby. Od kompozitních materiálů očekáváme to, že vlákna budou přenášet většinový podíl zatížení. Jestliže platí, že čím delší je vlákno, tím má větší vyztužující efekt, tak to musí mít za následek tzv. kritickou délku vlákna  $L_c$ , tedy minimální délku vlákna, které je schopné přenášet maximální napětí při nejmenší délce vlákna. Další rozhodující charakteristikou je tvar příčného řezu vláken, který ovlivňuje tuhost, sorbční vlastnosti, lesk atd. Též se můžeme setkat s dutými vlákny, která jsou lehčí, ale pevnost není stejná jako u plných vláken [26].

Mechanické vlastnosti vláken jsou ovlivněny chemickým složením, molekulovou hmotností polymerních řetězců postupem výroby. Pro určení mechanických vlastností se využívá jednoosé nebo víceosé namáhání, které mohou být buď statického či dynamického charakteru. Matematické modely pro popis nelineárních viskoelastických projevů semikrystalických materiálu, tedy vláken je relativně složitý, proto se tyto matematické modely aproximují do tří základních skupin. Modely zanedbávající strukturu vláken vychází z představy formální platnosti zákonů lineární viskoelasticity. Druhým základním modelem je tzv. strukturní model, který vyjadřuje makroskopicky časové napětí nebo deformaci. Někdy je tento přístup označován jako mikromechanický. Tento postup popisuje dílčí strukturní elementy jako je fibrila, vazné řetězce a další elementy. Posledním zástupcem ze skupiny modelů je tzv. vícefázový model, který předpokládá, že všechny fáze v polymeru jsou kontinuální. Každá tato fáze je charakterizována stupněm orientace a objemovým zlomkem.

Tah je základním namáháním, u kterého probíhá jednoosá deformace. Ta je vyvolána postupně rostoucí silou  $F_r$ - rovnice 1.8, roste prodloužení, až do bodu přetržení. Ve vláknech je silná anizotropie a to se projevuje tím, že modul pružnosti ve směru vláken je většinou řádově vyšší než modul ve směru kolmém na osu vláken. Proto se u vláken udává axiální  $K_a$  a transverziální  $K_t$  modul. U semikrystalických vláken je modul závislý na stupni krystalinity a orientaci řetězců. Další důležitou deformační charakteristikou vláken je Poissonův poměr  $\mu$ , který je definovaný jako poměr mezi příčným zkrácením a podélným prodloužením. U většiny polymerních vláken se pohybuje Poissonova konstanta kolem 0,2 až 0,47  $\mu$ .

$$F_r = \frac{F}{T} = \frac{F}{S \cdot \rho} [N.tex^{-1}] \quad (1.8)$$

Též platí, že  $F_r = \frac{\sigma}{\rho} [Pa]$ , S... plocha příčného řezu [ $m^2$ ],  $\rho$ ... hustota [ $kg.m^{-3}$ ],  $\sigma$ ... napětí [ $Pa$ ]

Ultimativní mechanické chování a porušení vláken se určují z pevnosti a tažnosti vláken  $\epsilon_p$  [%]. Relativní síla  $F_r$ - rovnice 1.10, tedy hodnota síly, nebo napětí  $\sigma_p$ - rovnice 1.11, do přetrhnutí definují limitní pevnost vláken. Dalším důležitým aspektem je tzv. tržná délka  $l_T$ , při níž by vlákno prasklo vlastní vahou, viz rovnice 1.9. Statistická teorie pevnosti při porušení vláken se popisuje pomocí mikromechanického modelu. Tento model vychází z několika předpokladů, a to že defekty jsou rozmístěny náhodně po celé délce vlákna, které nejsou na sobě vzájemně závislé a v každém "kritickém" defektu může docházet k praskání vlákna. Tento model může

platit jen u keramických vláken a speciálních vláken. U vláken v průběhu zatěžování dochází k deformacím, kde probíhá řada strukturních zmeň, kterým se lze přiblížit pomocí experimentálních dat [26].

$$l_T = \frac{\sigma}{\rho \cdot g} = [m] \quad (1.9)$$

$$F_p = l_T \rho \cdot S = [Pa] \quad (1.10)$$

$$\sigma_p = l_T \cdot \rho = [Pa] \quad (1.11)$$

S... plocha příčného řezu [ $m^2$ ] g... gravitační konstanta [ $m \cdot s^{-2}$ ],  $\rho$ ... hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ],  $\sigma$ ... napětí [ $Pa$ ]

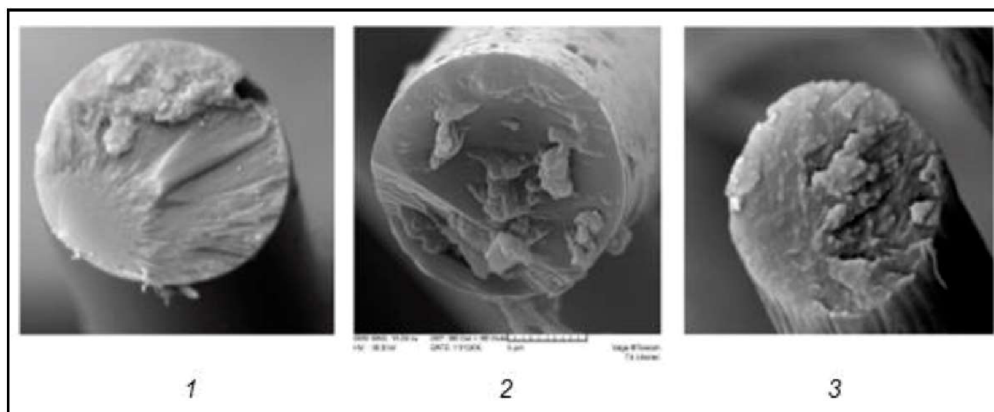
Ultimativní mechanické vlastnosti jsou značně závislé na teplotě, protože většina vláken je tvořena polymerní bází. To znamená, že rozhodující teploty jsou právě kolem teploty zaskelnění  $T_g$ . Modul pružnosti pro amorfny polymery značně klesá při narůstající teplotě, už při přiblížení k přechodové oblasti  $T_g$ , klesá modul pružnosti o tři řády. V kaučukovité oblasti je modul přibližně stejný jako v přechodové oblasti, ale při překročení oblasti pružného tečení modul pružnosti poklesne o přibližně 2 řády. Většina používaných vláken patří do skupiny semikrystalických polymerů, které při překročení kaučukovité oblasti dochází k tání polymerů.

### 1.3.2 Mechanismus porušení vláken

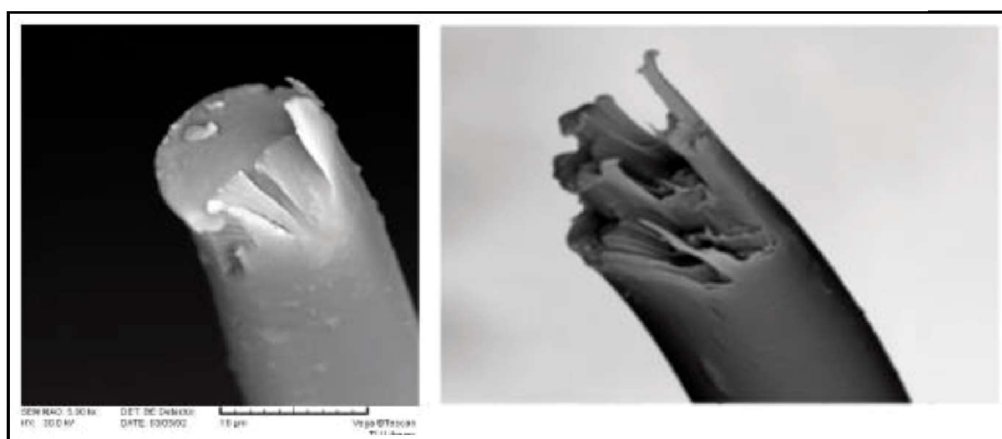
Mechanismus porušení vláken nastává při limitním mechanickém jednoosém namáhání, tedy překročení meze pevnosti vláken. Při přetržení vlákna vzniká lomová plocha v příčném řezu. Většina vláken je porušována křehkým lomem-*obr. 1.21*, který se šíří velkou rychlostí a je kolmý na normálové napětí. Z energetického hlediska je na křehký lom spotřebována nižší energie, než je tomu u houževnatého lomu. Křehký lom je většinou iniciován přítomností vad, ve kterých se koncentruje napětí, které se dál šíří v podobě trhlin ve vlákne. Většinou se s křehkým lomem setkáme u vláken, která jsou ve skleném stavu.

Syntetická vlákna, která se zvláknují z taveniny jsou většinou porušována houževnatým lomem. Houževnatý lom je charakterizován pomalým šířením trhliny, typicky ve tvaru V zářezu na lomové ploše. Při praskání vzniká plastická deformace, oproti křehkému lomu, kde se spíš jedná o elastickou deformaci.





Obrázek 1.21: Příklady křehkých lomů vláken (1)-skleněné vlákno, (2)-keramické vlákno, (3)-panCF [26].

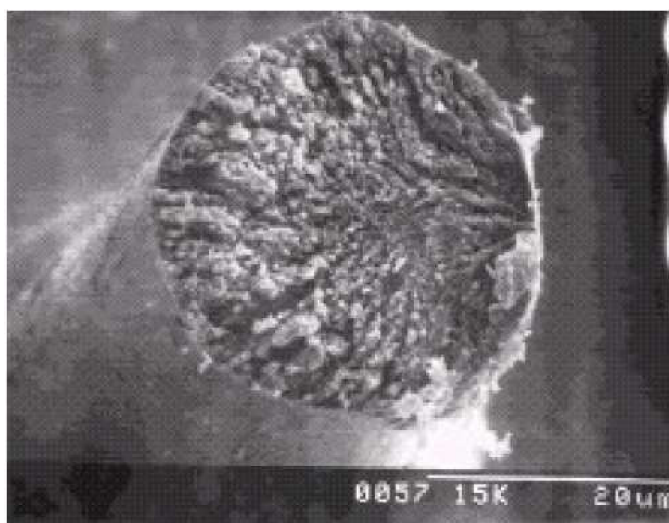


Obrázek 1.22: Příklady houževnatých lomů u PES vláken [26].

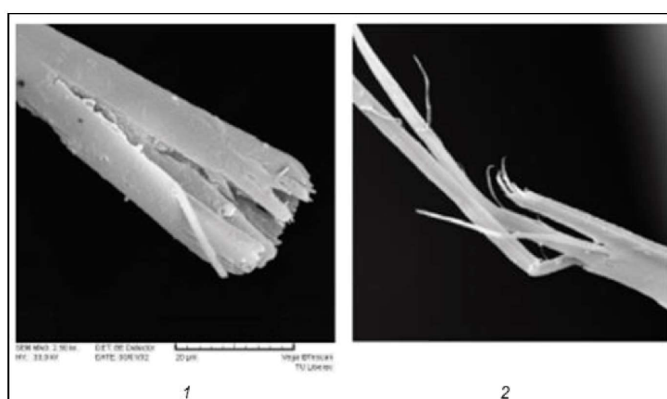
U mikroporézních vláken a vláken, která jsou zvlákňována z roztoků, dochází k tvorbě granulárního lomu-obr. 1.23. Tento lom je typický pro vlákna, u kterých se nachází mikropóry a síť slabých míst v průřezu. Trhlina se šíří vlivem přenosu napětí, a vláknenné elementy praskají postupně.

Axiální štěpení je typické pro vysoce pevná vlákna, jako jsou aramidová vlákna, PBO vlákna atd-obr. 1.24. Kritické napětí pro šíření trhlin  $\sigma_c$  souvisí s povrchovou energií vlákna  $\gamma$ , Poissonovým číslem  $\mu$ , kritickou délkou trhliny  $l_c$  a modulem pružnosti  $E$ , což je uvedeno ve vztahu 1.12.

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot l_c \cdot (1 - \mu^2)}} [m] \quad (1.12)$$



Obrázek 1.23: Granulární lom u lyocelových vláken [26].



Obrázek 1.24: Axiální štěpění vláken (1)-Kevlar, (2)-Nomex [26].

## 2 Experimentální část práce

### 2.1 Metodika experimentu

V rámci diplomové práce byla zkoumána destrukce vlákenných struktur u CFRP při třískovém obrábění-broušení, frézování a vrtání. Experiment byl zaměřen na přípravu vzorku na bázi epoxydové pryskyřice vyztužené uhlíkovou tkaninou, jeho obrobem a následným hodnocením charakteru uhlíkových vláken, která se v průběhu procesů uvolnila.

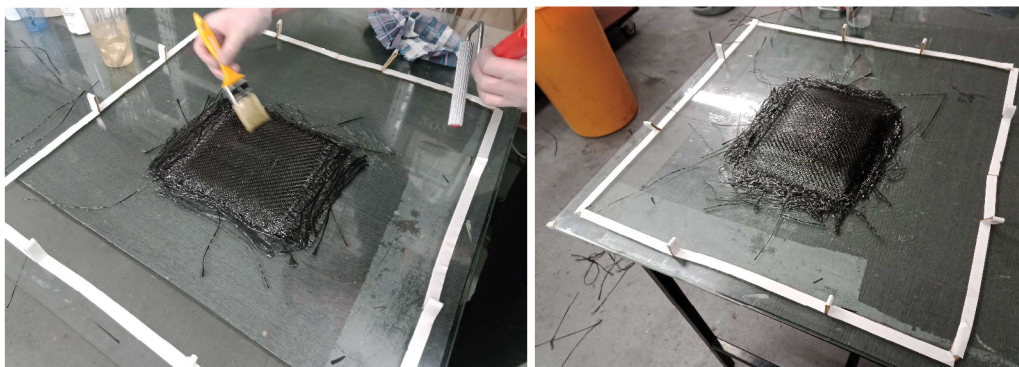
Příprava kompozitních vzorků z CFRP byla provedena v dílně FS TUL racing. Obrábění a sběr vzorků pro následné mikroskopické analýzy probíhalo v laboratoři Katedry obrábění a montáže Fakulty strojní na Technické univerzitě v Liberci. Měření a zpracování výsledných vzorků bylo provedeno na Katedře materiálu Fakulty strojní na Technické univerzitě v Liberci a Katedře strojírenské technologie.

### 2.2 Příprava kompozitních vzorků

Příprava laminátové desky z CFRP se skládala z nastříhání textilních vrstev o rozměrech 200x200 mm z uhlíkové tkaniny KC 160  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 3K, s keprovou vazbou, šířky 120 cm, která byla zakoupená od firmy Havel Composites CZ s.r.o. Zakoupená uhlíková vlákna byly povrchově ošetřena silanovým vazebním činidlem. Jako nástroj pro stříhání byly použity elektrické nůžky Easy Cutter. Celkově bylo nastříháno 110 textilních vrstev, tloušťka tkaniny byla 0,14 mm. Jako matrice byla použita epoxidová pryskyřice CHS - EPOXY 520, která byla vytvrzována tvrdidlem T 0492 v hmotnostním poměru 26:100 (tento poměr udává výrobce). Dalším krokem bylo zvolit nejlepší technologii pro výrobu laminátové desky z CFRP, která by nebyla finančně náročná, a nebylo nutné použití drahých přístrojů či nástrojů. Byla zvolena technologie vakuového lisování (vacuum bagging) s rovinnou formou, v podobě skleněné tabule. Forma byla očištěna ředidlem, a naseparována univerzálním PVA separátorem, a to ve dvou vrstvách po 15 minutách. Po dalších 15 minutách byl

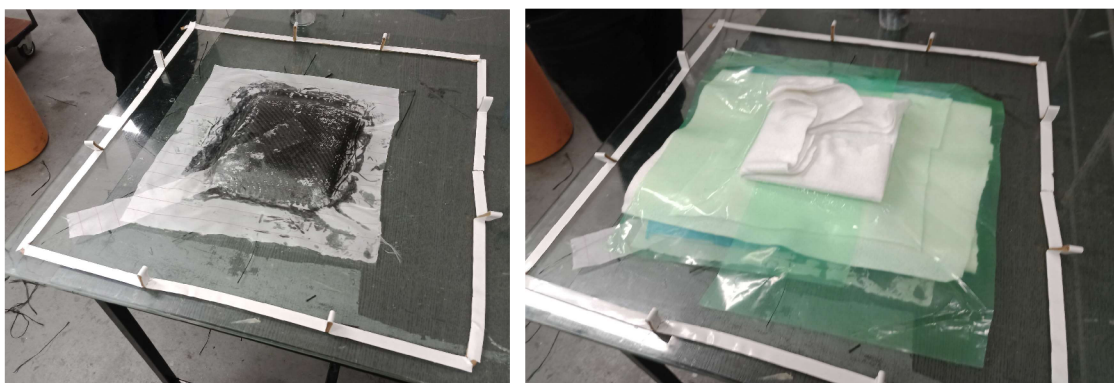
znovu nanesen separační vosk, též ve dvou vrstvách po 5 minutách, aby bylo docíleno minimální adheze konsolidovaného vzorku (deska) s formou při vyjmutí.

