



# Destrukce vláknenných struktur při obrábění kompozitních materiálů se skelnou výztuží

## Diplomová práce

*Studijní program:*

*Autor práce:*

*Vedoucí práce:*

N0722A270001 Technologie plastů a kompozitů

**Bc. Vojtěch Svoboda**

doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.

Katedra materiálu





Zadání diplomové práce

## Destrukce vláknenných struktur při obrábění kompozitních materiálů se skelnou výztuží

*Jméno a příjmení:* **Bc. Vojtěch Svoboda**

*Osobní číslo:* S20000251

*Studijní program:* N0722A270001 Technologie plastů a kompozitů

*Zadávající katedra:* Katedra materiálu

*Akademický rok:* **2021/2022**

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou kompozitních materiálů se skelnými vlákny a možnostmi jejich obrábění.
2. Proveďte rešerši k dané problematice, zejména k problematice destrukce vláknenných struktur a uvolňování skelných vláken z materiálu při obrábění.
3. Navrhněte metodiku experimentů – příprava kompozitních vzorků, technologie a podmínky obrábění, řezné 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. Antonsson, A.-B., Runmark, S. (1987). *Airborne Fibrous Glass and Dust Originating From Worked Reinforced Plastics. American Industrial Hygiene Association Journal*, 48(8), 684–687. doi:10.1080/15298668791385417

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. Vojtěch Svoboda

## Anotace

Tato diplomová práce se zabývá destrukcí vlákenných struktur při obrábění epoxidové pryskyřice vyztužené skelnými vlákny. Hlavním cílem bylo analyzování částic vzniklých při technologii vrtání, frézování a broušení.

Základní pojmy spojené s kompozitními systémy a jejich obrábění jsou popsány v teoretické části. Experimentální část popisuje výrobu kompozitního vzorku technologií vakuového lisování a jeho následné obrábění. Zkoumání částic vzniklých z obrábění bylo analyzováno pomocí optické a elektronové mikroskopie.

**Klíčová slova:** kompozitní materiál, skelná vlákna, epoxidová pryskyřice, obrábění, částice

## Annotation

This thesis deals with destruction of fiber structures during machining of epoxy resins reinforced with glass fibers. Main goal was to analyze particles created during drilling, milling and grinding technologies.

Basic concepts related to composite systems and their machining are described in theoretical part. Experimental part describes production of composite sample using vacuum pressing and his subsequent machining. Research of particles created during machining was analyzed using optical and electron microscopy.

**Keywords:** composite material, glass fibers, epoxy resin, machining, particles

## Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucí mé diplomové práce doc. Ing. Doře Kroisové, Ph.D., za velkou ochotu, poskytnutí cenných rad a připomínek, vstřícnost, trpělivost a odborné vedení. Také bych rád poděkoval mé rodině za podporu po celou dobu studia.

# Obsah

Seznam použitých zkratk	9
1 Úvod	10
2 TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1 Historie kompozitních materiálů	11
2.2 Charakteristika polymerních kompozitů	11
2.2.1 Synergický efekt	11
2.3 Rozdělení polymerních kompozitních materiálů	12
2.3.1 Podle výztuže	12
2.3.2 Podle matrice	13
2.4 Mezifázové rozhraní	16
2.4.1 Řízená a neřízená mezifáze	17
2.4.2 Smáčivost	18
2.5 Vláknenná výztuž	20
2.5.1 Uhlíková vlákna	21
2.5.2 Aramidová vlákna	22
2.5.3 Skelná vlákna	22
2.5.4 Typy vláknenných výztuží	25
2.6 Teorie vrstvení	28
2.7 Technologie výroby vláknových kompozitů	29
2.7.1 Ruční kladení	29
2.7.2 Vakuové lisování	30
2.7.3 Vakuové prosycování	31
2.7.4 Technologie prepreg	31
2.8 Obecné obrábění	32
2.8.1 Frézování	32
2.8.2 Vrtání	33
2.8.3 Broušení	33
2.9 Obrábění kompozitních materiálů	33
2.9.1 Ortogonální obrábění kompozitních materiálů	34
2.9.2 Vrtání kompozitních materiálů	35
2.9.3 Frézování kompozitních materiálů	36
2.9.4 Broušení kompozitních materiálů	37
2.9.5 Delaminace	38

2.9.6	Teplo vzniklé při obrábění kompozitů .....	39
2.9.7	Chlazení při obrábění kompozitů .....	40
2.9.8	Porovnání obrábění kovů a kompozitních materiálů .....	40
2.9.9	Vliv obrábění na tvorbu třísek .....	41
2.9.10	Vliv na zdraví člověka .....	41
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	43
3.1	Metodika experimentu.....	43
3.2	Příprava kompozitních vzorků .....	43
3.3	Obrábění kompozitních vzorků .....	49
3.4	Odběr vzorku .....	52
4	Vyhodnocení.....	55
4.1	Analyzování vzorků s délkou částic $\geq 10 \mu\text{m}$ .....	56
4.2	Analyzování vzorků s délkou částic 2 - 10 $\mu\text{m}$ .....	63
4.3	Analyzování vzorků s délkou částic 2 $\mu\text{m}$ a menších .....	70
5	Diskuse.....	77
6	Závěr .....	80
	Seznam použité literatury .....	81



## Seznam použitých zkratk

$\gamma_{sg}$	mezipovrchové napětí na rozhraní plyn - pevná látka	[mN.m <sup>-1</sup> ]
$\gamma_{lg}$	mezipovrchové napětí na rozhraní kapalina - plyn	[mN.m <sup>-1</sup> ]
$\gamma_{sg}$	mezipovrchové napětí na rozhraní kapalina - pevná látka	[mN.m <sup>-1</sup> ]
$\emptyset$	kontaktní úhel	[°]
$\sigma_{vP}$	pevnost vlákna	[Pa]
$\sigma_{mP}$	pevnost matrice	[Pa]
$E_v$	modul pružnosti vlákna	[Pa]
$E_m$	modul pružnosti matrice	[Pa]
$\varepsilon_{mP}$	tažnost matrice	[%]
$\varepsilon_{vP}$	tažnost vlákna	[%]
CF	Carbon fiber (uhlíkové vlákno)	
GF	Glass fiber (skelné vlákno)	
SEM	Skenovací elektronový mikroskop	

# 1 Úvod

Kompozitní materiály s vláknennou výztuží jsou ve světě používány již řadu desítek let a jejich obliba významně roste. Je to způsobeno především díky charakteristickým vlastnostem jako je synergický efekt a značně nízká hmotnost vůči vysoké pevnosti výrobku. Kompozitní systémy využívající výztuž se skelnými vlákny mají velmi příznivou cenu v poměru jejich mechanických vlastností, proto jsou v průmyslu jednou z nejvíce využívanou vláknennou výztuží.

Průmyslové firmy vyrábějící kompozitní materiály se skelnou výztuží a obráběcí firmy zabývající se obráběním sklolaminátů se praxí setkávají s vysokou prašností při obrábění těchto materiálů, než tomu bývá například u obrábění kovů.

V praxi jsou pro tyto materiály nejčastěji využívány obráběcí technologie vrtání, broušení a frézování. Proto tyto technologie obrábění byly použity i pro experiment v této diplomové práci. Obrábění vláknenných kompozitů je velmi specifickou disciplínou, která je doprovázena vznikem velkého množství větších či menších úlomků vláken a matrice. To má v praxi neblahý vliv nejen na samotné strojní ústrojí, ale největší dopad připadá na zdraví člověka. Přítomnost unášených částic po obrábění může dosahovat velmi vysokých hodnot okem neviditelných částic, které však mohou prostoupit do lidského těla.

Problematika vzniku destrukce vláknenných struktur na bázi skelných vláken při různých technologiích obrábění a potenciální vliv na zdraví člověka je v dnešní době aktuálnější než kdy dříve, proto došlo ke vzniku této diplomové práci, která se tímto zabývá.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Historie kompozitních materiálů

Historie kompozitních materiálů vyrobených člověkem je velmi dlouhá. Již před několika tisíci lety byly kompozity používány pro tehdejší potřeby. Vypalovaná jílová cihla byla nahrazována kompozitní cihlou. Výztuha cihel byla vždy z určitého rostlinného vlákna a jako pojivo sloužil jíl. Takto vyrobená cihla měla lepší mechanické vlastnosti, menší křehkost a byla lehčí. [1]

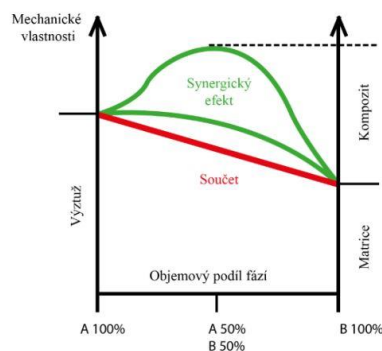
V novodobé historii přišel největší nárůst zájmu o kompozity začátkem druhé poloviny dvacátého století, kdy si lidé začali uvědomovat výhody těchto materiálů. V dnešním světě existují tisíce variant kompozitních systémů. [2]

### 2.2 Charakteristika polymerních kompozitů

Kompozitní materiály se skládají zpravidla nejméně ze dvou složek. Po mechanické stránce je nejdůležitější složkou výztuž. Výztuž je pevnější, tužší a tvrdší nespojitý materiál, který může být například částicový nebo vlákenný. Samotná výztuž však nedokáže udržet požadovaný tvar ani rozměr. K udržení výztuže slouží tzv. matrice, která zajistí požadovaný tvar, rozměry a přeneše napětí na výztuž. Polymerní kompozity využívají polymerní matrice, termoplastické nebo reaktoplastové. Obecně se dá říci, že vyztužené kompozitní materiály jsou na rozdíl od kovů anizotropní, tedy v různých směrech mají různé vlastnosti. [3]

#### 2.2.1 Synergický efekt

Kompozitní materiály zpravidla využívají tzv. synergického efektu. Tento efekt (jev) je pro kompozity charakteristický a matematicky by se dal zapsat rovnicí  $1+1=3$ . Znamená to, že získané vlastnosti kompozitu jsou lepší než poměrné sečtení vlastností jednotlivých složek kompozitu (viz. Obr.1)



**Obr. 2.1** Synergický efekt [4]

## 2.3 Rozdělení polymerních kompozitních materiálů

Kompozity lze rozdělit podle mnoha různých hledisek. Nejčastěji je však rozdělujeme podle povahy matrice a charakteru a uspořádání výztuže.

### 2.3.1 Podle výztuže

#### 2.3.1.1 Částicové kompozity

Druhů částic používaných v částicových kompozitech je velmi mnoho. Často se objevují tzv. whiskery. Jedná se o monokrystalické částice s velkým povrchem. Dále se používají částice s vločkovitým a destičkovitým tvarem, částice s trubičkovitým tvarem (zpravidla uhlíkové), sférické částice a částice s nepravidelnými tvary. Kvůli danému tvaru částic není možné je navzájem orientovat, proto částicové kompozity vykazují izotropní charakter a výsledné vlastnosti určuje z větší míry matrice. Velmi častými materiály pro výrobu částicových kompozitů jsou například uhlík ve formě sazí, oxid křemičitý, oxid titaničitý, oxid hlinitý a částice na bázi keramiky [5]

#### 2.3.1.2 Vlákenné kompozity

Obecně se vláknové kompozity dělí na kompozity s krátkými a dlouhými vlákny. Rozdělení délky vláken závisí na poměru délky ku průměru vlákna. Je-li tento poměr větší než 100, jedná se o dlouhá vlákna. V opačném případě jde o vlákna krátká. Délka vláken určuje konečnou izotropii nebo anizotropii kompozitu. Delší vlákna dosahují ve většině případů anizotropního charakteru, kratší dávají obvykle charakter izotropní. [5]

#### 2.3.1.3 Lamináty

Lamináty jsou v praxi velmi často používané hlavně s reaktoplastickou maticí. Jedná se o kompozit, který se skládá z několika tenkých vrstev vláken. Tato vlákna jsou většinou ve formě tkaniny. Každá jednotlivá vrstva má většinou odlišnou orientaci lokálních os od lokálních os předešlé vrstvy. Tím se dosáhne ideálního rozložení napětí v kompozitu. Často se objevují ve formě rovingů, rohoží, biaxiálních vláken apod. Oblíbenými materiály pro výrobu lamin jsou uhlíková a skelná vlákna.

## 2.3.2 Podle matrice

Matrice je obecně pojívem mezi jednotlivými vyztužujícími prvky – vlákny, částice. Jeden z hlavních úkolů matrice je udržet definovaný tvar výrobku, potažmo vláken. Matrice zároveň chrání výtuhu před nepříznivými vlivy okolí, chrání proti abrazi apod. Samotná matrice má oproti výtuzi obecně nižší mechanické vlastnosti, avšak má za úkol právě přenos namáhání na vlákno a přenos zatížení z vlákna na vlákno. [6]

Matrice běžně používané v průmyslu se dají rozdělit na termoplastické a reaktoplastické matrice. Termoplastické jsou levnější, mají vyšší houževnatost a mají možnost opětovného tepelného zpracování. Po zahřátí se matrice dostává do plastického stavu, naopak po ochlazení tuhne. Běžně používanými plněnými termoplasty jsou například polyethylen (PE), polypropylen (PP), polyamid (PA), polykarbonát (PVC) a mnoho dalších. Termoplastické matrice však není vhodná na aplikace se stálým zatížením, kdy se projevuje tzv. creep, což je tečení materiálu za studena. Proto se tyto materiály používají většinou výrazně pod teplotou skelného přechodu daného materiálu.

Reaktoplastické matrice jsou oproti termoplastům dražší. U tohoto typu matrice dochází k takzvanému zesítní, které je mnohdy podpořeno teplotním dotvrzením. Probíhá zde tzv. exotermická reakce, což je chemická reakce, při níž se uvolňuje energie obvykle ve formě tepla a vznikají chemické vazby. Takto zesítná struktura má jen zanedbatelný creep a velkou tepelnou a chemickou odolnost. Zároveň má nižší houževnatost, která se však dá částečně zlepšit přidáním modifikujících přísad. [6, 7]

Mezi nejdůležitější zástupce této skupiny matric patří nenasycené polyesterové pryskyřice, vinylesterové pryskyřice, fenolické pryskyřice a také epoxidové pryskyřice, které jsou velmi často využívány a byly taktéž využity pro výrobu vzorků pro tuto diplomovou práci.

### 2.3.2.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice

Jde o roztok lineárních nenasycených polyesterů ve vhodném rozpouštědle, kde jejich molekula obsahuje reaktivní dvojnou vazbu  $C=C$ . Nejčastěji se jako rozpouštědlo využívá styren, který snižuje viskozitu, a tím zajišťuje lepší smáčivost vláken. Obsah rozpouštědla by neměl překročit více jak 50 %, poté dochází ke křehnutí.

Vytvrzování začíná radikálovou kopolymerací nenasyceného polyesteru a reaktivního rozpouštědla, obvykle styrenu. Jako iniciátorem reakce je zde volný radikál, který vzniká při použití organického peroxidu.

V praxi je tato pryskyřice nejpoužívanější, a to z důvodů velmi zajímavého poměru ceny a vlastností. Její mechanické a chemické vlastnosti sice nedosahují hodnot například epoxidových pryskyřic, avšak cena je několikanásobně menší. Nejčastěji se tato pryskyřice používá v kombinaci se

skelnými vlákny, čímž dosáhneme velmi zajímavých vlastností s příznivou cenou výrobku. Objemové smrštění zde dosahuje 5 až 9 %. Nevýhodou této pryskyřice je velmi silný zápach a podezření na karcinogenitu.[2, 8]

#### 2.3.2.2 Vinylesterové pryskyřice

Základní komponentou pro výrobu vinylesterových pryskyřic je dian (jinak také bisfenol A) epichlorhydrin a kyselina akrylová. Zpracování je podobné s polyesterovými pryskyřicemi, obsahují dvojně vazby a jsou rovněž rozpouštěny ve styrenu, což má vliv na zatížení životního prostředí. Vytvrzování je prováděno radikálovou polymerací C=C vazeb, obvykle používaným iniciátorem je dibenzoylperoxid. V praxi se využívá nejčastěji se skelnou a uhlíkovou výztuží. V porovnání s nenasycenými polyesterovými pryskyřicemi jsou houževnatější a dražší. [9]

#### 2.3.2.3 Fenolické pryskyřice

Tyto pryskyřice vznikají reakcí fenolu a formaldehydu. Jedná se o reaktivní pryskyřice, které mají velice dobré chemické vlastnosti a jsou tepelně odolné. Teplota zpracování se pohybuje ve vysokých teplotách, konkrétně 150 až 210°C. Její podíl na celkové výrobě v praxi je ze všech zmíněných pryskyřic nejmenší. Výrobky obsahující fenolické pryskyřice jsou nejčastěji brzdové destičky, brusné kotouče a zahrnuje také velkou část výroby překližek a jako základ lepidel pro laminaci dřeva a papírových panelů. [2]

#### 2.3.2.4 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice jsou sloučeniny obsahující ve své molekule obvykle dvě epoxidové (oxiranové) skupiny. K vytvrzování se používají nejčastěji anhydridy, aminy nebo fenoly. V molekule těchto reaktivních tvrdidel se nachází aktivní vodíkové atomy, které se snaží vytvořit tzv. trojčlenný kruh, tedy vytvořit epoxidovou skupinu. Takto vytvořený epoxidový trojúhelník má velmi energeticky bohatou molekulu, čímž se epoxidová pryskyřice stává silně reaktivní.

Běžně používané epoxidy jsou vytvrditelné za pokojové teploty, kdy jejich mechanické a mnohdy i tepelné vlastnosti lze zlepšit následným dotvrzením při určité teplotě a určitém čase. Některé se však při pokojové teplotě nevytvrdí a je potřeba je po dosažení gel-timu (dosáhnutí gelového stavu) umístit do autoklávu.

Jednou z hlavních výhod epoxidových pryskyřic je jejich velmi malé objemové smrštění (přibližně 2 %), čímž dochází jen k zanedbatelnému vnitřnímu pnutí u velkých dílů vyrobených z kompozitních

materiálů. Další výhodou těchto pryskyřic je výborná odolnost proti kyselinám a některým druhům rozpouštědel, alkáliím a vodě, dobré mechanické vlastnosti a elektrické vlastnosti, které jsou v porovnání s ostatními pryskyřicemi podstatně lepší. Lepší vlastnosti epoxidů jsou však vykoupeny vyšší cenou, například oproti polyesterovým pryskyřicím to může být až pětinasobek ceny. Nevýhodou může být i fakt, že je potřeba klást důraz na přesné dávkování tvrdidla, aby byla pryskyřice s tvrdidlem vždy v předepsaném poměru, kdy tento poměr může být jak hmotnostní (více využívaný), tak i objemový. Tyto pryskyřice se často využívají jako zalévací hmoty pro elektroniku, na výrobu forem, na různé povlaky, barvy a k výrobě vyztužených kompozitů, kde je z celkové produkce těchto pryskyřic využita přibližně jedna desetina. Velká část produkce směřuje také na výrobu lepidel (velmi dobrá přilnavost k většině materiálům) a lepení brusných kotoučů. Četně se vyskytují také v dopravním průmyslu, především v leteckém. [3]

**Tab. 2.1** Porovnání vlastností pryskyřic [10]

Matrice	Pevnost v tahu [Mpa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Hustota [g/m <sup>3</sup> ]
Epoxidová pryskyřice	35 - 100	3,0 - 6,0	1,1 - 1,4
Vinylesterová pryskyřice	50 - 60	4,4	1,3
Polyesterová pryskyřice	40 - 90	2,0 - 4,5	1,2 - 1,5

#### 2.3.2.4.1 Vytvrzování epoxidových pryskyřic

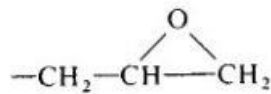
Pro převedení epoxidové pryskyřice do pevného stavu je nutné dosáhnout tzv. zesítní, kdy dojde k vytvrzení pryskyřice, a tedy i změně stavu. Epoxidy je možné vytvrdit třemi základními způsoby. Jedná se o polymeraci, polykondenzaci a polyadici.

Polyadice je nejčastější způsob vytvrzování epoxidů, kdy vytvrzování probíhá na epoxidových skupinách. Polyadici lze jednoduše popsat jako proces, při němž dochází k navázání atomu vodíku tvrdidla na atom kyslíku epoxidové skupiny. Paralelně s tímto procesem vzniká hydroxylová skupina, která přináší dobrou přilnavost například ke skelným vláknům. [2, 11]

#### 2.3.2.4.2 Druhy epoxidových pryskyřic

Epoxidové pryskyřice se dělí na dva základní druhy:

- Pryskyřice obsahující glycidylové skupiny – vznikají reakcí epichlorhydrinu například s bisfenolem A. Jedná se o běžné druhy epoxidových pryskyřic. [12]



**Obr. 2.2** Glycidyletherová skupina [12]

- Pryskyřice glycidylaminové – jde například o diaminodifenylmethan (TGDDM). Takováto matrice patří mezi špičkové epoxidy, které mají využití u náročných aplikacích v odvětvích jako je letectví a kosmonautika [2]

## 2.4 Mezifázové rozhraní

U klasických reaktoplastických kompozitních systémů (např. skelné vlákno s epoxidovou pryskyřicí) se nejedná pouze o jednoduchý systém složený ze dvou fází, ale je zde nutné započítat i tzv. mezifázové rozhraní.

Dobré mezifázové rozhraní je pro výrobu kompozitních dílů naprosto nezbytné. Jedná se o vzájemné spojení mezi jednotlivými vlákny a matricí. Jde o tenkou hraniční vrstvu, která dělí dva dané materiály. Hlavním úkolem mezifázového rozhraní je přenos napětí z matrice na výztuž a ochrana před poškozením (např. abrazivnímu) nositelů napětí, tedy obvykle vláken. Dobrá mezifáze má zásadní vliv na mechanické vlastnosti celého kompozitu. Jestliže je adheze mezi fázemi ideální, téměř veškeré napětí by měla přenášet vlákna. Vlastnosti mezifázového rozhraní může ovlivnit například i velikost průměru vláken, kdy mezifázové rozhraní roste, pokud klesá velikost jednotlivých vláken. To je zřejmé i ze vztahu (1):

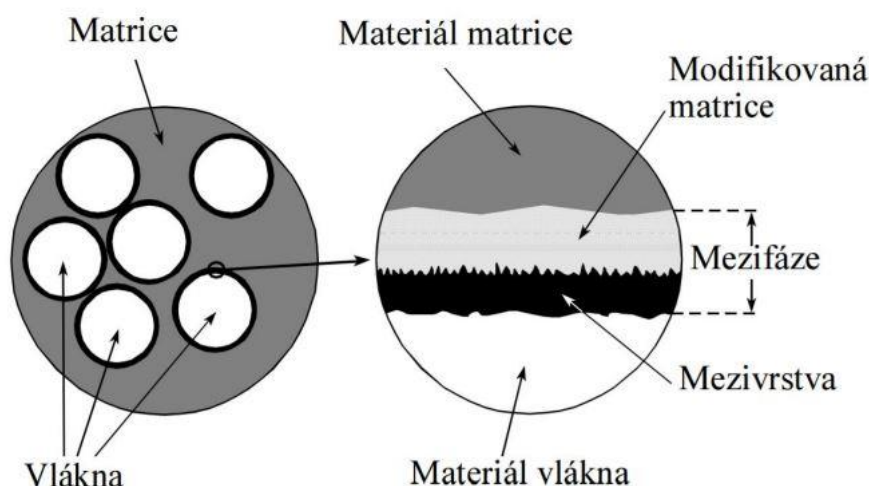
$$\frac{S}{V} = \frac{2\pi r l}{\pi r^2 l} = \frac{2}{r} \quad (1)$$

Kde  $S$  je plocha rozhraní, která je rovna ploše povrchu vláken,  $V$  je objem vláken,  $r$  je poloměr vlákna a  $l$  je délka vlákna.



## 2.4.1 Řízená a neřízená mezifáze

Mezifáze se dělí na řízenou a neřízenou. U neřízené mezifáze se používají vlákna bez povrchové úpravy. Takovéto výztuže mají obecně horší adhezi mezi výztuží a matricí, nedochází k dokonalému smáčení a díl vyrobený z této výztuže má obvykle menší mechanické vlastnosti. Řízená mezifáze je již s povrchově upravenou výztuží. Úprava spočívá v nanesení tenké mezivrstvy, jenž má za následek pevné spojení vláken (výztuže) a matrice. Díky této tenké mezivrstvě, která je obvykle v řádech desítek nanometrů, se zlepšuje i smáčivost vláken, což je výhodné taktéž pro samotnou výrobu dílů. Aplikace tenké mezifázové vrstvy je v dnešní době možná několika způsoby, např. chemickým roubováním, plazmovou polymerací nebo silanovými vazebnými činidly. Vazba mezi fázemi je zajištěna mezi oxidy na povrchu vláken (výztuže) a molekulami matrice. [13, 14]

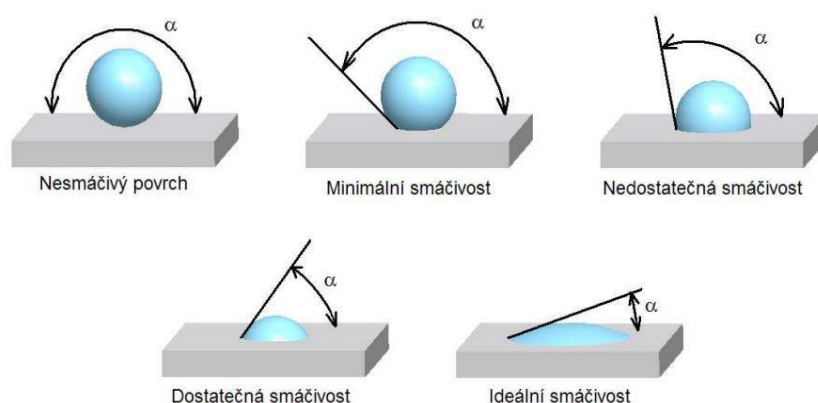


**Obr. 2.3** Schéma řízené mezifáze [15]

Důležitým aspektem mezifázového rozhraní je i drsnost povrchu výztuže (obvykle vláken). Vlákna nemohou být absolutně hladká, tedy mají vždy určitou drsnost. Větší povrchová drsnost zajistí získání větší plochy pro vytvoření mezifázového rozhraní, tedy i získání lepší soudržnosti obou fází. To však platí za předpokladu dobré smáčivosti.

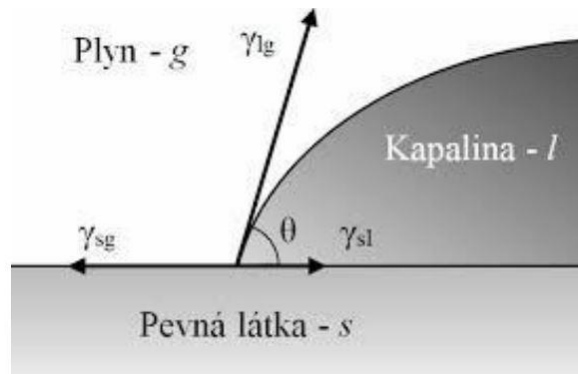
## 2.4.2 Smáčivost

Smáčivost je schopnost kapalně fáze se roztékat na tuhé fáze, kdy dochází ke snížení povrchové energie. V případě kompozitních materiálů se jedná o výztuž (obvykle vlákna) a matici (obvykle polymer). Jde tedy o stav, kdy dojde k rovnováze mezi kohezními silami v kapalině (polymeru) a adhezními silami mezi kapalinou (polymerem) a pevným tělesem (vlákem). Kapalina vytvoří na povrchu pevné fáze tvar kapky, který svírá určitý úhel (tzv. úhel smáčení), respektive kontaktní úhel. Podle velikosti smáčecího úhlu lze tedy posuzovat schopnost smáčení pevného tělesa kapalinou.



**Obr. 2.4** Vyobrazení kontaktního úhlu [16]

Z obr. 2.4 je patrné, že pokud úhel  $\alpha$  dosahuje menších hodnot, schopnost smáčení bude vyšší. V extrémních případech lze říci, že pokud úhel  $\alpha$  bude roven  $180^\circ$ , bude se jednat o absolutně nesmáčivý povrch. V takovémto případě by se kapalina dotýkala pevné fáze pouze bodově a vytvořila tvar koule. Dalším extrémním případem by byla absolutní smáčivost, kdy úhel  $\alpha$  by dosáhl hodnoty  $0^\circ$ , což by znamenalo celkové rozlití kapaliny po povrchu pevné fáze. Takovéto případy však v praxi nenastávají. Mezním úhlem je  $\alpha = 90^\circ$ , kdy v tomto případě zaujme kapalina tvar polokoule. Pokud bude svírat úhel  $\alpha$  menší úhel než mezní, bude se jednat o dobře smáčivé materiály. Naopak tomu bude, jestliže úhel smáčení bude větší než  $90^\circ$ . [17]



**Obr. 2.5** Rovnováha na fázovém rozhraní [18]

Tvar kapky je tedy dán energiemi tří fázových rozhraní. Na rozhraní je rovnováha sil, která je dána tzv. Youngovou rovnicí [19]:

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{gl} * \cos\theta \quad (2)$$

Úhel smáčení lze odvodit z Youngovy rovnice[20]:

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lg}} \quad (3)$$

Kde:  $\gamma_{sg}$  - mezipovrchové napětí na rozhraní plyn- pevná látka [ $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

$\gamma_{lg}$  - mezipovrchové napětí na rozhraní kapalina – plyn [ $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

$\gamma_{sl}$  - mezipovrchové napětí na rozhraní kapalina – pevná látka [ $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

$\theta$  - kontaktní úhel [°]

## 2.5 Vláknenná výztuž

Obecně se vlákno považuje za element, u kterého je podélný rozměr vůči příčnému značně větší. V dnešní době se využívá velké množství vláknenných výztuží a jejich počet stále roste. Z přírodních vláken lze jmenovat například bavlněné a kokosové, které mají výhodu především v nízké ceně, biologické odbouratelnosti, menších zdravotních rizicích a v neposlední řadě jsou také dobře obrobitelná [25]. Nevýhodou je, že u nich nelze zajistit kontinuální vlastnosti díky klimatickým změnám. V náročnějších strojírenských aplikacích jsou tato vlákna nahrazená například vláknem uhlíkovým, aramidovým a skelným.

