



# Měření vybraných charakteristik nově vyvíjeného kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny na bázi reaktoplastu pro měřicí a automatizační techniku firmy MESING spol. s.r.o., Brno

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály  
*Autor práce:* **Bc. Lukáš Charvát**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.





# Measurement of selected characteristics of newly developed composite material with carbon fiber on the base of reactoplastic for measuring and automation technology of the company MESING spol. s.r.o., Brno

## Master thesis

*Study programme:* N2301 – Mechanical Engineering  
*Study branch:* 2301T048 – Engineering Technology and Materials  
*Author:* **Bc. Lukáš Charvát**  
*Supervisor:* doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Charvát**  
Osobní číslo: **S16000016**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**  
Název tématu: **Měření vybraných charakteristik nově vyvíjeného kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny na bázi reaktoplastu pro měřicí a automatizační techniku firmy MESING spol. s.r.o., Brno**  
Zadávací katedra: **Katedra obrábění a montáže**

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

1. Shrnutí dosavadních poznatků o používaných materiálech pro měřicí a automatizační techniku.
2. Shrnutí poznatků o kompozitních materiálech na bázi reaktoplastů zpevněných (nejen) uhlíkovými vlákny.
3. Návrh metodiky experimentů v rámci měření vybraných charakteristik nově vyvíjeného kompozitního materiálu na bázi reaktoplastu pro měřicí a automatizační techniku, tj. měření délkové roztažnosti v závislosti na materiálovém složení.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení délkové roztažnosti v závislosti na materiálovém složení, výběr nejvhodnějšího materiálu pro měřicí a automatizační techniku.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací: **Obrázky, tabulky a grafy - dle potřeby.**

Rozsah pracovní zprávy: **Cca 60 - 70 stran textu.**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- 1. LIDAŘÍK, M. a kol. *Epoxidové pryskyřice*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., 1983. 732 s.**
  - 2. KOLOUCH, J. *Strojní součásti z plastů*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., 1981. 260 s.**
  - 3. DUCHÁČEK V. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. 280 s. ISBN 80-7080-617-6.**
  - 4. ČECH, J., PERNIKÁŘ, J., PODANÝ, K. *Strojírenská metrologie I*. 5. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 183 s. ISBN 978-80-214-4010-4.**
- 5. Firemní literatura.**

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.**

Katedra obrábění a montáže

Konzultant diplomové práce: **doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.**


Katedra materiálu

Datum zadání diplomové práce: **5. března 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **5. září 2019**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
doc. Ing. Jan Jersák, CSc.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 5. března 2018

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, 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 (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 15. 5. 2018

Podpis:



**Měření vybraných charakteristik nově vyvíjeného kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny na bázi reaktoplastu pro měřicí a automatizační techniku firmy MESING spol. s.r.o., Brno**

Anotace:

Předložená diplomová práce zpracovaná na téma "Měření vybraných charakteristik nově vyvíjeného kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny na bázi reaktoplastu pro měřicí a automatizační techniku firmy MESING spol. s.r.o., Brno" se zabývá vývojem a testováním kompozitu na bázi reaktoplastu plněného uhlíkovými vlákny.

V teoretické části byl proveden rozbor týkající se problematiky reaktoplastů, epoxidových pryskyřic a kompozitů a problematiky matric a disperzí používaných pro výrobu kompozitů. Další významnou součástí této kapitoly je seznámení s materiály používanými pro výrobu měřicí a automatizační techniky.

Experimentální část nejprve popisuje použité materiály, metodiku přípravy vzorků a metodiku měření, dále průběh experimentu, shrnutí výsledků, kalkulaci a končí vyhodnocením a porovnáním výsledků.