Pryskyřičný systém byl míchán v plastovém kelímku, a zároveň vážen vahou Kern KB-B. První vrstva pryskyřičného systému byla nanášena na předseparovanou formu pomocí štětce-obr. 2.1. Nanášená vrstva pryskyřičného systému se přibližně rovnala ploše vzorku, na kterou byla umístěna první vrstva tkaniny a pomocí válečku vtlačena do pryskyřičného systému. Tímto způsobem bylo nanášeno všech 110 vrstev tkaniny, viz obrázek 2.2.



Obrázek 2.1: Nanášení vrstev uhlíko- Obrázek 2.2: Nekonsolidovaná deska při  
vé tkaniny, a prosycování pryskyřičným nanesených 110 vrstvách uhlíkové tka-  
systémem pomocí válečku a štětce. niny.

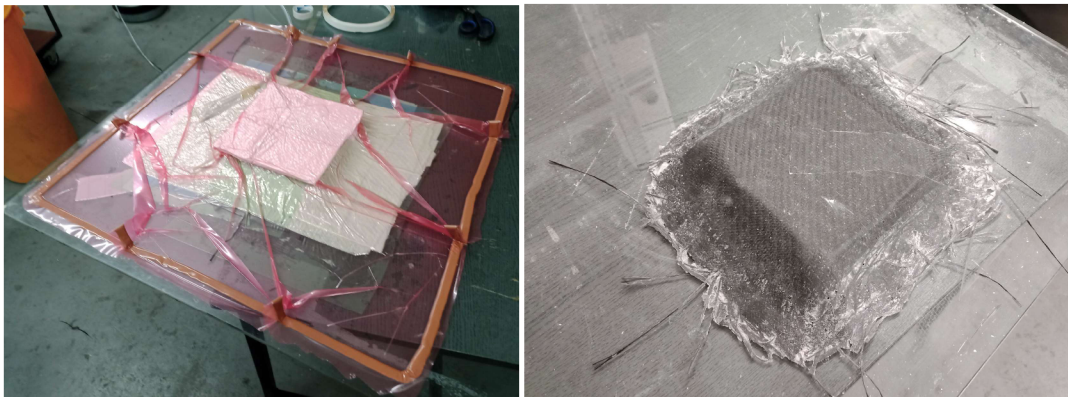
Po prosycení všech vrstev uhlíkové tkaniny a jejich navrstvení byla na povrch položena strhávací fólie ve 2 vrstvách, a to ve formě pásku o přibližných rozměrech 4x30 cm, který slouží k lepšímu strhnutí krycí strhávací fólie, která je z části položená na ploše pásku, a po celé ploše laminátové desky, viz obrázek 2.3.



Obrázek 2.3: Nekonsolidovaná deska se  
strhávací fólii.

Obrázek 2.4: Nekonsolidovaná deska  
s navrstvenými uhlíkovými tkaninami  
a ocelou destičkou.

Další položená vrstva byla modrá plastová fólie, která sloužila k lepšímu odvodu přebytečného pryskyřičného systému z prosycené laminátové desky. Odsávací rohož byla pokládána po třech vrstvách. Jejich úkolem bylo odstranit přebytečný pryskyřičný systém. Na vrstvy z odsávací rohože byla položena zelená plastová fólie z PE, na kterou byla umístěna ocelová destička o rozměrech 200x200 mm. Ocelová destička sloužila k dosažení rovnoměrného tlaku na laminátovou desku, aby nedocházelo k nerovnoměrnému stlačení ke straně konsolidované laminátové desky, viz obrázek 2.4. Po navrstvení všech vrstev byla použita předem nastříhaná vzduchotěsná (vakuová) fólie, která se postupně vmačkávala do těsnící vakuové pásky. Vývod do vakuové pumpy byl řešen vtlačáním vakuové hadice do těsnící vakuové pásky a utěsněn, viz obrázek 2.5.



Obrázek 2.5: Nekonsolidovaná deska při zapnuté vakuové pumpě.

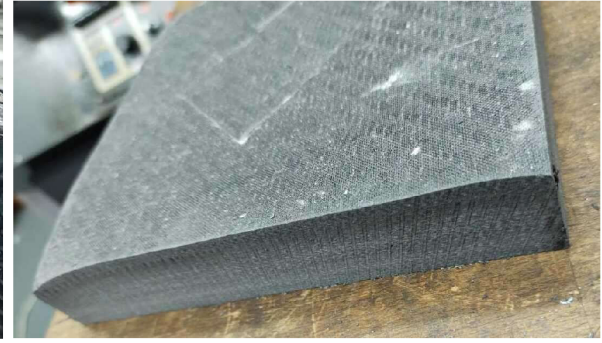
Obrázek 2.6: Vyjmutá laminátová deska z formy.

Při technologii vakuového lisování je nutné, aby vakuová pumpa byla zapnutá během celého cyklu vytvrzování dílu. Doba vytvrzování trvala přibližně dvacet hodin, při laboratorní teplotě  $22\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ -obr. 2.6. Po dokončení vytvrzování byl vzorek vyjmut z formy a následně dotvrzen v sušárně při teplotě  $50\text{ °C}$  po dobu 10 hodin, aby bylo docíleno co nejlepšího prostorového zasiťování kompozitu.

Po dotvrzení byla konsolidovaná laminátová deska zarovnána pásovou pilou ARPG 600 Plus H.F-obr. 2.7, aby byla zajištěna základní rozměrová stálost, tedy zarovnání hran obrobku. Po obrobení hran získal obrobek požadovaný rozměr, a to  $175 \times 170 \times 29\text{ mm}$ -obr. 2.8. Poté byl obrobek rozřezán na 4 vzorky ve formě laminátových desek o rozměrech  $85 \times 87 \times 29\text{ mm}$ .



Obrázek 2.7: Zarovnání hran konsolidovaného vzorku pásovou pilou ARPG 600 Plus H.F.

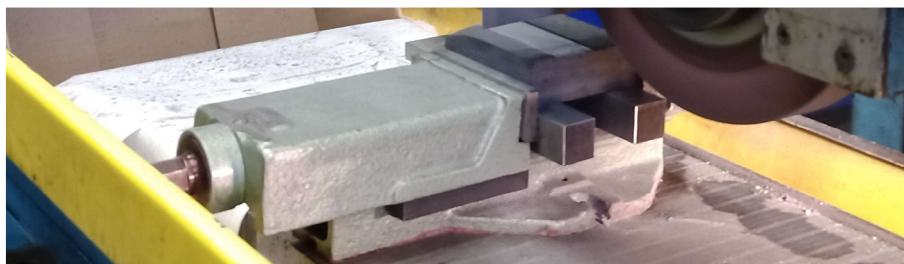


Obrázek 2.8: Zarovnaná laminátová deska z CFRP o rozměrech 175x170x29 mm.

### 2.2.1 Obrábění vzorků

Třískové obrábění u všech vzorků probíhalo na čisté pracovní ploše. Kolem pracovní plochy nástroje byla umístěna netkaná nanovláknenná textilie, která měla za úkol zachytit většinu třísek vzniklých při obrábění. Pro ochranu před vdechnutím, či vniknutím uhlíkových částic prachu do pokožky byly použity ochranné pomůcky ve formě roušek, gumových rukavic, dlouhých rukávů a ochranných brýlí. Při a po obrábění laminátové desky nebyly vykonávány žádné prudké pohyby kolem pracovní plochy stroje, aby nedošlo k rozptýlu uhlíkových částic prachu. Všechny obráběcí operace probíhaly při teplotě  $22\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ . Před zahájením každého experimentu byl vzorek z CFRP zarovnán do roviny. Po každém opakovaném třískovém obrábění byla pracovní plocha uklizena, a položena nová netkaná nanovláknenná textilie.

**Broušení** bylo provedeno na rovinné brusce TOS BPH 320 A/1000. Obráběla se rovinná plocha vzorku při zvolených řezných podmínkách, viz tabulka 2.1. Zvolený nástroj byl brusný kotouč T1 250x32x76 98A60K9V40 421188, od výrobce TYROLIT-[obr.2.9](#).



Obrázek 2.9: Vyobrazení technologie broušení laminátové desky z CFRP.

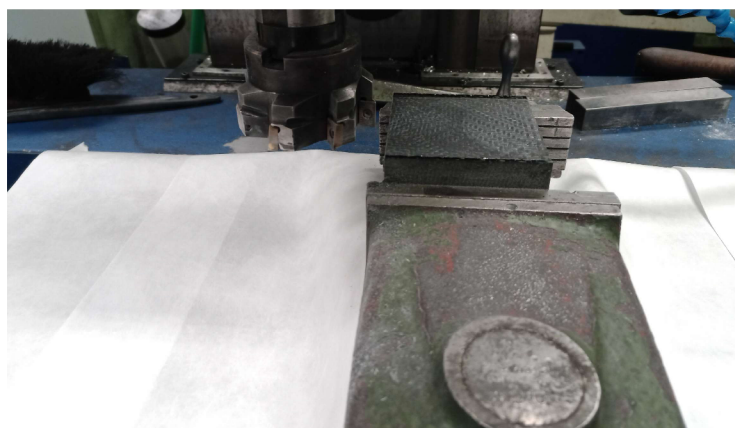
Tabulka 2.1: Řezné podmínky při broušení.

Vzorek	Otáčky $n$ [ $ot.min^{-1}$ ]	Hloubka záběru $a_p$ [mm]	Rychlost posuvu $v_f$ [ $mm.min^{-1}$ ]
vzorek 1	2400	0,2	200

Tabulka 2.2: Specifikace frézky FNG 32

Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Rozměr pracovní plochy	800x400	[mm]
Počet upínacích drážek	7	[-]
Výkon hlavního motoru	4	[kW]
Výkon posuvného motoru	1,1	[kW]
Pracovní zdvih podelný (osa X)	600	[mm]
Pracovní zdvih příčný (osa Y)	400	[mm]
Pracovní zdvih svislý (osa Z)	400	[mm]
Maximální zatížení stolu	350	[kg]

**Frézování** probíhalo bez procesního media, na frézce FNG 32, viz tabulka 2.2 specifikace stroje. Pro tento experiment byly zvoleny vybrané řezné podmínky, které byly převzaty z [22], a jsou uvedeny v tabulce 2.3. Pro obrábění vzorku byla zvolena frézovací hlava se sedmi břitovými destičkami TNGX 100404SR-F od firmy Pramet. Vyobrazení frézování vzorku-obr. 2.10.



Obrázek 2.10: Vyobrazení technologie frézování laminátové desky z CFRP.

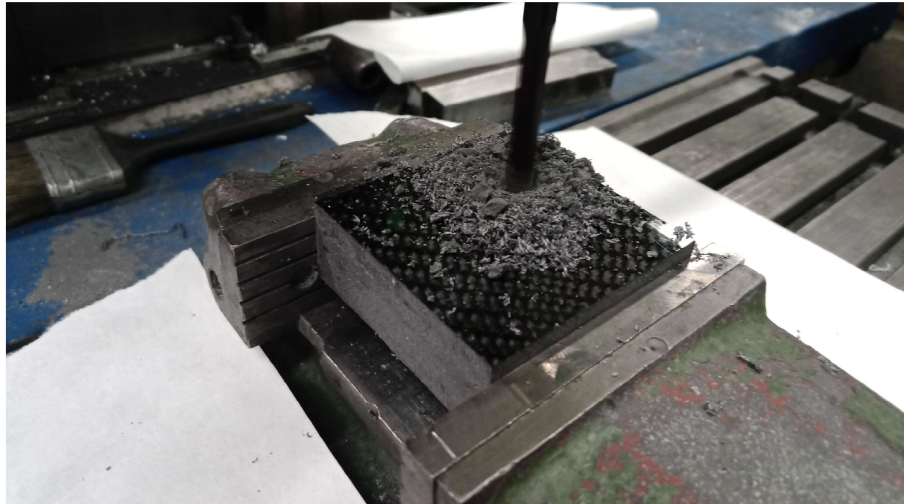
Tabulka 2.3: Řezné podmínky při frézování.

Vzorek	Otáčky $n$ [ $ot.min^{-1}$ ]	Hloubka záběru $a_p$ [mm]	Rychlost posuvu $v_f$ [ $mm.min^{-1}$ ]
vzorek 2	1000	1	100
vzorek 3	1000	2	100

Tabulka 2.4: Řezné podmínky při vrtání.

Vzorek	Průměr vrtáku $D$ [mm]	Otáčky $n$ [ot.min <sup>-1</sup> ]	Posuv na otáčku $f_{ot}$ [mm.ot <sup>-1</sup> ]
vzorek 4	9,8	500	0,2
vzorek 5	9,8	1000	0,2
vzorek 6	5	1500	0,2
vzorek 7	5	2000	0,2

**Vrtání** vzorku bylo provedeno na stroji FNG 32 bez procesního média, viz tabulka specifikace 2.4. Pro experiment byly zvoleny vrtáky HSS-Co DIN 338 o průměrech 5 mm a 9,8 mm s úhlem špičky 118 °, od firmy OREN. Řezné podmínky byly použity obdobně jako v diplomové práci [21]. Celkově byly připraveny 4 vzorky s odlišnými průměry a otáčkami vrtáků při řezných podmínkách, které jsou uvedeny v tabulce 2.4. Vyobrazení vrtání-obr. 2.11.



Obrázek 2.11: Vyobrazení technologie vrtání laminátové desky z CFRP.



## 2.2.2 Odběr a analýza vzorků

Jelikož se tato práce zabývá destruovanými vlákennými strukturami, které jsou tvořeny nepravidelnými submikročásticemi vlákenného charakteru, tak bylo nutné zvolit vhodnou terminologii pro takto oddělené části vlákenné struktury uhlíkových vláken. Proto byl zvolen v této diplomové práci termín vlákenné částice.

Jak bylo zmíněno výše, kolem pracovní plochy nástroje byla umístěna netkaná nanovlákná textilie, ze které byly odebírány vzorky (oddělená uhlíková vlákna s vytvrzenou epoxidovou pryskyřicí) po obrobení a to přibližně v perimetru 30 cm. Tato vzdálenost byla zvolena z důvodu zvýšené pravděpodobnosti koncentrace vdechovatelných vlákenných částic prachu (WHO-fibers) [20]. Po obrábění byly vlákenné částice náhodně odebírány přímo z netkané nanovlákné textilie do sáčků s uzavíratelnou lištou, které byly označeny. Při technologii vrtání, byly vlákenné částice s vytvrzenou epoxidovou pryskyřicí odebírány přímo z laminátové destičky, které se tvořil kolem díry a nástroje. Důvodem byl minimální rozptyl třísek, který by zůstal na netkané nanovlákné textili.