**Tab. 2.2** Porovnání vlastností vláken [11]

Typ vlákna	Hustota [g*cm-3]	Pevnost [MPa]	Modul [GPa]	Prodloužení [%]
Skelná	2,54	3500	75	3 - 4
Uhlíková(a)	1,78 - 1,81	3800 - 6530	230 - 400	1,78 - 1,81
Aramidová	1,44	3600 - 4100	131	-

Vlákna v kompozitních systémech mají funkci nositele napětí, a proto musí vždy splňovat několik podmínek [3]:

- Mez pevnosti vlákna musí být větší než mez pevnosti matrice  $\sigma_{VP} > \sigma_{mP}$
- Modul pružnosti vlákna musí být vyšší než modul pružnosti matrice  $E_v > E_m$
- Tažnost vlákna musí být nižší než tažnost matrice, aby nedošlo k porušení soudržnosti u matrice dříve než u vlákna  $\varepsilon_{mP} > \varepsilon_{VP}$

Kde znamená:

$\sigma_{VP}$  – pevnost vlákna

$\sigma_{mP}$  – pevnost matrice

$E_v$  – modul pružnosti vlákna

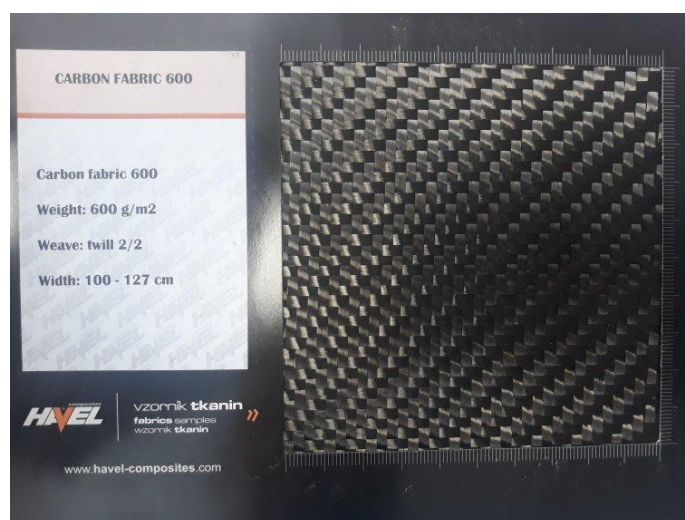
$E_m$  – modul pružnosti matrice

$\varepsilon_{mP}$  – tažnost matrice

$\varepsilon_{VP}$  – tažnost vlákna

## 2.5.1 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna, označována jako CF (Carbon Fiber), patří k často používanému typu vlákna, které se začalo hojně aplikovat od šedesátých let minulého století. Výroba uhlíkových vláken se standardně skládá ze dvou kroků, a to peroxidace a karbonizace. Peroxidace je prvním krokem výroby, kde dochází v oxidační atmosféře při teplotě 200 až 300 °C k polymeraci nitrilových postranních skupin, odštěpení vody a následné zčernání vláken. Dalším krokem je karbonizace, kdy se dosahuje až teplot okolo 1600 °C a obsah uhlíku v takovémto vláknu je okolo 95 %. Pro speciální aplikace, kdy je potřeba zvýšený modul pružnosti, přijde na řadu ještě třetí fáze výroby a tou je grafitizace. Tento proces je specifický vysokou teplotou (až 3000 °C), při kterém obsah uhlíku ve vláknu stoupne až na 99 % a zároveň u nich nastane vysoká orientace, což způsobí nárůst modulu pružnosti. Uhlíková (karbonizovaná) vlákna mají pevnost v tahu od 2,5 GPa do 4 GPa, kdežto grafitizovaná vlákna mají tuto hodnotu přibližně poloviční. U grafitových vysokomodulových vláken lze dosáhnout hodnot modulu pružnosti 420 GPa, což je přibližně dvojnásobek běžných uhlíkových vláken [21]. Důležité je podotknout, že mechanické vlastnosti CF se liší podle jednotlivých výrobců. Tažnost uhlíkových vláken se běžně pohybuje okolo 1 % až 2 %, kdy u grafitových vláken může být tato hodnota ještě nižší. Využití nachází hojně v dopravním průmyslu. Nevýhodou CF je především zdravotní hledisko a horší obrobiteľnosť.



**Obr. 2.6** Uhlíková tkanina 600 g/m<sup>2</sup> v keprové vazbě [22]

## 2.5.2 Aramidová vlákna

Aramidová jádra jsou z chemického hlediska benzenová jádra, která pevně spojují vodíkové můstky a aromatické polyamidy. Veřejnosti jsou aramidová vlákna známá spíše jako Kevlar, což je obchodní název. Jde o velmi pevná, tuhá a houževnatá vlákna, která dokáží dobře pohlcovat vibrace a energii. Hlavní výhodou je již zmíněná houževnatost, kdy oproti jiným vláknům (uhlíková, skelná) dochází k prasknutí vláken až velmi pozdě [23]. Toho se hojně využívá například ve vojenském průmyslu na výrobu ochranných neprůstřelných vest, helem a pancéřů. V automobilovém průmyslu se tyto vlákna používají například jako jedna z vrstev laminátu do závodních karbon-kevlarových karosérií, kdy právě díky aramidovým vláknům je při střetu závodního vozu s překážkou menší předpoklad prasknutí vláken, a tím pádem i větší ochrana jezdce. Nevýhodou těchto vláken je velmi obtížné obrábění dílů a dělení vláken v suchém stavu, kdy dochází k velkému opotřebení nástrojů.



**Obr. 2.7** Aramidová tkanina 110 g/m<sup>2</sup> v keprové vazbě [22]

## 2.5.3 Skelná vlákna

Skelné vlákno, označováno jako GF (Glass Fiber), se začalo v průmyslu používat v první polovině dvacátého století. Dnes patří mezi nejpoužívanější vláknenné výztuže v kompozitních materiálech v různých konstrukčních aplikacích, jelikož se jedná o vlákna, která mají výborný poměr ceny a vlastností. Oproti uhlíkovému vláknu je až pětikrát levnější.

Toto vlákno je taženo z roztavené skloviny rychlostí až 50 m/s. Po vytažení a následném ochlazení na teplotu okolí je nutné tato vlákna dále povrchově upravit, nejčastěji se používají vosky. Takto upravená vlákna mají menší předpoklad k vzájemnému abrazivnímu opotřebení při integraci do svazku a povlak zároveň chrání vlákno před přístupem vzdušné vlhkosti, která snižuje pevnost vláken.

Skelná vlákna se řadí mezi nehořlavé materiály. Výhodou vláken je i to, že mohou být vystaveny dlouhodobému tepelnému namáhání (do 250 °C) bez snížení jejich mechanických vlastností. Mez pružnosti je 2 až 3 %. Neobvyklá je také pevnost skelných vláken, kdy pevnost masivního skla je mnohonásobně menší, než tomu je právě u vláken. Nejvyšší pevnosti lze dosáhnout správným chemickým složením a také technologií výroby, kdy jsou vlákna vytažena při vysoké teplotě a následně velmi rychle zchlazena na teplotu okolí. Takto pevná vlákna jsou méně náchylná na lámání a nejsou tak křehká, což způsobuje i menší prašnost.

Odolnost proti vodě a navlhavost je důležitým faktorem v hodnocení vlastností skelných vláken. Skelná vlákna jsou velmi hladká s neporézním povrchem. To napomáhá faktu, že v porovnání s ostatními vláknitými materiály má menší hodnoty navlhavosti. Velmi dobře odolávají působení vody a vzdušné vlhkosti tzv. bezalkalická skla. Naopak tomu je u skel alkalických, kdy dochází k částečnému narušení struktury a dochází k úbytku mechanických vlastností. Obecně lze říci, že skelná vlákna patří mezi nenavlhavé materiály. Díky hladkému povrchu vlákna neprostupuje vlhkost do hloubky, ale je pouze na povrchu. To umožňuje i rychlé vysychání vláken. Navlhavost skelných vláken nepřesahuje 2 hmot.%.

Tloušťka vlákna je jedním z nejvýznamnějších parametrů, neboť má vliv na celkové fyzikální vlastnosti. Tloušťka jednoho vlákna se pohybuje od 3,5  $\mu\text{m}$  do 24  $\mu\text{m}$  a má kruhovitý tvar. Vlákna s menší tloušťkou budou méně křehká, naopak vlákna s větší tloušťkou budou více křehká.

Skelná vlákna mají velmi dobrou chemickou odolnost, fungují dobře jako elektrický izolant, jsou transparentní, pružná a nehořlavá. Pro termoplastické matrice se používají skelná vlákna nejčastěji v podobě krátkých vláken, dlouhých vláken, případně v podobě netkaných textilií. Pro reaktoplastické matrice se používají vlákna v různých podobách, nejčastěji však v podobě tzv. rovingů (pramence), tkanin a rohoží. [6, 11, 24–27]



**Obr. 2.8** Skelná tkanina 280 g/m<sup>2</sup> v keprové vazbě [22]

### 2.5.3.1 Druhy skel a jejich složení

V dnešní době existuje několik typů skel, která se používají pro výrobu skelných vláken. Jednotlivé druhy skel se od sebe liší chemickým složením, avšak většina skel obsahuje značnou část oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ). Nejběžněji používané sklo je typu E, které bylo dříve vyvinuto převážně pro elektrické aplikace. Skelné vlákno typu E však splňuje podmínky i pro použití v dalších aplikacích, a proto dnes patří mezi nejčastěji vyráběná a používaná skla (cca 90 % z celkové výroby skel). Zkratka typu skla udává signifikační vlastnosti jednotlivých typů (např. E-electric, S-strength, R-resistance).[3, 28]

**A-skla (alkalická):** Patří mezi levnější varianty skel, jsou alkalická. Mají malou schopnost odolávat zásadám a používají se na méně náročné aplikace – okenní výplně nebo výroba lahví.

**C-skla (chemická):** Tato skla se vyznačují výbornou chemickou odolností, proto se používají jako filtrační tkaniny v chemickém průmyslu. Oproti E-skladu má horší mechanické vlastnosti. Jsou středně alkalická.

**D-skla (dielektrická):** Vyznačují se nízkou dielektrickou konstantou, což toto sklo předurčuje k využití v elektrotechnickém průmyslu.

**E-skla (elektrická):** Jedná se o bezalkalická vlákna, nejpoužívanější sklo pro výrobu skelných vláken, jejich zásadní vlastností je vysoký elektrický odpor (elektroizolační vlastnost), což jej předurčuje k použití především v elektrických aplikacích. Není příliš odolné vůči minerálním kyselinám. Je to nejvíce vyráběné sklo (cca 90 % celkové produkce)

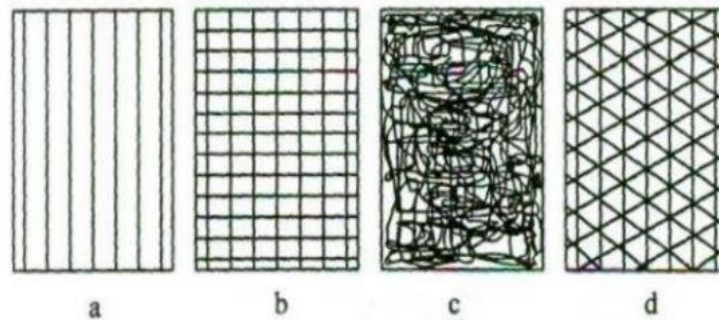
**M-skla (modulová):** Tyto skla mají velmi vysoký modul pružnosti. Nevýhodou je však jejich toxicita.

**S-skla (pevnostní):** Mají nejlepší mechanické vlastnosti ze všech skel, uplatnění nachází v náročných konstrukcích, v leteckém průmyslu a všude tam, kde je potřeba vysoký modul pružnosti, rázová houževnatost a vysoká pevnost v tahu. Patří do skupiny bezalkalických skel. Výhodou je i dobrá teplotní odolnost. Nevýhodou je jejich vysoká cena, která může být i několikanásobně vyšší než u standardních skel. [2, 7, 29]



## 2.5.4 Typy vláknenných výztuží

Vláknem je většinou pouze polotovarem, který se dále zpracovává. Jej možné je zpracovat například do stavu tkané a netkané textilie, sekat na menší vlákna apod. Na obr. 2.9 je možné vidět několik základních uspořádání vláken.



**Obr. 2.9** Časté způsoby uspořádání vláknenné výztuže: a) jednosměrná vlákna b) tkanina c) rohož d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken [30]

Rovingy jsou pramenec nekonečných vláken, které se navíjí na cívku. Nejčastěji se rovingy vyrábí se skla, uhlíku a aramidů. Pramenec mohou obsahovat i několik tisíc monofilů (elementárních vláken). Roving je základním kamenem pro výrobu většiny kompozitních tkaných výztuží. Jde o nejlevnější variantu vláknenné výztuže. Rovingy jsou nejčastěji používané pro navíjení, tkaní nebo výrobu sekaného vlákna. [3]



**Obr. 2.10** Uhlíkový roving [22]



**Obr. 2.11** Skleněný roving [22]

Dalším typem vlákenných výztuží je sekané vlákno, které je sekáno na potřebnou délku. Uplatnění nachází například jako výztuž ve vstřikovací směsi nebo na výrobu sklolaminátových forem, kde se s výhodou využívají k výztužení špatně dostupných míst a záhybů.



**Obr. 2.12** Sekané skelné vlákno [31]

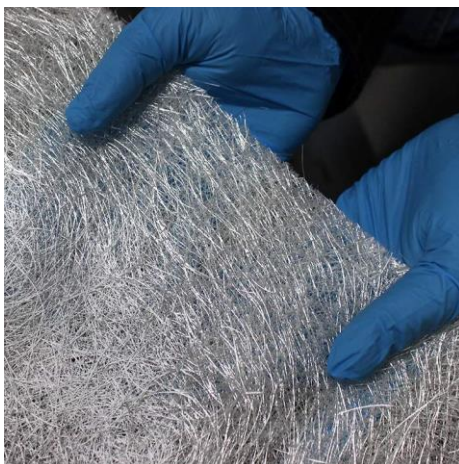
Rohož ze sekaných pramenců je netkanou textilií, která má v ploše stochasticky rozprostřená nasekaná jemná vlákna o délce cca od 25 mm do 50 mm. Tyto vlákna drží navzájem tvar díky polymernímu pojivu, které se následně vysuší, aby bylo možné skelnou rohož dále navinut do rolí. Polymerní pojivo se rozpustí v pryskyřici při finální výrobě kompozitního dílu. [32]



**Obr. 2.13** Skelná rohož vyrobená ze sekaných pramenců [31]

Skelné rohože mohou být vyráběny také z kontinuálního vlákna, kdy se nejedná o sekaná vlákna, ale jde o několik nekonečných skleněných vláken, která jsou nahodile umístěná do plochy. Vlákna mají

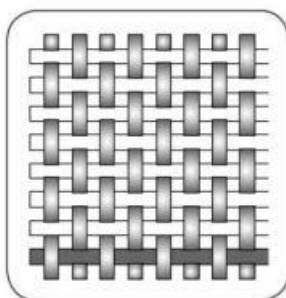
tvary smyček a podle požadované gramáže se vrství na sebe. Hlavní výhodou oproti rohožím ze sekaných pramenců je dobrá tvarovatelnost a vyšší tuhost a pevnost. [3]



**Obr. 2.14** Skelná rohož vyrobená z kontinuálních vláken [33]

Tkaniny patří k nejpoužívanějším typům vláknenné výztuže. Vlákna jsou uložena pravouhle v tzv. útku a osnově, která jsou na sebe kolmá a působí tak v obou směrech. Má v ploše velký počet vláken, což zaručuje velkou tuhost a pevnost. Pokud se zvyšuje poloha vláken v osnově (popř. v útku), dochází ke vzniku různých druhů křížení vláken, tzv. vazbě. Existuje mnoho druhů vazeb, nejčastěji je možné se v praxi setkat s vazbou keprovou, plátnovou a atlasovou. [3, 34]

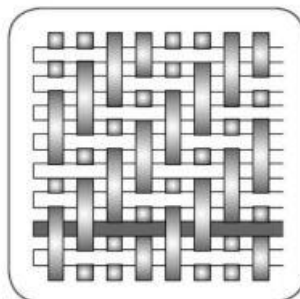
Dalším typem vazby je plátňová vazba. Jedná se o základní jednoduchou tkaninovou vazbu. Výhodou je malý otřep při řezání. Má menší tvarovou poddajnost u složitých tvarů formy. [3]



**Obr. 2.15** Plátňová vazba [35]

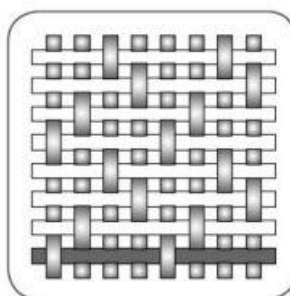
Jedna z nejpoužívanějších typů vazeb tkanin je keprová vazba. Jak je patrné z obr., vytváří diagonální efekt, v tomto případě jde o vazbu 2x2. Je vyráběno mnoho dalších variant, například kepr 4x4.

Keprová vazba je vhodná pro výrobu složitějších tvarových komponentů kvůli její dobré tvarové poddajnosti. [3]



**Obr. 2.16** Keprová vazba [35]

Poslední z často používaných vazeb tkanin je atlasová vazba, někdy nazývána také jako saténová vazba, která je schopna vytvořit velmi hladký povrch. Díky své dobré tvarové poddajnosti je využívána pro velmi složité tvarové aplikace. [3]

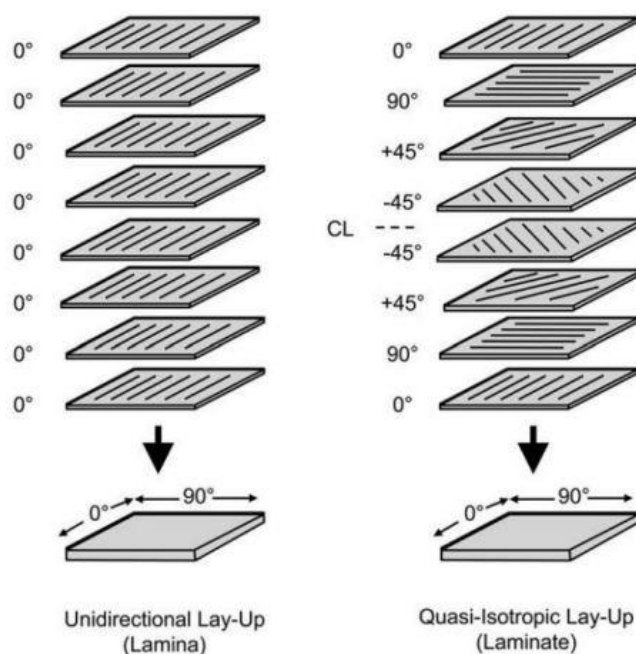


**Obr. 2.17** Atlasová (saténová) vazba [35]

## 2.6 Teorie vrstvení

Vrstvení v laminátu má velmi významný vliv na většinu vlastností v kompozitu. Nejjednodušší příklad vrstvení je tzv. lamina, což je uskupení vrstev (případně jen jedné vrstvy) výztuže, kde orientace vláken je pouze v jednom směru, a to ve všech kladených vrstvách. Jednosměrná lamina má hlavní směr  $0^\circ$  a v tomto směru dosahují nejlepších vlastností. Vlastnosti takové laminy ve směru kolmém na vlákna (tj.  $90^\circ$ ) jsou však velmi malé, jelikož zatížení přebírá matrice, a je tedy závislé jen na mechanických vlastnostech samotné matrice. Některé druhy vláken s vysokou pevností mohou bez problému dosahovat hodnot 3500 MPa, ale většina polymerních matric v normálovém směru může dosáhnout maximálních hodnot okolo 70 MPa. Pokud se však jednotlivé vrstvy pokládají s určitou a

rozdílnou orientací vláken, tak nazýváme toto uspořádání jako lamináty. Častými úhly jsou  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $-45^\circ$  a  $90^\circ$ . [23]



**Obr. 2.18** Skladba vrstev laminy a laminátu [23]

Jak je z obr. 2.18 patrné, v prvním případě jde o laminu. V druhém případě jde o tzv. symetrický laminát, kdy se laminát skládá od vnější po střední vrstvu. Každá vrstva má svůj určitý úhel a pořadí vložení. Po dosažení střední vrstvy se další vrstvy symetricky opakují. [23]

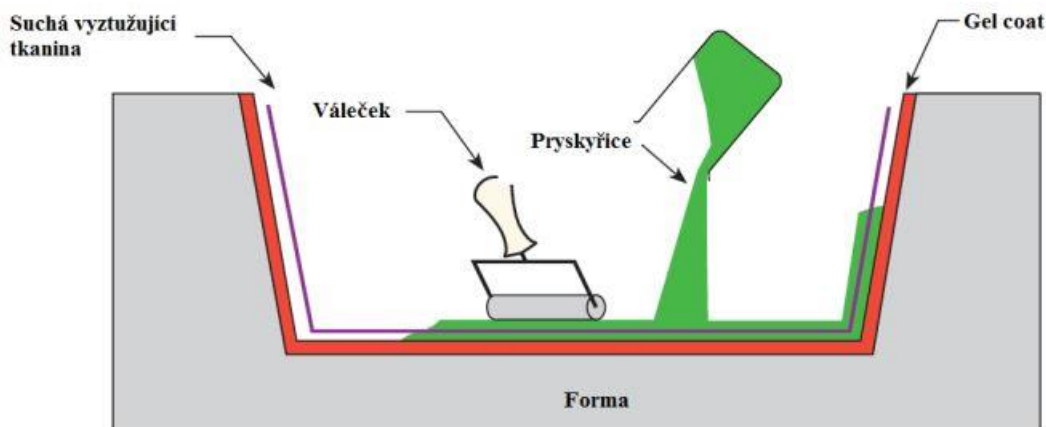
## 2.7 Technologie výroby vláknových kompozitů

V této kapitole jsou popsány základní druhy technologií pro výrobu vláknových kompozitů jako jsou vakuové prosycování, navíjení a technologie prepreg. Také jsou popsány technologie lisování pomocí vakua a metoda ručního kladení, protože právě tato kombinace technologií byla použita v praktické části pro výrobu vzorků ze skelných vláken.

### 2.7.1 Ruční kladení

Ruční kladení (také někdy ruční laminace) je nejjednodušší a nejstarší proces výroby kompozitních materiálů. Do otevřené formy se nejdříve nanese tenká separační vrstva, kterou často zastává separační vosk. Dále je do formy aplikován tzv. gelcoat v malé vrstvě (tj. do 1 mm), který má za úkol ochránit díl vůči okolnímu prostředí a zároveň vytvořit dobrý povrch dílu. Povrch dílu je však jen tak

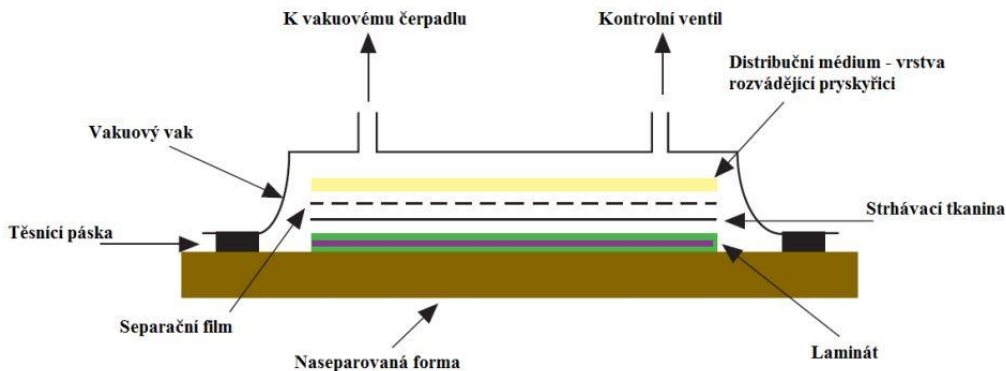
dobrý, jako je dobrý samotný povrch formy. Po nanesení gelcoatu se přechází k ukládání vlákně a následnému prosycování pryskyřicí. Nejběžněji se k tomuto používají válečky, popř. štětce. Takto prosycený díl se nechá vytvrdit většinou při laboratorní teplotě nebo s následnou temperací. Největšími výhodami tohoto procesu jsou relativně malé nároky na výrobního pracovníka a minimální vstupní náklady. Nevýhodou je dlouhý čas výroby, značné množství nerecyklovatelného odpadu a do jisté míry i závislost finální kvality výrobku na zručnosti a zkušenosti pracovníka. [2, 22]



**Obr. 2.19** Technologie ručního kladení [35]

## 2.7.2 Vakuové lisování

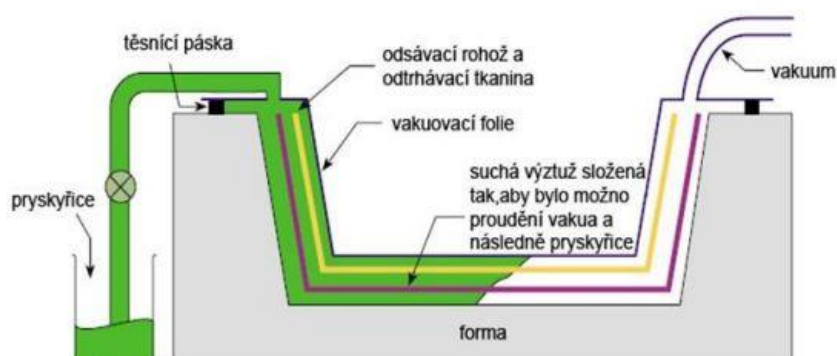
Metoda vakuového lisování je nadstavbou technologie ručního kladení. Do otevřené formy se nanese separační materiál, často ve formě vosku. Dále dochází k ručnímu kladení vrstev výztuže a prosycování pryskyřicí pomocí válečků, případně štětců. Po vytvoření dílu pomocí ručního kladení se na prosycenou výztuž položí tzv. strhávací tkanina a na ní absorpční látka, která do sebe nasaje přebytek pryskyřice. Takto připravený polotovár se ve formě uzavře do speciální vakuovací fólie, která je po obvodu zajištěna těsnicí páskou. Přes ventil jde z uzavřené formy vzduch a poté dochází k lisování pomocí fólie. Takto vytvořený díl je při správné výrobě téměř bez vzduchových bublin v porovnání s technologií ručního kladení. Díky absorpční látce, která do sebe absorbuje přebytečnou část pryskyřice, dochází k lepšímu poměru výztuže ku matrici. Nevýhodou je delší výrobní čas a v porovnání s ruční laminací jsou zde větší nároky na zručnost pracovníka. [2]



**Obr. 2.20** Technologie vakuového lisování [35]

### 2.7.3 Vakuové prosyčování

Metoda vakuového prosyčování (někdy také nazývána vakuová infuze) je založena na distribuci pryskyřice do vytužujících vláken pomocí podtlaku. Do separované formy se vloží suchá výztuž a na tu se postupně vkládá další potřebný technologický materiál – strhávací tkanina, rozvodná síť pro pryskyřici a vakuovací folie. Nejprve dojde k uzavření formy folií, zajištění podtlaku, zalisování suché tkaniny do všech záhybů formy a poté dochází k prosyčení výztuže za pomoci systému hadiček. [36]

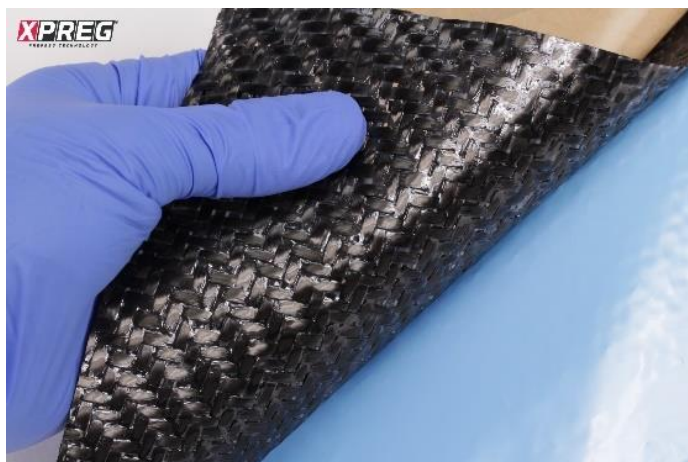


**Obr. 2.21** Technologie vakuového prosyčování (vakuová infuze) [35]

### 2.7.4 Technologie prepreg

Dnes moderní a ve velkovýrobě často používanou technologií k výrobě kompozitních dílů jsou tzv. prepregy. Jde o polotovary, které v sobě zahrnují jak výztuž, tak i rovnou matici. Takto předem prosyčená výztuž má vysoký podíl vláken (ideální poměr matrice a výztuže), nízkou hmotnost a velmi dobře se s nimi pracuje. Tato technologie umožňuje vyrobit velmi kvalitní produkt. Není problém tuto technologii použít i pro složité a komplikované díly. Jedná se o jednu z nečistějších technologií výroby a velkou výhodou je i minimální požadavky na zručnost a zkušenosti pracovníka. Nevýhodami jsou například velmi vysoká cena prepregů, nutnost vytvrzovat díl v autoklávu, uchovávání v teplotách

okolo -20 °C a s tím spojená omezená životnost polotovarů, protože při pokojových teplotách dochází k samovolnému vytvrzování pryskyřice. [3, 37, 38]

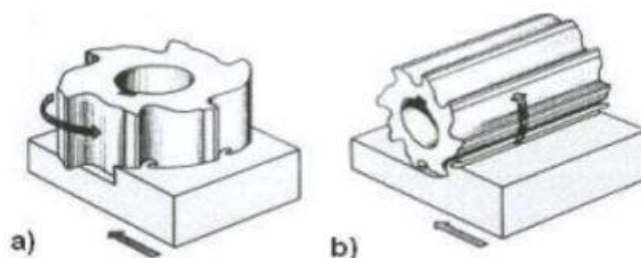


**Obr. 2.22** Uhlíkový prepreg [39]

## 2.8 Obecné obrábění

### 2.8.1 Frézování

Frézování patří mezi třískové obrábění. Většinou se používají vícebřité nástroje. Nástroj má hlavní pohyb (rotační) a vedlejší pohyb vykonává posuv a přísuv obrobku. Frézování se dělí na dvě základní skupiny – frézování čelem nebo obvodem nástroje. Dalším rozdělení frézování může být na sousledné a nesousledné. U obvodového frézování (někdy také válcové frézování) je osa vždy rovnoběžná s obráběnou plochou, u frézování čelního je osa kolmo k obráběné ploše. Čelní fréza má řezné plochy (břity) na čele i po obvodu, což jí umožňuje obrábět oběma způsoby.