**Klíčová slova:** reaktoplast, epoxidová pryskyřice, kompozit, uhlíková vlákna, délková teplotní roztažnost

**Measurement of selected characteristics of newly developed composite material with carbon fiber on the base of reactoplastic for measuring and automation technology of the company MESING spol. s.r.o., Brno**

Annotation:

Presented diploma thesis on the topic "Measurement of selected characteristics of newly developed composite material with carbon fiber on the base of reactoplastic for measuring and automation technology of the company MESING spol. s.r.o., Brno" deals with the development and testing of composite on the basis of carbon fiber-filled reactoplastic.

In the theoretical part, there was made an analysis of the topics of reactoplastics, epoxy resins and composites and the problems of matrices and

dispersions used for production of composites. Another important part of this chapter is acquaintance with the materials used for the production of measuring and automation technology.

The experimental part first describes used materials, the methodology of sample preparation and the methodology of measurement, the course of the experiment, the summary of the results, the calculation and ends with the evaluation and comparison of the results.

**Keywords:** reactoplastic, epoxy resin, composite, carbon fiber, linear thermal expansion

**Zpracovatel:** TU v Liberci, KOM

**Dokončeno:** 2018

**Archivní označ. zprávy:** Počet stran: 99 Počet tabulek: 22  
Počet příloh: 4 Počet grafů: 2  
Počet obrázků: 32

## Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

### **Měření vybraných charakteristik nově vyvíjeného kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny na bázi reaktoplastu pro měřicí a automatizační techniku firmy MESING spol. s.r.o., Brno**

**Measurement of selected characteristics of newly developed composite  
material with carbon fiber on the base of reactoplastic for measuring and  
automation technology of the company MESING spol. s.r.o., Brno**

Evidenční číslo práce: **KOM 1296**

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Charvát**

Vedoucí práce: **doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.**  
Katedra obrábění a montáže

Konzultant: **doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.**  
Katedra materiálu

Počet stran: 99  
Počet příloh: 4  
Počet tabulek: 22  
Počet obrázků: 32  
Počet grafů: 2

Datum: 15.5.2018



## ***Poděkování***

Tímto bych rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce **doc. Ing. et Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D.** za příkladné vedení, ochotu, odborné konzultace a velmi důležité a přínosné rady a připomínky při tvorbě práce.

Dále bych rád poděkoval paní **doc. Ing. Doře Kroisové, Ph.D.** za odborné konzultace a také panu **Ing. Miloslavu Ledvinovi** za odborné a cenné rady.

V neposlední řadě děkuji celé své rodině za podporu a trpělivost projevenou v průběhu mých studií.

Lukáš Charvát

# OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	13
SEZNAM TABULEK .....	14
SEZNAM GRAFŮ .....	14
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	15
1. Úvod .....	18
2. Teorie .....	19
2.1 Reaktoplasty .....	19
2.1.1 Vznik reaktoplastů .....	19
2.1.2 Vlastnosti reaktoplastů .....	20
2.1.3 Druhy reaktoplastů .....	21
2.2 Epoxidové pryskyřice .....	23
2.2.1 Vlastnosti epoxidových pryskyřic .....	24
2.2.2 Vytvrzování epoxidových pryskyřic .....	24
2.3 Kompozitní materiály .....	25
2.3.1 Vlastnosti kompozitních materiálů .....	26
2.3.2 Rozdělení kompozitních materiálů .....	27
2.3.3 Polymerní matrice .....	28
2.3.4 Disperze .....	29
2.3.4.1 Vláknová disperze .....	29
2.3.5 Uhlíková vlákna .....	31
2.3.5.1 Technologie výroby uhlíkových vláken .....	32
2.3.6 Výroba vláknových kompozitů s reaktoplastickou matricí .....	33
2.3.6.1 Impregnace disperze kapalnou fází .....	34
2.3.7 Moduly pružnosti krátkovláknového kompozitu .....	37
2.4 Měřicí a automatizační technika .....	39