Nejprve byl analyzován vlákenné částice s odštěpeným pryskyřičným systémem pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu (SEM-BSE) TESCAN VEGA 3 SH. Výsledky z SEM nám sice ukázaly vlákna a vlákenné částice, ale též velké množství epoxidové pryskyřice-[obr. 2.12](#), která by ve vyhodnocování mohla vést k záměně vlákenných uhlíkových částic za submikrometrové částice epoxidové pryskyřice. A z tohoto důvodu bylo nutné eliminovat epoxidovou pryskyřici. Proto všechny vzorky, které byly odebrány z dané třískové technologie byly rozděleny do dvou skupin. Kde uhlíkový vlákenný částicový prach byl analyzován ve stavu s odštěpeným pryskyřičným systémem, a ve stavu bez pryskyřičného systému-[obr. 2.13](#).



Obrázek 2.12: Nevypálené vzorky s epoxidovou pryskyřicí.



Obrázek 2.13: Vypálené vzorky bez epoxidové pryskyřice.

Tabulka 2.5: Navážka vypálených vzorků.

Vzorek	Hmotnost před vypálením [mg]	Hmotnost po vypálení [mg]	Hmotnostní úbytek [%]
vzorek 1	49	17	65,3
vzorek 2	49	15	69,4
vzorek 3	56	16	71,4
vzorek 4	54	18	66,7
vzorek 5	52	19	63,5
vzorek 6	53	18	66,0
vzorek 7	48	17	64,6
Průměr	51,6	17,1	66,7
$\sigma$	2,7	1,3	2,6

Skupina vzorků připravená na vypálení byla nejdříve odvážena do keramických vaniček, které byly před zahájením vážení vyžháný při teplotě  $700\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$  po dobu 30 min. Vyžhání keramických vaniček bylo nutné kvůli ustálení váhy a spálení nečistot. Vypálení přebytečného pryskyřičného systému z navážky probíhalo při teplotě  $500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$  za přístupu vzduchu. Vážení probíhalo na laboratorní váze KERN EWJ, při teplotě  $24\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ , viz tabulka 2.5.

Vzorky bez epoxidové pryskyřice byly následně zkoumány pod optickým mikroskopem NIKON EPIPHOT 200 při dvacetinásobném zvětšení. Pod optickým mikroskopem byla dobře viditelná oddělená uhlíková vlákna do délky  $10\text{ }\mu\text{m}$ . Při větším zvětšení docházelo ke snížení ostrosti obrazu.

Jelikož se ve vzorcích vyskytovala také vlákna menší než  $10\text{ }\mu\text{m}$  a vlákenné částice menší než  $5\text{ }\mu\text{m}$ , z tohoto důvodu byly použity obrázky získané ze SEM (BSE), které byly nahrány a vyhodnoceny ve softwaru NIS-elements 5.02. Díky tomu mohly být vyhodnoceny vzorky s délkou vláken menší než  $10\text{ }\mu\text{m}$ .

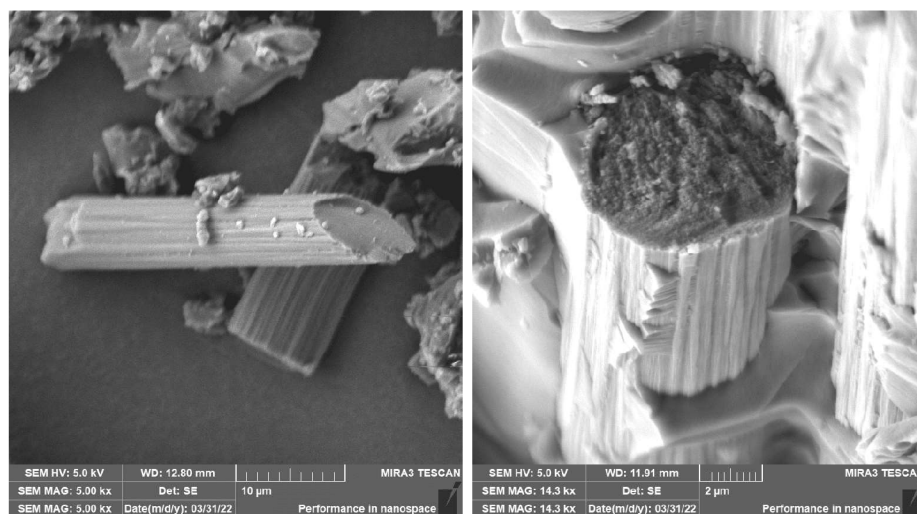
U všech analyzovaných vzorků byly zkoumány tři náhodně vybrané oblasti. V každé oblasti bylo hodnoceno 15 měření délek, tedy u každého vzorku bylo celkově naměřeno a vyhodnoceno 45 měření (celkově 315 měření).

Tabulka 2.6: Přehled vzorků.

Vzorek	Zvolený název
vzorek 1	broušení-0,2-2000
vzorek 2	frézování-1-1000
vzorek 3	frézování-2-1000
vzorek 4	vrtání-9,8-500
vzorek 5	vrtání-9,8-1000
vzorek 6	vrtání-5-1500
vzorek 7	vrtání-5-2000

## 2.3 Hodnocení vzorků vláken a vlákněných částic

Každá zkoumaná technologie při obrábění měla odlišný rozptyl a šíření třísek do prostoru laboratoře. Rozptyl třísek při frézování tvořil přibližně radius 60 cm od nástroje. U technologie broušení vznikala největší rozptyl třísek do prostoru laboratoře. U vrtání vznikala nejmenší rozptyl třísek ze všech vybraných třískových technologií. Největší četnost třísek se tvořila kolem obráběcího nástroje. Pro lepší identifikaci a zápis vzorků byly zvoleny zkrácené názvy, které jsou spojeny s technologickými řeznými podmínkami, které jsou uvedeny v tabulce 2.6. U všech vláken byl zjištěn průměr kolem 8  $\mu\text{m}$ .



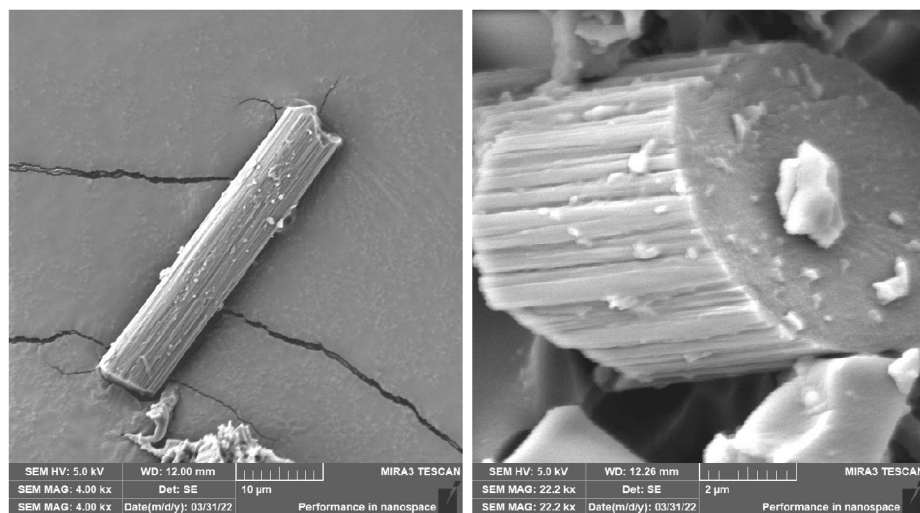
Obrázek 2.14: Ukázka oddělení vlákněné částice (v levo dole) a zobrazení smykového lomu (v pravo nahoře) uhlíkového vlákna, broušení-0,2-vého vlákna, vrtání-5-1500/pryskyřice, -2400/pryskyřice, SEM (BSE).  
 Obrázek 2.15: Zobrazení granulárního lomu uhlíkového vlákna, broušení-0,2-vého vlákna, vrtání-5-1500/pryskyřice, -2400/pryskyřice, SEM (BSE).

Z první analýzy SEM (BSE) byla dobře viditelná uhlíková vlákna s epoxidovou pryskyřicí. Avšak epoxidová pryskyřice tvořila většinový podíl odebraných vzorků a to přibližně 67 %, přehled je uveden v tabulce 2.5. Vysoký podíl epoxidové pryskyřice měl dopad na viditelnost malých vláknenných částic, které byly zakryty nebo obaleny epoxidovou pryskyřicí.

První analýza nám též umožnila vidět tvorbu lomových ploch zkoumaných uhlíkových vláken. Z fraktografického hlediska docházelo u obrobených uhlíkových vláken převážně ke granuálnímu lomu a smykovému lomu-obr. 2.15, 2.14, které byly doprovázeny štěpením vláken podél axiální osy vlákna na vláknenné částice v rozmezí délek od stovek nanometrů až do jednotek mikrometrů. Také byly nalezená destruovaná vlákna s výrazným křehkým lomem, a též docházelo ke smíšených nerovným lomům u destruovaných vláken, kde oddělování vláknenných vrstev či vláknenných částic probíhalo v rozmezí 0 až 80 ° od osy vlákna.

Tvorba povrchu a případných defektů uhlíkových vláken je značně závislá na technologii výroby vláken. Zkoumaná vlákna byla vyrobena technologií mokrého zvláknění z prekurzoru PAN. Povrchová struktura zkoumaných uhlíkových vláken byla tvořena drážkami (bazálními stuhami), které byly paralelně rozmístěny podél osy vláken. Mezi bazálními stuhami vznikala polootevřená eliptická mikrodutina o velikosti několika nanometrů. Změřená průměrná šířka bazálních stuh byla  $0,49 \pm 0,1 \mu\text{m}$ . U některých zkoumaných destruovaných vláken docházelo k odlupování bazální stuhy, u které byla velikost oddělené povrchové vrstvy ve stovkách nanometrů.

Na snímku je vidět, že z vlákna byla odštěpnuta tenká povrchová vrstva submikrometrového rozměru - obr. 2.16. Takový případ nebyl ojedinělý. Rozměry oddělených povrchových vrstev jsou na úrovni jednotek mikrometrů z hlediska délky/šířky a na úrovni submikrometrové z hlediska jejich tloušťky. Vysvětlení oddělování vrstev uvedeného popisu spočívá v charakteru vnitřní mikrostruktury uhlíkových vláken. Během procesu výroby vznikají vlákna o průměru 7 až 8  $\mu\text{m}$ ., ta jsou však také vnitřně strukturovaná. Vnitřní struktura je tvořena grafénovými vrstvami, které jsou více či méně uspořádané a rovnoběžné s osou vlákna, čímž zajišťují vláknům vysoké hodnoty mechanických parametrů. Odštěpení vrstev takového charakteru může být také potenciálně zdravotně závadné pro jakékoli živé organismy.



Obrázek 2.16: Zobrazení náhodně vybraného odštípnutého vlákna s odštíplou povrchovou vrstvou (horní část odděleného vlákna), SEM (BSE)/pryskyřice, broušení-0,2-2400. (BSE).  
 Obrázek 2.17: Zobrazení náhodně vybraného odštípnutého vlákna s viditelnými drážkami (bazálními stuhami), SEM (BSE)/pryskyřice, frézování-1-1000/pryskyřice, SEM (BSE).

Abychom mohli správně analyzovat délky vláken a vlákenných částic, tak bylo nutné odstranit epoxidovou pryskyřici ze všech odebraných vzorků. Po odstranění epoxidové pryskyřice spálením byly z analýzy SEM (BSE) dobře viditelná obnažená uhlíková vlákna a velmi malé částice vznikající rozlámáním uhlíkových vláken při popisovaných technologických operacích. Při odstraňování epoxidové pryskyřice docházelo k průvodní vysokoteplotní degradaci uhlíkových vláken. To mělo za následek natavování uhlíkových vláken téměř ve všech vzorcích.

### 2.3.1 Vyhodnocení délek vláken pomocí optické a elektronové rastrovací mikroskopie

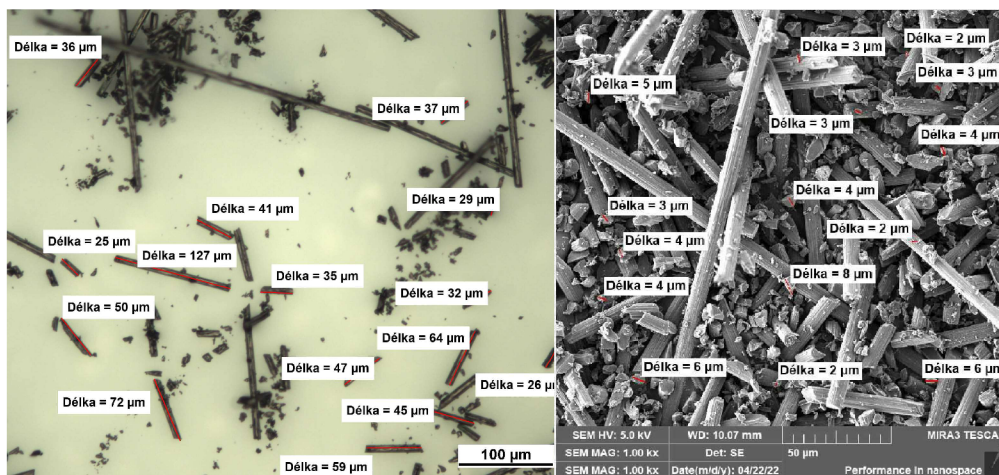
Pro vyhodnocování délek uhlíkových vláken a vlákenných submikroskopických uhlíkových částic (vlákenných částic) byl využit optický mikroskop NIKON EPIPHOT 200 a na něm nainstalován program NIS-elements 5.02, který nám umožnil sledovat vlákna od 10  $\mu$ m a výše, ale vlákenné částice nebylo možné zaostřit na požadovanou kvalitu zobrazení. Důsledkem nízké kvality zobrazení by docházelo u měření menších než 10  $\mu$ m délek vláken a vlákenných částic k značné chybě měření. Proto byla nejprve vyhodnocována vlákna větší než 10  $\mu$ m.

Měření délek vláken bylo rozděleno do třech oblastí na větší než  $10\ \mu\text{m}$ , menší než  $10\ \mu\text{m}$  a menší než  $5\ \mu\text{m}$ . Důvodem k tomuto rozdělení byl fakt, že každá délka vláken je více nebo méně nebezpečná pro lidský (a obecně živý) organismus a jak bude uvedeno v diskuzi výsledků, vlákna různých délek vznikají při odlišných způsobech obrábění.

Nebezpečnost uhlíkových vláken je dána zejména jejich inertním chováním v živém organismu, vlákna se nerozkládají ani nerozpouští a mohou vyvolat závažné procesy. Vlákna a jejich odštěpky (vláknenné částice) jsou dle WHO anglicky označována jako "respirable", což značí že jsou vdechovatelné. Podle délky respektive rozměru se pak mohou usazovat v dýchacím traktu, přesněji řečeno jednotlivé částice mohou vniknout až do plicních sklípků [20].

Dalším nebezpečím odštěpených vláken je usazování v zařízeních, které se vyskytují v blízkosti obráběcích strojů. Jelikož jsou vláknenné částice schopny šířit se vzduchem a jsou vysoce vodivé může docházet ke zkratování elektrických komponent. Též jsou uhlíková vlákna vysoce abrazivní materiály, které se mohou dostat do mechanických částí strojů, kde může docházet k obrušování nebo zahlcování ložisek či jiných pohyblivých mechanických částí zařízení.