**Obr. 2.23** Frézování a) čelní b) obvodové (válcové) [40]



## 2.8.2 Vrtání

Vrtání je metoda obrábění, kdy dochází k vytvoření otvorů v plném materiálu. Signifikačním rysem nástrojů pro vyvrtávání děr je, že se řezná rychlost zvětšuje od nulové hodnoty v ose nástroje směrem k obvodu vrtáku, kde je maximální hodnota řezné rychlosti. Řezná rychlost je tedy obvodovou rychlostí na maximálním průměru vrtáku. [41]

## 2.8.3 Broušení

Jedná se o technologii, při které dochází k hromadnému mikrořezání jemnými brusnými částicemi. Zrna brusiva jsou navzájem spojena pojivem v samotném nástroji. Pro broušení je typickým znakem vysoká řezná rychlost a malá hloubka záběru. Rychlost posuvu bývá oproti řezné rychlosti velmi malá, mnohdy až 200x menší. Při broušení dochází k vytváření velkého množství jemných částic (třísek) a kvůli působení brusných zrn v kombinaci s vysokou rychlostí broušení v místě styku dochází k vytváření poměrně velkého tepla. Nejčastěji mají brusné nástroje tvar kotouče, tělíska, nebo například pásu. [42, 43]

## 2.9 Obrábění kompozitních materiálů

Kompozitní materiály patří k těm, které jsou velmi obtížně obrobitelné. Vlákněné kompozitní díly se mohou vytvářet v různé formě, s různými vlákny, orientací vláken a jejich obsahem v konkrétním dílu. Zejména pak obsah vlákněné výztuže (u skelných kompozitů až 80 %) je zásadním faktorem pro obrobění takového dílu. Skelné vlákno patří mezi velmi tvrdé materiály, a proto by použití méně tvrdých nástrojových materiálů pro obrábění skelného kompozitu znamenalo, že by docházelo k intenzivnímu a extrémně rychlému opotřebení. Proto je vhodné používat jako nástrojové materiály k obrábění skelných laminátů tvrdší materiály, například slinuté karbidy, karbid boru a křemíku. Jeden z problémů obrábění laminátů je orientace vláken, kdy je materiál anizotropní a v podstavě nehomogenní. Takovéto strukturní vlastnosti znesnadňují obrobění, dochází k nezanedbatelnému poškození materiálu, celistvosti povrchu, integrity materiálu, nedoříznutí vláken a tvorbě otřepů [42, 43]. U skelných a uhlíkových vláken dochází při obrábění ke křehkému lomu, naopak tomu je u aramidových vláken, která mají lom houževnatý. Další problém nastává u odvodu tepla, kdy pojivo (pryskyřice) má nepříliš velkou schopnost odvodu tepla [9].

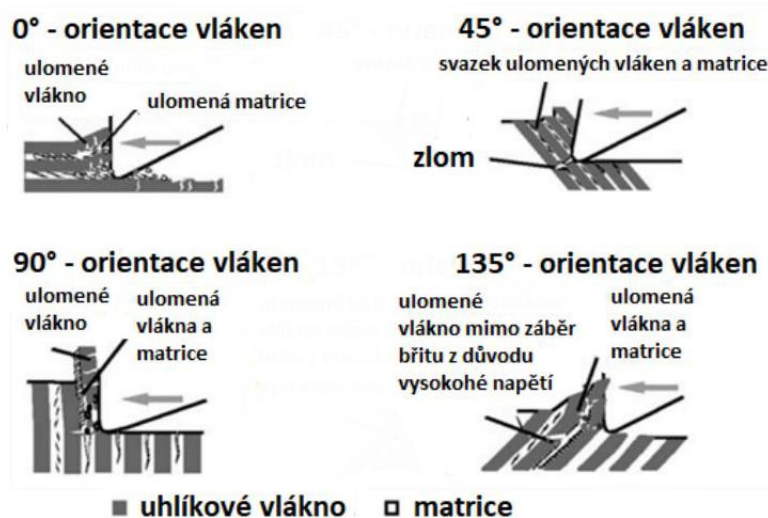
**Tab. 2.3.** Odvod tepla [%] při obrábění kompozitních materiálů ve srovnání s ocelí [44]

Odvod tepla	Ocel	Termoplast	Reaktoplast	CFRP	GFRP
Třískou	75	50 - 57	2 - 3	5 - 8	8 - 10
Obrobkem	20 - 22	15 - 20	5 - 8	5 - 10	10 - 15
Nástrojem	3 - 5	20 - 25	80 - 90	70 - 80	

CFRP - kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny, GFRP - kompozity vyztužené skleněnými vlákny

### 2.9.1 Ortogonální obrábění kompozitních materiálů

Při ortogonálním obrábění směřuje ostří nástroje kolmo na směr řezného pohybu. Při obrábění vláknenných kompozitů je důležitým faktorem orientace vláken, která má nejen vliv na mechanické vlastnosti materiálu, ale také na obrobiteľnosť.



**Obr. 2.24** Vliv orientace vláken u kompozitního systému na destrukci vlákna a matrice [45]

Na obr. 2.24 jsou znázorněny celkem čtyři různé techniky, jak je možné z kompozitního dílu odebírat třísku. Prvním případem je obrábění vláken s orientací 0°, kdy dochází pod ostřím nástroje ke stlačování povrchu v obrobku a v materiálu je napětí rovnoběžně s vlákny. Před ostřím bříty se objevuje praskání matrice, delaminace a praskání na rozhraní matrice a výtzuže. Pod ostřím jsou zanechávány zbytky obrobené vláknenné výtzuže, vláknenného prachu a matrice. Při vyjždění nástroje z materiálu dochází k delaminaci. Z technologického hlediska je tato varianta nejméně výhodná.

Další možností je obrábění výrobků s vláknennou výtzuží s úhlem orientace vláken vůči nástroji od 30° do 60°, kterou však doprovází společně s předchozími jevy i špatná kvalita obrobeného povrchu.

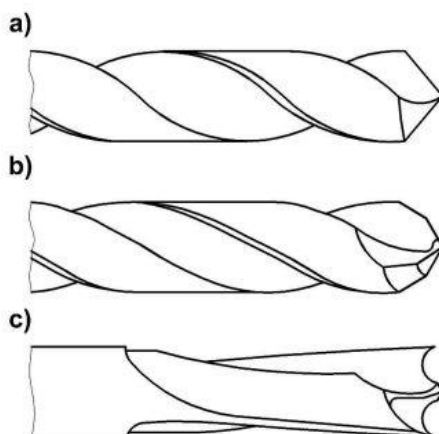
Kvalita povrchu je ovlivněna především tím, že jsou vlákna stlačována a namáhána na ohyb, který poté způsobuje trhliny.

Kompozity s orientací vláken  $90^\circ$  vůči nástroji mají namáhání stříhem v kombinaci s ohybem. Na rozdíl od varianty s  $0^\circ$  orientací vláken je zde řezáno každé vlákno jednotlivě za sebou. Jak je patrné i z obr. X, může tlaková deformace působící kolmo na výztuž způsobovat trhliny, které pronikají i do neobrobeného povrchu.

Posledním případem je obrábění vláken s orientací větší než  $90^\circ$ , konkrétně tedy v rozmezí od  $105^\circ$  do  $150^\circ$ , kdy nejvýhodnější je úhel  $135^\circ$ . Dochází zde k částečnému poškození mezi vláknem a matricí, které probíhá pod rovinou řezu. Skupina vláken před čelem nástroje je odehnuta od sebe a při odlomení vlákna dochází vzhledem k předpětí vláken ke zpětnému návratu na původní pozici. To má za následek větší abrazi hřbetu nástroje. V této orientaci vláken je na vlákna vyvíjeno tahové a ohybové napětí s následným přetržením svazků vláken. Z důvodu nedostatečné přilnavosti a spojení vláken k matrici mohou být jednotlivá vlákna vytrhávána z materiálu. [45]

## 2.9.2 Vrtání kompozitních materiálů

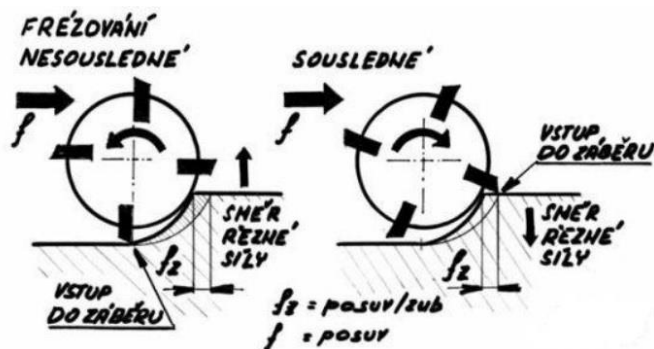
Vrtání kompozitu s výztužnými vlákny způsobuje různé poruchy a defekty materiálu. Při vrtání kompozitního laminátu je dobré použít nízké rychlosti posuvu, které snižují axiální síly, což má za následek snížení výskytu delaminace. Pro minimalizaci potenciálního vzniku delaminace je dobré použít také vhodnou geometrii vrtáku, kde úhel vrtáku  $120^\circ$  je pro toto ideální. Vhodné geometrie vrtáků jsou uvedeny na obr. 2.25. V publikaci [44] autor zmiňuje, že u běžného vrtáku s ostřenou špičkou (viz obr. 2.25 a) by příčné ostří mělo být co nejmenší, jelikož má negativní vliv na proces řezání, jelikož kvůli negativnímu úhlu čela a nízké řezné rychlosti má tendenci nástroj spíše materiál vytlačovat než řezat. To zapříčiní zvýšení posuvné síly, která umožní vznik delaminace kompozitu. Proto jsou pro obrábění běžně používány spíše speciální vrtáky (viz Obr. 2.25 b) a 2.25 c)). Dobré kvality povrchu vrtaného otvoru je možné dosáhnout pomocí vysoké řezné rychlosti právě v kombinaci s nízkou rychlostí posuvu. Při vysoké řezné rychlosti totiž prakticky nedochází k vytrhávání vláken, to však ale za předpokladu ostrého nástroje. [46] Zvláštností je pak obrábění vláken aramidových, kde je zapotřebí použít zcela jinou geometrii vrtáku z důvodu velké houževnatosti vláken oproti skelným, případně uhlíkovým.



Obr. 2.25 Geometrie vrtáků pro vrtání kompozitních materiálů s vláknovou výztuží [44]

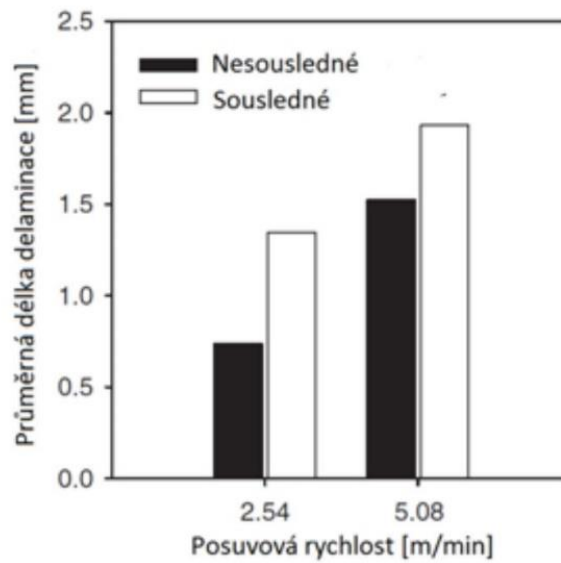
### 2.9.3 Frézování kompozitních materiálů

Frézování u kompozitů se používá často jako dokončovací operace, protože při samotné výrobě vláknového kompozitu, tj. kladení jednotlivých vrstev a případně následným lisováním, je snaha o to, aby výsledný tvar odpovídal co největší měrou finálnímu výrobku. Pro frézování vláknenných kompozitů se doporučuje využívat nesousledné frézování. Při nesousledném frézování je materiál odebrán z minima do maxima, kdežto u sousledného je tomu naopak (viz. Obr. 2.26). [47]



Obr. 2.26 Sousledné a nesousledné frézování [47]

Při nesousledném obrábění jsou tepelně zatížené třísky odváděny z obráběného místa, což zmenšuje pravděpodobnost připečení třísek k reaktoplastické matici. Trhliny jsou zde spíš v horizontálním směru. Ty však nemají vliv na již obrobený povrch. U sousledného obrábění je tomu naopak, kdy dochází k trhlinám v obrobené ploše. Nesousledné frézování je vhodné pro obrábění vláknenných struktur především kvůli menší pravděpodobnosti vytvoření delaminace, ale také z důvodu menší drsnosti obrobeného povrchu. Na obr. 2.27 je vyobrazen výstup z experimentu, kde byl obráběn kompozit z uhlíkových vláken nástrojem o průměru 6,35mm. [47]

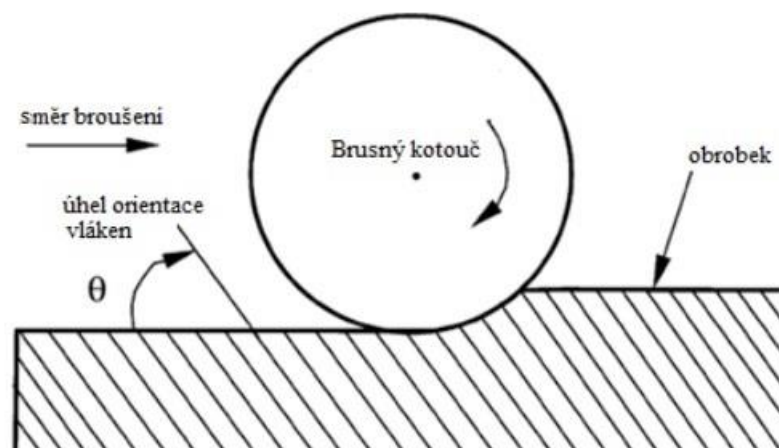


**Obr. 2.27** Vliv druhu frézování a velikosti posuvné rychlosti na vznik delaminace [47]

#### 2.9.4 Broušení kompozitních materiálů

Broušení kompozitních materiálů je dalším způsobem obrábění, většinou používané jako dokončovací operace s nejmenší drsností povrchu. Při broušení má velký vliv úhel orientace vláken, kdy tento úhel lze definovat mezi úhlem orientace vláken a směru řezné síly (viz obr. 2.28). Charakteristickým znakem pro broušení je malá hloubka záběru a vysoká řezná rychlost oproti malému posuvu. Tomu není jinak ani u broušení kompozitních materiálů. Je nutné dát si velký pozor na teplotu vznikající broušením, aby nedocházelo k tepelné degradaci matrice (pryskyřice) a postupnému zalepení brusné plochy.

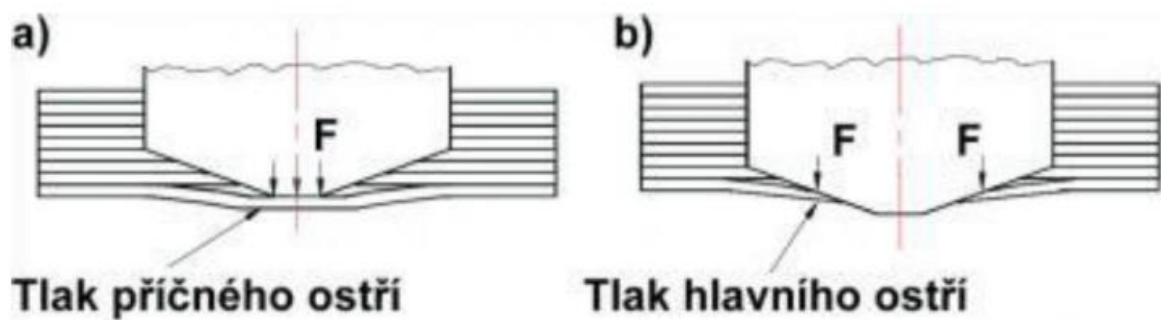
[40]



**Obr. 2.28** Broušení kompozitu - úhlem orientací vláken [40]

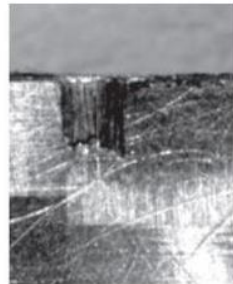
## 2.9.5 Delaminace

Při obrábění kompozitních vláknových materiálů, jako je například vrtání a ortogonální frézování, je možné se setkat s častým jevem, tzv. delaminací. Je to jev, při kterém dochází k vytrhávání materiálu (především výztuže) v místě obráběné plochy. K delaminaci dochází především při použití klasického šroubovitého vrtáku, kdy proběhne ve dvou fázích. V první fázi dochází ke styku příčného ostří s materiálem, kdy po celou dobu působí tlakovou silou na ještě neobrobený materiál. Tlaková síla na příčném ostří přetrvává až do doby, kdy toto ostří vrtáku pronikne poslední vrstvou materiálu ven. Před posledními vrstvami kompozitu má příčné ostří snahu vytlačovat poslední vrstvy ven, což způsobuje nepatrné vyboulení těchto vrstev s nejvyšší hodnotou v ose vrtání. Ve chvíli, kdy se příčné ostří dostane z materiálu ven, nastává druhá fáze. V druhé fázi se delaminace dále rozvíjí především působením tlaku a otáčením hlavního ostří. Delaminace dosáhne své maximální hodnoty ve chvíli, kdy příčné ostří pronikne ven. Na velikost delaminace má vliv také orientace vláken v krajních vrstvách. [48]

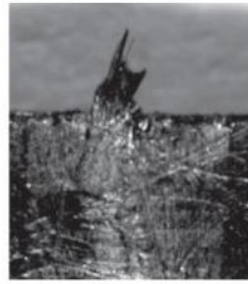


**Obr. 2.29:** a) první fáze vzniku delaminace b) druhá fáze vzniku delaminace [48]

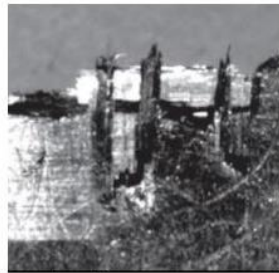
Existují celkem tři typy delaminace. Delaminace typu I je ta, ve které dochází v obrobené hraně k vyštípnutí vláken. U typu II má po obrobení jasně viditelná nedoříznutá vlákna, která vyčnívají na obrobené hraně. Tento typ delaminace vznikne díky ohebnosti vláken, která se dokáží během pronikání nástroje tomuto obrábění vyhnout. Poté, co se nástroj vrátí zpět, se vlákna odpružením vrátí na původní pozici. Dalším typem je kombinací typu I a typu II, kdy dochází k odštěpení vláken na hraně paralelně s nedoříznutím vláken. Posledním typem delaminace je typ III, u kterého je charakteristickým znakem částečné odštěpení vláken od povrchu materiálu, který má poté tendenci se třepit. [49]



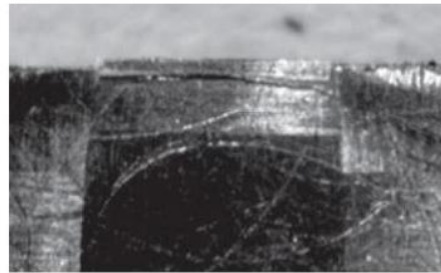
*Delaminace typ I*



*Delaminace typ II*



*Delaminace typu I a II*

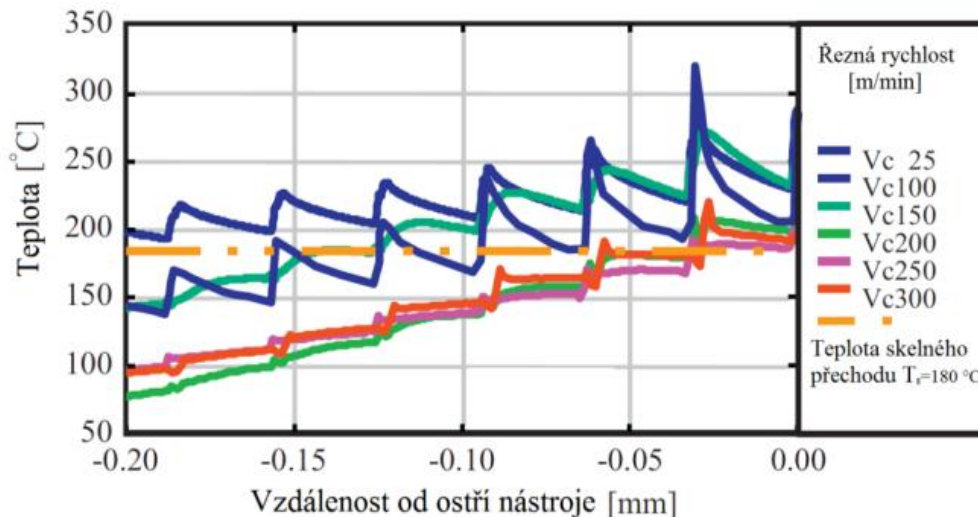


*Delaminace typ III*

**Obr. 2.30** Typy delaminací [49]

## 2.9.6 Teplo vzniklé při obrábění kompozitů

Kompozitní materiály jsou, jak již bylo zmíněno výše, špatně obrobitelné. Provázejícím jevem při obrábění takového materiálu je i vysoká teplota v místě obrábění. To je u těchto materiálů problémem především z důvodu toho, že polymerní matrice mají malou tepelnou odolnost (100 – 300 °C). Při obrábění polymerních kompozitů dochází ke vzniku tepla v oblasti primární a také i sekundární plastické deformace vlivem tření třísek o čelo nástroje. Vlivem elastické deformace, která vzniká třením již obrobené plochy o břít nástroje, vzniká teplo v oblasti terciální plastické deformace. U obrábění kovů dochází k výraznému odvodu tepla třískou (až 70 %), což u kompozitů nenastává – viz tab.2.3. Odvod tepla při obrábění kompozitních materiálů vykonává nástroj (až 90 %), což může v některých případech způsobovat až lokální hoření reaktoplastické matrice. Skelná a aramidová vlákna mají oproti uhlíkovým vláknům horší vedení tepla, avšak rozdíly nejsou enormní. Vedení tepla u vlákenné výztuže probíhá ve směru jejich os. Ať už se ale jedná o kompozit s jakýmikoliv z již zmíněných vláken, vždy je potřeba brát zřetel na teplotu skelného přechodu matrice a teplot v těsné blízkosti ostří nástroje. Díky špatné tepelné vodivosti reaktoplastické matrice se teplota při zvyšující se vzdálenosti od ostří značně snižuje. Pokud dojde k překročení teploty skelného přechodu, matrice ztratí pevnost a zároveň dojde ke zhoršení kvality obrobeného povrchu. Z grafu 2.1 jsou patrné závislosti teploty materiálu na vzdálenosti od ostří nástroje. [44, 49, 50]



**Graf 2.1:** Závislost teploty vzorku na vzdálenosti od oblasti primární plastické deformace [50]

### 2.9.7 Chlazení při obrábění kompozitů

Chlazení při obrábění vlákniny vyztužených materiálů je oproti kovům více problematické. Obecně se pro obrábění laminátů využití chladicí kapaliny nedoporučuje z důvodu navlhání matric a snížení přilnavosti vláken k matrici. Zároveň však v některých případech je vhodná z důvodu chlazení a zároveň strhávání vzniklého prachu do chladicí kapaliny. Pro případy, kdy dochází k navlhání matric se doporučuje využívat jiné chladicí médium, které v tomto případě může být stlačený vzduch. Ve speciálních případech se používá i oxid uhličitý, případně tekutý dusík. Další možností je využití vakua k eliminaci prachových částic. To však funguje dobře spíše u obrábění menších ploch, u větších je lepší volbou chladicí kapalina. Kvůli poréznímu povrchu materiálu je nevhodné využívat olejovou emulzi, jelikož olej by prosakoval do materiálu právě kvůli porezitě a nebylo by možné ho dostatečně očistit, což by znamenalo nemožnost lakování, lepení a dalších technologických operací. Nejčastěji se však obrábí bez chladicího média na sucho. Jak bylo již popsáno v části zabývající se vznikem tepla, v případě obrábění bez chlazení musí většinu tepla odvést nástroj.[51, 52]

### 2.9.8 Porovnání obrábění kovů a kompozitních materiálů

Na rozdíl od obrábění kovů zde může docházet k ovlivnění integrity obrobenej plochy, při špatných řezných podmínkách může dojít k vytrhávání vláken z materiálu, tavení matric, vylamování matric a namotávání vláken na nástroj. Často se u obrábění laminátu dá setkat s tvorbou trhlin a tvorby



delaminace, což je umožněno vzhledem k charakteru těchto materiálů.

U kovů dochází k plynulému odvodu tepla přibližně ze dvou třetin třískou, u kompozitů se jedná o jednotky procent. Laminát (respektive matrice) se může, na rozdíl od kovů, při obrábění s nesprávně nastavenými řeznými podmínkami a špatným nástrojem natavovat.

Pro dosažení kvalitních obráběných povrchů kompozitů je důležité brát ohled jak na ostrost nástroje, tak i na jeho správný výběr. Pro různé typy výztuží je nutné vybírat různé typy nástrojů. To je důležité především kvůli minimalizaci vzniku delaminace a vzniku tepla při obrábění.

Obrábění vyztužených dílů má oproti obrábění kovů svá specifika i ve velikosti a množství třísek. Při obrábění těchto materiálů se uvolňuje do okolí obrovské množství drobných třísek a prachových částic, především z výztuže. To vyžaduje použití výkonných odsávacích zařízení, aby nebyly překročeny zdravotní a hygienické limity pracovního prostředí.

### 2.9.9 Vliv obrábění na tvorbu třísek

Na téma tvorby prachových částic, které se uvolňují do okolí při obrábění vyztužených materiálů, se toho příliš nepublikovalo. Je však pár starších publikací, kde se tato problematika řešila. Například v publikaci [53] autoři zmiňují, že podmínky tvorby třísek se v závislosti na orientaci vláken významně lišily. Když se změnila orientace jednosměrných vláken z 0° na 15°, došlo k velmi výraznému snížení délky třísek. Další poznatkem bylo to, že geometrie nástroje má ve srovnání s orientací vláken zřejmě jen omezený vliv na geometrii třísek a prachových částic. Klocke a kol. v publikaci [54] poukazuje na to, že nástroje, které poskytují ostřejší řeznou hranu, produkují do okolí vyšší podíl malých prachových částic. Neméně zajímavým faktem bylo to, že řezná rychlost a materiál nástroje má také velký vliv na tvorbu drobných třísek. Při experimentu, kdy se zvýšila řezná rychlost z 200 m/min na 1000 m/min, vzrostla v okolí tvorba prachových částic z koncentrace 5 mg/m<sup>3</sup> na 13 mg/m<sup>3</sup>. Ze studie také vyplynulo, že karbidové nástroje produkují méně poletavých třísek než diamantové nástroje.

### 2.9.10 Vliv na zdraví člověka

Klasické obrábění vláknenné výztuže je prakticky vždy zatíženo otázkou na zdravotní dopady, proto se v publikaci [55] autoři zabývali nekonvenčními metodami obrábění těchto materiálů, konkrétně tedy vodním paprskem. Vodní paprsek s sebou unáší částice z obrábění, což eliminuje většinu potenciálního rizika. Jak již ale bylo nastíněno v kapitole o chlazení při obrábění, kompozity nejsou příliš vhodné na takovýto kontakt s vodou a mohlo by to mít vliv na celkové užité mechanické vlastnosti materiálu.

Obrábění kompozitních vláknových systémů může být pro člověka relativně velkým zdravotním rizikem. Schopnost drobných vláken vstoupit například do dýchacího traktu a iniciovat tak možné zdravotní problémy, to je s ohledem na narůstající oblibu výroby kompozitních dílu čím dál více aktuálnější téma. Jediným problémem nemusí být však jen samotná výztuž, ale i matrice. Vytvrzená epoxidová pryskyřice může mít jen nízký potenciál toxicity pro různé formy expozice, ale nutné je zmínit také to, že to neplatí u všech druhů epoxidů. [56, 57].

Největší obavy jsou především z vdechování destrukcí vzniklých prachových vláknových částic. Geometrie třísky polétající ve vzduchu je důležitým aspektem rizika. Velikost takovéto částice do určité míry definuje, ve které části dýchacího traktu se může usadit. U delších částic je jen málo pravděpodobné, že se dostanou do plic. Pokud se do plic dostanou, je jen minimální pravděpodobnost, že se dostanou opět ven. Proto potenciálně největším zdravotním rizikem je právě taková velikost částice, která je schopna proniknout až do plic. Proto je dobré určit tzv. aerodynamický ekvivalentní průměr částice [ $d_a$ ], který je definován jako průměr kulové částice o hustotě  $1000 \text{ kg/m}^3$ , která se usazuje stejně rychle jako sledovaná částice. V některých publikacích se zmiňuje kritická hodnota  $10 \text{ }\mu\text{m}$ , při které je už možné takto velkou částici vdechnout. Většina částic, které jsou větší než kritická hodnota  $10 \text{ }\mu\text{m}$ , neproniknou přirozeným filtrem v nosní dutině. U velikosti částic s aerodynamickým průměrem od  $5 \text{ }\mu\text{m}$  do  $10 \text{ }\mu\text{m}$  se většina těchto částic ukládá v nosohltanu a přibližně  $40 \%$  částic od  $2 \text{ }\mu\text{m}$  do  $5 \text{ }\mu\text{m}$  se dokáže dostat do oblasti průdušnice, případně až do průdušek. Částice pod  $2 \text{ }\mu\text{m}$  jsou schopny proniknout až do plicních alveol, které jsou nazývány také plicní sklípky. Plicní alveoly se nacházejí v plicích v blízkosti jejich stěn, kde částice může způsobovat největší zdravotní problémy. [58, 59]

Vliv dermatické expozice se v testech s částicemi z aramidových vláken prováděných na zvířatech i lidech neprokázal zásadní dopad na člověka. Citlivost kůže a reakce na částice byla zanedbatelná a pokud byla, jednalo se o podráždění kůže vlivem mechanického otěru usazeného prachu na kůži kvůli přiléhajícímu oblečení. U obrábění skelných a uhlíkových vláken je průběh citlivosti téměř stejný. Dermatitida se zde v určité míře objevuje, nejčastěji u nových pracovníků. Na rozdíl od velké části dermatitid se zdá, že se při dlouhodobější expozici pokožka znečistí. Pořád je ale třeba brát na paměť, že se jedná o působení drobných těles, které nejsou přirozené pro člověka, a tedy by měla být snaha se vyvarovat kontaktu s těmito částicemi. [60]

## 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 3.1 Metodika experimentu

Diplomová práce byla zaměřena na zkoumání destrukce kompozitních vlákných systémů při obráběcích technologiích broušení, frézování a vrtání. Experimentální část byla zaměřena především na délky a četnost jednotlivých třísek a prachových částic, které jsou tak malé, že pouhým okem nejsou viditelné a mohou být unášeny vzduchem.

Výroba vzorků byla uskutečněna v dílně FS TUL Racing a obrábění probíhalo na obráběcích strojích v laboratoři třískových technologií a procesů katedry obrábění a montáže v budově L na Technické univerzitě v Liberci. Analyzování vláken pomocí optické mikroskopie bylo prováděno na katedře materiálů a analyzování s využitím elektronového mikroskopu na katedře strojírenské technologie.

### 3.2 Příprava kompozitních vzorků

Cílem práce bylo vytvořit kompozitní materiál ze skelných vláken, který bude dosahovat rozměrů alespoň 200x200x15 mm. Pro výrobu sklolaminátového dílu byly zapotřebí tyto materiály a pomůcky:

1. Výztuž – skelná tkanina v keprové vazbě
2. Matrice – epoxidová pryskyřice
3. Elektrické nůžky
4. Štětce a válečky na prosycení
5. Skleněná deska
6. Těsnící páska
7. Vakuovací fólie
8. Odsávací rohož
9. Perforovaná fólie
10. Strhávací tkanina
11. Separální tuhý vosk
12. Tekutý separátor - PVA
13. Laboratorní váha
14. Rukavice
15. Kelímky a míchadlo
16. Vakuová vývěva

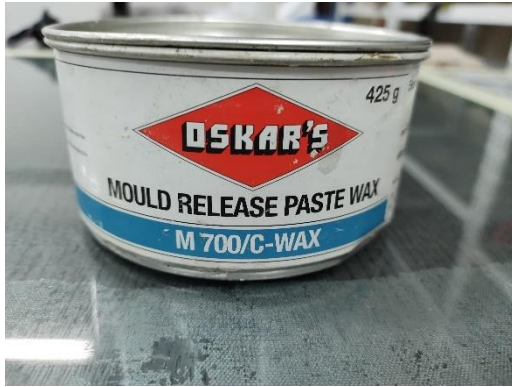
17. Rezervoár
18. Ocelová destička
19. Vakuová hadice

Jelikož jsou vlákenné výztuže dodávány zpravidla v rolích, tak prvním krokem při výrobě sklolaminátového dílu bylo nařezání skelných vláken na požadovaný rozměr 200x200 mm. Bylo použito 5 m<sup>2</sup> skelné tkaniny s keprovou vazbou 2/2 (HAVEL COMPOSITES CZ, s.r.o.), kde počet pramenců na cm<sup>2</sup> je 12x11,5 (osnova x útek). Z role bylo teoreticky možné nastříhat 125 vrstev, avšak kvůli určitému prořezu bylo nastříháno 120 kusů. Tloušťka jedné vrstvy suché tkaniny byla změřena s hodnotou 0,16 mm. Z důvodu velkého množství nastříhaných vrstev byly použity elektrické akumulátorové nůžky Easy Cutter.