2.4.1	Měření ve strojírenství.....	39
2.4.2	Materiály pro měřicí a automatizační techniku .....	39
2.4.3	Materiály pro výrobu měřicích doteků .....	42
3.	Experiment .....	43
3.1	Metodika výroby vzorků.....	43
3.2	Použité materiály pro výrobu vzorků .....	44
3.2.1	Matrice – epoxidová pryskyřice.....	44
3.2.2	Tvrdidlo – P11 .....	44
3.2.3	Plnivo – recyklovaná uhlíková vlákna.....	45
3.2.4	Formy – silikonová pryž Silastic T1 .....	46
3.3	Příprava vzorků .....	47
3.3.1	Volba složení a příprava směsí .....	47
3.3.2	Odlévání vzorků .....	48
3.4	Hodnocení vzorků .....	50
3.4.1	Měření délkové roztažnosti vzorků.....	50
3.4.2	Příprava měřicího zařízení a metodika vlastního měření vzorků..	52
3.4.3	Nedostatky při přípravě vzorků .....	53
3.5	Vlastní experiment.....	54
3.5.1	První série měření: srpen – září 2017 .....	55
3.5.2	Druhá série měření: září – listopad 2017 .....	61
3.5.3	Zhodnocení výsledků měření .....	66
3.5.4	Finanční zhodnocení a kalkulace.....	67
3.6	Porovnání s jinými materiály na výrobu měřicí techniky .....	68
3.6.1	Cenové srovnání měřicích doteků.....	69
3.6.2	Porovnání vlastností.....	70
3.6.3	Porovnání užitné hodnoty .....	71
4.	Diskuze.....	72

5. Závěr .....	78
Seznam použité literatury.....	79
Seznam příloh.....	84

## **SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 2-1: Schéma struktury sítě vytvrzeného reaktoplastu [28].....	19
Obr. 2-2: Vliv zesítené struktury na modul pružnosti ve smyku G [28].....	21
Obr. 2-3: Příklady aplikací fenoplastů [4] .....	21
Obr. 2-4: Příklady aplikací aminoplastů [4].....	22
Obr. 2-5: Příklady aplikací polyuretanů [4] .....	23
Obr. 2-6: Příklad impregnace polyesterovou pryskyřicí [4].....	23
Obr. 2-7: Vzorec nejběžnějšího typu EP [32] .....	24
Obr. 2-8: Příklady aplikací EP [4] .....	25
Obr. 2-9: Příklad kompozitu vyrobeného pultruzí [30] .....	26
Obr. 2-10: Schématické znázornění rozdílu v křivkách napětí - poměrné prodloužení polymerní matrice a uhlíkového vlákna [7] .....	29
Obr. 2-11: Schematické znázornění pevností a tuhostí různých vláken [7].....	30
Obr. 2-12: Rozdělení vláknových kompozitů z geometrického pohledu [5] .....	30
Obr. 2-13: Příklady uspořádání vláknové disperze v kompozitech [7].....	31
Obr. 2-14: Srovnání průměrů UV a lidského vlasu [10] .....	32
Obr. 2-15: Vytvrzování dílů v autoklávu [33] .....	35
Obr. 2-16: Pultruzní výrobní linka [30].....	37
Obr. 2-17: Koeficient $\alpha$ materiálu ZERODUR® [34] .....	41
Obr. 2-18: Měřicí dotek RENISHAW s rubínovou kuličkou [35].....	42
Obr. 3-1: EP CHS EPOXY 520 [35] .....	45
Obr. 3-2: Recyklovaná UV Carbiso™ MF [35].....	46
Obr. 3-3: Silikonové formy pro odlévání vzorků [35].....	46
Obr. 3-4: Originály vzorků zalité v silikonu [35] .....	47
Obr. 3-5: Směs s plnivem 80 DSK [35] .....	48
Obr. 3-6: Směs s plnivem 80 DSK pod mikroskopem [35] .....	48
Obr. 3-7: Naplněné silikonové formy [35].....	49
Obr. 3-8: Vzorky z vyvíjeného kompozitu [35].....	49
Obr. 3-9: Detail měřicího systému s křížovým stolkem [35] .....	51
Obr. 3-10: Měřicí listy se vzorky [35].....	52
Obr. 3-11: Vzorky měřicích doteků zvětšené pod mikroskopem [35] .....	69
Obr. 3-12: Vzorek měřicího doteku zvětšený pod mikroskopem [35] .....	70
Obr. 3-13: Ocelové měřidlo a vzorky na bázi čisté a plněné EP [35].....	71