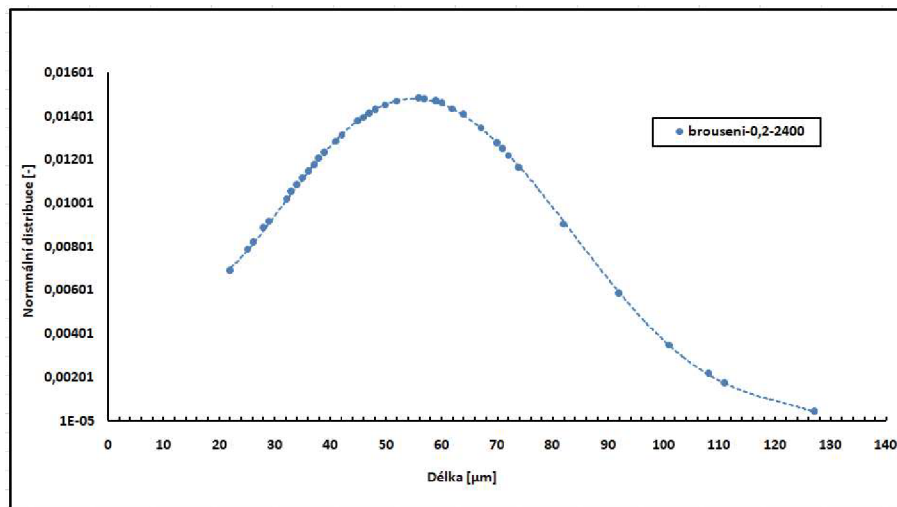
### Naměřené hodnoty délek vláken u technologie broušení



Obrázek 2.18: Náhodně vybraná a změ- Obrázek 2.19: Náhodně vybraná a změ-  
řená uhlíková vlákna větší než  $10\ \mu\text{m}$ , řená uhlíková vlákna menší  $10\ \mu\text{m}$ ,  
broušení-0,2-2400, OM. broušení-0,2-2400, SEM (BSE).

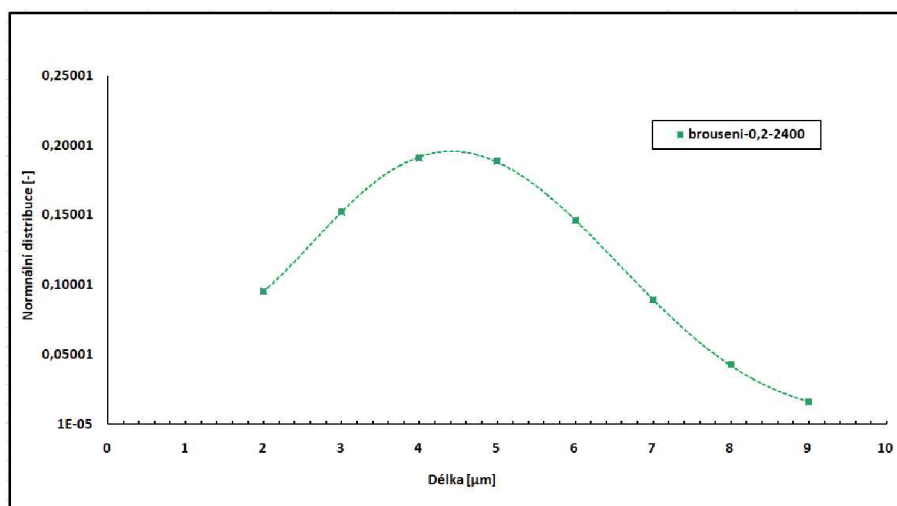
U technologie broušení při analýze měření délek vláken větších než  $10\ \mu\text{m}$  pomocí optického mikroskopu byla nalezena maximální hodnota délky vlákna  $127\ \mu\text{m}$  a minimální délka vlákna byla  $22\ \mu\text{m}$  ze všech zkoumaných oblastí. Průměrná

hodnota ze všech oblastí byla  $55,3 \mu\text{m}$  a směrodatná odchylka byla  $26,9 \mu\text{m}$ . Graf naměřených délek je znázorněn pomocí Gaussovy křivky-obr. 2.20 a vizualizace vybrané oblasti je zobrazena na obrázku 2.18.



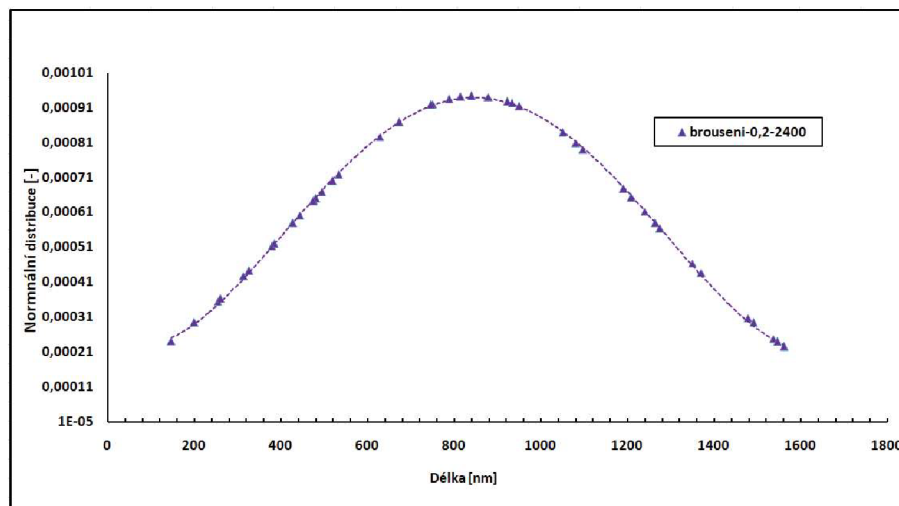
Obrázek 2.20: Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna větší než  $10 \mu\text{m}$ , broušení-0,2-2400.

Z analýzy měření délek vláken menších než  $10 \mu\text{m}$ , která byla získána pomocí SEM (BSE) byla nalezena maximální hodnota délky vláken  $9 \mu\text{m}$  a minimální délka vláken činila  $2 \mu\text{m}$ . Průměrná hodnota měření ze všech oblastí byla  $4,4 \mu\text{m}$  a směrodatná odchylka byla  $2,1 \mu\text{m}$ . Gaussova křivka délek vláken je znázorněna v grafu 2.21 a náhled na měřenou oblast je znázorněn na obrázku 2.19.

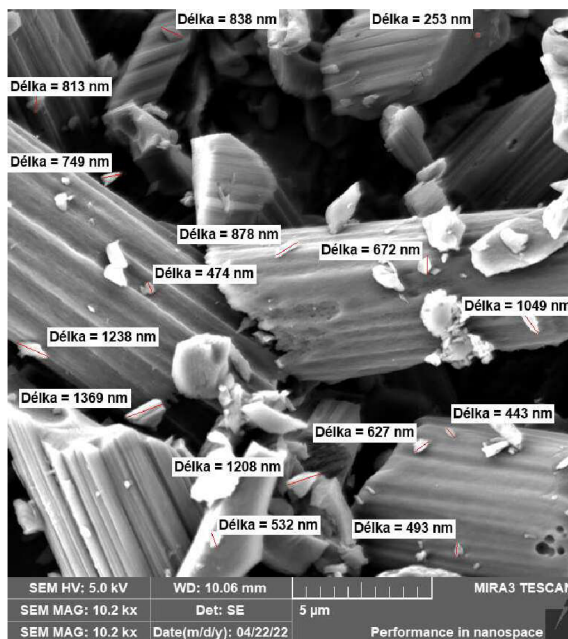


Obrázek 2.21: Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna menší než  $10 \mu\text{m}$ , broušení-0,2-2400.

Z rozboru naměřených délek vláknenných částic menších než  $5\ \mu\text{m}$ , které byly získány pomocí SEM (BSE) analýzy. Průměrná délka submikroskopických částic byla  $845\ \text{nm}$  se směrodatnou odchylkou  $423\ \text{nm}$ . Maximální nalezané délka vláknenných částic byla  $1561\ \text{nm}$  a minimální nalezená délka  $146\ \text{nm}$ . Výsledky jsou znázorněny pomocí Gaussovy křivky v grafu 2.22. Náhodně vybraná oblast z měření je viditelná na obrázku 2.23.



Obrázek 2.22: Hustota normálního rozdělení pro uhlíkové vláknenné částice menší než  $5\ \mu\text{m}$ , broušení-0,2-2400.

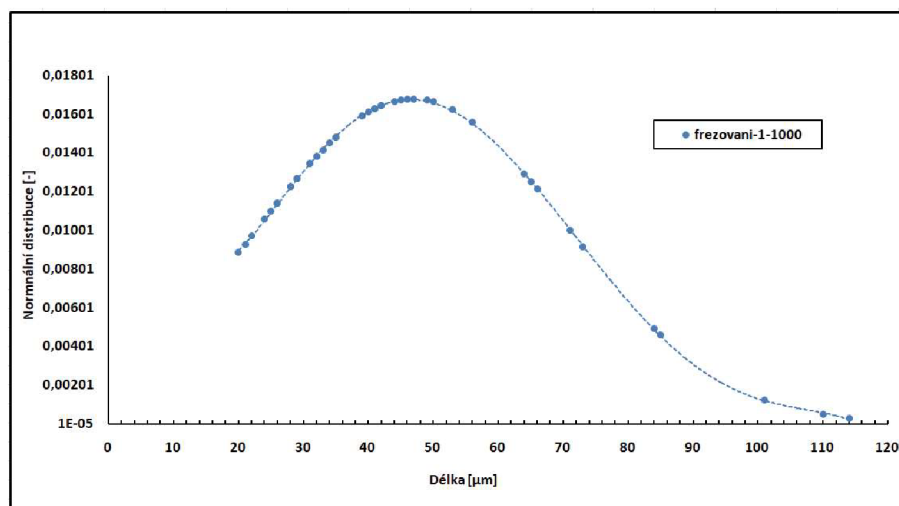


Obrázek 2.23: Zobrazení náhodně vybrané oblasti pro měření délek uhlíkových vláknenných částic menších než  $5\ \mu\text{m}$ , SEM (BSE), broušení-0,2-2400.

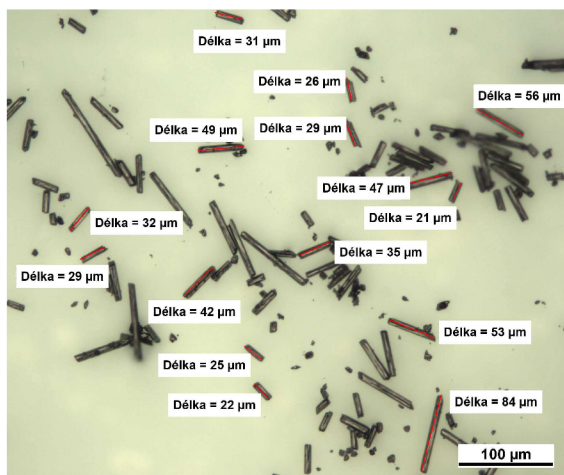


## Naměřené hodnoty délek vláken u technologie frézování

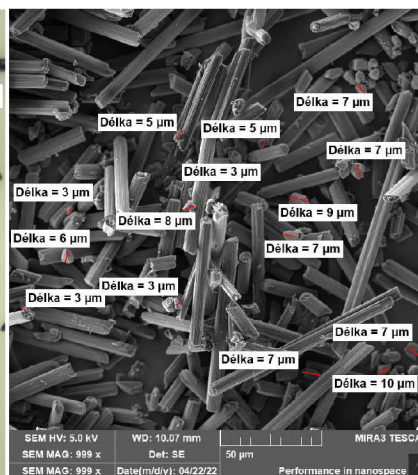
U technologie frézování pro vzorek frézování-1-1000 při analýze měření délek vláken větších než  $10\ \mu\text{m}$  pomocí optického mikroskopu byla nalezena maximální hodnota délky vlákna  $144\ \mu\text{m}$  a minimální délka vlákna byla  $20\ \mu\text{m}$  ze všech zkoumaných oblastí. Průměrná hodnota ze všech oblastí byla  $46,8\ \mu\text{m}$  a směrodatná odchylka byla  $23,8\ \mu\text{m}$ . Graf naměřených délek je znázorněn pomocí Gaussovy křivky-obr. 2.24 a vizualizace vybrané oblasti je zobrazena na obrázku 2.25.



Obrázek 2.24: Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna větší než  $10\ \mu\text{m}$ , frézování-1-1000.

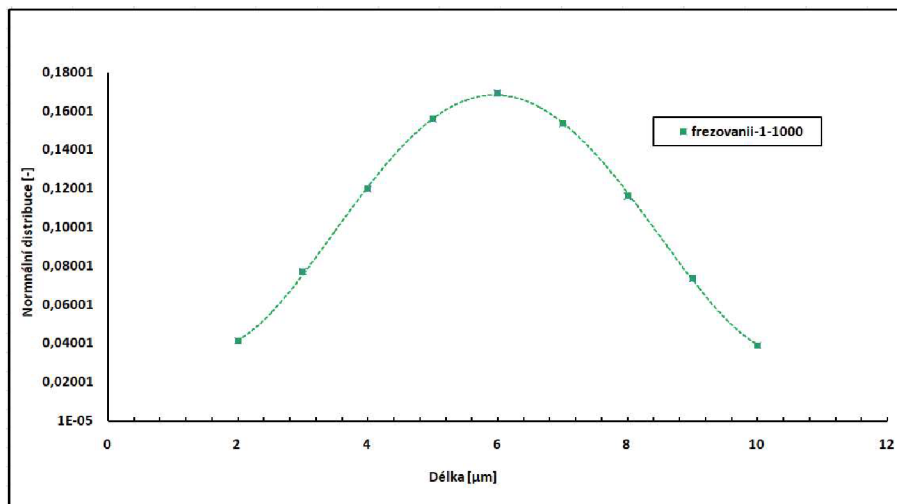


Obrázek 2.25: Náhodně vybraná a změ-  
řená uhlíková vlákna větší než  $10\ \mu\text{m}$ ,  
frézování-1-1000, OM.

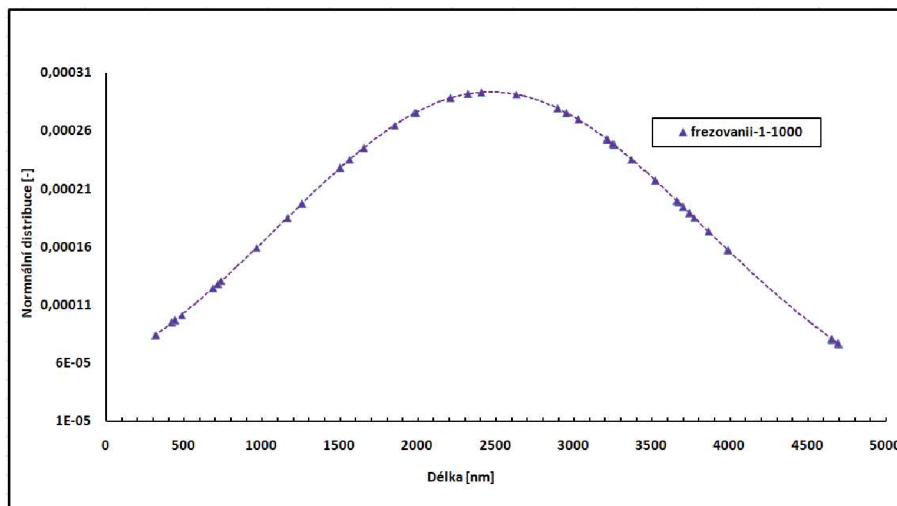


Obrázek 2.26: Náhodně vybraná a změ-  
řená uhlíková vlákna menší než  $10\ \mu\text{m}$ ,  
frézování-1-1000, SEM (BSE).

Z analýzy měření délek vláken menších než  $10\ \mu\text{m}$ , která byla získaná pomocí SEM (BSE) byla nalezena maximální hodnota délky vláken  $10\ \mu\text{m}$  a minimální délka vláken činila  $2\ \mu\text{m}$ . Průměrná hodnota měření ze všech oblastí byla  $5,9\ \mu\text{m}$  a směrodatná odchylka byla  $2,3\ \mu\text{m}$ . Gaussova křivka délek vláken je znázorněna v grafu 2.27 a náhled na měřenou oblast je znázorněn na obrázku 2.26.



Obrázek 2.27: Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna menší než  $10\ \mu\text{m}$ , frézování-1-1000.