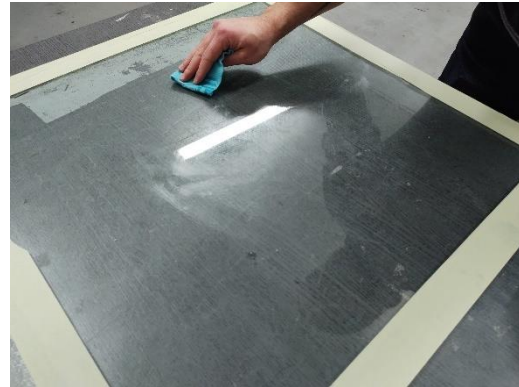


**Obr. 3.1** Stříhání skelné keprové tkaniny

Dalším krokem byla příprava formy. Jako forma zde posloužila skleněná deska, na kterou byly nanесeny vrstvy tuhého vosku M700/C-WAX od firmy Oskar's. Po nanесení bylo nutné počkat 15 minut na zavadnutí vosku a poté byl vosk rozleštěn. Takovýmto způsobem byly nanесeny celkově tři vrstvy vosku. Pro ujištění, že výrobek půjde oddělit od formy, byl použit ještě univerzální tekutý PVA separátor.

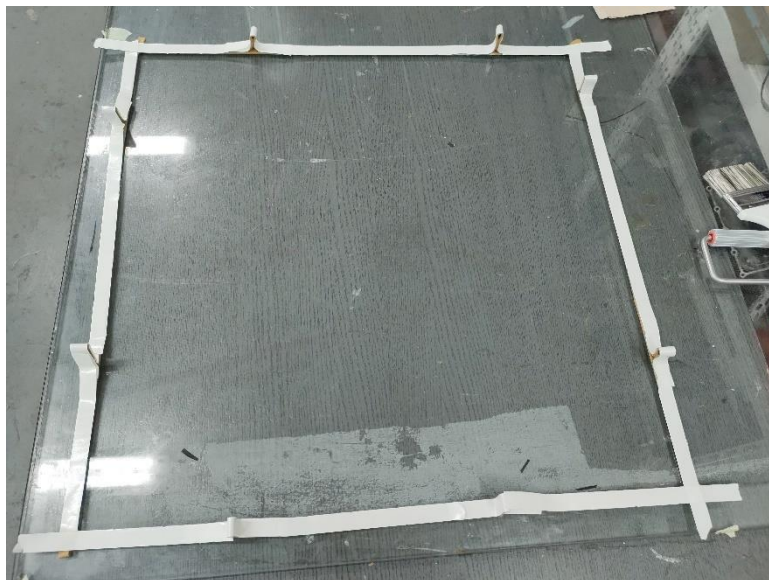


**Obr. 3.2** SeparáčnÍ vosk Oskar's



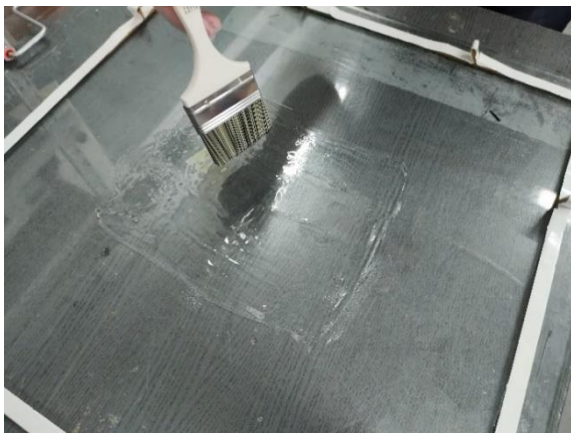
**Obr. 3.3** Leštění vosku na formě

Následně byla po okrajích aplikována těsnící páska DIATEX LSM6000 s překlady, které byly vytvořeny z důvodu eliminace napnutí vakuovací fólie při finálním vakuování.



**Obr. 3.4** Separovaná forma s těsnící páskou

Po aplikování těsnící pásky byla namíchána epoxidová pryskyřice s tvrdidlem. Pro tuto diplomovou práci byla použita nízkomolekulární epoxidová pryskyřice CHS-EPOXY 520 s tvrdidlem T0492, které bylo namícháno dle technického listu výrobce, v hmotnostním poměru 100:26. Snahou bylo docílit ideálního prosycení veškerých vláken s minimálním odpadem, kdy poměr epoxidové pryskyřice a skelných vláken bude ideálně v hmotnostním poměru 50:50. Při použití technologie vakuového lisování bylo zapotřebí použít větší množství pryskyřice, aby došlo k dokonalému prosycení. Přebytek pryskyřice poté zadrží odsávací rohož. Proto bylo namícháno celkově 1200 g pryskyřice (včetně tvrdidla), a to postupně ve třech fázích po 400 g, kvůli minimalizaci možného vzniku exotermické reakce. Poté byla aplikována pryskyřice a na ní první vrstva skelné tkaniny. K prosycování byl použit plochý štětec a na vytlačování vzniklých bublin v již prosycené tkanině byl použit váleček s drážkováním.



**Obr. 3.5** Nanášení první vrstvy matrice



**Obr. 3.6** Prosycování pomocí válečku

Tento postup se opakoval u všech 120 vrstev. Prosycený laminátový polotovár je vidět na obr.X. Následně na něj byla položena strhávací tkanina (Nylon 66) 83 g/m<sup>2</sup>, která zajistí to, aby po vytvrzení došlo k pohodlnému oddělení vytvrzeného výrobku od pomocných materiálů.

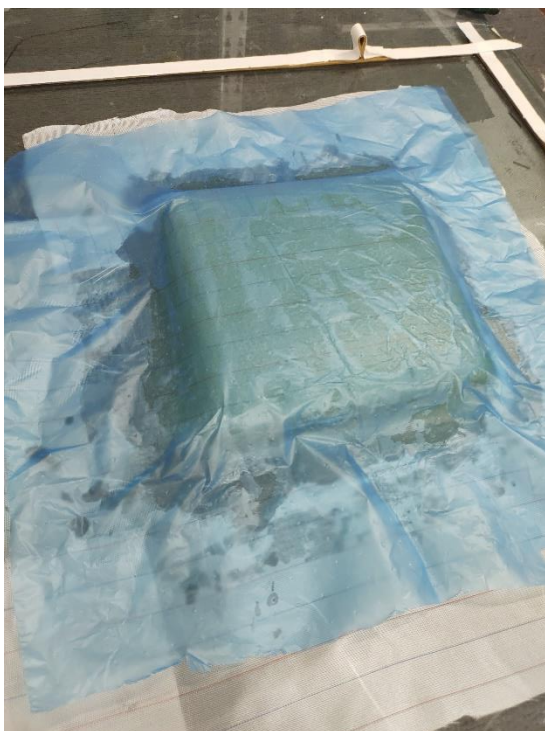


**Obr. 3.7** Prosycený finální vzorek

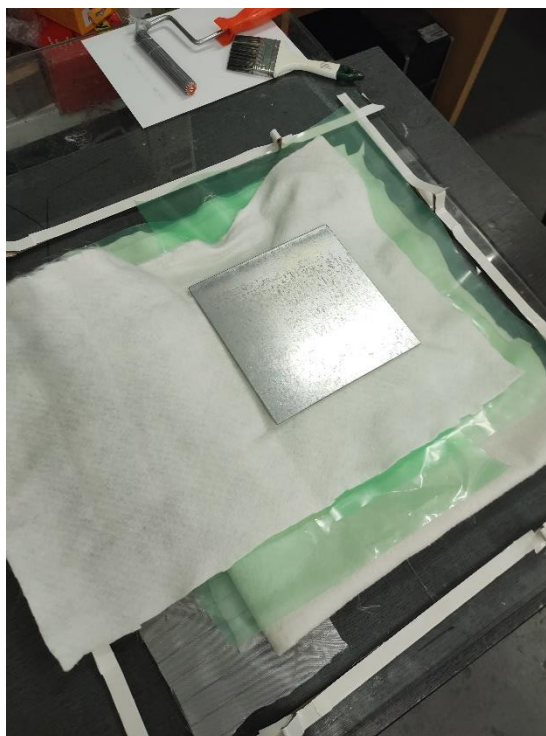


**Obr. 3.8** Aplikace strhávací tkaniny

Na strhávací tkaninu byla položena perforovaná fólie, která zde byla z důvodu rovnoměrného protékání přebytku pryskyřice do odsávací rohože. Poté byla na perforovanou fólii položena odsávací rohož. Následně byla položena polyethylenová fólie a další odsávací rohož, do které byla vložena ocelová destička. Fólie z PE sloužila jako zábrana v kontaktu pryskyřice a ocelové destičky. V tomto kroku byla využita odsávací rohož k pokrytí ocelové destičky, aby se předešlo možnému protržení finální vakuovací fólie o hranu destičky vlivem podtlaku. Ocelová destička o rozměrech 200x200 mm sloužila k vytvoření rovnoměrného tlaku, aby nemohlo dojít ke zborcení hran a nakupení velkého množství materiálu na jednom místě výrobku.



**Obr. 3.9** Aplikace perforované fólie



**Obr. 3.10** Umístění ocelové destičky

Dalším krokem bylo nachystání vakuovací hadice, která zajistila přívod k vytvoření podtlaku. Pro vytvoření vakua bylo nutné celý díl zavřít do vakuovací PE fólie, která byla utěsněna již připravenou těsnící butylkaučukovou páskou. Podtlak byl vytvořen pomocí vakuové vývěvy BUSCH R 5 KB 0016 E, která byla napojena na vakuovou hadici přes rezervoár, který sloužil jako ochrana před natečením pryskyřice do vakuové vývěvy v případě, že by došlo k přehlcení odsávací rohože epoxidovou pryskyřicí. Podtlak pro výrobu tohoto kompozitního vzorku dosáhl hodnoty 92 kPa.

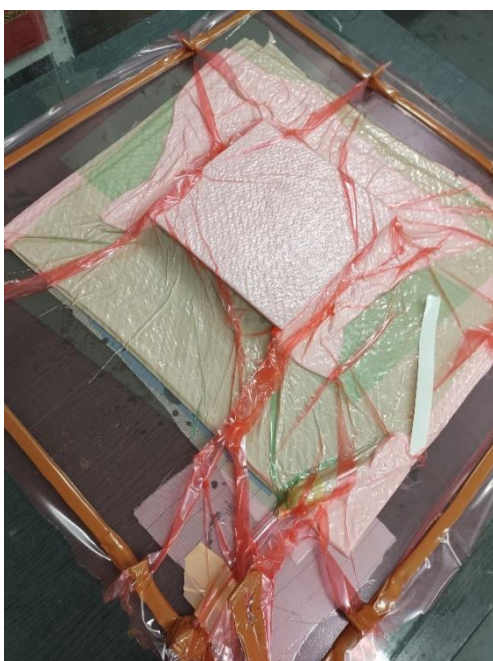


**Obr. 3.11** Vakuovací hadice

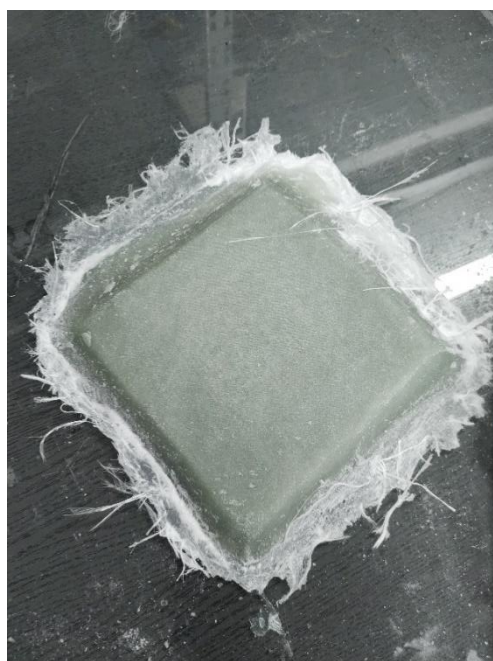


**Obr. 3.12** Rezervoár na matrici

Následovalo vakuové lisování, které probíhalo po celou dobu vytvrzování. Doba vytvrzování byla přibližně 24 hodin při laboratorní teplotě  $22\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ . Po dokončení vytvrzování byl vzorek sejmут z formy a umístěn do sušárny kvůli lepšímu zesílení celé struktury. Dotvrzování probíhalo po dobu 10 hodin při teplotě  $50\text{ °C}$ .



**Obr. 3.13** Vakuově lisovaný vzorek



**Obr. 3.14** Vzorek po vytvrzení



Posledním krokem ve výrobě kompozitních vzorků bylo zarovnání hran (z důvodu lepšího upnutí ve svěráku) a nařezání na menší vzorky. K tomuto účelu byla využita poloautomatická pásová pila PILOUS. Vzorek byl rozdělen na 4 menší vzorky, a to na požadované rozměry 90 x 90 x 28 mm.



**Obr. 3.15** Zarovnávání vzorku

### 3.3 Obrábění kompozitních vzorků

V teoretické části této diplomové práce je napsáno, že obrábění kompozitních dílů oproti obrábění kovů vytváří velké množství třísek a drobných prachových částic. Proto při obrábění vzorků byla vždy použita bezpečnostní zábrana a využita polomaska 7500 od firmy 3M s částicovými filtry FFP3 od stejné firmy. Dále byly použity ochranné brýle a ochranné rukavice.

Tato diplomová práce je zaměřena na nejpoužívanější obráběcí technologie v oblasti kompozitních materiálů, tedy frézování, vrtání a broušení. Pro tuto DP bylo potřeba získat obráběním velké množství prachových částic a třísek o různých délkách, proto byly vytvořeny vzorky se 120 vrstvami skelné tkaniny. Při obrábění běžných kompozitů, které obsahují často jen několik na sebe položených vrstev, by bylo nutné vytvořit nezměrné množství vzorků a všechny vzorky následně obrobit. Proto byl vytvořen jeden větší vzorek, ze kterého byl vygenerován dostatek částic k analýze.

První obráběcí technologií použitou pro obrábění vyrobených kompozitních vzorků bylo broušení. Pro tuto operaci byl zvolen brusný kotouč T1 250 x 32 x 76 98A 60 K 9 V 40 s korundovým brusným zrnem od firmy Tyrolit. Zvolené řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 3.1.



**Obr. 3.16** Broušení kompozitního vzorku

**Tab. 3.1** Řezné podmínky pro broušení

Vzorek	Otáčky $n$ [ot/min]	Hloubka záběru $a_p$	Rychlost posuvu $v_f$ [mm/min]
Vzorek 1	2400	0,2	200

Další technologií obrábění bylo frézování, které bylo prováděno na frézce FNG 32 pomocí válcové stopkové frézy s průměrem 80 mm a se sedmi vyměnitelnými břitovými destičkami od firmy PRAMET. Pro frézování kompozitu byly zvoleny řezné podmínky viz. tabulka 3.3. Specifikace frézky FNG 32 jsou zobrazeny v tabulce 3.2. V průběhu frézování nebyla použita procesní kapalina.

**Tab. 3.2** Specifikace stroje FNG 32

Charakteristika stroje	Hodnota	Jednotky
Rozměry pracovní plochy	800 x 400	[mm]
Maximální zatížení stolu	350	[kg]
Posuv X	15 - 1000	[mm/min]
Posuv Y	15 - 1000	[mm/min]
Posuv Z	6 - 400	[mm/min]
Pracovní zvih příčný	400	[mm]
Pracovní zvih podélný	600	[mm]
Pracovní zvih svislý	400	[mm]
Rozsah otáček vřetene	50 - 4000	[ot/min]
Výkon hlavního motoru	4	[kW]
Výkon posuvného motoru	1,1	[kW]



**Obr. 3.17** Frézování kompozitního vzorku

**Tab. 3.3** Řezné podmínky pro frézování

Vzorek	Otáčky $n$ [ot/min]	Hloubka záběru $a_p$	Rychlost posuvu $v_f$ [mm/min]
Vzorek 2	1000	1	100
Vzorek 3	1000	2	100

Poslední technologií obrábění bylo vrtání, které bylo uskutečněno na stroji FNG 32. Specifikace stroje jsou uvedeny v tabulce 3.2. Pro experiment byly zvoleny vrtáky HSS-Co, DIN 338 s úhlem špičky 118°. Zvoleny byly dva průměry vrtáků (5 mm a 9,8 mm) a pro každý vrták byly vybrány dvojce otáčky. Pro vrták s průměrem 5 mm byly zvoleny nižší otáčky, pro vrták s průměrem 9,8 mm vyšší otáčky, viz tabulka 3.4. Díry byly vytvářeny v určitém rozestupu na vzorku, aby nemohlo dojít k ovlivnění geometrie třísek z jednotlivých děr například kvůli delaminaci z předešlého vrtání.

**Tab. 3.4** Řezné podmínky pro vrtání

Vzorek	Otáčky $n$ [ot/min]	Průměr vrtáku $D$ [mm]	Rychlost na otáčku $f_{ot}$ [mm/ot]
Vzorek 4	2000	5	0,2
Vzorek 5	1500	5	0,2
Vzorek 6	1000	9,8	0,2
Vzorek 7	500	9,8	0,2

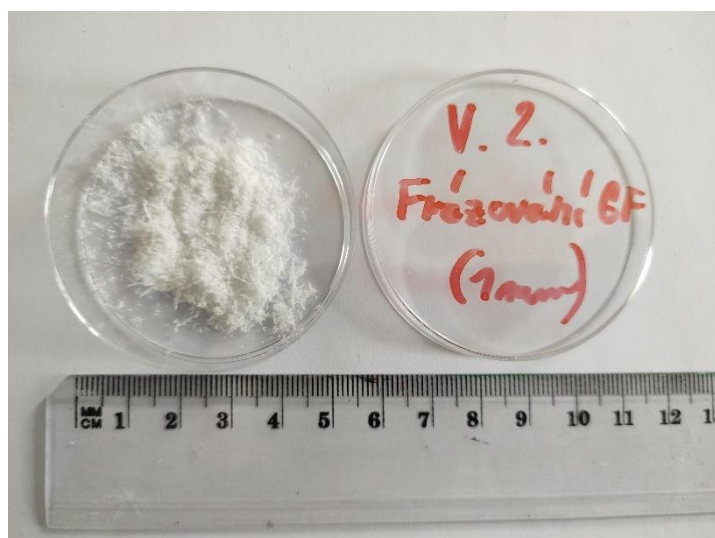


**Obr. 3.18** Vrtání kompozitního vzorku

### 3.4 Odběr vzorku

Před samotným zahájením obrábění došlo k důkladnému očištění všech ploch v blízkém okolí nástroje, aby nedošlo k případné kontaminaci vzorků. Veškeré prachové částice je kvůli jejich značnému šíření do okolí složité zachytit, avšak pro tento experiment postačila zachytná oblast částic, která byla v okruhu přibližně 40 cm od osy nástroje. Pro zachycení co největšího množství třísek a prachových částic při obráběcích technologiích frézování a broušení byla využita nanovláknenná netkaná textilie, ze které byly vzorky následně odebírány do jednotlivých uzavíratelných sáčků s klipem a poté popsány. U technologie vrtání byl odběr proveden přímo z kompozitního vzorku, jelikož tvořené třísky a prachové částice se uskupovaly v minimální vzdálenosti od osy nástroje a na nanovláknenné textilií byl jen zanedbatelný vzorek částic, který by pro vyhodnocování nebyl v dostatečném množství. Po jednotlivém opakovaném obrábění bylo místo obrábění vždy vyčištěno a byla položena nová nanovláknenná textilie pro zachyt dalších vzorků.

Poté byly vzorky přendány v laboratoři z uzavřených sáčků do skleněných Petriho misek a taktéž popsány pro následné analyzování.



**Obr. 3.19** Odebraný vzorek z frézování v Petriho misce

Následně byly jednotlivé vzorky prachových částic umístěny na terče určené pro vložení do konzole rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM) TESCAN VEGA 3 SHB, kde byly dále zkoumány.

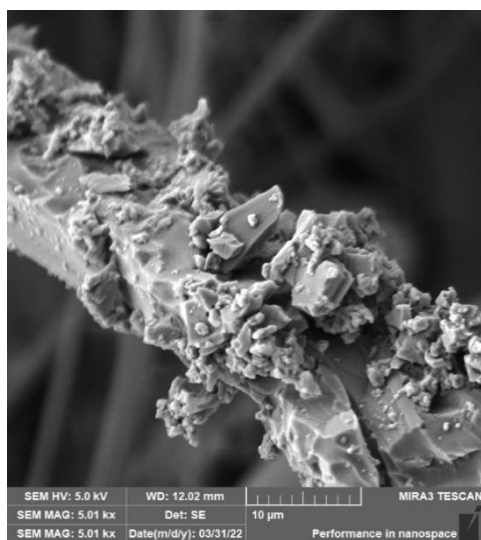


**Obr. 3.20** Terče do SEM se vzorky

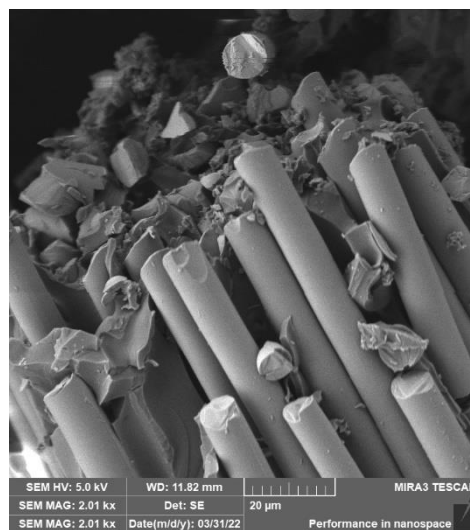


**Obr. 3.21** Vkládání terčů do konzole SEM

Při prohlédnutí jednotlivých vzorků na elektronovém mikroskopu bylo patrné, že velké množství menších vláken není viditelné z důvodu přítomnosti částic z epoxidové pryskyřice, která byla schopna menší částice výztuže skrýt. V některých případech také nebylo možné zcela rozeznat, zdali se jedná o částici z epoxidové pryskyřice nebo skelného vlákna.



**Obr. 3.22** SEM - třísky z vláken a matrice



**Obr. 3.23** SEM - třísky z vláken a matrice

Z důvodu lepší čitelnosti vláken bylo zapotřebí odstranit částice epoxidové pryskyřice, což bylo realizováno pomocí vypalování v peci. Do keramických vaniček byly jednotlivé vzorky nasypány a zváženy laboratorní vahou KERN EWJ při laboratorní teplotě  $22\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ . Poté byly vzorky vloženy do pece, kde probíhalo vypalování epoxidové složky do doby, než se dosáhlo teploty  $500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ . Při této teplotě bylo možné s jistotou tvrdit, že zde už nemohou být žádné zbytky epoxidové pryskyřice, jelikož její teplotní odolnost, respektive teplota, při které je definitivně odstraněna spálením, se pohybuje přibližně do  $300\text{ °C}$ . Zároveň v použitém teplotním rozsahu nedochází ani k degradaci vláken.



**Obr. 3.24** Vzorky v keramických vaničkách



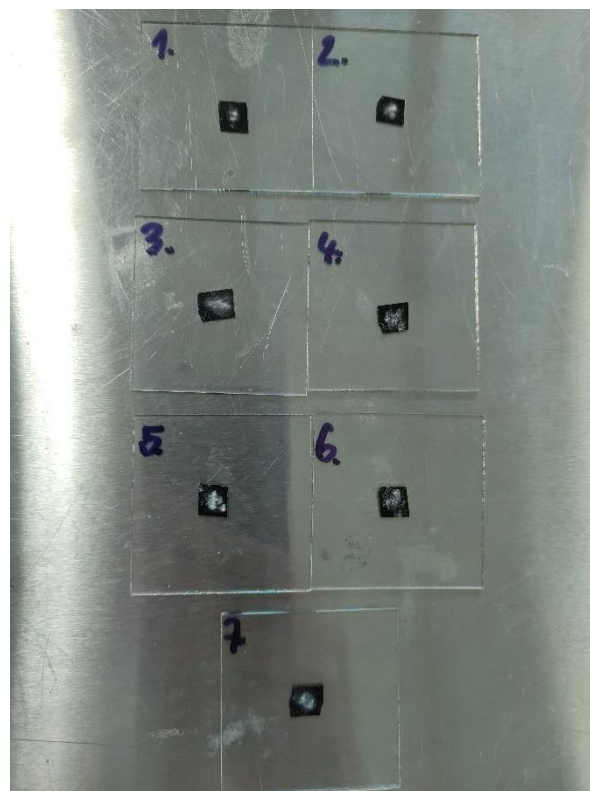
**Obr. 3.25** Vzorky po vypálení epoxidu

## 4 Vyhodnocení

Po vypálení epoxidové pryskyřice zbyly v keramických miskách pouze částičky skelné výztuže, které bylo možné dále zkoumat na mikroskopu. Při prvním analyzování na SEM (před vypálením) bylo zjištěno, že se ve vzorcích s prachovými částicemi objevují vlákna různých délek. Pro zjištění veškerých délek bylo zapotřebí použít dva typy mikroskopů. Pro částice do 10  $\mu\text{m}$  byl použit výše zmíněný rastrovací elektronový mikroskop (SEM) TESCAN VEGA 3 SHB, který dokáže kvalitně zobrazit vlákna v řádu jednotek mikrometrů a menších. Jelikož se však ve vzorcích vyskytovaly i vlákna podstatně delší (o jeden řád), byl pro částice nad 10  $\mu\text{m}$  použit optický mikroskop NIKON EPIPHOT 200 (obr. 4.1). Na skleněné destičky bylo umístěno všech sedm vzorků a vloženy do optického mikroskopu. Bylo zkoumáno několik oblastí v každém vzorku k získání relevantních výsledků. Všechny vzorky byly změřeny a analyzovány v softwaru NIS – ELEMENTS AR.