Obr. 4-1: Měřidlo osazené doteky z vyvinutého kompozitu [35] .....	77
--	----

## **SEZNAM TABULEK**

Tab. 1: Porovnání mech. vlastností matric z reaktoplastů [5, 7].....	28
Tab. 2: Porovnání mech. vlastností vybraných vláken [5, 7] .....	33
Tab. 3: Technologické výrobní postupy používané u kompozitů [5].....	34
Tab. 4: Hodnoty koeficientu $\alpha$ z prvního měření – čistá EP [35].....	55
Tab. 5: Hodnoty koeficientu $\alpha$ z prvního měření – 10 DSK [35] .....	55
Tab. 6: Hodnoty koeficientu $\alpha$ z prvního měření – 20 DSK [35] .....	56
Tab. 7: Hodnoty koeficientu $\alpha$ z prvního měření – 40 DSK [35] .....	56
Tab. 8: Hodnoty koeficientu $\alpha$ z prvního měření – 60 DSK [35] .....	57
Tab. 9: Hodnoty koeficientu $\alpha$ z prvního měření – 80 DSK [35] .....	57
Tab. 10: Hodnoty koeficientu $\alpha$ z prvního měření – 85 DSK [35] .....	58
Tab. 11: Hodnoty koeficientu $\alpha$ z prvního měření – 90 DSK [35] .....	58
Tab. 12: Hodnoty koeficientu $\alpha$ z prvního měření – 100 DSK [35] .....	59
Tab. 13: Výsledné průměrné hodnoty koeficientu $\alpha$ z prvního měření [35] .....	59
Tab. 14: Hodnoty koeficientu $\alpha$ z druhého měření – čistá EP [35] .....	61
Tab. 15: Hodnoty koeficientu $\alpha$ z druhého měření – 20 DSK [35] .....	61
Tab. 16: Hodnoty koeficientu $\alpha$ z druhého měření – 40 DSK [35] .....	62
Tab. 17: Hodnoty koeficientu $\alpha$ z druhého měření – 60 DSK [35] .....	62
Tab. 18: Hodnoty koeficientu $\alpha$ z druhého měření – 80 DSK [35] .....	63
Tab. 19: Hodnoty koeficientu $\alpha$ z druhého měření – 90 DSK [35] .....	63
Tab. 20: Hodnoty koeficientu $\alpha$ z druhého měření – 100 DSK [35] .....	64
Tab. 21: Výsledné průměrné hodnoty koeficientu $\alpha$ z druhého měření [35] .....	64
Tab. 22: Materiálové náklady na výrobu jednoho vzorku [35] .....	68

## **SEZNAM GRAFŮ**

Graf 1: Výsledné průměrné hodnoty koeficientu $\alpha$ z prvního měření [35].....	60
Graf 2: Výsledné průměrné hodnoty koeficientu $\alpha$ z druhého měření [35] .....	65

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení důležitých veličin a význam použitých zkratek a symbolů v předkládané diplomové práci

<b>Značka</b>	<b>Význam</b>
CNC	Computer numeric control – číslicové řízení počítačem
CAD	Computer aided design – počítačem podporované projektování
RTM	Resin transfer molding – technologie výroby kompozitů
S-RIM	Structural Reaction Injection Molding – technologie výroby kompozitů
R-RIM	Reinforced Reaction Injection Molding – technologie výroby kompozitů
SMC	Sheet molding compound – technologie výroby kompozitů
DSK	Jednotka užívaná pro určení hmotnostního objemu
MKP	Metoda konečných prvků
DTR	Délková teplotní roztažnost
EP	Epoxidová pryskyřice
UV	Uhlíková vlákna