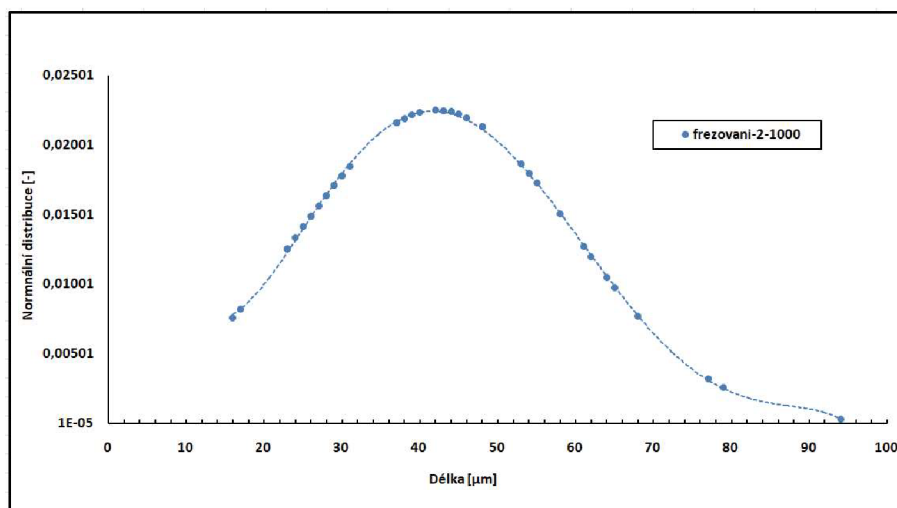


Obrázek 2.28: Hustota normálního rozdělení pro uhlíkové vlákenné částice menší než  $5\ \mu\text{m}$ , frézování-1-1000.

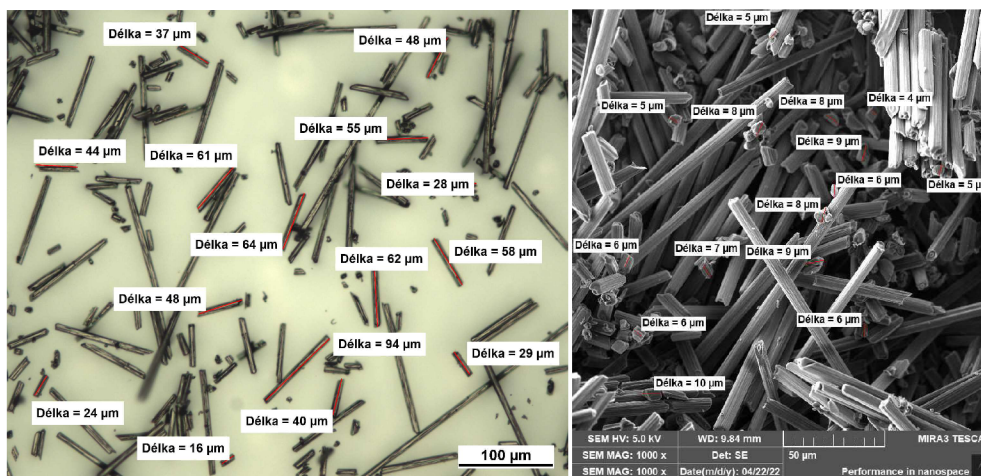
Z rozboru naměřených délek vlákenných částic menších než  $5\ \mu\text{m}$ , které byly získány pomocí SEM (BSE) analýzy. Průměrná délka submikroskopických částic byla  $2467\ \text{nm}$  se směrodatnou odchylkou  $1356\ \text{nm}$ . Maximální nalezaná délka vlá-

kenných částic byla 4698 nm a minimální nalezená délka 313 nm. Výsledky jsou znázorněny pomocí Gaussovy křivky v grafu 2.28.

U vzorku 3 (frézování-2-1000) při analýze měření délek vláken větších než 10  $\mu\text{m}$  pomocí optického mikroskopu byla nalezena maximální hodnota délky vlákna 94  $\mu\text{m}$  a minimální délka vlákna byla 16  $\mu\text{m}$  ze všech zkoumaných oblastí. Průměrná hodnota ze všech oblastí byla 42,1  $\mu\text{m}$  a směrodatná odchylka byla 17,7  $\mu\text{m}$ . Graf naměřených délek je znázorněn pomocí Gaussovy křivky-obr. 2.29 a vizualizace vybrané oblasti je zobrazena na obrázku 2.30.

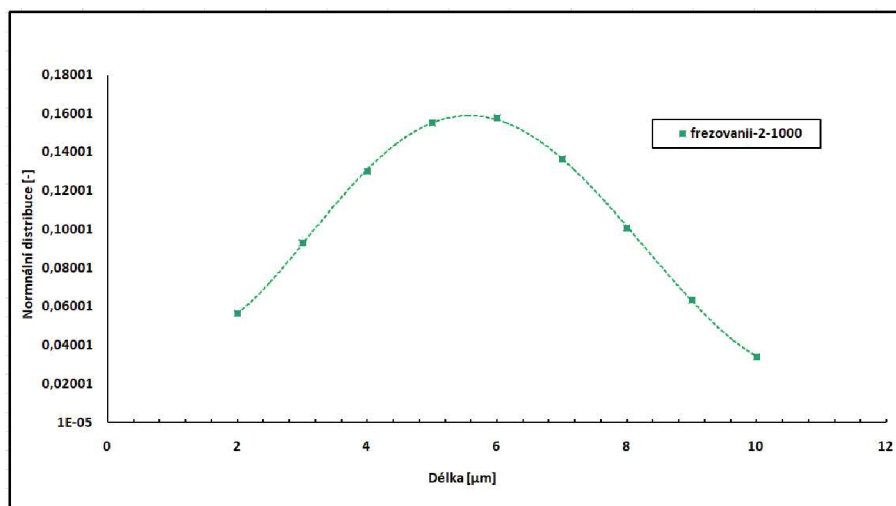


Obrázek 2.29: Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna větší než 10  $\mu\text{m}$ , frézování-2-1000.



Obrázek 2.30: Náhodně vybraná a změ- Obrázek 2.31: Náhodně vybraná a změ-  
řená uhlíková vlákna větší než 10  $\mu\text{m}$ , řená uhlíková vlákna menší než 10  $\mu\text{m}$ ,  
frézování-2-1000, OM. frézování-2-1000, SEM (BSE).

Z analýzy měření délek vláken menších než  $10\ \mu\text{m}$ , která byla získána pomocí SEM (BSE) byla nalezena maximální hodnota délky vláken  $10\ \mu\text{m}$  a minimální délka vláken činila  $2\ \mu\text{m}$ . Průměrná hodnota měření ze všech oblastí byla  $5,6\ \mu\text{m}$  a směrodatná odchylka byla  $2,5\ \mu\text{m}$ . Gaussova křivka délek vláken je znázorněna v grafu 2.32 a náhled na měřenou oblast je znázorněn na obrázku 2.31.

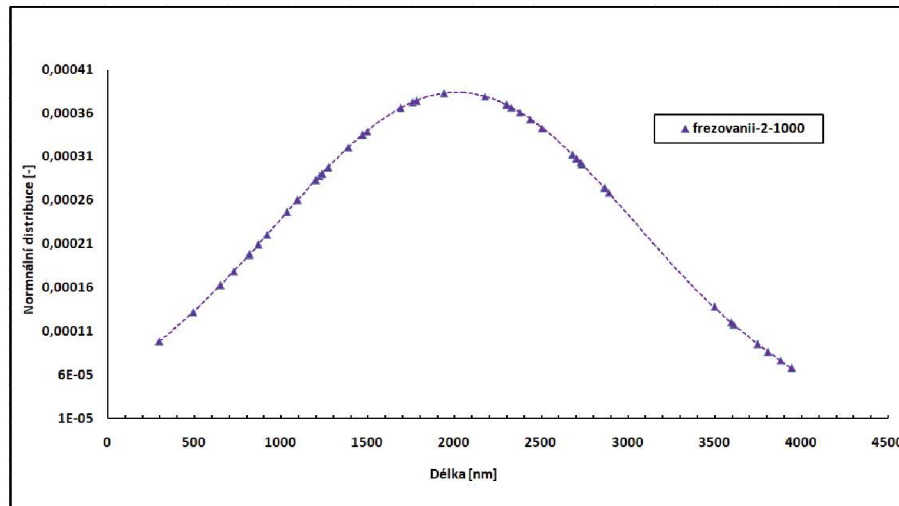


Obrázek 2.32: Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna menší než  $10\ \mu\text{m}$ , frézování-2-1000.

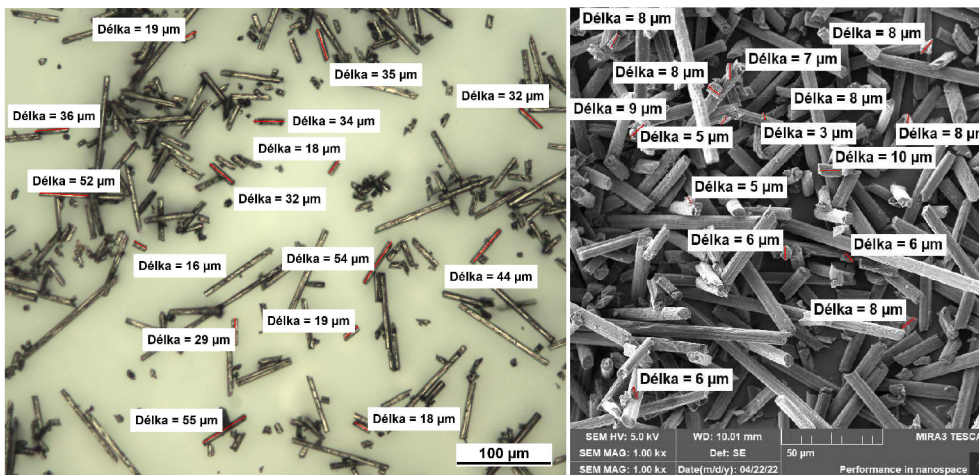
Z rozboru naměřených délek vláknenných částic menších než  $5\ \mu\text{m}$ , které byly získány pomocí SEM (BSE) analýzy. Průměrná délka submikroskopických částic byla  $2010\ \text{nm}$  se směrodatnou odchylkou  $1039\ \text{nm}$ . Maximální nalezená délka submikroskopických vláknenných částic byla  $3941\ \text{nm}$  a minimální nalezená délka  $297\ \text{nm}$ . Výsledky jsou znázorněny pomocí Gaussovy křivky v grafu 2.33.

### Naměřené hodnoty délek vláken u technologie vrtání

U vzorku 4 (vrtání-9,8-500) při analýze měření délek vláken větších než  $10\ \mu\text{m}$  pomocí optického mikroskopu byla nalezena maximální hodnota délky vlákna  $63\ \mu\text{m}$  a minimální délka vlákna byla  $16\ \mu\text{m}$  ze všech zkoumaných oblastí. Průměrná hodnota ze všech oblastí byla  $34,3\ \mu\text{m}$  a směrodatná odchylka byla  $12,7\ \mu\text{m}$ . Graf naměřených délek je znázorněn pomocí Gaussovy křivky-obr. 2.36 a vizualizace vybrané oblasti je zobrazena na obrázku 2.34.



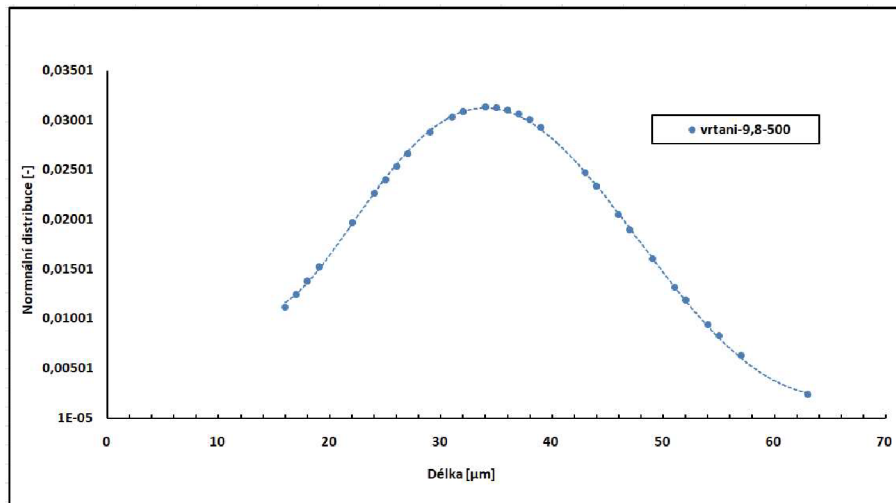
Obrázek 2.33: Hustota normálního rozdělení pro uhlíkové vlákně částice menší než  $5 \mu\text{m}$ , frézování-2-1000.



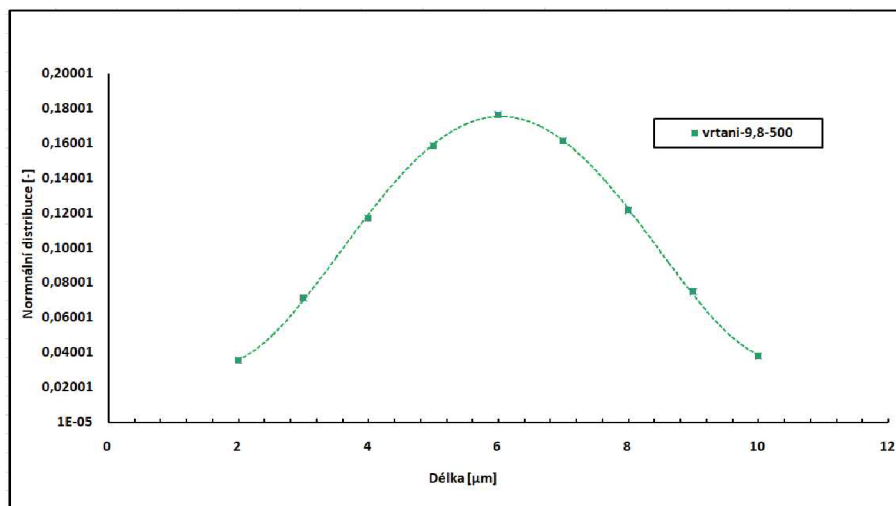
Obrázek 2.34: Náhodně vybraná a změ-  
řená uhlíková vlákna větší než  $10 \mu\text{m}$ ,  
vrtání-9,8-500, OM.

Obrázek 2.35: Náhodně vybraná a změ-  
řená uhlíková vlákna menší než  $10 \mu\text{m}$ ,  
vrtání-9,8-500, SEM (BSE).

Z analýzy měření délek vláken menších než  $10 \mu\text{m}$ , která byla získána pomocí SEM (BSE) byla nalezena maximální hodnota délky vláken  $10 \mu\text{m}$  a minimální délka vláken činila  $2 \mu\text{m}$ . Průměrná hodnota měření ze všech oblastí byla  $6 \mu\text{m}$  a směrodatná odchylka byla  $2,2 \mu\text{m}$ . Gaussova křivka délek vláken je znázorněna v grafu 2.37 a náhled na měřenou oblast je znázorněn na obrázku 2.35.