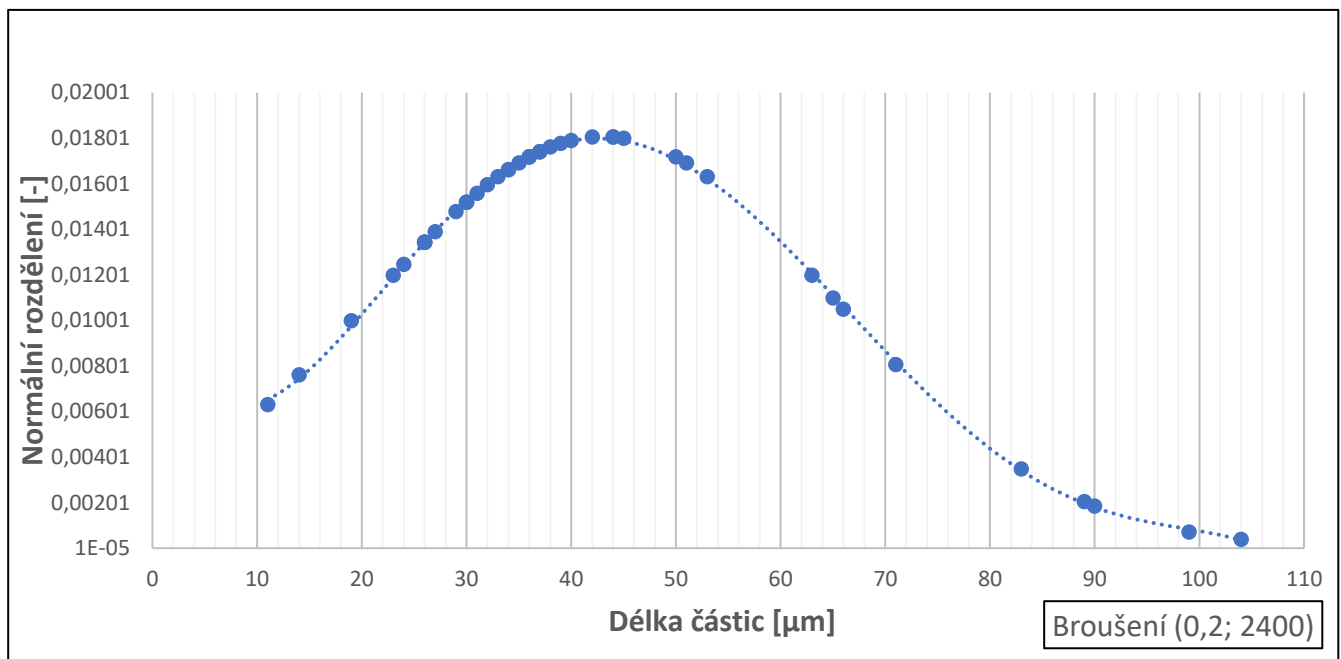
**Obr. 4.1** Optický mikroskop NIKON EPIPHOT 200



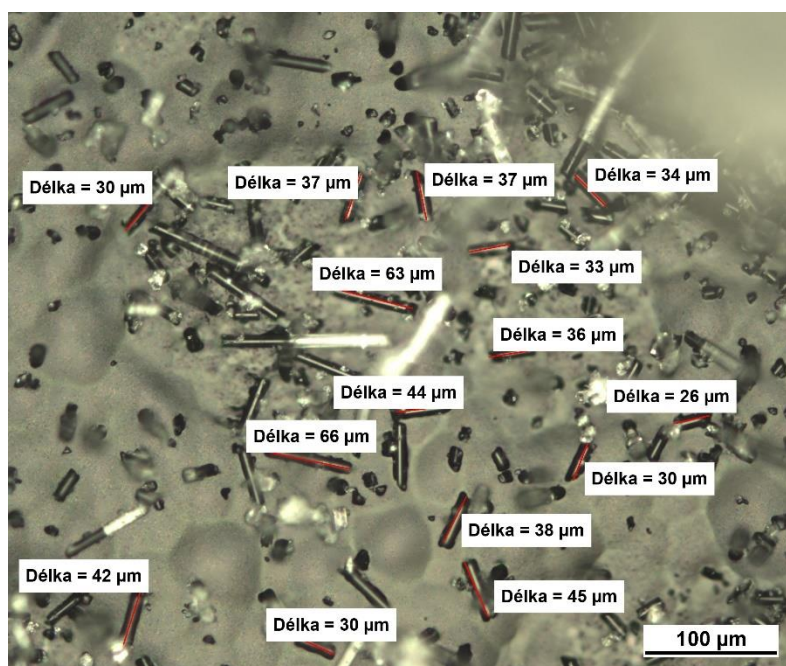
**Obr. 4.2** Vzorky připravené na analyzování OEM

## 4.1 Analyzování vzorků s délkou částic $\geq 10 \mu\text{m}$

Prvním vzorkem byl vzorek 1 – broušení (0,2; 2400)



**Obr. 4.3** Gaussovo rozdělení pro vzorek broušení (0,2; 2400) s délkou částic  $\geq 10 \mu\text{m}$

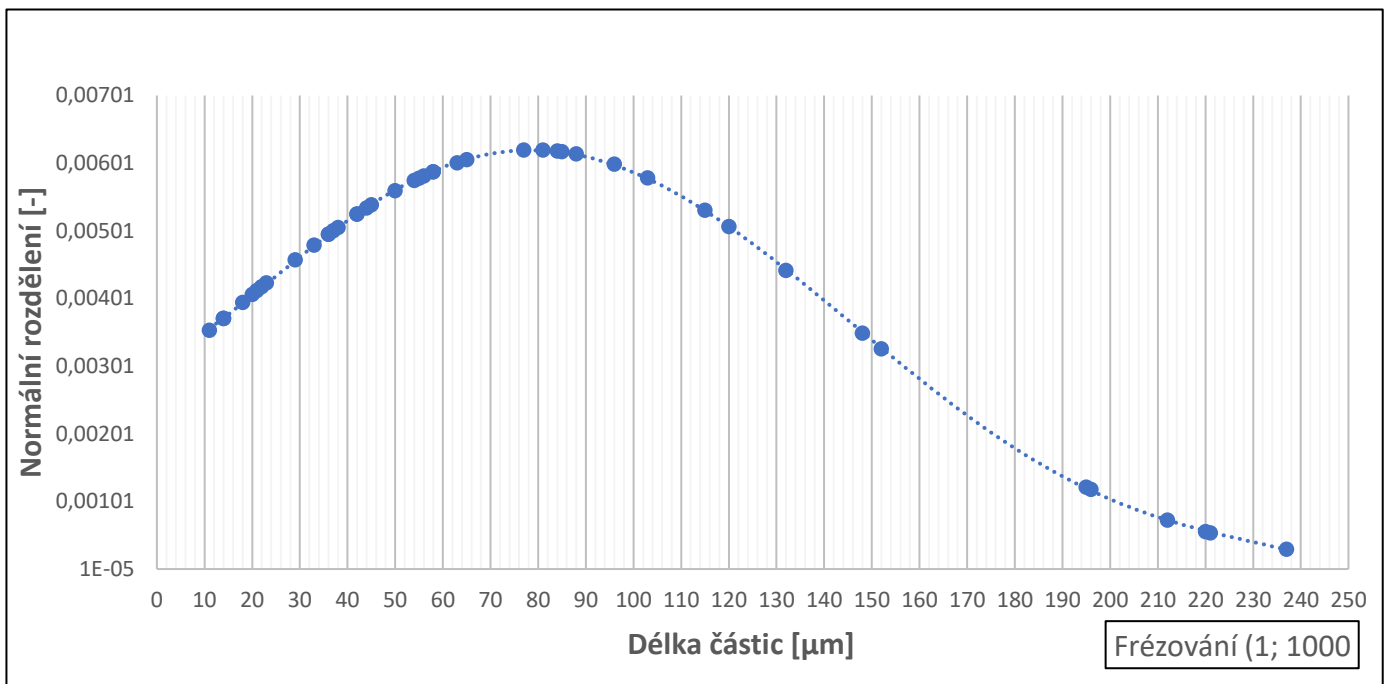


**Obr. 4.4** Snímek vzorku broušení (0,2; 2400) s délkou částic  $\geq 10 \mu\text{m}$  zachycený na OEM s analyzováním délek vlákných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

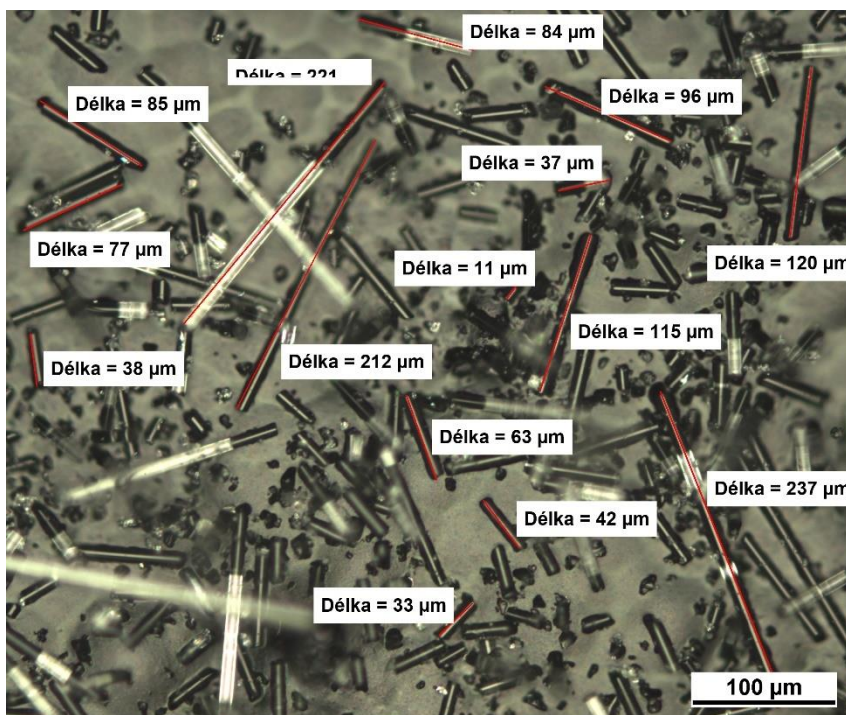
Vzorek 1 – broušení (0,2; 2400) měl největší počet vláken s hodnotou 43  $\mu\text{m}$ . Vlákno s nejdelší délkou měřilo 104  $\mu\text{m}$ , směrodatná odchylka byla 21,8.



Druhý vzorek byl vzorek 2 – frézování (1; 1000)



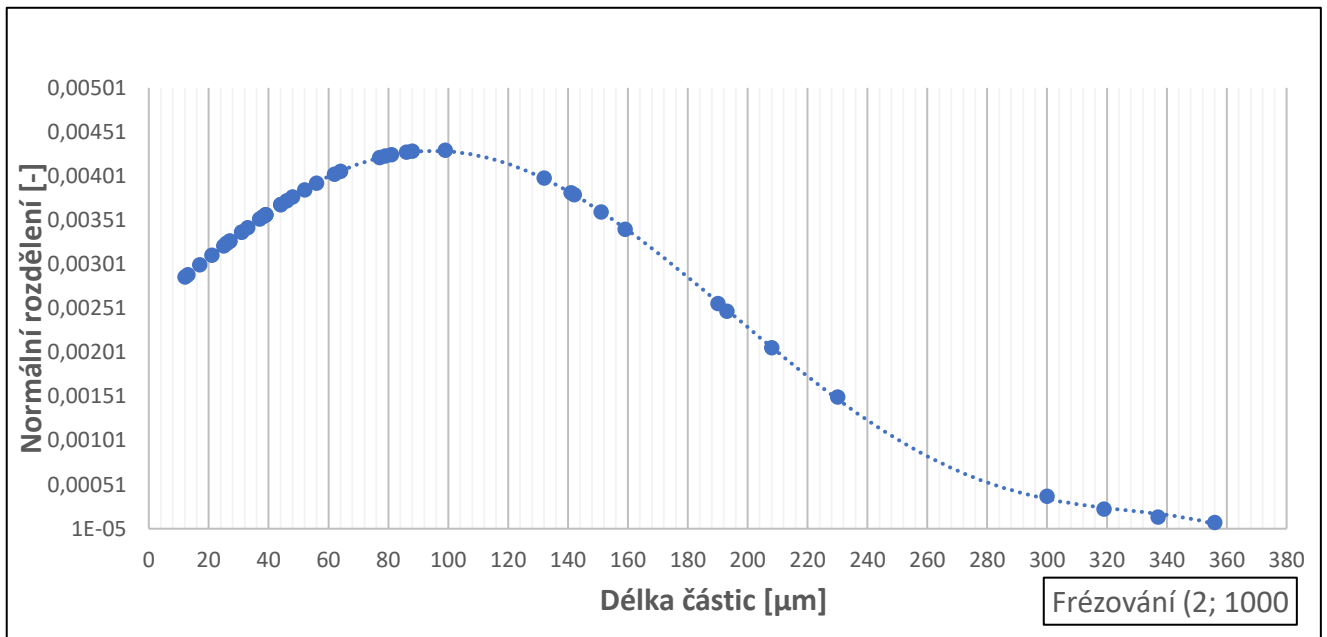
Obr. 4.3 Gaussovo rozdělení pro vzorek frézování (1; 1000) s délkou částic  $\geq 10 \mu\text{m}$



Obr. 4.4 Snímek vzorku frézování (1 ;1000) s délkou částic  $\geq 10 \mu\text{m}$  zachycený na OEM s analyzováním délek vláknenných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

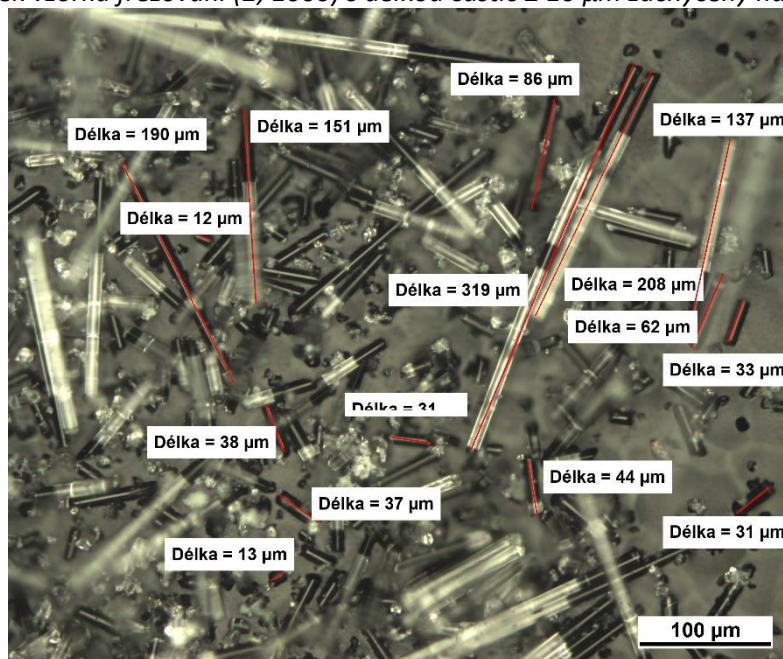
Vzorek 2 – frézování (1; 1000) měl největší počet vláken s hodnotou 79,1  $\mu\text{m}$  a nejdelší vlákno dosahovalo hodnoty 237  $\mu\text{m}$ , směrodatná odchylka byla 63,6.

Třetím byl vzorek 3 – frézování (2; 1000)



**Obr. 4.5** Gaussovo rozdělení pro vzorek frézování (2; 1000) s délkou částic  $\geq 10 \mu\text{m}$

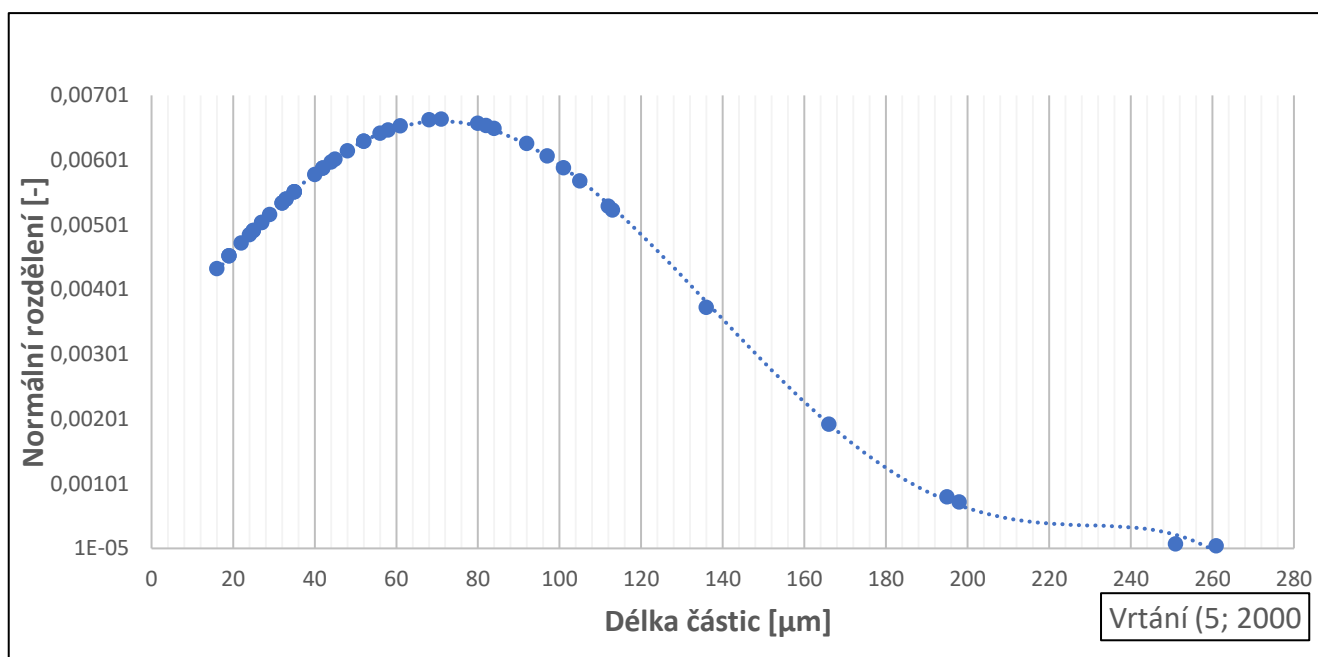
**Obr. 4.6** Snímek vzorku frézování (2; 1000) s délkou částic  $\geq 10 \mu\text{m}$  zachycený na OEM s analyzováním



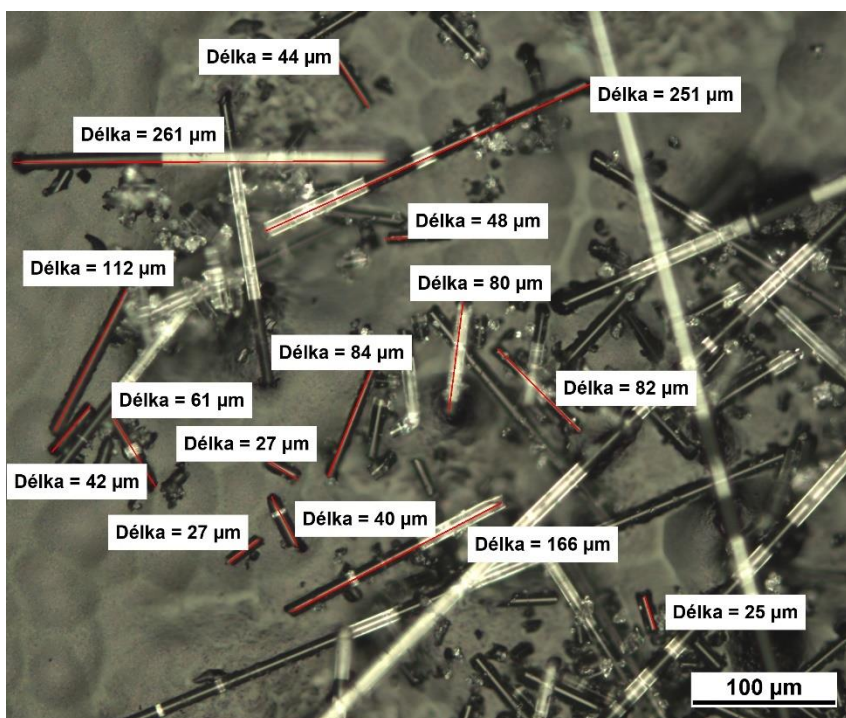
délek vlákných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

Vzorek 3 – frézování (2; 1000) měl největší počet vláken s hodnotou  $95,6 \mu\text{m}$  a nejdelší vlákno dosahovalo hodnoty  $356 \mu\text{m}$ , směrodatná odchylka byla  $91,6$ .

Čtvrtý byl vzorek 4 – vrtání (5; 2000)



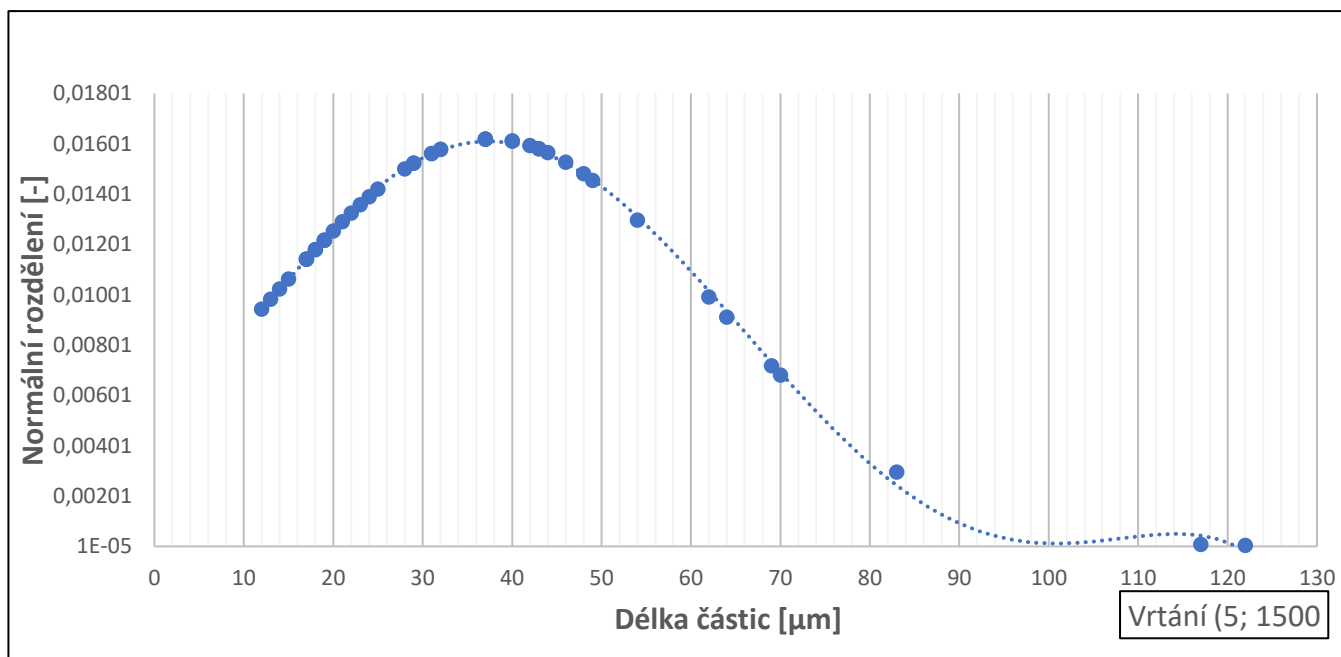
Obr. 4.7 Gaussovo rozdělení pro vzorek vrtání (5; 2000) s délkou částic  $\geq 10 \mu\text{m}$



Obr. 4.8 Snímek vzorku vrtání (5; 2000) s délkou částic  $\geq 10 \mu\text{m}$  zachycený na OEM s analyzováním délek vlákněných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

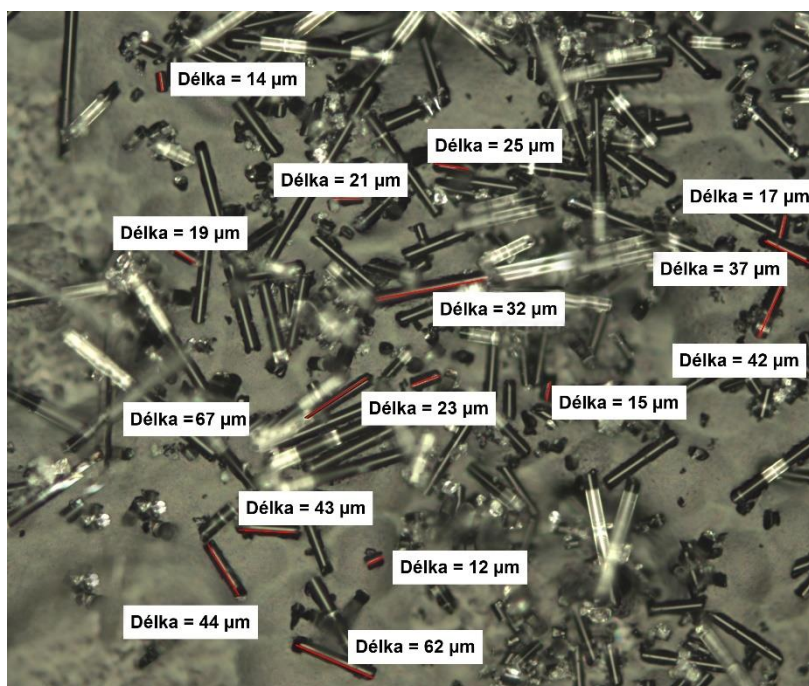
Vzorek 4 – vrtání (5; 2000) měl největší počet vláken s hodnotou 71,5 μm a nejdelší vlákno dosahovalo hodnoty 261 μm, směrodatná odchylka byla 59,4.

Pátý vzorkem byl vzorek 5 – vrtání (5; 1500)



**Obr. 4.9** Gaussovo rozdělení pro vzorek vrtání (5; 1500) s délkou částic  $\geq 10 \mu\text{m}$

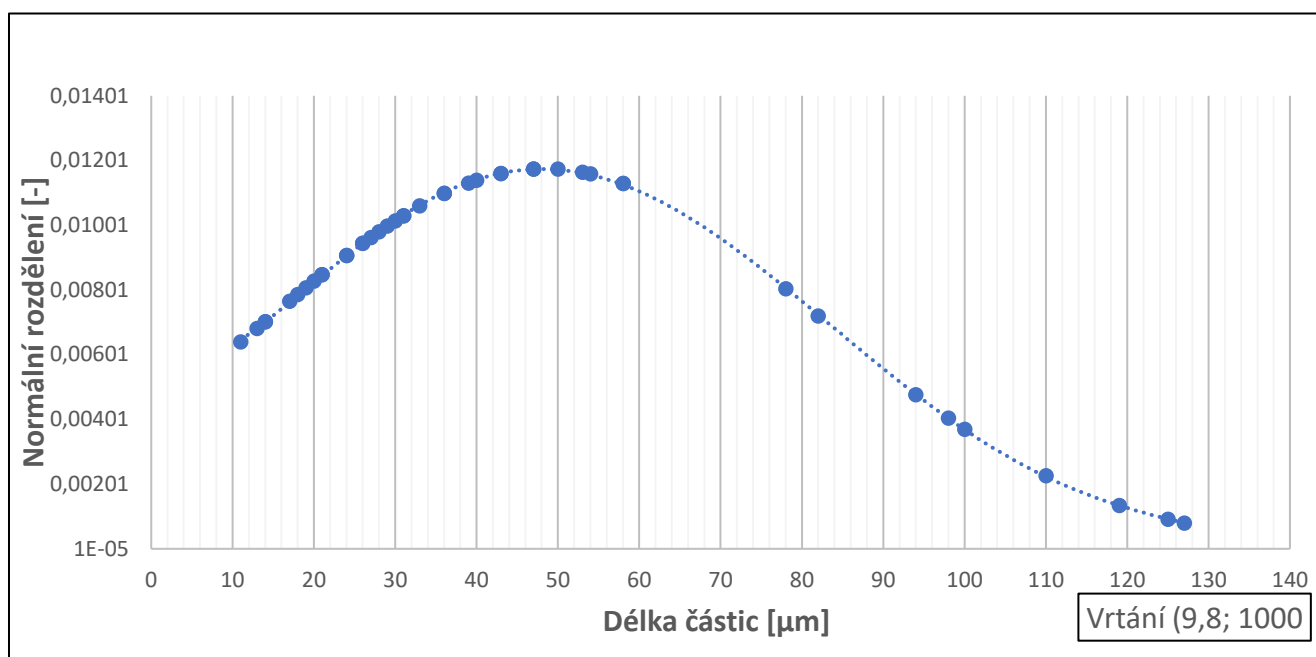
**Obr. 4.10** Snímek vzorku vrtání (5; 1500) s délkou částic  $\geq 10 \mu\text{m}$  zachycený na OEM s analyzováním



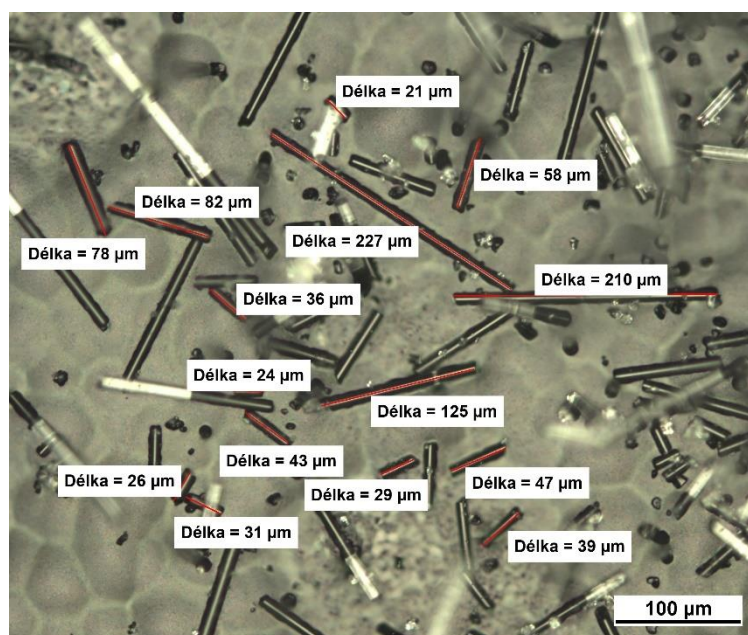
délek vlákněných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

Vzorek 5 – vrtání (5; 1500) měl největší počet vláken s hodnotou 38,1  $\mu\text{m}$  a nejdelší vlákno dosahovalo hodnoty 122  $\mu\text{m}$ , směrodatná odchylka byla 24,3.

Šestý vzorek byl vzorek 6 – vrtání (9,8; 1000)



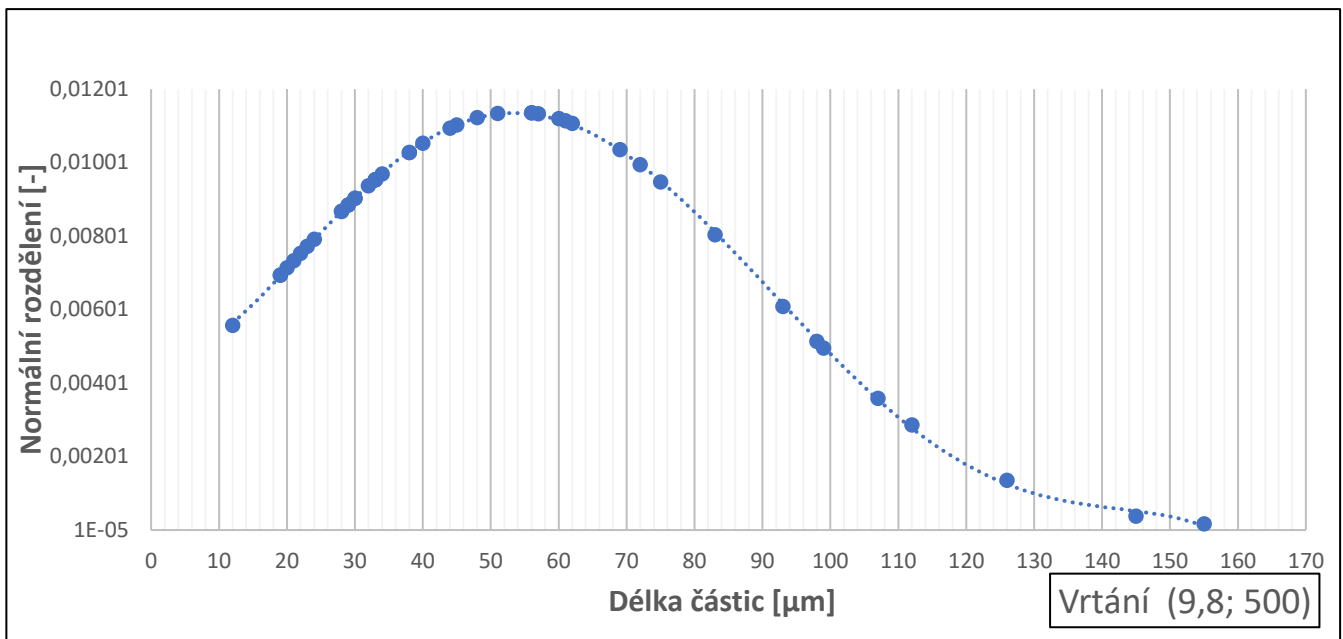
**Obr. 4.11** Gaussovo rozdělení pro vzorek vrtání (9,8; 1000) s délkou částic  $\geq 10 \mu\text{m}$



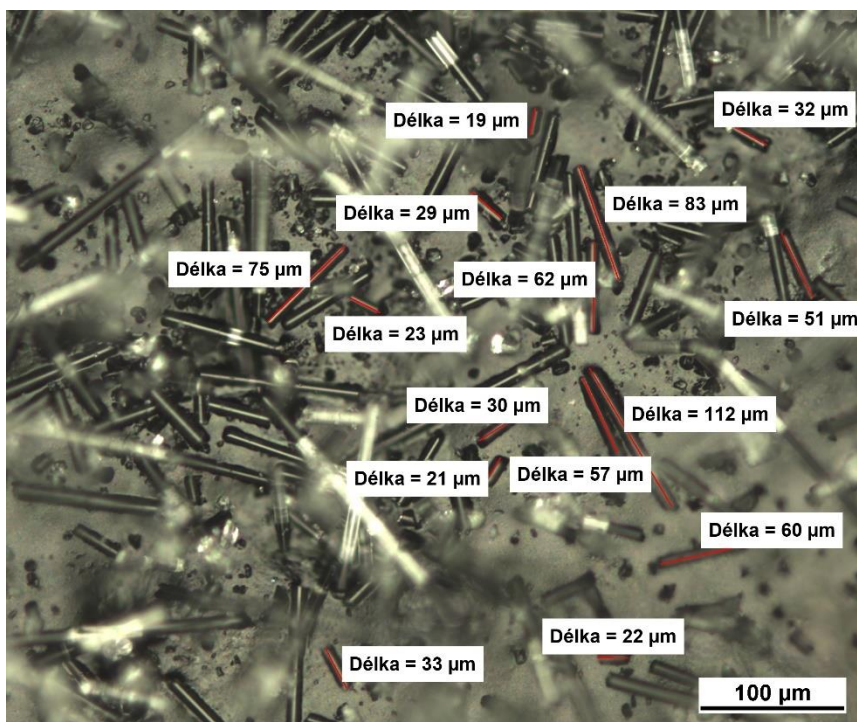
**Obr. 4.12** Snímek vzorku vrtání (9,8; 1000) s délkou částic  $\geq 10 \mu\text{m}$  zachycený na OEM s analyzováním délek vlákněných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

Vzorek 6 – vrtání (9,8; 1000) měl největší počet vláken s hodnotou 48,4  $\mu\text{m}$  a nejdelší vlákno dosahovalo hodnoty 127  $\mu\text{m}$ , směrodatná odchylka byla 33,6.