### LATINSKÁ ABECEDA

<b>Značka</b>	<b>Význam</b>	<b>Rozměr</b>
G	Modul pružnosti ve smyku	[Pa]
E	Modul pružnosti v tahu	[Pa]
E <sub>L</sub>	Podélný modul pružnosti v tahu	[Pa]
E <sub>T</sub>	Příčný modul pružnosti v tahu	[Pa]

<b>Značka</b>	<b>Význam</b>	<b>Rozměr</b>
$E_m$	Modul pružnosti v tahu matrice	[Pa]
$E_f$	Modul pružnosti v tahu vláken	[Pa]
$R_m$	Mez pevnosti v tahu	[Pa]
$A$	Tažnost	[%]
$v_f$	Objemový podíl vláken	[ - ]
$V_f$	Celkový objem vláken ve vzorku	[m <sup>3</sup> ]
$V_C$	Celkový objem vzorku	[m <sup>3</sup> ]
$S_e$	Obsah epoxidových skupin	[mol/kg]
$m_e$	Epoxidový hmotnostní ekvivalent	[g/mol]
$T_g$	Teplota zesklnění	[°C]
$T_f$	Teplota viskózního toku	[°C]
$t$	Teplota	[°C]
$\Delta t$	Změna teploty	[°C]
$p$	Tlak	[Pa]
$t$	Čas	[s]
$\Delta l$	Prodloužení	[m]
$l_t$	Délková roztažnost při teplotě $t$	[m]
$l_0$	Délková roztažnost při teplotě 0°C	[m]
$L/d$	Štíhlostní poměr	[ - ]
$U$	Rozšířená standartní nejistota	[ $\mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ ]
$\bar{x}$	Aritmetický průměr	[ - ]
$s$	Směrodatná odchylka	[ - ]



## ŘECKÁ ABECEDA

<b>Značka</b>	<b>Význam</b>	<b>Rozměr</b>
$\alpha$	Koeficient délkové teplotní roztažnosti	$[\mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})]$
$\rho$	Hustota	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
$\eta$	Dynamická viskozita	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$
$\eta_L$	Parametr v podélném směru	$[-]$
$\eta_T$	Parametr v příčném směru	$[-]$

## MATERIÁLY

<b>Značka</b>	<b>Význam</b>
W	Wolfram
Fe	Železo
Cr	Chrom
Mo	Molybden
Ti	Titan
Ni	Nikl
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Oxid hlinitý
SiC	Karbid křemíku
TiC	Karbid titanu
B	Bor
C	Uhlík

# 1. Úvod

Metrologie je v současné době, stejně jako jiné obory spojené se strojírenstvím, velmi rychle a dynamicky se rozvíjející vědní disciplína. Výrobci měřicí techniky musí investovat nemalé prostředky do vývoje a výroby, aby udrželi krok s konkurencí či v ještě lepším případě byli inovátory a drželi se stále o krok před ostatními. Lidé ve firmě MESING spol. s.r.o., Brno takovými inovátory jsou, a proto iniciovali vývoj nového kompozitního materiálu. Ten by v budoucnu chtěli ve vhodných případech využít při výrobě měřicí a automatizační techniky.

Impulesem k zahájení vývoje nového kompozitního materiálu pro měřicí techniku byla snaha o vyhovění požadavkům uživatelů posuvných, mikrometrických a jiných nestanovených měřidel. Tyto požadavky vzešly z průzkumů provedených firmou MESING spol. s.r.o., Brno na domácích a zahraničních veletrzích. Mezi nejčastější připomínky uživatelů patřily obecně velmi vysoká cena za nová měřidla a za kalibrace a rekalibrace již používaných, náchylnost měřidel k poškození vlivem nesprávné manipulace nebo špatného skladování, nutnost častých mezikalibračních kontrol, např. po opravě měřidla a v neposlední řadě vysoké riziko poškození dílů (plastových, lakovaných, broušených, lesklých apod.) od měřidla.