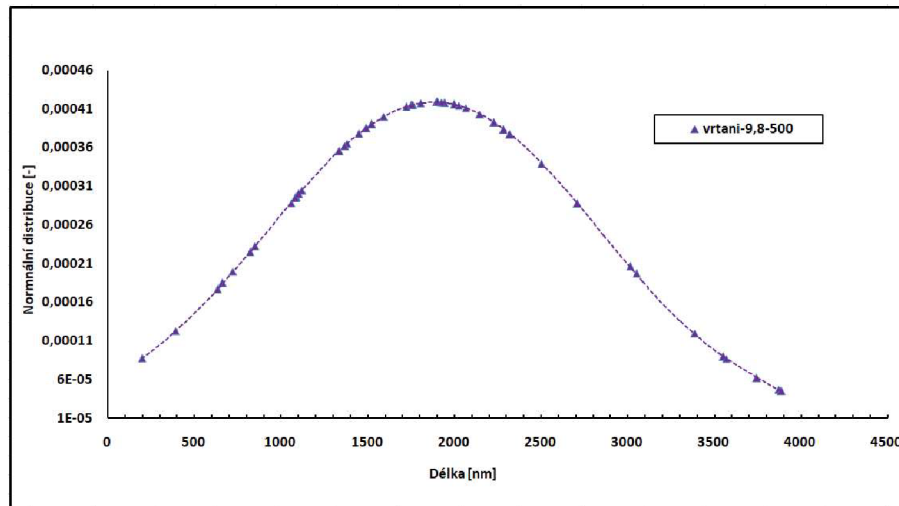


Obrázek 2.36: Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna větší než  $10 \mu\text{m}$ , vrtání-9,8-500.



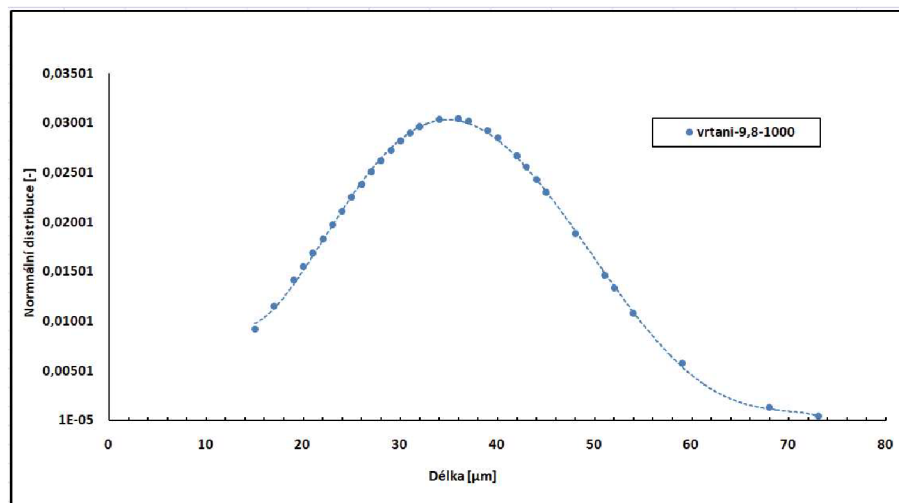
Obrázek 2.37: Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna menší než  $10 \mu\text{m}$ , vrtání-9,8-500.

Z rozboru naměřených délek vlákenných částic menších než  $5 \mu\text{m}$ , které byly získány pomocí SEM (BSE) analýzy. Průměrná délka submikroskopických částic byla  $1882 \text{ nm}$  se směrodatnou odchylkou  $953 \text{ nm}$ . Maximální nalezaná délka submikroskopických vlákenných částic byla  $3888 \text{ nm}$  a minimální nalezená délka  $196 \text{ nm}$ . Výsledky jsou znázorněny pomocí Gaussovy křivky v grafu 2.38.

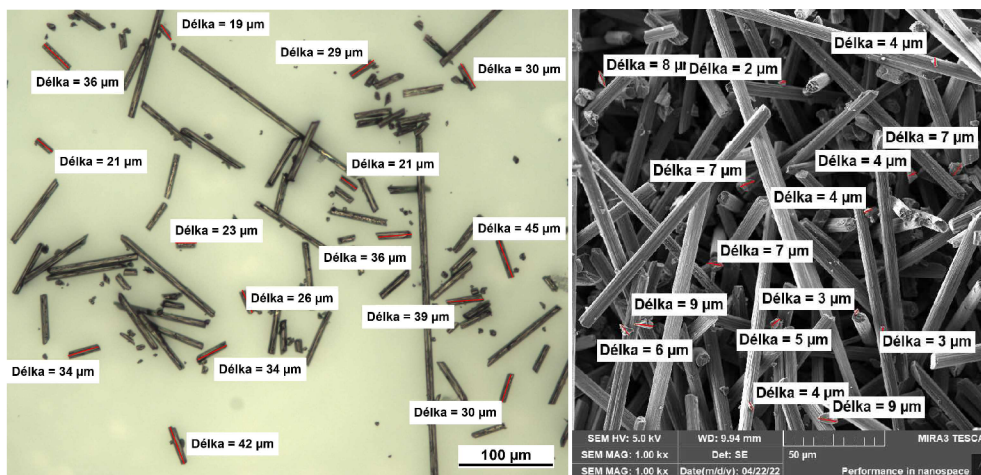


Obrázek 2.38: Hustota normálního rozdělení pro uhlíkové vlákněné částice menší než  $5 \mu\text{m}$ , vrtání-9,8-500.

U vrtání pro vzorek vrtání-9,8-1000 při analýze měření délek vláken větších než  $10 \mu\text{m}$  pomocí optického mikroskopu byla nalezena maximální hodnota délky vlákna  $73 \mu\text{m}$  a minimální délka vlákna byla  $15 \mu\text{m}$  ze všech zkoumaných oblastí. Průměrná hodnota ze všech oblastí byla  $35,2 \mu\text{m}$  a směrodatná odchylka byla  $13 \mu\text{m}$ . Graf naměřených délek je znázorněn pomocí Gaussovy křivky-obr. 2.39 a vizualizace vybrané oblasti je zobrazena na obrázku 2.40.

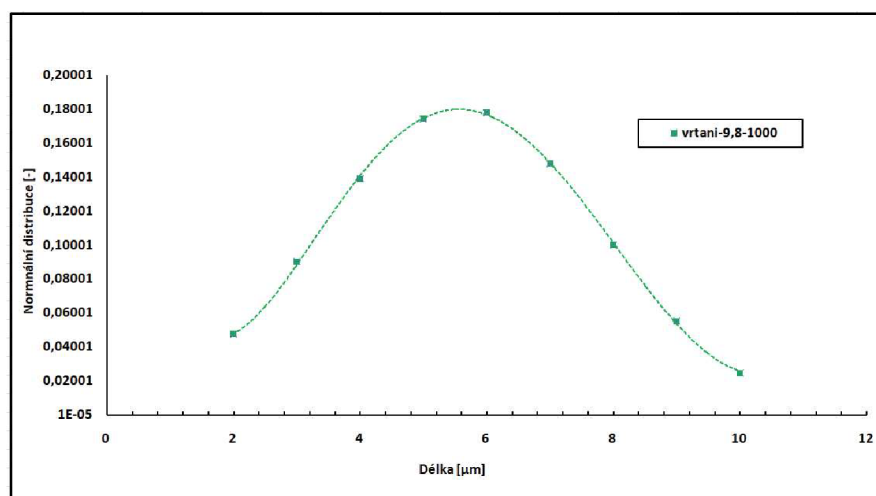


Obrázek 2.39: Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna větší než  $10 \mu\text{m}$ , vrtání-9,8-1000.



Obrázek 2.40: Náhodně vybraná a změ- Obrázek 2.41: Náhodně vybraná a změ-  
řená uhlíková vlákna větší než 10  $\mu\text{m}$ , řená uhlíková vlákna menší než 10  $\mu\text{m}$ ,  
vrtání-9,8-1000, OM. vrtání-9,8-1000, SEM (BSE).

Z analýzy měření délek vláken menších než 10  $\mu\text{m}$ , která byla získána pomocí SEM (BSE) byla nalezená maximální hodnota délky vláken 10  $\mu\text{m}$  a minimální délka vláken činila 2  $\mu\text{m}$ . Průměrná hodnota měření ze všech oblastí byla 5,6  $\mu\text{m}$  a směrodatná odchylka byla 2,2  $\mu\text{m}$ . Gaussova křivka délek vláken je znázorněna v grafu 2.42 a náhled na měřenou oblast je znázorněn na obrázku 2.41.

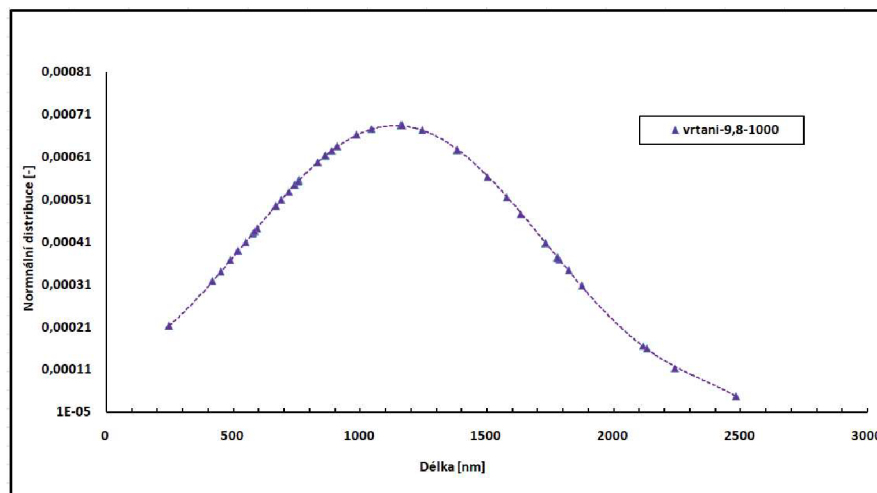


Obrázek 2.42: Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna menší než 10  $\mu\text{m}$ , vrtání-9,8-1000.

Z rozboru naměřených délek vláknenných částic menších než 5  $\mu\text{m}$ , které byly získány pomocí SEM (BSE) analýzy. Průměrná délka submikroskopických částic byla 1138 nm se směrodatnou odchylkou 582 nm. Maximální nalezané délka submi-

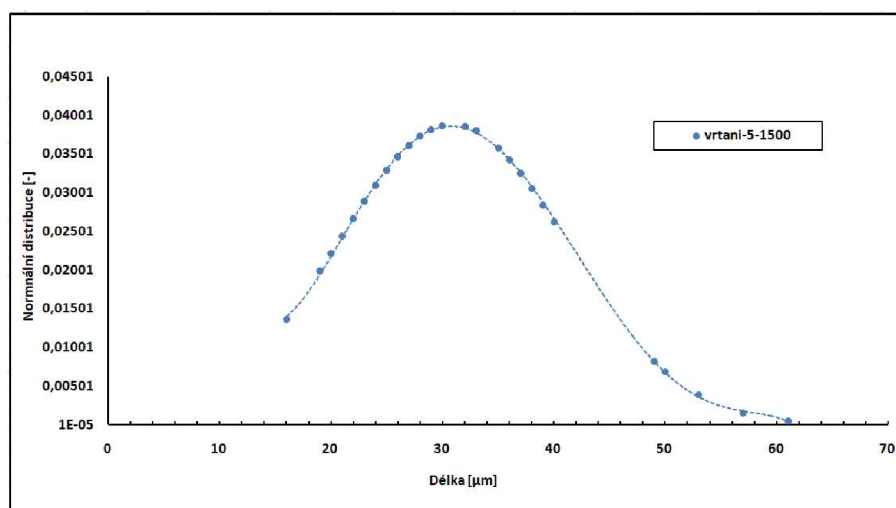


kroskopických vlákných částic byla 2484 nm a minimální nalezená délka 248 nm. Výsledky jsou znázorněny pomocí Gaussovy křivky v grafu 2.43.

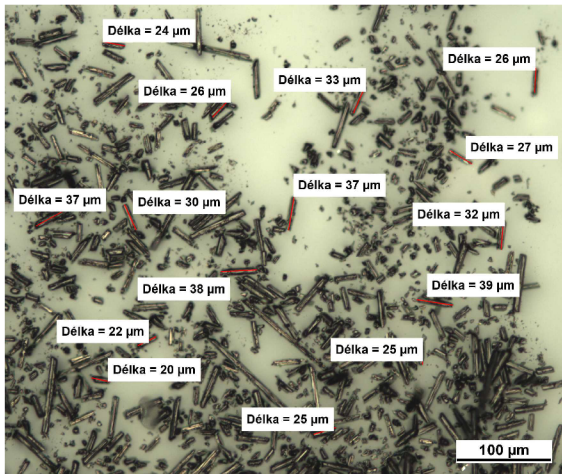


Obrázek 2.43: Hustota normálního rozdělení pro uhlíkové vlákněné částice menší než 5  $\mu\text{m}$ , vrtání-9,8-1000.

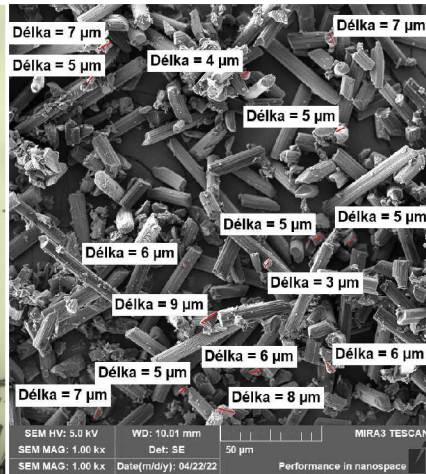
U vzorku 1 (vrtání-5-1500) při analýze měření délek vláken větších než 10  $\mu\text{m}$  pomocí optického mikroskopu byla nalezena maximální hodnota délky vlákna 61  $\mu\text{m}$  a minimální délka vlákna byla 16  $\mu\text{m}$  ze všech zkoumaných oblastí. Průměrná hodnota ze všech oblastí byla 30,1  $\mu\text{m}$  a směrodatná odchylka byla 10,3  $\mu\text{m}$ . Graf naměřených délek je znázorněn pomocí Gaussovy křivky-obr. 2.44 a vizualizace vybrané oblasti je zobrazena na obrázku 2.45.



Obrázek 2.44: Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna větší než 10  $\mu\text{m}$ , vrtání-5-1500.

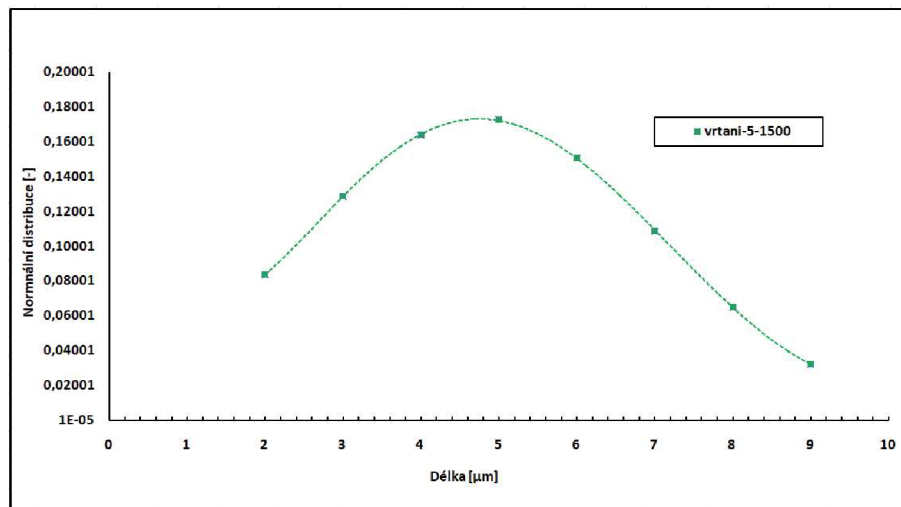


Obrázek 2.45: Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna větší než 10 μm, vrtání-5-1500, OM.



Obrázek 2.46: Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna menší než 10 μm, vrtání-5-1500, SEM (BSE).