Sedmý vzorek byl vzorek 7 – vrtání (9,8; 500)



**Obr. 4.11** Gaussovo rozdělení pro vzorek vrtání (9,8; 500) s délkou částic  $\geq 10 \mu\text{m}$

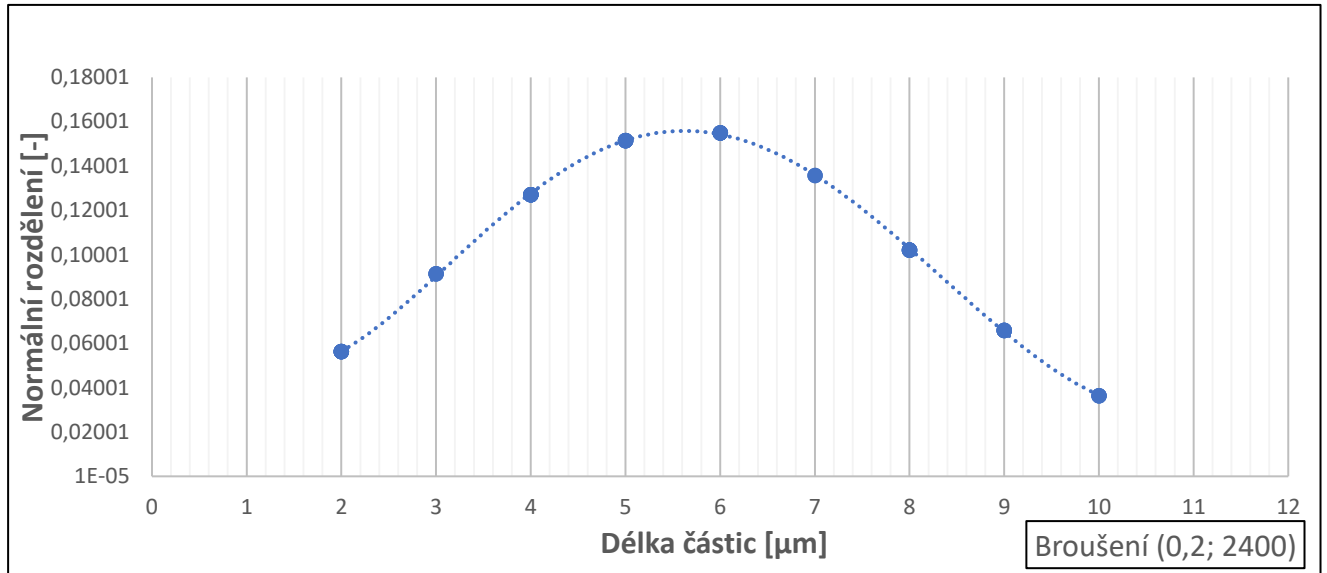


**Obr. 4.14** Snímek vzorku vrtání (9,8; 500) s délkou částic  $\geq 10 \mu\text{m}$  zachycený na OEM s analyzováním délek vlákněných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

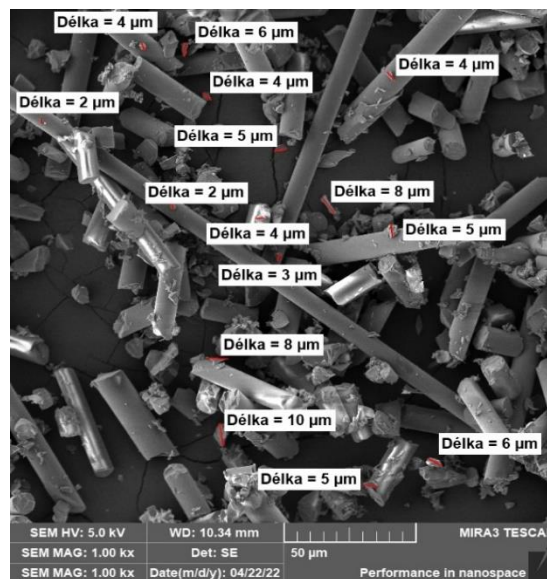
Vzorek 7 – vrtání (9,8; 500) měl největší počet vláken s hodnotou  $53,8 \mu\text{m}$  a nejdelší vlákno dosahovalo hodnoty  $155 \mu\text{m}$ , směrodatná odchylka byla  $34,6$ .

## 4.2 Analyzování vzorků s délkou částic 2 - 10 $\mu\text{m}$

První vzorek k analyzování délek vláken v byl **vzorek 1 – broušení (0,2; 2400)**



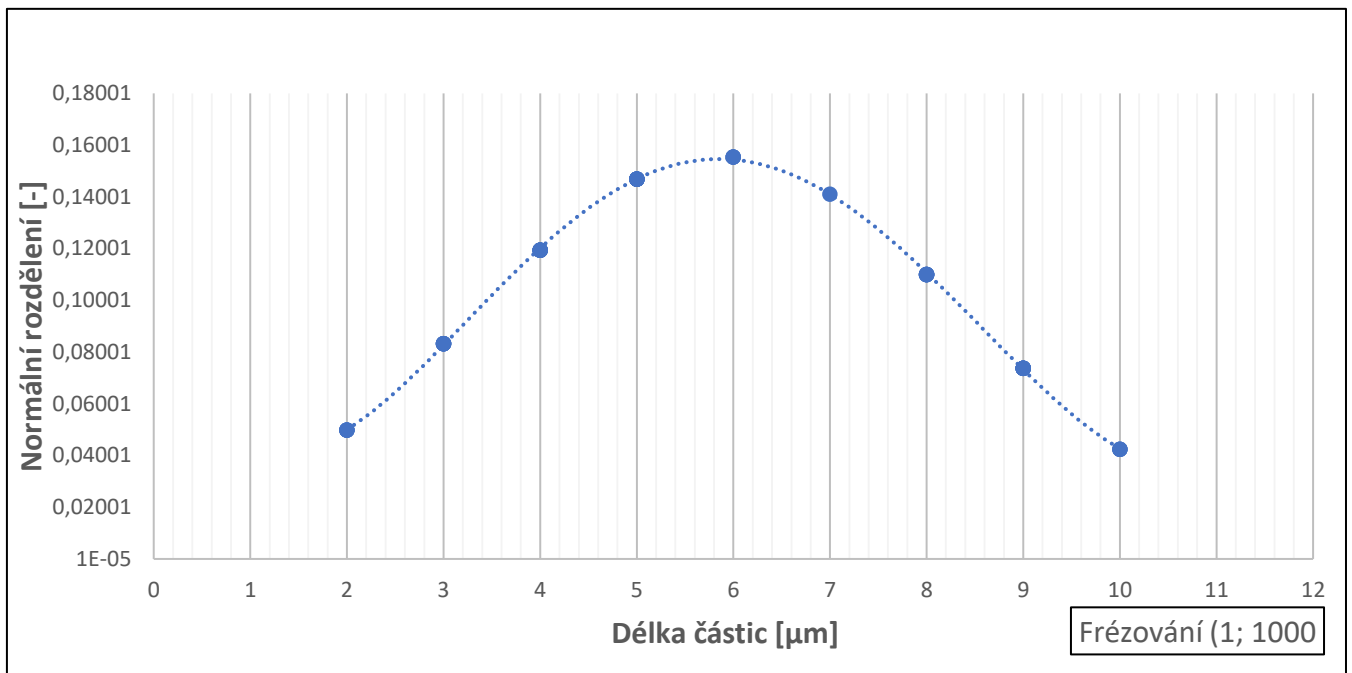
**Obr. 4.15** Gaussovo rozdělení pro vzorek **broušení (0,2; 2400)**



**Obr. 4.16** Snímek vzorku **broušení (0,2; 2400)** zachycený na SEM a následným analyzováním délek vláknenných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

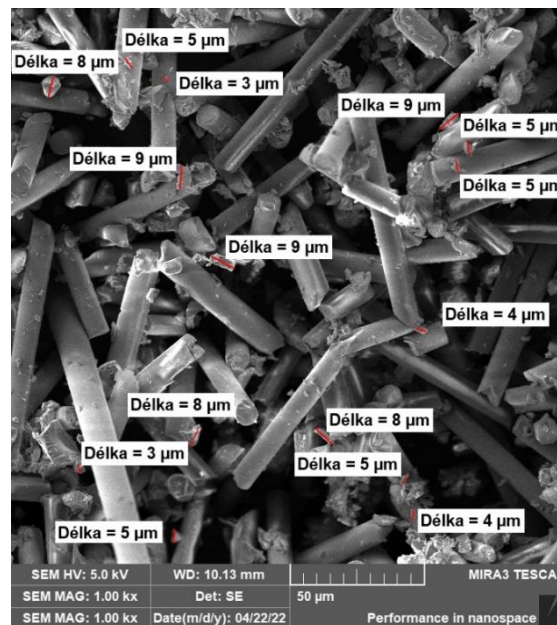
Vzorek 1 – broušení (0,2; 2400) měl největší počet vláken s hodnotou 5,6  $\mu\text{m}$ , směrodatná odchylka 2,52.

Dalším vzorek k analyzování byl **vzorek 2 – frézování (1; 1000)**



**Obr. 4.17** Gaussovo rozdělení pro vzorek **frézování (1; 1000)**

**Obr. 4.18** Snímek vzorku **frézování (1; 1000)** zachycený na SEM a následným analyzováním délek

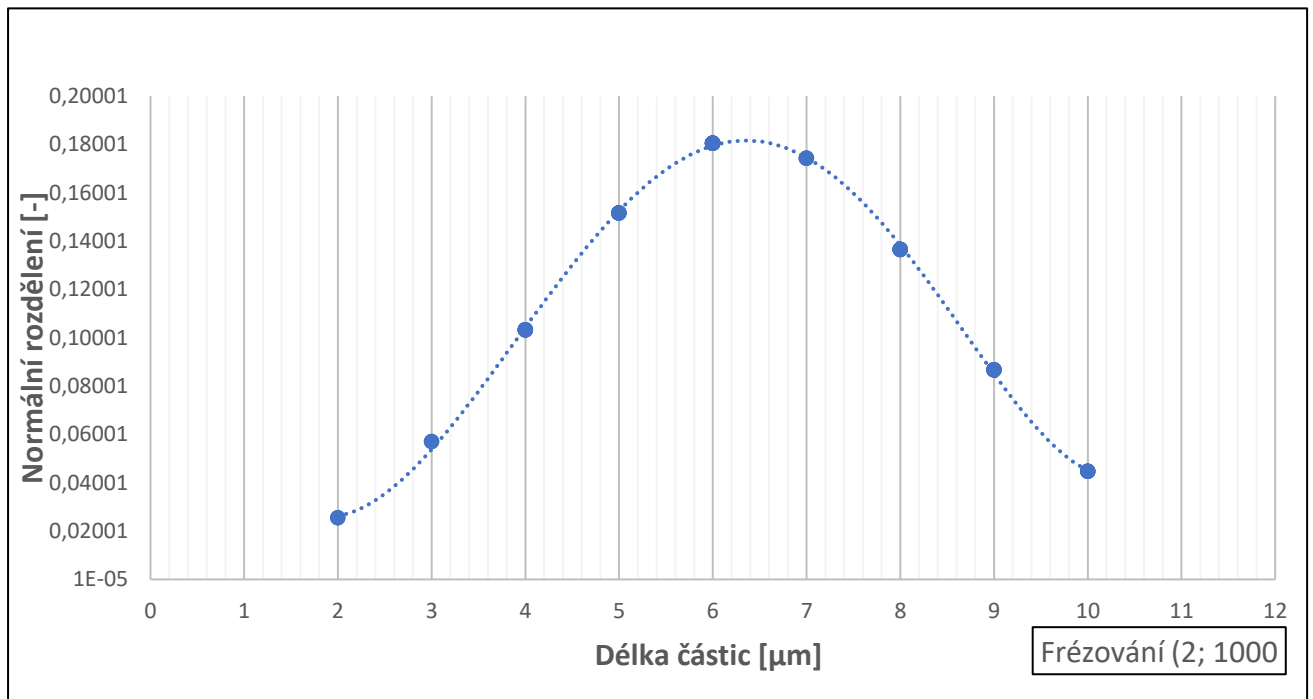


*vlákenných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR*

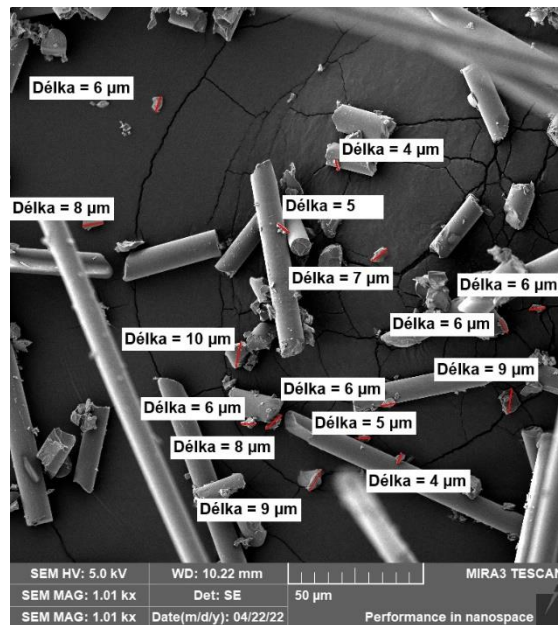
Vzorek 2 – frézování (1; 1000) měl největší počet vláken s hodnotou 5,9  $\mu\text{m}$ , směrodatná odchylka 2,54.



Následoval vzorek 3 – frézování (2; 1000)

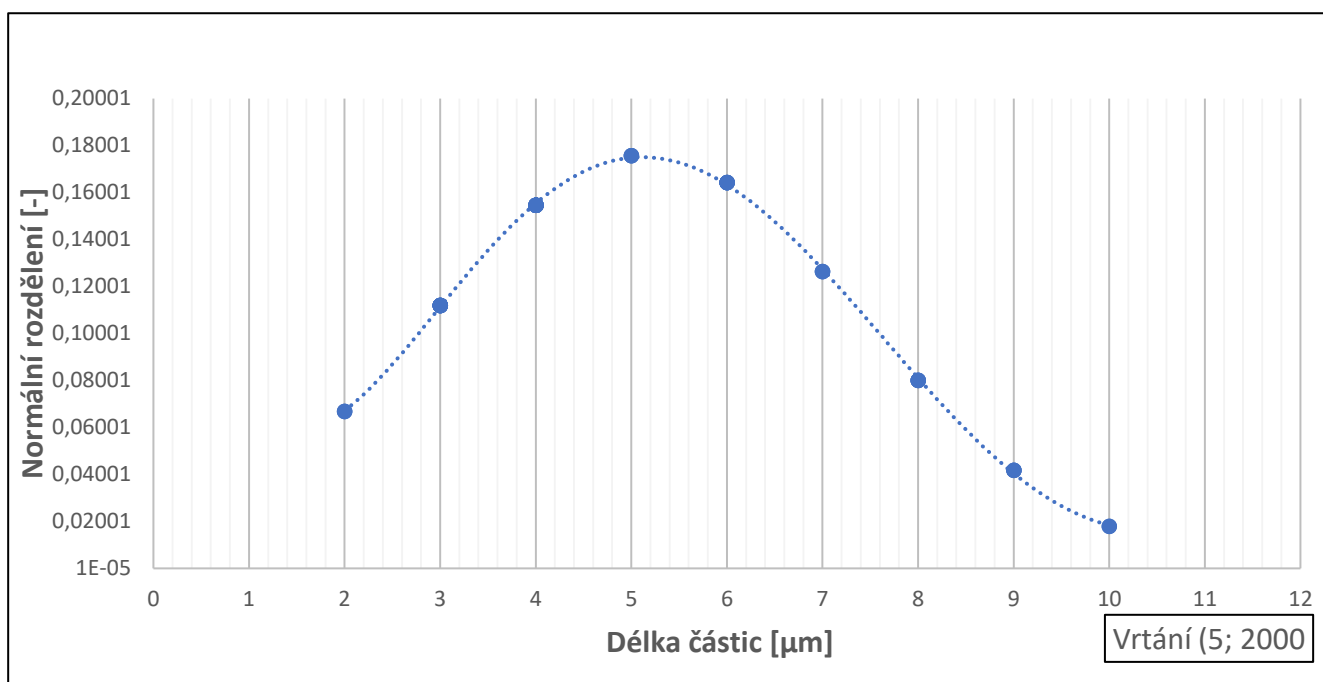


Obr. 4.19 Gaussovo rozdělení pro vzorek frézování (2; 1000)

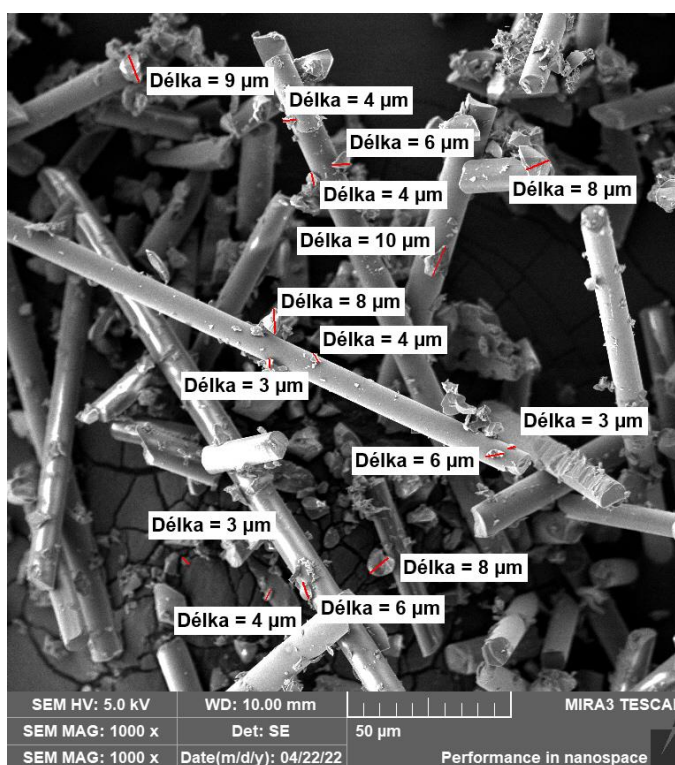


Vzorek 3 – frézování (2; 1000) měl největší počet vláken s hodnotou 6,3  $\mu\text{m}$ , směrodatná odchylka 2,16.

Další byl vzorek 4 – vrtání (5; 2000)



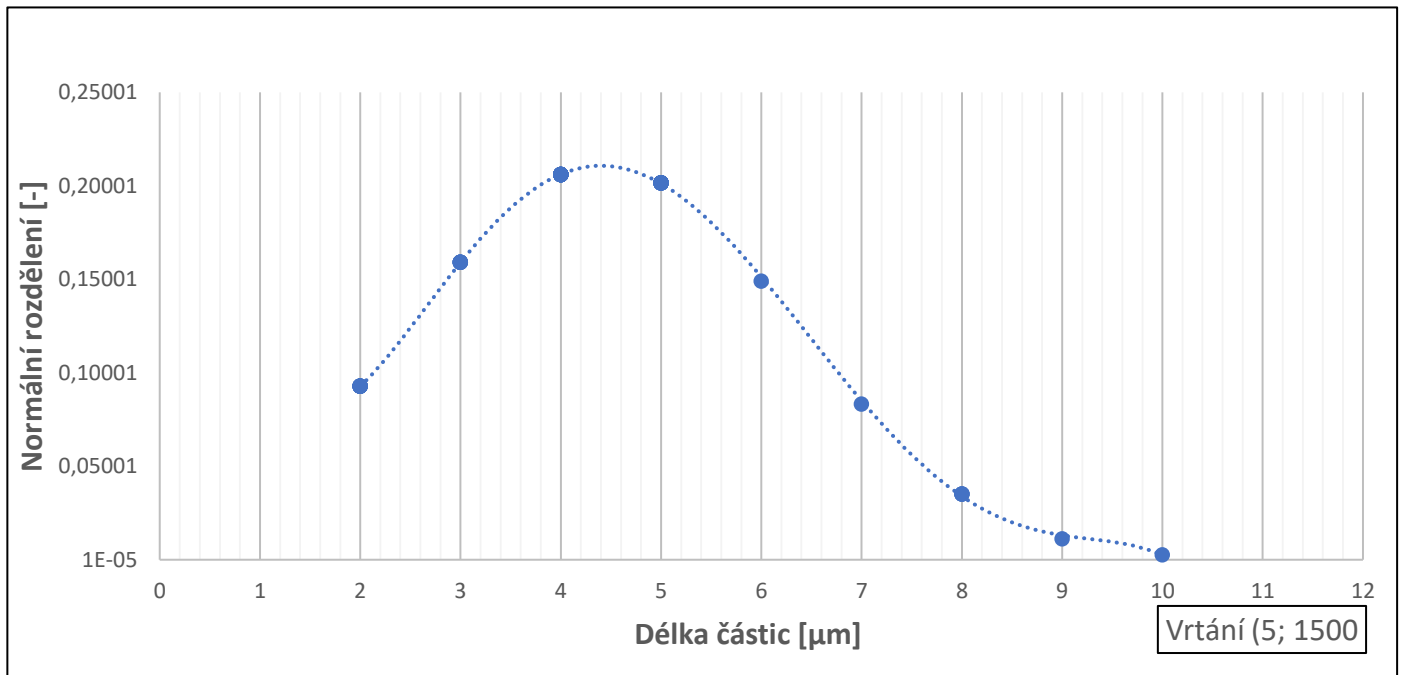
Obr. 4.21 Gaussovo rozdělení pro vzorek vrtání (5; 2000)



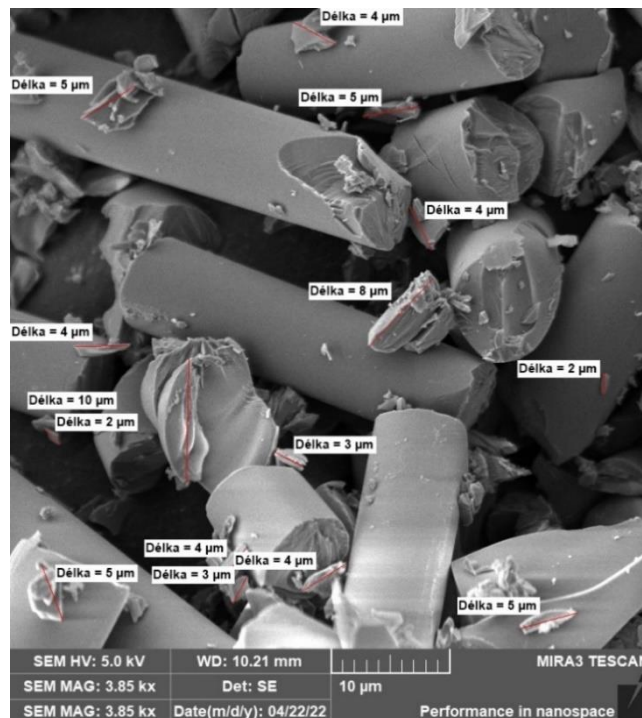
Obr. 4.22 Snímek vzorku vrtání (5; 2000) zachycený na SEM a následným analyzováním délek vláknenných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

Vzorek 4 – vrtání (5; 2000) měl největší počet vláken s hodnotou 5,1 μm, směrodatná odchylka 2,24.

Další byl vzorek 5 – vrtání (5; 1500)



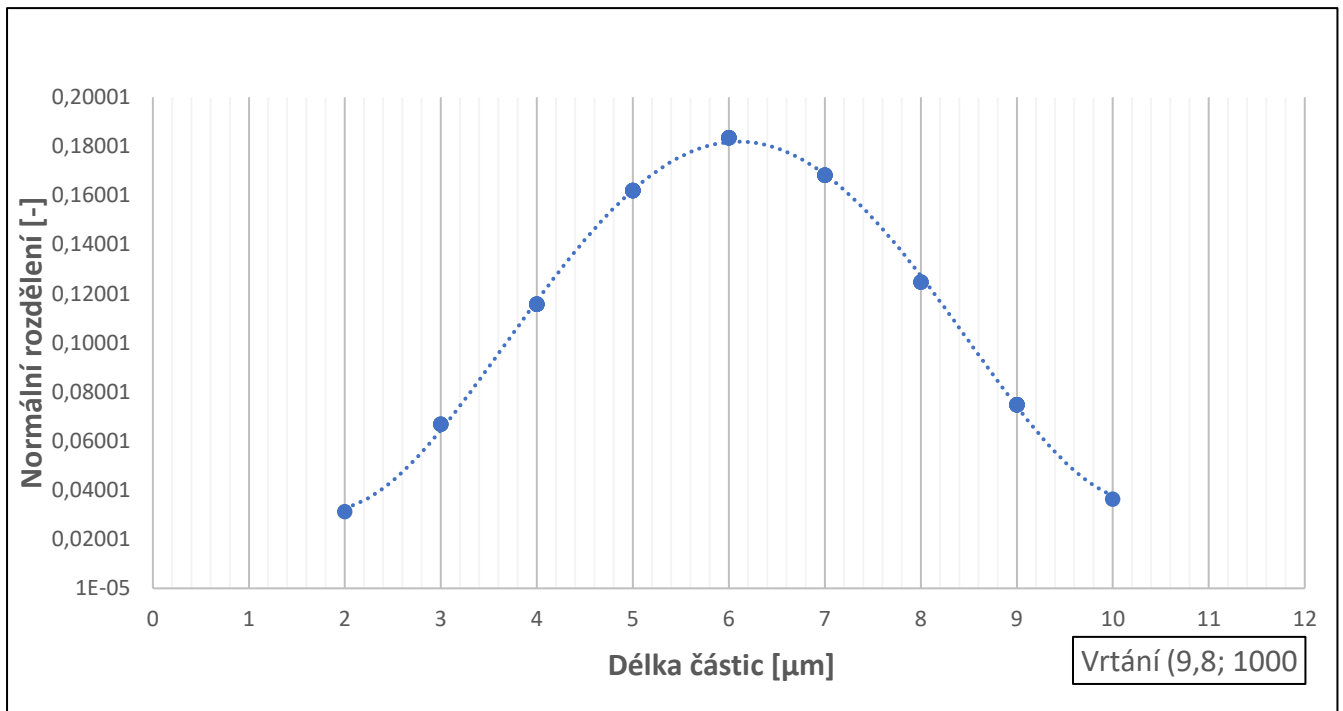
**Obr. 4.23** Gaussovo rozdělení pro vzorek *vrtání (5; 1500)*



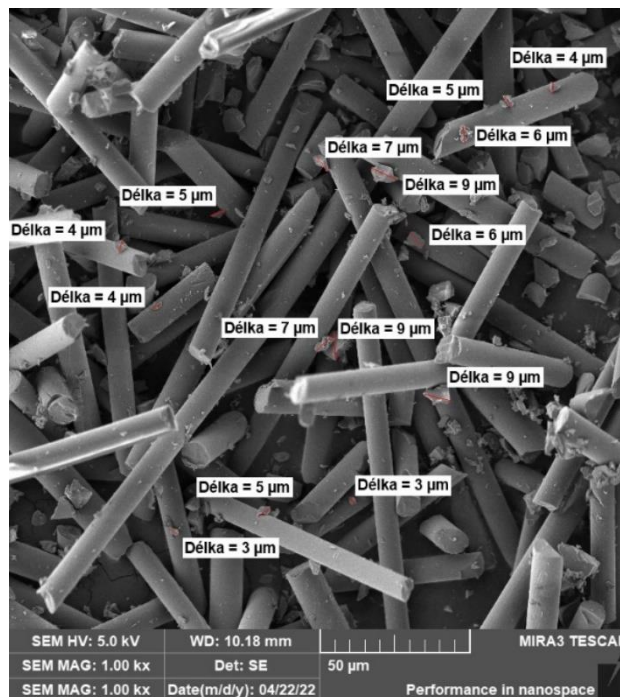
**Obr. 4.24** Snímek vzorku *vrtání (5; 1500)* zachycený na SEM a následným analyzováním délek vláknenných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

Vzorek 5 – vrtání (5; 1500) měl největší počet vláken s hodnotou 4,4 μm, směrodatná odchylka 1,87.