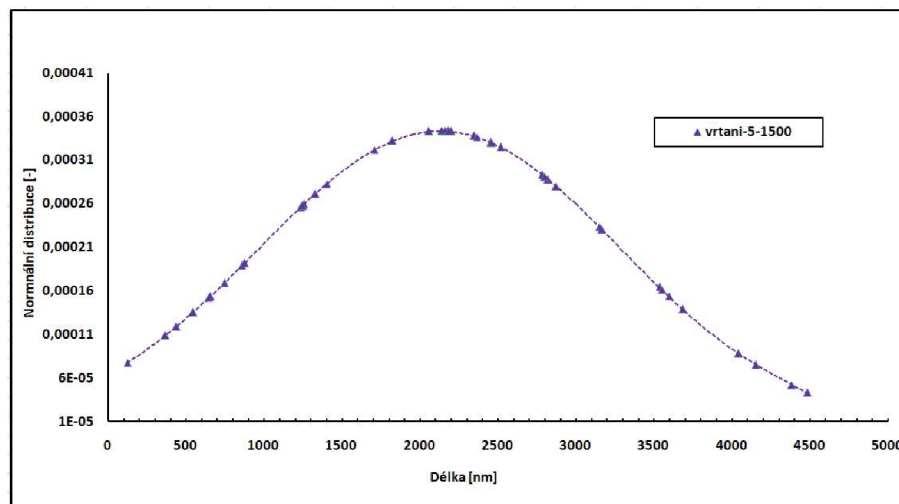
Z analýzy měření délek vláken menších než 10 μm, která byla získána pomocí SEM (BSE) byla nalezena maximální hodnota délky vláken 9 μm a minimální délka vláken činila 2 μm. Průměrná hodnota měření ze všech oblastí byla 4,8 μm a směrodatná odchylka byla 2,3 μm. Gaussova křivka délek vláken je znázorněna v grafu 2.47 a náhled na měřenou oblast je znázorněn na obrázku 2.46.



Obrázek 2.47: Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna menší než 10 μm, vrtání-5-1500.

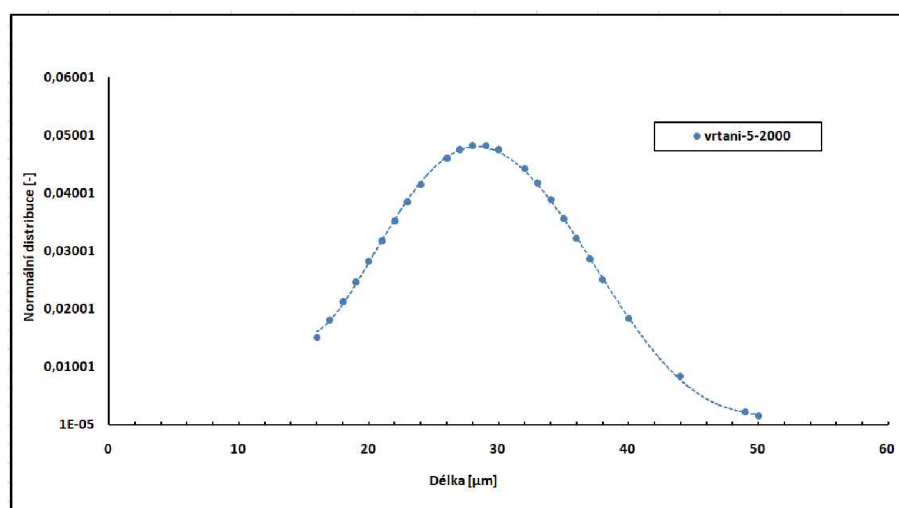
Z rozboru naměřených délek vláknenných částic menších než 5 μm, které byly získány pomocí SEM (BSE) analýzy. Průměrná délka submikroskopických částic byla 1138 nm se směrodatnou odchylkou 582 nm. Maximální nalezaná délka submi-

kroskopických vlákných částic byla 2484 nm a minimální nalezená délka 248 nm. Výsledky jsou znázorněny pomocí Gaussovy křivky v grafu 2.48.

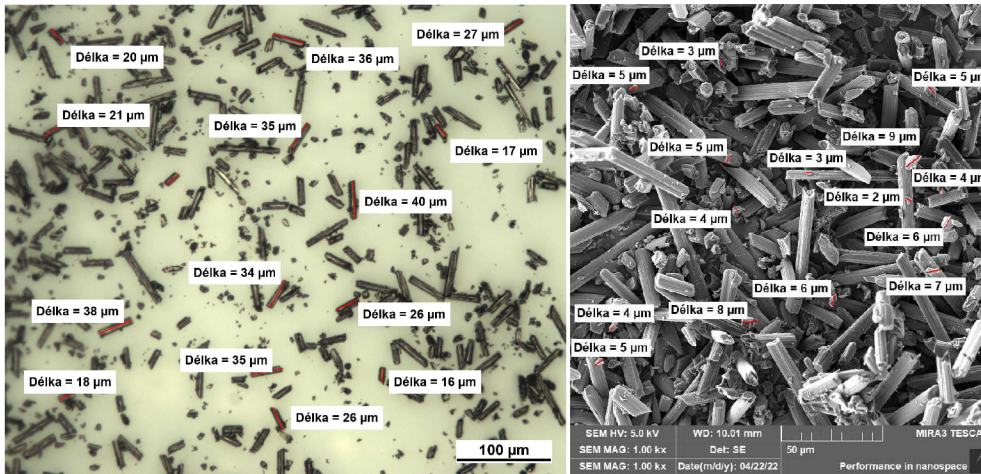


Obrázek 2.48: Hustota normálního rozdělení pro uhlíkové vlákněné částice menší než 5  $\mu\text{m}$ , vrtání-5-1500.

U vrtání pro vzorek vrtání-5-2000 při analýze měření délek vláken větších než 10  $\mu\text{m}$  pomocí optického mikroskopu byla nalezena maximální hodnota délky vlákna 50  $\mu\text{m}$  a minimální délka vlákna byla 16  $\mu\text{m}$  ze všech zkoumaných oblastí. Průměrná hodnota ze všech oblastí byla 28,6  $\mu\text{m}$  a směrodatná odchylka byla 8,3  $\mu\text{m}$ . Graf naměřených délek je znázorněn pomocí Gaussovy křivky-obr. 2.49 a vizualizace vybrané oblasti je zobrazena na obrázku 2.50.

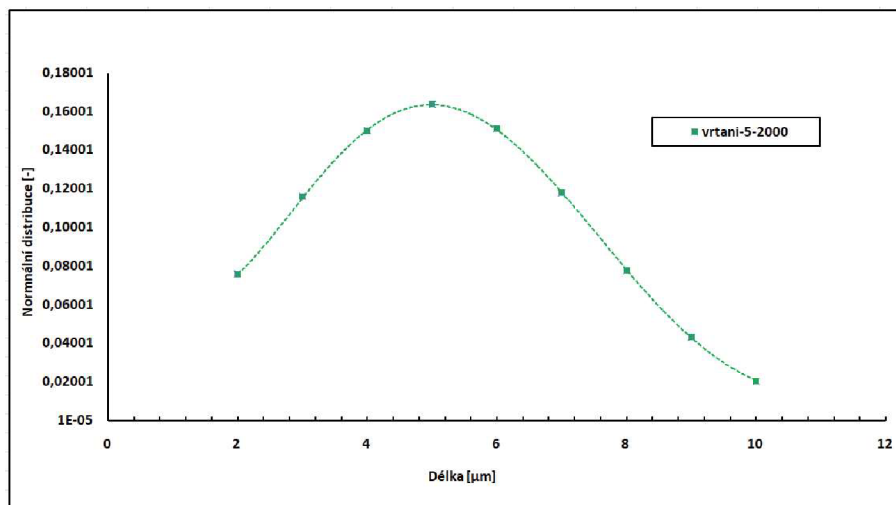


Obrázek 2.49: Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna větší než 10  $\mu\text{m}$ , vrtání-5-2000.



Obrázek 2.50: Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna větší než  $10 \mu\text{m}$ , řetání-5-2000, OM.  
 Obrázek 2.51: Náhodně vybraná a změřená uhlíková vlákna menší než  $10 \mu\text{m}$ , řetání-5-1500, SEM (BSE).

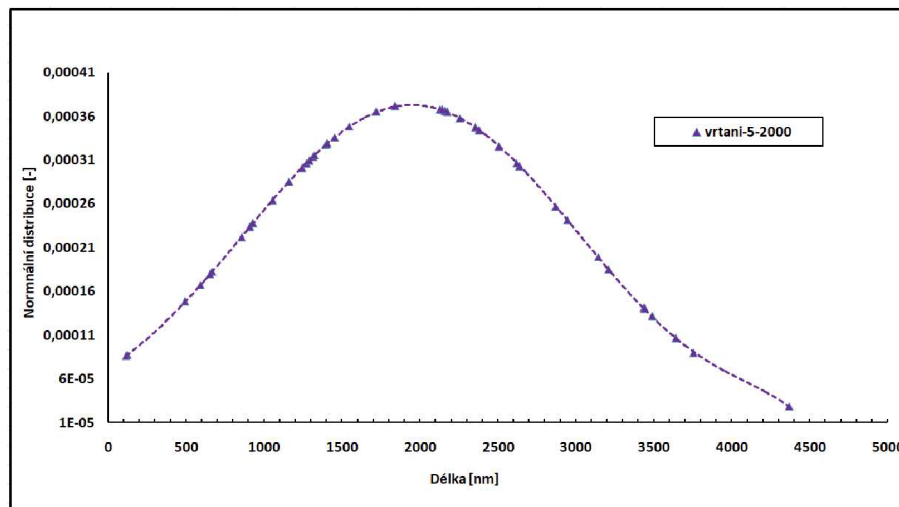
Z analýzy měření délek vláken menších než  $10 \mu\text{m}$ , která byla získána pomocí SEM (BSE) byla nalezena maximální hodnota délky vláken  $10 \mu\text{m}$  a minimální délka vláken činila  $2 \mu\text{m}$ . Průměrná hodnota měření ze všech oblastí byla  $5 \mu\text{m}$  a směrodatná odchylka byla  $2,4 \mu\text{m}$ . Gaussova křivka délek vláken je znázorněna v grafu 2.52 a náhled na měřenou oblast je znázorněn na obrázku 2.51.



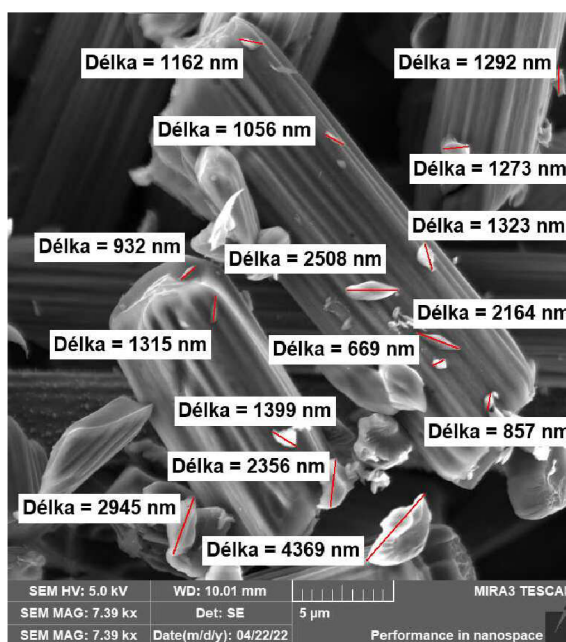
Obrázek 2.52: Hustota normálního rozdělení pro uhlíková vlákna větší než  $10 \mu\text{m}$ , řetání-5-2000

Z rozboru naměřených délek vláknenných částic menších než  $5 \mu\text{m}$ , které byly získány pomocí SEM (BSE) analýzy. Průměrná délka submikroskopických částic byla  $1947 \text{ nm}$  se směrodatnou odchylkou  $1068 \text{ nm}$ . Maximální nalezená délka submikroskopických vláknenných částic byla  $4369 \text{ nm}$  a minimální nalezená délka  $117 \text{ nm}$ .

Výsledky jsou znázorněny pomocí Gaussovy křivky v grafu 2.53. Náhodně vybraná oblast z měření je viditelná na obrázku 2.54.



Obrázek 2.53: Hustota normálního rozdělení pro uhlíkové vlákněné částice menší než  $5 \mu\text{m}$ , vrtání-5-2000.



Obrázek 2.54: Zobrazení náhodně vybrané oblasti pro měření délek uhlíkových vlákněných částic menších než  $5 \mu\text{m}$ , SEM (BSE), vrtání-5-2000.

### 3 Diskuse

Na základě provedených analýz bylo zjištěno, že při třískovém obrábění kompozitních materiálů na bázi epoxidové pryskyřice s vyztužujícími uhlíkovými vlákny, dochází k tvorbě třísek, které jsou tvořeny více či méně velkými částicemi nadrcené epoxidové pryskyřice (polymeru) a vlákny, která se roztrhla v průběhu vybraných obráběcích procesů na menší vlákenné částice.

Při procesech obrábění došlo k destrukci vláken, která se podle dané technologie roztrhla na různě dlouhé délky. Analýza délek destruovaných vláken byla navržena tak, aby reflektovala obecně uznávaná zdravotní hlediska, respektivě vliv přítomnosti vláken v pracovním prostředí na možnost zdravotní závadnosti těchto vlákenných částic, pokud se dostanou do živého organismu. Vlákna, která jsou větší než 10 mikrometrů se do dýchacího ústrojí dostanou s minimální pravděpodobností, jsou zachycována nosní sliznicí. Oddělená vlákna v rozmezí délek 5 až 10 mikrometrů se do živého organismu mohou dostat do oblasti horních cest dýchacích. Vlákna nebo spíše vlákenné částice, menší než 5 mikrometry se mohou dostat do dolních cest dýchacích. Analýzy délek vláken byly realizovány s využitím optické, elektronové mikroskopie a obrazové analýzy, které byly využity k určení délek a struktur vláken či vlákenných částic. Na základě výše uvedených podkladů bylo celkem analyzováno 315 oddělených vláken či vlákenných částic z daných obráběcích technologií, které byly rozděleny do třech oblastí, z nichž byly zjištěny následující výstupy.

Tabulka 3.1: Vyhodnocené průměrné délky analyzovaných vláken a vlákněných částic ze všech měření (oblast 3 je měřena v jednotkách nm).

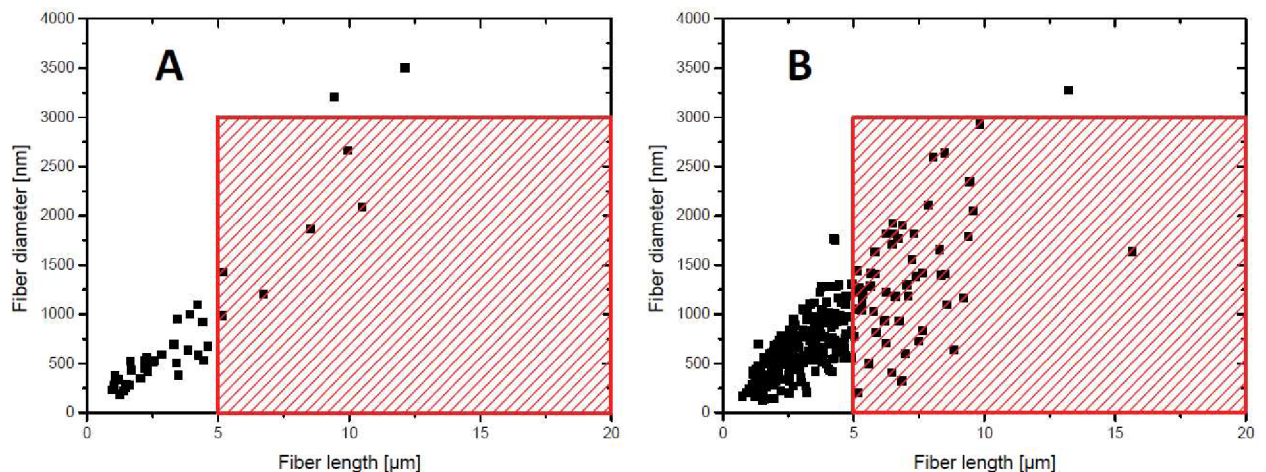
Označení vzorku	Průměrná délka vláken $> 10 \mu\text{m}$ (oblast 1)	Průměrná délka vláken $\leq 10 \mu\text{m}$ (oblast 2)	Průměrná délka vlákněných částic $\leq 5 \mu\text{m}$ (oblast 3)
broušení-0,2-2400	$55,3 \pm 26,9$	$4,4 \pm 2$	$845 \pm 423$
frézování-1-1000	$46,8 \pm 23,7$	$5,9 \pm 2,4$	$2467 \pm 1359$
frézování-2-1000	$42,1 \pm 17,7$	$5,6 \pm 2,5$	$2010 \pm 1059$
vrtání-9,8-500	$34,3 \pm 26,9$	$6,1 \pm 2$	$1882 \pm 952$
vrtání-9,8-1000	$35,2 \pm 12,7$	$5,6 \pm 2,2$	$1138 \pm 581$
vrtání-5-1500	$31,6 \pm 10$	$4,8 \pm 2,3$	$2151 \pm 1160$
vrtání-5-2000	$28,6 \pm 8,3$	$5,1 \pm 2,4$	$1947 \pm 1068$

Tabulka 3.2: Vyhodnocené maximální a minimální délky analyzovaných vláken a vlákněných částic ze všech měření.