Další byl vzorek 6 – vrtání (9,8; 1000)



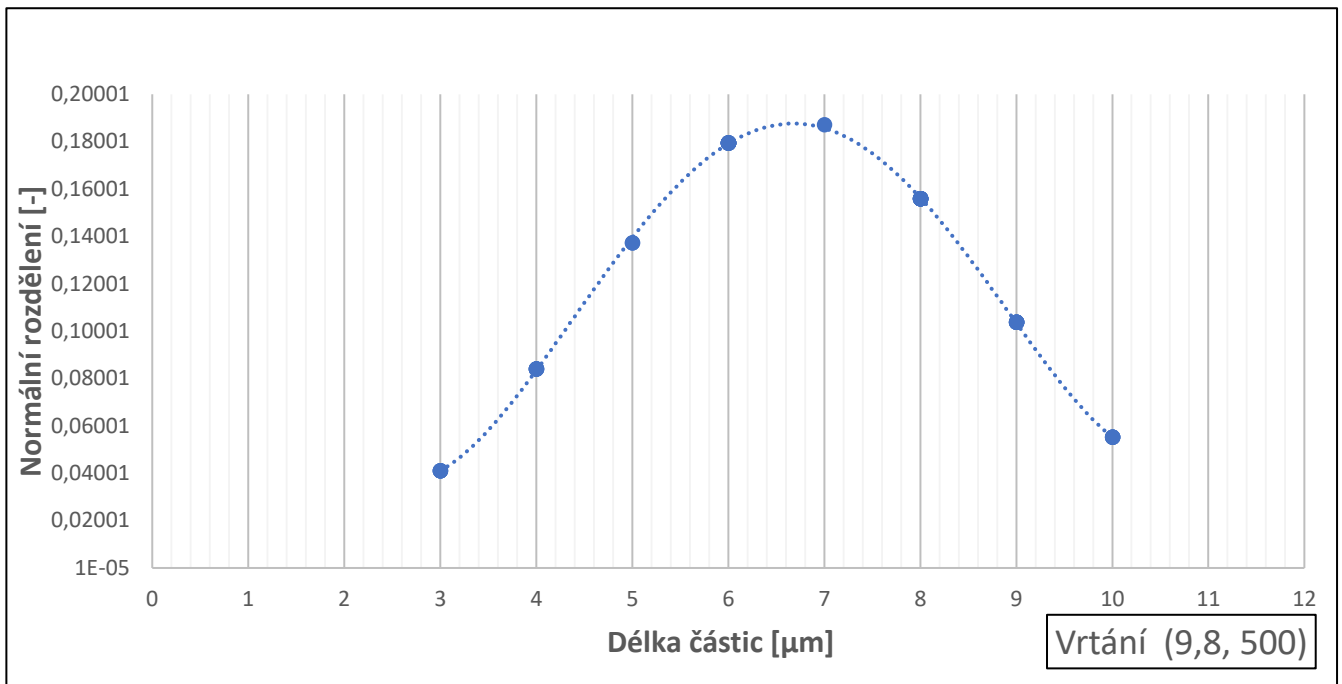
Obr. 4.25 Gaussovo rozdělení pro vzorek vrtání (9,8; 1000)



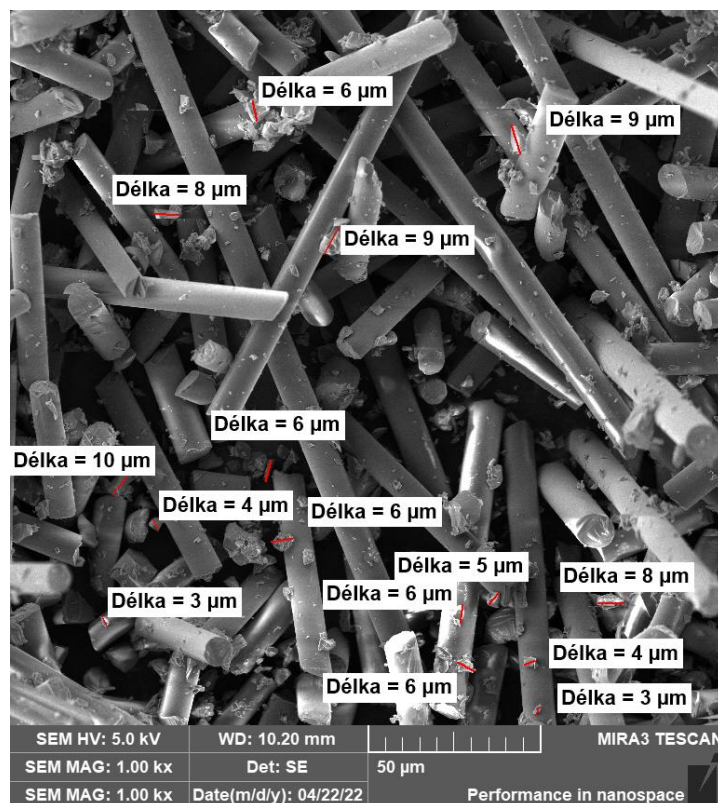
Obr. 4.26 Snímek vzorku vrtání (9,8; 1000) zachycený na SEM a následným analyzováním délek vláknenných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

Vzorek 6 – vrtání (9,8; 1000) měl největší počet vláken s hodnotou 6,1 μm, směrodatná odchylka 2,15.

Poslední vzorek byl vzorek 7 – vrtání (9,8; 500)



Obr. 4.25 Gaussovo rozdělení pro vzorek vrtání (9,8; 500)

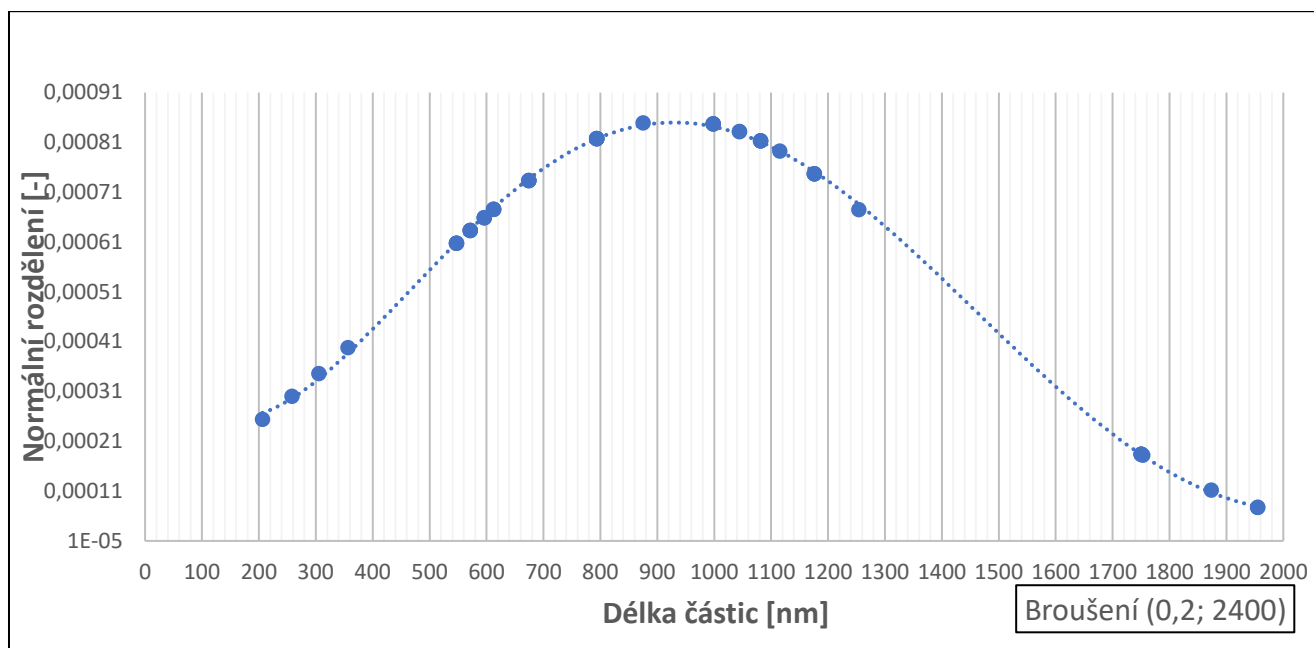


Obr. 4.26 Snímek vzorku vrtání (9,8; 500) zachycený na SEM a následným analyzováním délek vlákněných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

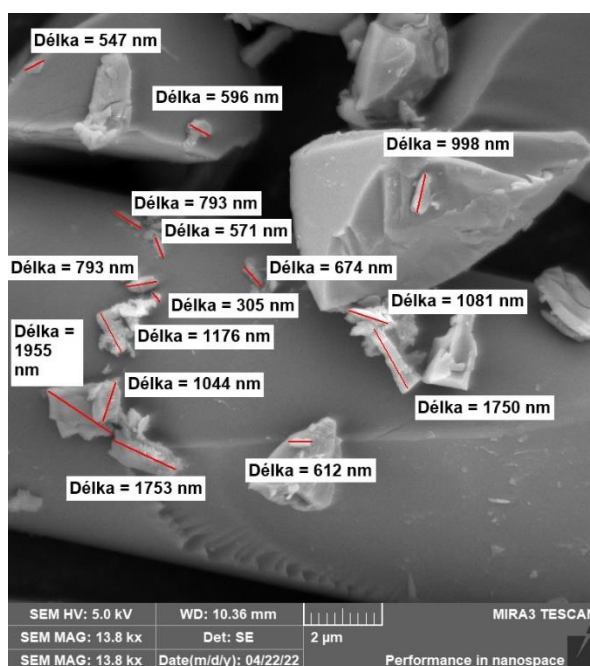
Vzorek 7 – vrtání (9,8; 500) měl největší počet vláken s hodnotou 6,7 μm, směrodatná odchylka 2,09.

### 4.3 Analyzování vzorků s délkou částic 2 μm a menších

Prvním vzorkem byl vzorek 1 – broušení (0,2; 2400)



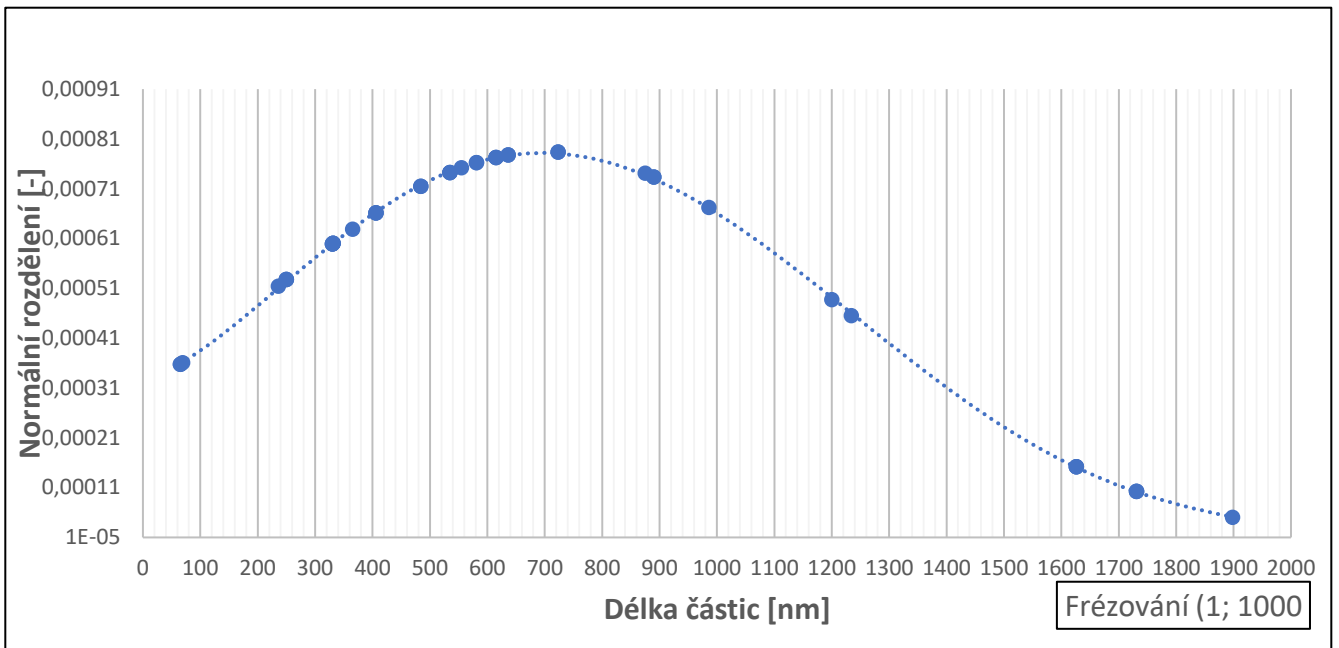
**Obr. 4.27** Gaussovo rozdělení pro vzorek **broušení (0,2; 2400)**



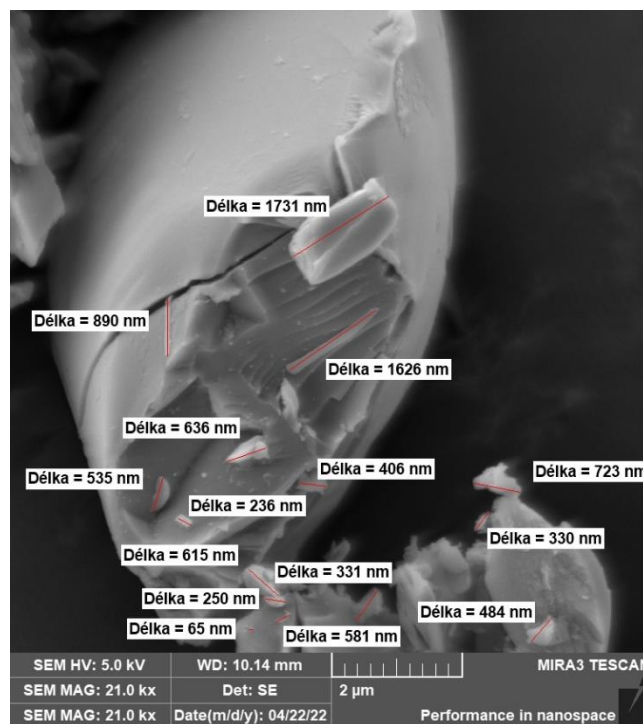
**Obr. 4.28** Snímek vzorku **broušení (0,2; 2400)** zachycený na SEM a následným analyzováním délek vlákněných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

Vzorek 1– broušení (0,2; 1000) měl největší počet vláken s hodnotou 933 nm, směrodatná odchylka byla 461 a nejkratší vlákno bylo dlouhé 206 nm.

Další byl zkoumaný vzorek 2 – frézování (1; 1000)



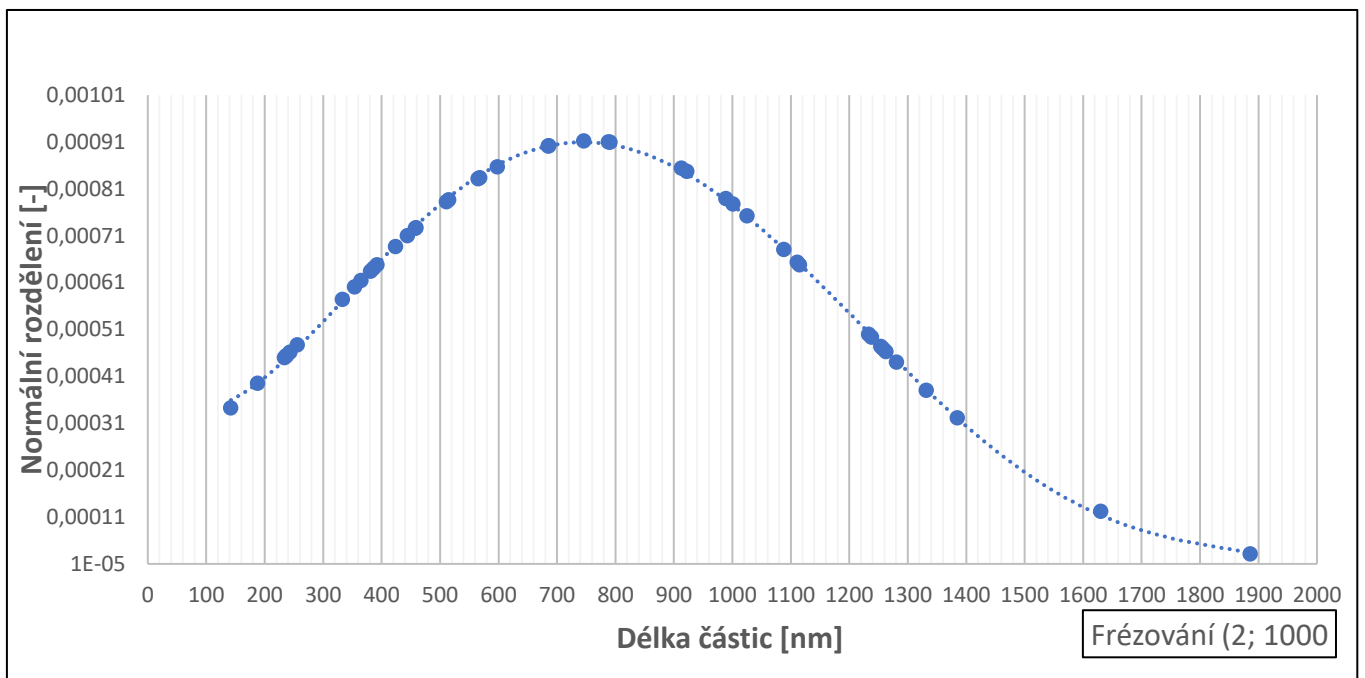
Obr. 4.29 Gaussovo rozdělení pro vzorek frézování (1; 1000)



Obr. 4.30 Snímek vzorku frézování (1; 1000) zachycený na SEM a následným analyzováním délek vláknenných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

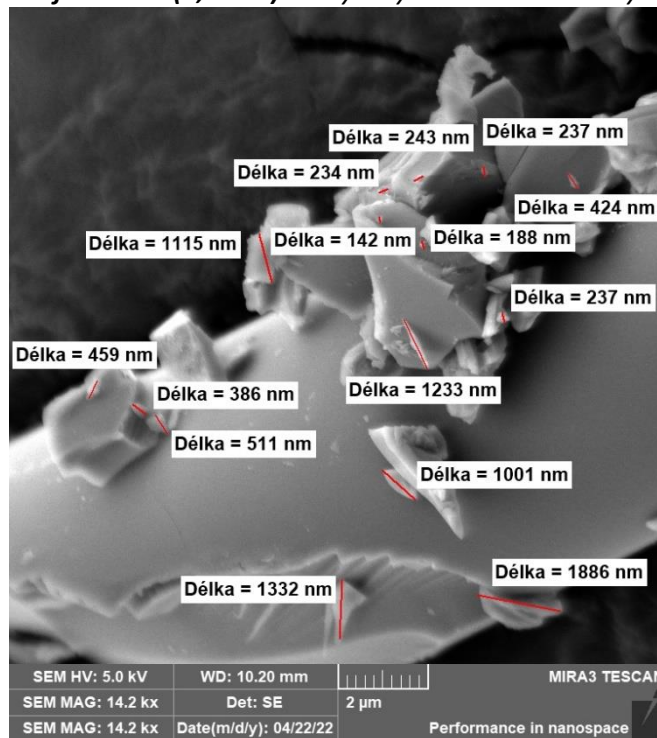
Vzorek 2 – frézování (1; 1000) měl největší počet vláken s hodnotou 703 nm, směrodatná odchylka byla 508 a nejkratší vlákno bylo dlouhé 65 nm.

Následoval vzorek 3 – frézování (2; 1000)



**Obr. 4.31** Gaussovo rozdělení pro vzorek frézování (2; 1000)

**Obr. 4.32** Snímek vzorku frézování (2; 1000) zachycený na SEM a následným analyzováním délek

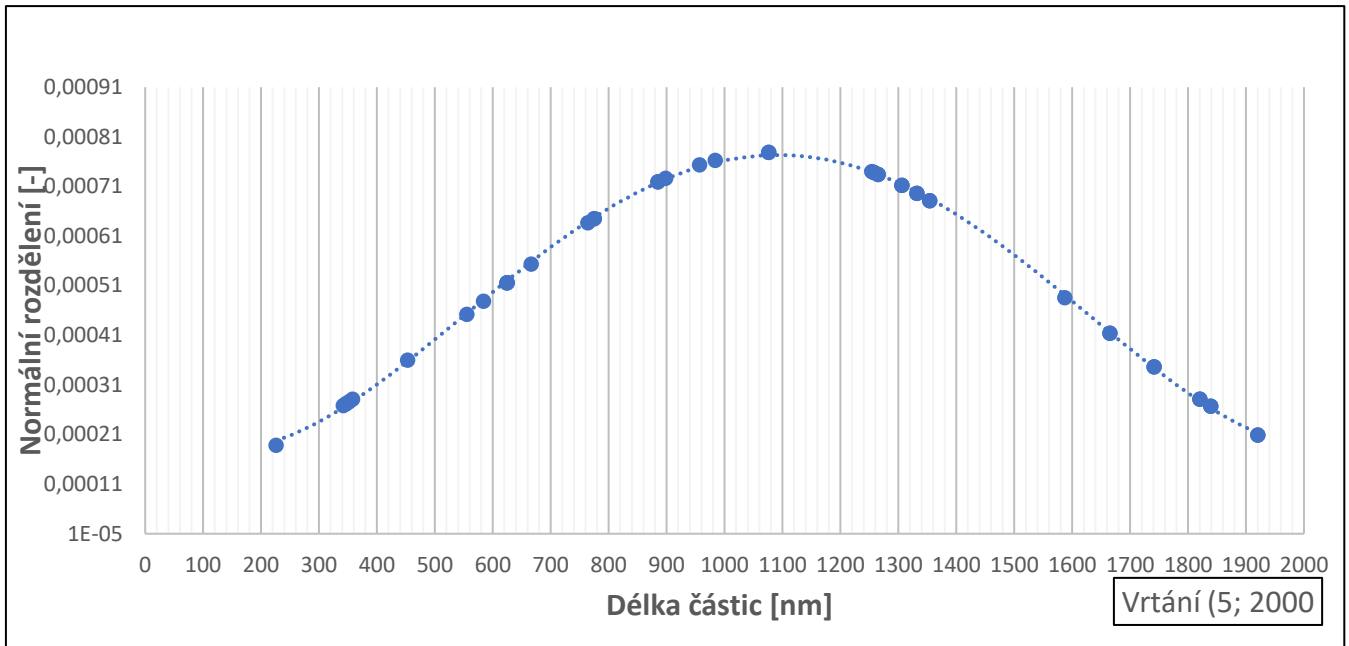


vlákenných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

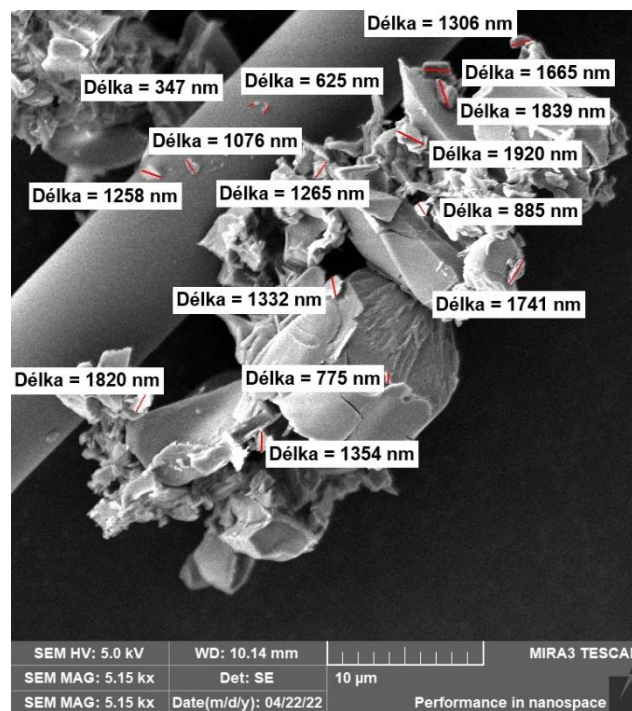
Vzorek 3 – frézování (2; 1000) měl největší počet vláken s hodnotou 753 nm, směrodatná odchylka byla 432 a nejkratší vlákno bylo dlouhé 142 nm



Další byl analyzován vzorek 4 – vrtání (5; 2000)



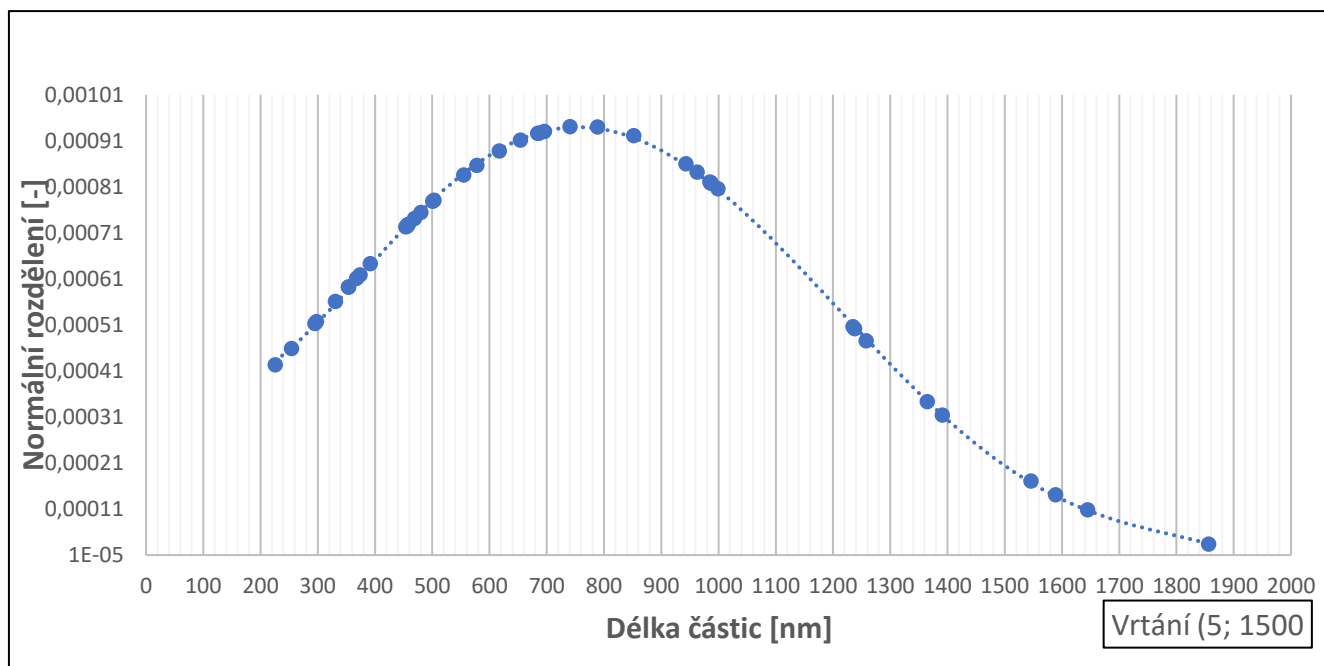
Obr. 4.33 Gaussovo rozdělení pro vzorek vrtání (5; 2000)



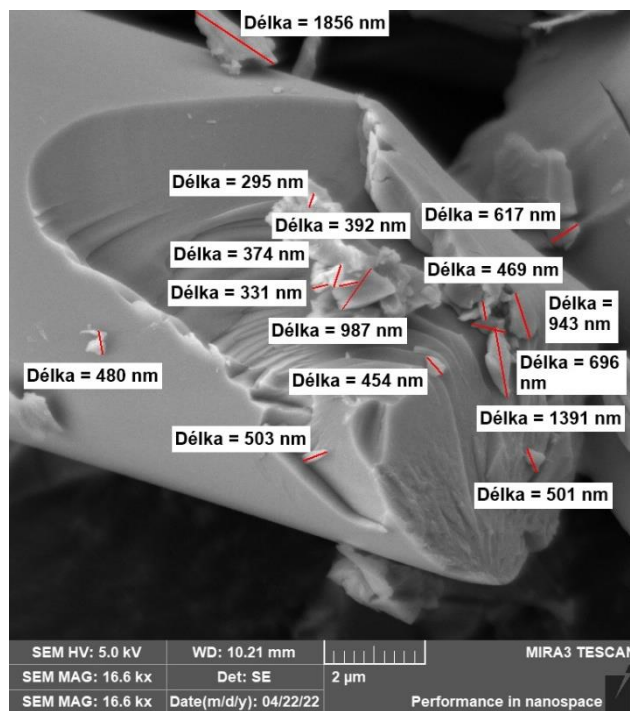
Obr. 4.34 Snímek vzorku vrtání (5; 2000) zachycený na SEM a následným analyzováním délek vláknenných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

Vzorek 4 – vrtání (5; 2000) měl největší počet vláken s hodnotou 1089 nm, směrodatná odchylka byla 506 a nejkratší vlákno bylo dlouhé 226 nm.

Následně byl analyzován vzorek 5 – vrtání (5; 1500)



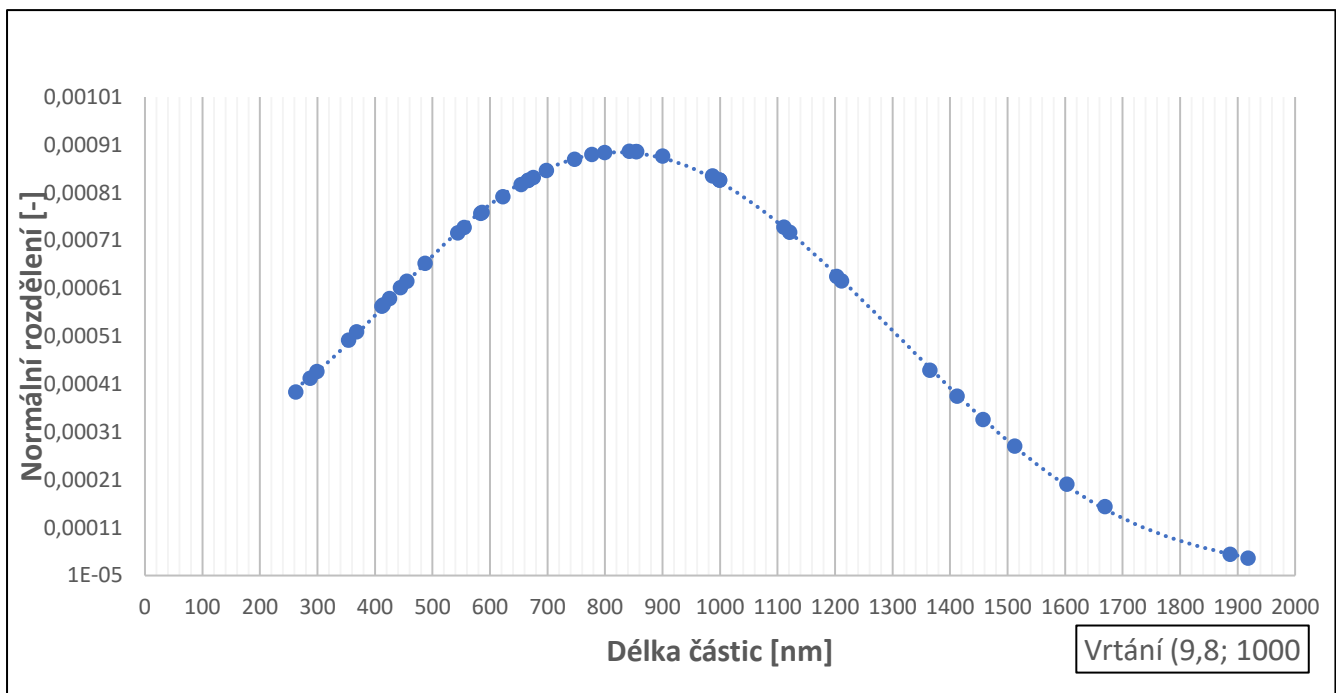
**Obr. 4.35** Gaussovo rozdělení pro vzorek *vrtání (5; 1500)*



**Obr. 4.36** Snímek vzorku *vrtání (5; 1500)* zachycený na SEM a následným analyzováním délek vláknenných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

Vzorek 5 – vrtání (5; 1500) měl největší počet vláken s hodnotou 762 nm, směrodatná odchylka byla 419 a nejkratší vlákno bylo dlouhé 226 nm.

Dalším vzorkem byl vzorek 6 – vrtání (9,8; 1000)



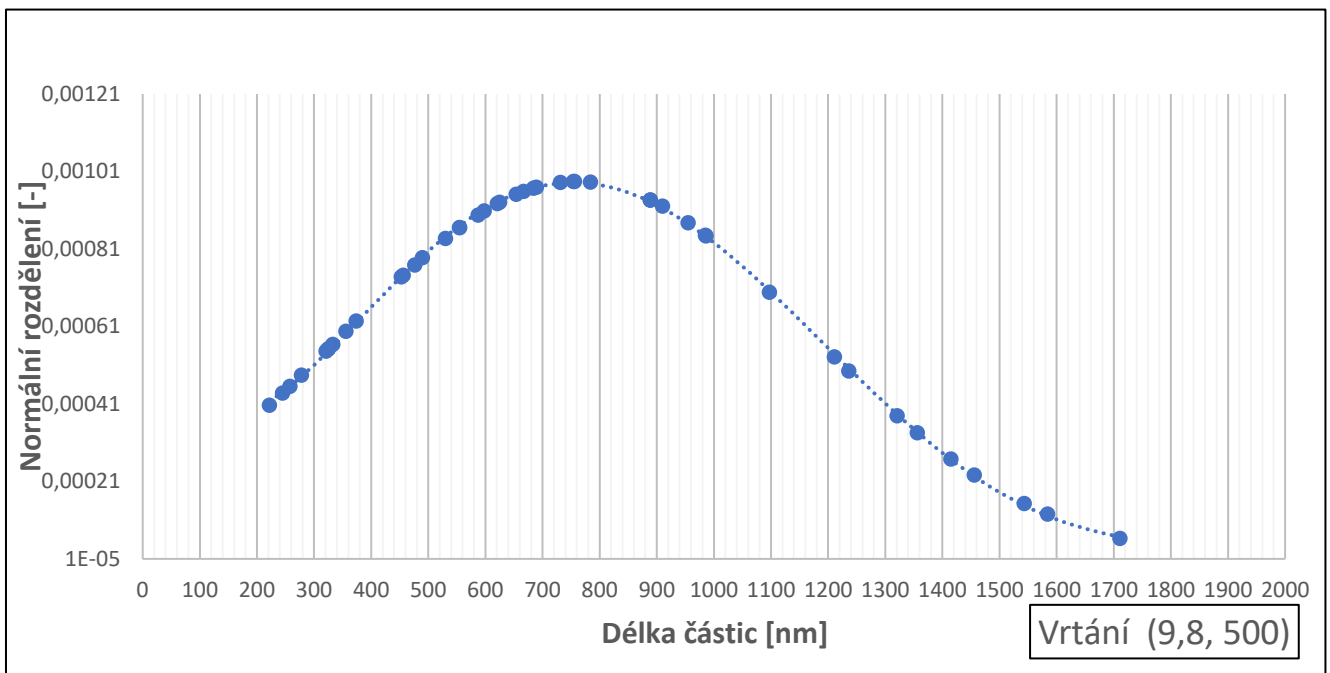
Obr. 4.37 Gaussovo rozdělení pro vzorek vrtání (9,8; 1000)



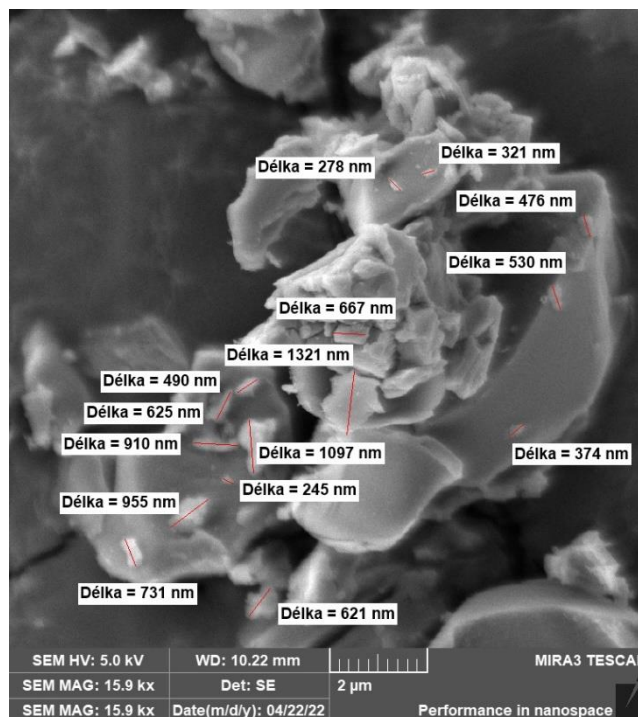
Obr. 4.38 Snímek vzorku vrtání (9,8; 1000) zachycený na SEM a následným analyzováním délek vlákněných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

Vzorek 6 – vrtání (9,8; 1000) měl největší počet vláken s hodnotou 833 nm, směrodatná odchylka byla 440 a nejkratší vlákno bylo dlouhé 262 nm.

Poslední byl analyzován vzorek 7 – vrtání (9,8; 500)



Obr. 4.39 Gaussovo rozdělení pro vzorek vrtání (9,8; 500)



Obr. 4.40 Snímek vzorku vrtání (9,8; 500) zachycený na SEM a následným analyzováním délek vlákněných částic pomocí softwaru NIS – ELEMENTS AR

Vzorek 7 – vrtání (9,8; 500) měl největší počet vláken s hodnotou 761 nm, směrodatná odchylka byla 400 a nejkratší vlákno bylo dlouhé 222 nm.

## 5 Diskuse

Hlavním cílem předložené práce bylo analyzovat a zkoumat destrukci vlákenných struktur při obrábění materiálů s epoxidovou matricí vyztuženou skelnou výztuží. Byly vybrány tři v praxi nejčastěji využívané obráběcí technologie pro vyztužené kompozitní materiály, konkrétně vrtání, broušení a frézování s konkrétními řeznými podmínkami.

Při experimentu bylo zjištěno, že při procesu obrábění kompozitních vzorků dochází (podle dané technologie a řezných podmínek) k tvorbě více či méně dlouhých částic a prachu z epoxidové pryskyřice a rovněž také ze skelných vláken.

Jemné prachové částičky z obrábění mohou mít vliv na obráběcí stroj (popř. stroje v blízkém okolí) z důvodu, že jemná skelná vlákna (mnohdy unášena vzduchem i několik metrů od místa obrábění) mají silně abrazivní funkci, kdy například při vniknutí do rotačních částí stroje mohou způsobovat rychlejší opotřebení jednotlivých částí stroje vlivem abrazivního otěru.

Významnější problémem částic vzniklých z obrábění kompozitů s vlákennou výztuží však vzniká z pohledu lidského zdraví a dlouhodobého dopadu na člověka. Největším problémem je inhalace vzniklých částic, kdy při obrábění mohou vznikat částice o velikosti 2  $\mu\text{m}$  a menší, které mohou způsobit potenciální zdravotní problémy pro člověka v blízkosti vzniku třísek.

Analýza délek destruovaných vláken byla navržena tak, aby reflektovala obecně uznávaná zdravotní hlediska, respektive vliv přítomnosti vláken v pracovním prostředí na možnost zdravotní závadnosti těchto částic, pokud se dostanou do živého organismu.

Na základě výše uvedených podkladů byly provedeny tři skupiny analýz, z nichž byly zjištěny následující výstupy, kde prvním jsou uvedeny částice vzniklé při různém obrábění a různých řezných podmínkách, které dosahují velikosti 10  $\mu\text{m}$  a delší.

**Tab. 5.1** Velikosti vláken, průměrné délky a směrodatná odchylka v jednotlivých technologiích obrábění s délkou vláken větších než 10  $\mu\text{m}$

	První oblast vláken				Druhá oblast vláken				Třetí oblast vláken			
	Nejkratší [ $\mu\text{m}$ ]	Nejdelší [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr [ $\mu\text{m}$ ]	Odchylka [-]	Nejkratší [ $\mu\text{m}$ ]	Nejdelší [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr [ $\mu\text{m}$ ]	Odchylka [-]	Nejkratší [ $\mu\text{m}$ ]	Nejdelší [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr [ $\mu\text{m}$ ]	Odchylka [-]
Broušení (0,2; 2400)	26	66	39,4	11,53	11	90	42,3	24,39	14	104	47,3	27,69
Frézování (1; 1000)	11	237	98,1	71,96	14	132	48,5	30,06	13	220	90,7	73,31
Frézování (2; 1000)	12	337	106,1	109,49	25	300	83,8	82,99	17	356	97,1	88,45
Vrtání (5; 2000)	25	261	90,2	77,14	22	195	64,6	49,13	16	198	60,1	49,18
Vrtání (5; 1500)	12	122	40,9	34,94	13	69	33,9	17,48	17	83	39,4	18,34
Vrtání (9,8; 1000)	21	127	58,4	37,07	13	119	36,7	26,82	11	120	50,2	35,59
Vrtání (9,8; 500)	19	112	47,3	27,39	20	126	59,5	32,27	12	155	54,6	44,52

Z uvedených výsledků vyplývá, že nejdelší délka vláken v první analyzované oblasti je pro obráběcí technologii frézování s hloubkou záběru 2 mm a s otáčkami 1000 ot/min, kdy délka vlákna byla 337  $\mu\text{m}$ . Největší průměrná hodnota délek vláken byla v první zkoumané oblasti taktéž u technologie frézování s totožnými řeznými podmínkami.

V druhé oblasti bylo nalezeno nejdelší vlákno rovněž u vzorku frézování (2; 1000), kde délka vlákna byla 300  $\mu\text{m}$ . Zároveň zde byla také v průměru nejdelší vlákna, konkrétně 83,8  $\mu\text{m}$ .

Třetí analyzovaná oblast dosáhla obdobných výsledků, tedy nejdelší vlákno bylo nalezeno u technologie frézování (2; 1000), stejně tak i průměrná hodnota vláken byla pro tuto technologii a zvolené řezné podmínky nejvyšší, konkrétně 97,1  $\mu\text{m}$ .

Tato skupina vláken, tedy větší než 10 µm, by neměla mít zásadní vliv na zdraví člověka. Jak již bylo zmíněno v teoretické části, v publikaci [60] se autoři zmiňují, že částice s velikostí nad 10 µm je člověk schopen odfiltrovat přirozeným inhalačním filtrem, nosní sliznicí. Teoreticky se dá tedy konstatovat, že zvolená technologie frézování (2; 1000) je ze zdravotního hlediska nejpříznivější, jelikož zde vznikají částice o největších délkách, které mají minimální šanci projít hlouběji do dýchacího ústrojí.

Další částice byly v zkoumány v rozsahu od 2 do 10 µm.

**Tab. 5.2** Velikosti vláken, průměrné délky a směrodatná odchylka v jednotlivých technologiích obrábění v rozsahu délek vláken od 2 do 10 µm

	První oblast vláken				Druhá oblast vláken				Třetí oblast vláken			
	Nejkratší [µm]	Nejdelší [µm]	Průměr [µm]	Odchylka [-]	Nejkratší [µm]	Nejdelší [µm]	Průměr [µm]	Odchylka [-]	Nejkratší [µm]	Nejdelší [µm]	Průměr [µm]	Odchylka [-]
Broušení (0,2; 2400)	2	10	5	2,25	2	10	5,4	2,53	2	10	6,4	2,82
Frézování (1; 1000)	3	9	6	2,23	2	10	5,8	2,89	2	10	5,7	2,68
Frézování (2; 1000)	4	10	6,6	1,84	4	9	6,2	1,75	2	10	5,8	2,72
Vrtání (5; 2000)	3	10	5,7	2,37	2	9	4,6	1,95	2	10	5	2,46
Vrtání (5; 1500)	2	10	4,5	2,11	2	9	4,5	1,88	2	8	4,2	1,78
Vrtání (9,8; 1000)	3	9	5,7	2,09	2	9	6,1	2,26	3	10	6,4	2,28
Vrtání (9,8; 500)	3	10	6,2	2,21	4	10	7,5	1,84	3	10	6,4	2,16

Z uvedených výsledků vyplývá, že průměrně nejkratší vlákna objevená v rámci tohoto rozsahu v první oblasti byly u obráběcí technologie vrtání s průměrem vrtáku 5 mm a otáčkami 1500 ot/min, kdy průměrná velikost byla 4,5 µm a průměrně nejdelší vlákna byla u frézování s hloubkou záběru 2 mm a otáčkami 1000 ot/min.

V druhé oblasti byla nalezena průměrně nejkratší vlákna také u technologie vrtání (5; 1500) o velikosti 4,5 µm. Vlákna s průměrně nejdelší délkou byla nalezena také u vrtání, ale za použití vrtáku o průměru 9,8 mm a s otáčkami 500 ot/min o průměrné velikosti 7,5 µm.

V poslední zkoumané oblasti byla objevena průměrně nejkratší vlákna rovněž u technologie vrtání (5; 1500) o průměrné hodnotě délek vláken 4,2 µm. Průměrně nejdelší vlákna v této oblasti byly nalezena s hodnotou 6,4 µm u třech technologií, konkrétně vrtání (9,8; 1000), vrtání (9,8; 500) a broušení (0,2; 2400).

Ve skupině analyzovaných délek od 2 do 10 µm byla v celkovém průměru nejdelší vlákna nalezena u technologie vrtání s průměrem vrtáku 9,8 mm a otáčkami 500 ot/min, kdy průměrná hodnota byla 6,7 µm. Naopak vlákna v celkovém průměru nejkratší, která se podařila analyzovat, byla u technologie vrtání s průměrem vrtáku 5 mm a otáčkami 1500 ot/min, kdy průměrná délka vlákna byla 4,4 µm.

U vláken uvolněných z obrábění v délkovém rozmezí 2 až 10 µm je už velká pravděpodobnost vniknutí do dýchacích cest lidského těla. Vlákna o velikosti 5 až 10 µm se už bez větších problémů dostávají do nosohltanu a část vláken o délce 2 až 5 µm dokáže proniknout až do oblasti průdušnice, případně až do průdušek.[59, 60]

Technologie vrtání (5; 1500) má průměrnou délku vlákna 4,4 µm, tedy značná část těchto vláken v této délkové skupině může být potenciálně největší zdravotní riziko.

Poslední skupinou byla vlákna a prachová částice o velikosti 2 µm a menší.

**Tab. 5.3** Velikosti vláken, průměrné délky a směrodatná odchylka v jednotlivých technologiích obrábění v rozsahu délek vláken 2 µm a menších

	První oblast vláken				Druhá oblast vláken				Třetí oblast vláken			
	Nejkratší [nm]	Nejdelší [nm]	Průměr [nm]	Odchylka [-]	Nejkratší [nm]	Nejdelší [nm]	Průměr [nm]	Odchylka [-]	Nejkratší [nm]	Nejdelší [nm]	Průměr [nm]	Odchylka [-]
Broušení (0,2; 2400)	305	1995	976	496	206	1750	847	423	356	1873	941	438
Frézování (1; 1000)	65	1731	629	475	86	1898	833	579	69	1788	652	481
Frézování (2; 1000)	142	1886	641	534	381	1630	919	383	256	1258	699	348
Vrtání (5; 2000)	347	1920	1280	473	347	1956	1282	476	226	1587	706	375
Vrtání (5; 1500)	295	1856	685	439	226	1365	724	385	298	1645	876	448
Vrtání (9,8; 1000)	262	1669	889	491	287	1918	857	556	333	1211	752	245
Vrtání (9,8; 500)	245	1321	642	313	258	1584	917	437	222	1711	723	428

Z výsledků uvedené v tab. 5.3 je patrné, že nejkratší vlákno v první oblasti bylo nalezeno u obráběcí technologie frézování s hloubkou záběru 1 mm a otáčkami 1000 ot/min, kdy velikost byla 65 nm. Průměrně nejkratší vlákna se nacházela taktéž u frézování (1; 1000) s průměrnou délkou 629 nm.

V druhé oblasti se podařilo najít nejkratší vlákno s hodnotou 86 nm rovněž u frézování (1; 1000). Průměrně nejkratší délky vláken však byly nalezeny u vrtání s průměrem vrtáku 5 mm a otáčkami 1500 ot/min, kdy průměrná délka vlákna činila 724 nm.

Třetí analyzovaná oblast nabídla obdobné výsledky jako první oblast, tedy nejkratší vlákno měřilo 69 nm a průměrově nejkratší vlákna měla velikost 652 nm. Obě hodnoty patřily technologii frézování (1; 1000).

Tato skupina délek je ze zdravotního hlediska tou zcela nejhorší a potenciálně nejškodlivější. Částice o velikosti 2 µm a menších mají tendenci pronikat hluboko do těla, kdy nejmenší částice mohou proniknout až do oblasti plicních sklípků, což může způsobovat zdravotní komplikace. [60]

Celkově nejkratší vlákna vytváří frézování s hloubkou záběru 1 mm a otáčkami 1000 ot/min, kdy nejkratší vlákno měřilo 65 nm. Zároveň průměrná nejkratší délka vláken ze všech oblastí byla pouhých 73 nm, rovněž u této technologie obrábění.

V průmyslových firmách se pro pracovníky u obráběcích strojů obrábějící kompozitní materiály se skelnou výztuží používají dýchací respirátory FFP3, které mají nejnižší povolenou celkovou účinnost 98 % při velikosti 360 nm. [61] Délky částic vzniklé při frézování (1; 1000) jsou zcela největším potenciálním rizikem a lze téměř s jistotou říct, že alespoň malá část vláken bude schopna prostoupit i zmíněným respirátorem třídy FFP3.

Pro srovnání se nabízí velikosti některých druhů mikroorganismů - bakterií a virů. Například bakterie *Bacillus megatherium* má v průměru 1,2 -1,5 µm, což je mnohonásobně více, než byla nalezena nejmenší částice. Vir *Filoviruses* (známější pod názvem ebola) dosahuje průměrné velikosti okolo 80 nm [62], kdy tato hodnota se už přiblížila nejmenší částici získané z obrábění.

Dalším zjištěným poznatkem při procesu obrábění kompozitů se skelnou výztuží bylo to, že při žádné z uvedené technologie obrábění nedochází k zásadnímu odlamování, štípání, či jiné destrukci povrchu skelných vláken. Zároveň byl u všech vzorků zjištěn křehký lom vláken, který je dobře patrný například na obr. 4.36.

V poslední řadě je také nutné zmínit fakt, že měření délek bylo zatíženo lidským faktorem při ručním měření v softwaru NIS – ELEMENTS AR, proto výsledky měření jsou s přesností ± 5 %.

## 6 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo analyzování vzniklých třísek a prachových částic při obrábění kompozitních dílů na bázi epoxidové matrice a skelné výztuže.

Na základě provedených experimentů bylo zjištěno, že při žádném obrábění nedochází k narušování a štípání povrchu skelných vláken. Naopak byl ve všech případech zaznamenán křehký lom vláken.

Byly použity tři nepoužívanější technologie obrábění pro obrábění kompozitních dílů – broušení, frézování a vrtání s různými reznými podmínkami. Zkoumány byly tři skupiny délek, z nichž nejzásadnější byly s délkou do 2  $\mu\text{m}$ .

Počáteční predikce výsledků před zahájením samotného experimentu byla taková, že nejkratší vlákna budou nalezena u technologie broušení. To však experiment vyvrátil, jelikož nejmenší částice ze všech typů obrábění byly nalezeny u frézování s hloubkou záběru 1 mm a otáčkami 1000 ot/min. Tato technologie s těmito reznými podmínkami vykazovala průměrně nejkratší vlákna v analyzovaných vzorcích, kde se našlo nejkratší vlákno o délce pouhých 65 nm.

Z výsledku také vyplývá, že pro tvorbu určitých délek částic vzniklých z obrábění jsou důležitým faktorem nejen rozdílná technologie obrábění, ale i jen pouhá změna rezných podmínek. To lze vidět v porovnání u technologie frézování, kdy změnou hloubky záběru z 1 mm na 2 mm se významně změnila i délka nejkratšího nalezeného vlákna, které měřilo 142 nm. U technologie frézování s hloubkou záběru 2 mm a otáčkami 1000 ot/min byla také nalezena celkově nejdelší vlákna ze všech zmíněných typů obrábění.

Význam této práce spočíval především s ohledem na lidské zdraví a životnost obráběcích strojů a strojů v blízkém okolí obrábění. Skelné částice vzniklé z obrábění fungují jako silná abraziva, která mohou například v rotačních částech stroje značně snižovat životnost jednotlivých částí stroje z důvodu abrazivního otěru. Důležitější faktem však je působení těchto částic na zdraví člověka. Největší problémy mohou být způsobeny vniknutím do dýchacího ústrojí, kde proniknou částice menší než 10  $\mu\text{m}$ . Proto je nutné u obrábění sklolaminátových kompozitů používat vhodnou ochranu například v podobě běžně využívaného respirátoru třídy FFP3, který však není schopen zamezit průniku vláken menších jak 0,3  $\mu\text{m}$ . S ohledem na výsledky experimentu je tedy vhodné přiřadit k použití respirátoru i například kvalitní odsávací zařízení umístěné v blízkosti osy obrábění.



## Seznam použité literatury

- [1] VEJRAŽKOVÁ I. Vejražková I.: Plasty pro stavebnictví a architekturu 7 – Polymerní vláknové kompozity, volně ke stažení z <http://www.imaterialy.cz/clanky/materialy/2967/plasty-pro-stavebnictvi-a-architekturu-7-polymerni-vlaknove-kompozity/>.
- [2] JANCÁR, J. JANCÁR, J. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitu 1. vyd. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. 194 s. ISBN 80–214–2443–5.
- [3] EHRENSTEIN, GOTTFRIED W. EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6, 2009.
- [4] DAŘOUREK, KAREL. DAŘOUREK, Karel. Kompozitní materiály - druhy a jejich užití. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [5] HULL, D.; CLYNE, T. W. HULL, D.; CLYNE, T. W. An introduction to composite material. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. ISBN 0-521-38855-4.
- [6] MALLICK, P. MALLICK, P. Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design. 3rd ed., [expanded and rev. ed.]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008. ISBN 978-0-8493-4205-9.
- [7] BAREŠ, RICHARD. BAREŠ, Richard. Kompozitní materiály. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [8] RATNA, DEBDATTA. Chemistry, Properties and Applications of Thermoset Resins. RATNA, Debdatta. Handbook of thermoset resins. Shawbury, Shrewsbury, U.K: ISmithers, 2009, s. 61-153 [cit. 2017-02-03]. ISBN 9781615836499.
- [9] HUMÁR, A. HUMÁR, A. Obrábění vláknově vyztužených kompozitů: Machining fibre reinforced composites : teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru strojírenská technologie. Brno: VUTIUUM, 2004. 26 s. ISBN 80-214-2740-x.
- [10] Analýza mechanických vlastností kompozitů vyrobených technologií HP-RTM - diplomová práce, Petr Jedinák. 2017.
- [11] 17. EHRENSTEIN, Gottfried. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [12] MLEZIVA, J., KÁLAL, J. MLEZIVA, J. – KÁLAL, J. : Základy makromolekulární chemie. Praha: SNTL, 1986, 384 s.
- [13] KNOB, A. KNOB, A. PLAZMOCHEMICKÉ ZPRACOVÁNÍ VLÁKNOVÝCH VÝZTUŽÍ PRO POLYMERNÍ KOMPOZITY [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=50496](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=50496). Diplomová práce. VUT v Brně Fakulta chemická.
- [14] POLYMERNÍ KOMPOZITY S UŽITNÝMI VLASTNOSTMI. POLYMERNÍ KOMPOZITY S VYŠŠÍMI UŽITNÝMI VLASTNOSTMI [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=70019](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=70019).
- [15] PLASTOVÉ POLYMERY. Plastové polymery na bázi křemíku [online]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-2425-7.pdf>.

- [16] KOVAČIČ L. KOVAČIČ L.: Lepenie kovov a plastov. Bratislava: Nakladateľství ALFA, 1984. 398s.
- [17] Jirsák O., Kalinová K.: Netkané textilie, Technická univerzita v Liberci, 2003.
- [18] ŠUBRT, KAMIL. ŠUBRT, Kamil. Diplomová práce: Návrh zařízení pro měření smáčivosti povrchů. B.m., 2013. Vysoké učení technické v Brně.
- [19] KRČMAR R. KRČMAR R.: Teorie netkaných textilií, Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1986.
- [20] ŠIMEK, LUBOMÍR A JOSEF HRNČIŘÍK. ŠIMEK, Lubomír a Josef HRNČIŘÍK. Fyzikální chemie I. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2005. ISBN 80-7318-324-2.
- [21] MÍŠEK, B. Kompozity. Brno: Technický dozorčí spolek - Sekce materiálů a svařování, 2003. ISBN 80-903386-0-7.
- [22] HAVEL Composites CZ s.r.o., the world of composites, volně ke stažení z <http://www.havel-composites.com>.
- [23] CAMPBELL, F. C. Structural composite materials. 1st edition. USA: ASM International, 2010. 629 pages. ISBN 978-1-61503-037-8.
- [24] Lener J., Surý L.: Silikátová vlákna v průmyslu a stavebnictví, SNTL 1975.
- [25] ČERNÝ, O. Analýza vlastností polymerních kompozitů se skleněnými a uhlíkovými vlákny v matrici PA. Liberec, 2015. Bakalářská práce. TUL Fakulta strojní.
- [26] HRUDŇÁK, M. Materiálové charakteristiky a struktura kompozitních materiálů pro malé sportovní letouny [online]. Praha, 2004. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24589/tich%C3%A11\\_2013\\_dp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24589/tich%C3%A11_2013_dp.pdf?sequence=1). Diplomová práce. ČVUT v Praze Fakulta strojní.
- [27] Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů. [online]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobekompozitu.html>.
- [28] LOEWENSTEIN, K. L., 1983. The manufacturing technology of continuous glass fibres. 3rd, completely rev. ed. New York: Elsevier. Glass science and technology, v. 6. ISBN 978-0444893468.
- [29] THOMAS, S., JOSEPH, K., MALHOTRA, S.K. at al. Polymer composites: macro- and microcomposites. Germany: Wiley-VCH, 2013. 727 pages. ISBN 978-3-527-32624-2.
- [30] AGARWAL, Bhagwan D a Lawrence J BROUTMAN. Vláknové kompozity: celost. vysokošk. příručka pro vys. školy techn. 1. vydání. Praha : SNTL, 1987. str. 294. ISBN.
- [31] Sklocement Beneš s. r. o. volně ke stažení z <https://www.sklocement.cz/sklenena-vlakna-cem-fil/anti-crak-hd/>.
- [32] Skriptum TUL Liberec, volně ke stažení z <https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2006-03-16/12-55-59.pdf>.
- [33] FIBER GLAST DEVELOPMENTS CORP volně ke stažení z [https://www.fibreglast.com/product/Continuous\\_Strand\\_Mat\\_251/Fiberglass\\_Mat](https://www.fibreglast.com/product/Continuous_Strand_Mat_251/Fiberglass_Mat).
- [34] NING, Fuda, et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. Composites Part B: Engineering, 2015, 80: 369-378.

- [35] Gurit.com. Guide to composites. [Online] 2017 <http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx>.
- [36] RUSNÁKOVÁ, Soňa. UČEBNÍ TEXT - VÝUKA. Kompozitní materiály. Zlín, 2014.
- [37] Prepreg technologie [online]. form: FORM. Dostupné z: <http://www.form-composite.com/prepreg>.
- [38] Carbon Fiber Prepreg [online]. IndiaMART: IndiaMART. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/carbon-fiber-fabric-for-structuralstrengthening-15653338430.htm>.
- [39] Easy Composites Ltd, volně dostupné na <https://www.easycomposites.co.uk/>.
- [40] N.S.hu, L.C. Zhang, Some observations in grinding uni directional carbon fibrereinforced plastics, The University of Sydney, Sydney 2006, NSW, Australia <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604007514>>.
- [41] TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ - VŠB , FS. Volně dostupné na [https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_001/Technologie%20Obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20e-learning/Technologie%20obrabeni%2003%20Vrt%C3%A1n%C3%AD.pdf](https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_001/Technologie%20Obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20e-learning/Technologie%20obrabeni%2003%20Vrt%C3%A1n%C3%AD.pdf).
- [42] CIHLÁŘOVÁ, Petra, Michael Lars George HILL and Miroslav PÍŠKA. Fundamentals of CNC Machining. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://cnc.fme.vutbr.cz>>.
- [43] SÝKORA, R., Obrábění kompozitních materiálů, 2012.
- [44] SEDLÁČEK, J., EFEKTIVNÍ OBRÁBĚNÍ VLÁKNOVĚ VYZTUŽENÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ - disertační práce 2010.
- [45] R. TETI, Machining of Composite Materials, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 51, Issue 2, 2002, Pages 611-634, ISSN 0007-8506, [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61703-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61703-X).
- [46] Durao LMP, Gonçalves DJS, Tavares JMRS, de Albuquerque VHC, Aguiar ~ Vieira A, Torres Marques A. Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. Compos Struct 2010;92(7):1545e50.
- [47] Václav Schorník; bakalářská práce -Frézování rovinných ploch a drážek při obrábění kompozitního materiálu 2013.
- [48] MM Průmyslové spektrum - Kompozitní materiály v letectví - volně dostupné na: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kompozitni-materialy-v-letectvi.html>.
- [49] SHEIKH-AHMAD, JAMAL Y. Machining of Polymer Composites. The Petroleum Institute, Department of Mechanical Engineering Abu Dhabi, United Arab Emirates : Springer Science + Business Media, LLC, 2009. ISBN: 0387355391, 9780387355399.
- [50] TAKESHI YASHIRO, TAKAYUKI OGAWA, HIROYUKI SSAHARA, Temperature measurement of cutting tool and machined surface layer in milling of CFRP, International Journal of Machine Tools and Manufacture, <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695513000503>>.
- [51] MAŠEK, Petr. Frézování kompozitních materiálů s termoplastickou maticí [online], 2019 ČVUT. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82082/F2-D-2019-Masek-Petr-prilohaTeze\\_Masek.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82082/F2-D-2019-Masek-Petr-prilohaTeze_Masek.pdf?sequence=-1&isAllowed=y).

- [52] JAMAL Y. Sheikh-Ahmad. Machining of polymer composites. 1. vyd. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2009 ISBN 978-0-387-35539-9.
- [53] Arola, D., M. Ramulu, and D. H. Wang, "Chip Formation in Orthogonal Trimming of Graphite/Epoxy Composite." *Composites: Part A*, Vol. 27A (1996), pp. 121-133.
- [54] Klocke, F., C. Koenig, C. Wuertz, and C. Dietz. "Environmental Effects and Safety in Machining Fibrous Composites." *Machining of Ceramics and Composites*. Edited by S. Jahanmir, M. Ramulu, and P. Koshy, Marcel Dekker, Inc., New York (1999), pp. 411-425.
- [55] Ramulu, M. and D. Arola. "Traditional and Non-Traditional Machining of Fiber Reinforced Plastic Composites." 39th International SAMPE Symposium (1994), pp. 1073-1087.
- [56] Zustra, M. A. "Evaluation of the Potential Health Hazards Associated with the Machining of Carbon Fiber Composites" *Government Reports Announcements and Index (GRA&I)*, Issue 21 (1988).
- [57] Schwartz, C. S. "Toxicity of Advanced Composite Matrix Materials." *Conference on Occupational Health Aspects of Advanced Composite Technology in the Aerospace Industry* (1989), pp. 146-163.
- [58] Thompson, S. A. "Toxicology of Carbon Fibers." *Conference on Occupational Health Aspects of Advanced Composite Technology in the Aerospace Industry* (1989), pp. 164-176.
- [59] Kwan, J. "Health Hazards Evaluation of the Postcuring Phase of Graphite Composite Operations at the Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California." *Government Reports Announcements and Index (GRA&I)*, Issue 15 (1991).
- [60] M. Ramulu, John C. Kramlich, *Machining of fiber reinforced composites: Review of environmental and health effects*, 2004.
- [61] Respirátory FFP3 - Nanospace. Volně dostupné na - <https://www.nanospace.cz/slovník-pojmu/kategorie-respirator-ffp3/>.
- [62] Analýza respirátoru dle norem - Volně dostupné na <https://www.zdravotnickydenik.cz/wp-content/uploads/2020/04/Analyza-respiratoru-dle-norem-Porta-Medica.pdf>.