Označení vzorku	Maximální naměřená délka vlákna [ $\mu\text{m}$ ]	Minimální naměřená délka vlákněné částice [nm]
broušení-0,2-2400	127	145
frézování-1-1000	114	313
frézování-2-1000	94	297
vrtání-9,8-500	63	196
vrtání-9,8-1000	73	248
vrtání-5-1500	61	123
vrtání-5-2000	50	117

Z uvedených výsledků vyplývá, že technologie broušení (broušení-0,2-2400) produkovala v oblasti 1 největší průměrnou délku vláken ze všech třískových obrábění. To může být zapříčiněno vytáhováním vláken z matrice brusným kotoučem při daných řezných podmínkách. Avšak v oblasti 2 a 3 byla nalezena nejmenší vypočítaná průměrná délka oddělených vláken a vlákněných částic ze všech obrábění. To bylo nejspíše způsobeno jemnou strukturou zrnitosti použitého brusného kouteče, a následným prolamováním vlákněných struktur během procesu obrábění. Všechny vypočítané průměrné hodnoty délek pro technologii broušení jsou vyobrazeny v tabulce 3.1 a naměřené maximální a minimální hodnoty délek vláken či vlákněných částic, které jsou zobrazeny v tabulce 3.2.

U technologie frézování pro vzorky frézování-1-1000 a frézování-2-1000 docházelo v oblasti 1 k oddělování větších vláken než u technologie vrtání. Též tomu tak bylo i v ostatních zkoumaných oblastech. Tato skutečnost mohla být způsobena rychlím odvodem oddělených vláken od matrice, kde dál nedocházelo k namílání či roztrhávání vláken nástrojem (fréza). Avšak experiment ukázal, že zvětšením hloubky záběru dochází k oddělování menších vláken či vlákněných částic. Všechny vypočítané průměrné hodnoty délek pro technologii frézování jsou vyobrazeny v tabulce 3.1 a naměřené maximální a minimální hodnoty délek vláken, které jsou zobrazeny v tabulce 3.2. Obdobné měření bylo provedeno ve vědecké studii [20], ale s tím rozdílem, že jejich studie se spíše zabývala rozptýlenými vlákněnými částicemi (WHO-fibers) ve vzduchu v uzavřeném systému při frézování (abrazivní experiment). Tato studie byla převážně zaměřena na pitchCFRP, ale též tato studie zahrnovala i panCFRP. Výsledná distribuce oddělených vláken či vlákněných částic je zobrazena v grafu 3.1.



Obrázek 3.1: Distribuce oddělených uhlíkových vláken a vlákněných částic (WHO-fibers) pro (A) panCFRP, (B) pitchCFRP, které byly nalezeny po abrazivním experimentu (frézování) [20]

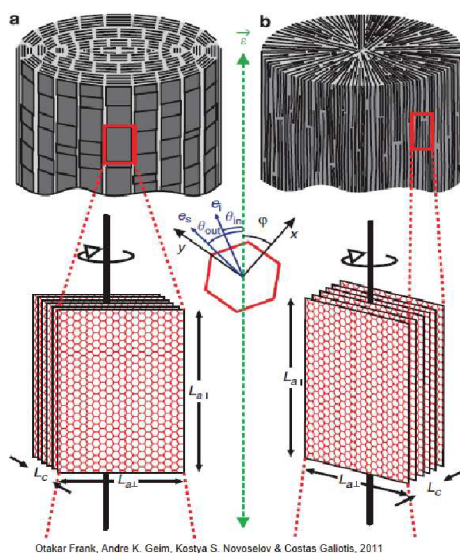
Technologie vrtání u všech zkoumaných vzorků produkovala v oblasti 1 nejmenší vlákna ze všech vybraných technologií. Nejmenší naměřená průměrná hodnota v oblasti 1 byla zjištěna u vzorku vrtání-5-2000. Obdobně tomu tak bylo i v oblasti 2, pokud vyloučíme technologii broušení. Tato skutečnost může být zapříčiněna pomalému odvodu oddělených vláken od obráběcího nástroje. Vlivem vrtání může docházet k mletí a drcení vláken a vlákněných částic na špičce vrtáku. Oproti jiným technologiím se místo volně oddělených vláken v prostoru tvořili shluky těchto vláken



či vláknenných částic kolem vrtáku, které po rozdrčení v ruce tvořili jemný vláknenný prach částic.

U naměřených výsledků zkoumaných délek vláken či vláknenných částic docházelo k vyšší vypočítané směrodatné odchylce. Tento fakt byl způsoben nedostatkem potřebného analytického a softwarového vybavení, které by bylo schopné naměřené hodnoty délek vypočítat s malou směrodatnou odchylkou. Vyřešit tento problém by mohl speciálně navržený program s detekovacím zařízením, které by bylo schopné detekovat aspoň 90 procent všech vláken či vláknenných částic z vložené navážky vzorku, a poté správně analyzovat délky vláken či vláknenných částic.

Jak bylo zmíněno výše, největším problémem je oddělování vláknenných částic z destruovaných vláken, které mohou způsobit zdravotní potíže nebo možnou závadu v elektrických či mechanických zařízeních. Tento problém by se dal řešit změnou orientace grafenových vrstev vůči ose vlákna. U klasických uhlíkových vláken z PAN prekurzoru je běžné, že grafenové vrstvy jsou uspořádány relativně rovnoběžně s osou vlákna. Pokud bychom vymysleli technologii či jiný technologický postup, který by změnil orientaci grafenových vrstev, která by byla kolmá na osu vlákna (radiální vrstvení) nebo obdobně naorientovaná, mohla by se u většiny destruovaných vláken snížit četnost oddělováných vláknenných částic, též by to mohlo ovlivnit jiné užité vlastnosti uhlíkových vláken. Schématické zobrazení natočených grafenových vrstev je znázorněno na obrázku 3.2.



Otakar Frank, Andre K. Geim, Kostya S. Novoselov & Costas Galiotis, 2011

Obrázek 3.2: Schématické znázornění naorientovaných grafenových vrstev (a) grafenové vrstvy rovnoběžně s osou vlákna, (b) grafenové vrstvy kolmo na osu vlákna [2]

## 4 Závěr

Má diplomová práce se zabývá destrukcemi vlákenných struktur u CFRP při třískovém obrábění. Cílem diplomové práce bylo připravit vhodné kompozitní vzorky, zrealizovat vybrané procesy obrábění a zhodnotit destrukci uhlíkových vláken s využitím optické a elektronové mikroskopie. Na základě provedených analýz bylo zjištěto, že:

Při třískovém obrábění dochází k destrukci uhlíkových vláken na vlákenné částice různých tvarů a velikostí.

Důsledkem třískového obrábění dochází u všech zkoumaných vláken ke granulárnímu či smykovému lomu a méně pak ke křehkému či smíšenému lomu.

Zkoumaná oddělená uhlíková vlákna se lámala v rozmezí úhlů  $0^\circ$  až  $80^\circ$  od osy vlákna u všech zkoumaných technologií.

Nejkratší naměřená vlákenná částice s hodnotou 117 nm byla nalezena u technologie vrtání u vzorku vrtání-5-2000.

Nejdelší naměřené oddělené vlákno s hodnotou 127  $\mu\text{m}$  bylo nalezeno u technologie broušení u vzorku broušení-0,2-2400.

Obecně technologie vrtání produkovala nejmenší uhlíkové vlákenné částice.

Cílem této práce bylo též upozornit na fakt, že z třískového obrábění kompozitních materiálů s uhlíkovou výztuží dochází k destrukci uhlíkových vláken na menší vlákenné částice, které mohou způsobit zdravotní potíže člověku či obecně živému organismu. Rovněž se mohou uhlíkové vlákenné částice dostat do zařízení, které se vyskytuje v blízkosti obráběcího stroje, a svojí elektrickou vodivostí a abrazivním chováním mohou způsobit zkrat v elektrickém zařízení nebo může docházet k obušování pohyblivých mechanických částí přístrojů.

## Literatura

- [1] Vacuum Bagging Techniques. *Vacuum Bagging Techniques: WESTS YSTEM® Epoxy*, ročník 2010, č. 7th Edition, 2010: str. 53, DOI:Catalognumber002-150.
- [2] Development of a universal stress sensor for graphene and carbon fibres. *Nature communications*, ročník 2011, č. 1., 2011: str. 7, DOI:<https://doi.org/10.1038/ncomms1247>.
- [3] Meltem Altin Karataş and Hasan Gökkaya. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. *Defence Technology*, ročník 14, č. 4, 2018: s. 318--326, ISSN 2214-9147, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.02.001>, composite Materials in Defence Technology.  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914717302040>
- [4] Azmi, Azwan Iskandar and Lin, Richard J T and Bhattacharyya, Debes. Experimental study of machinability of GFRP composites by end milling. *Materials and Manufacturing Processes*, ročník 27, č. 10, 2012: s. 1045--1050.
- [5] Michael J. Behr and Brian G. Landes and Bryan E. Barton and Mark T. Bernius and Gerry F. Billovits and Eric J. Hukkanen and Jasson T. Patton and Weijun Wang and Charlie Wood and Denis T. Keane and James E. Rix and Steven J. Weigand. Structure-property model for polyethylene-derived carbon fiber. *Carbon*, ročník 107, 2016: s. 525--535, ISSN 0008-6223, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.06.032>.  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622316304833>
- [6] Caggiano, Alessandra. Machining of Fibre Reinforced Plastic Composite Materials. *Materials*, ročník 11, č. 3, 2018, ISSN 1996-1944, DOI:10.3390/ma11030442.  
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/3/442>
- [7] Caggiano, Alessandra and Improta, Ilaria and Nele, Luigi. Characterization of a New Dry Drill-Milling Process of Carbon Fibre Reinforced Polymer Laminates. *Materials*, ročník 11, č. 8, 2018, ISSN 1996-1944, DOI:10.3390/ma11081470.

Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/8/1470>

- [8] Cherrett, Nia and Barrett, John and Clemett, Alexandra and Chadwick, Matthew and Chadwick, M.J. Ecological footprint and water analysis of cotton, hemp and polyester. *Stockholm Environmental Institute*, 2005.
- [9] Lawrence T. Drzal and Michael J. Rich and Pamela F. Lloyd. Adhesion of Graphite Fibers to Epoxy Matrices: I. The Role of Fiber Surface Treatment. *The Journal of Adhesion*, ročník 16, č. 1, 1983: s. 1--30, DOI:10.1080/00218468308074901, <https://doi.org/10.1080/00218468308074901>.  
Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00218468308074901>
- [10] Gottfried W. Ehrenstein. *Polymerní kompozitní materiály*, V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [11] V.N. Gaitonde and S.R. Karnik and J. Campos Rubio and A. Esteves Correia and A.M. Abrão and J. Paulo Davim. Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites. *Journal of Materials Processing Technology*, ročník 203, č. 1, 2008: s. 431--438, ISSN 0924-0136, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.050>.  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607009776>
- [12] Geim, Andre K and Novoselov, Konstantin S. The rise of graphene. In: *Nanoscience and technology: a collection of reviews from nature journals*, World Scientific, 2010, s. 11--19.
- [13] Emile S. Greenhalgh. *Failure analysis and fractography of polymer composites*, 1. Oxford: Woodhead, 2009. ISBN 9781845692179.
- [14] Gregr, Jan. Uhlíková vlákna. *Sborník Muzea Českého ráje v Turnově - Acta musei Turnoviensis*, 01 2005: str. 107--119.
- [15] N.S. Hu and L.C. Zhang. Some observations in grinding unidirectional carbon fibre-reinforced plastics. *Journal of Materials Processing Technology*, ročník 152, č. 3, 2004: s. 333--338, ISSN 0924-0136, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.374>.  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604007514>
- [16] Jiří Janovec and Jiří Cejp and Josef Steidl. *Perspektivní materiály*, Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.

- [17] Josef Jančář. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*, Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [18] Kadlec, Martin. Fraktografie vláknových kompozitů na bázi epoxid/uhlík pro letecké aplikace. 01 2012.
- [19] Kadlec, Martin. *DISERTAČNÍ PRÁCE - Mechanismy porušování polymerního kompozitu vyztuženého uhlíkovou tkaninou pro letecké konstrukce / DISSERTATION THESIS - Failure Mechanisms of a Carbon Fabric Reinforced Polymer Composite for Aerospace Structures*. Dizertační práce, 01 2014, DOI: 10.13140/RG.2.2.33924.94084.
- [20] Dominic Kehren and Barbara Simonow and Daphne Bäger and Nico Dziurawitz and Daniela Wenzlaff and Carmen Thim and Judith Neuhoff and Asmus Meyer-Plath and Sabine Plitzko. Release of Respirable Fibrous Dust from Carbon Fibers Due to Splitting along the Fiber Axis. *Aerosol and Air Quality Research*, ročník 19, č. 10, 2019: s. 2185--2195, DOI:10.4209/aaqr.2019.03.0149. Dostupné z: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.03.0149>
- [21] Artur Knap. Problematika vrtání do kompozitních materiálů. Česká republika, Liberec, 2021.
- [22] Tomáš Knápek. Stanovení vhodných řezných podmínek pro frézování kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny z hlediska řezného nástroje a obráběného materiálu. Česká republika, Liberec, 2021.
- [23] Vladislav Laš. *Mechanika kompozitních materiálů*, 2., přeprac. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN sbn9788070436899.
- [24] Jan Lehner. *Skleněná, horninová a strusková vlákna*, 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [25] Petr Mašek. Frézování kompozitních materiálů s termoplastickou matricí. Praha, 2019.
- [26] Jiří Militký. *Textilní vlákna*, Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2002. ISBN 80-7083-644-X.
- [27] Plueddemann, Edwin P. *Interfaces in Polymer Matrix Composites: Composite Materials, Vol. 6*, ročník 6. Elsevier, 2016.
- [28] Jan Sedláček. *Efektivní obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů*. [V Brně: Vysoké učení technické], 2010. ISBN 978-80-214-4142-2.

- [29] Sweat, Rebekah and Park, Jin Gyu and Liang, Richard. A Digital Twin Approach to a Quantitative Microstructure-Property Study of Carbon Fibers through HRTEM Characterization and Multiscale FEA. *Materials*, ročník 13, č. 19, 2020, ISSN 1996-1944, DOI:10.3390/ma13194231.  
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/19/4231>
- [30] Xiao-Su Yi and Shanyi Du and Litong Zhang. *Composite materials engineering*. Beijing: Chemical Industry Press, [2018]. ISBN 978-981-10-5695-6.
- [31] Jaroslav Řasa and Vladimír Gabriel. *Strojírenská technologie 3*, 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-337-1.
- [32] Josef Švrčina. *Podstata frézování*. Opava, 2011/2012.