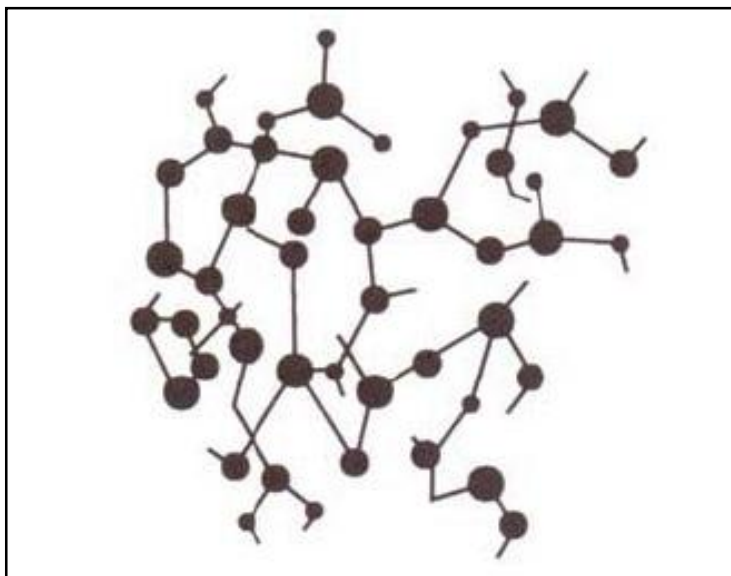
Proto by bylo vhodné v těchto případech využívat měřidla vyrobená z polymerních materiálů, kterými však lze zajistit požadovanou přesnost. V dnešní době jsou měřidla z polymerních materiálů používána pouze omezeně.

Hlavním cílem předkládané diplomové práce bylo vyvinout a otestovat nový kompozitní materiál na bázi reaktoplastu plněný uhlíkovými vlákny, který bude vynikat velmi nízkým koeficientem délkové teplotní roztažnosti  $\alpha$  a bude vhodný pro použití při výrobě měřicí a automatizační techniky ve firmě MESING spol. s.r.o., Brno. Firma by ho v budoucnu ráda využila zejména na výrobu měřicích doteků pro 3D souřadnicové měřicí stroje a jako dotykových měřicích ploch na nestanovených měřidlech (posuvných, mikrometrických aj.).

## 2. Teorie

### 2.1 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou amorfní polymery tvořené hustými trojrozměrnými sítěmi molekul. Prostřednictvím primární vložené energie dochází v polymeru ke změnám, které jsou známé jako **zesíťování**. V případě reaktoplastů se pak hovoří o tzv. **vytvrzování (Obr. 2-1)**, kdy energie, způsobující vytvrzení polymeru, může být vložena do materiálu buď za pomoci tepla, záření nebo prostřednictvím jiné chemické sloučeniny – tzv. **katalyzátoru**. Mezi molekulami polymeru pak tato energie podněcuje vznik pevných kovalentních vazeb. Po dokončení procesu vytvrzování již není možné znovu reaktoplast uvést do viskózního stavu, tvářet ho nebo tavit, protože vzniklá prostorově zesíťovaná struktura již nemůže být zrušena. [1, 3 ,4]



Obr. 2-1: Schéma struktury sítě vytvrzeného reaktoplastu [28]

#### 2.1.1 Vznik reaktoplastů

První čistě syntetický materiál připravil v roce 1907 americký chemik Leo Baekeland. Jeho chemickou podstatou byla fenol-formaldehydová pryskyřice (PF, bakelit). Tento materiál následně našel široké uplatnění v elektrotechnice,

avšak jeho vůbec prvním využitím byl knoflík rychlostní páky luxusního Rolls-Royce.

Princip vzniku syntetických polymerů je „řetězení“ monomerů prostřednictvím třech různých chemických postupů, které se nazývají **polyreakce**. Jedná se o polymeraci, polyadici a polykondenzaci. Pro vznik reaktoplastů se běžně využívají dva z nich – polykondenzace (vznikají polykondenzáty) a polyadice (vznikají polyadukty).

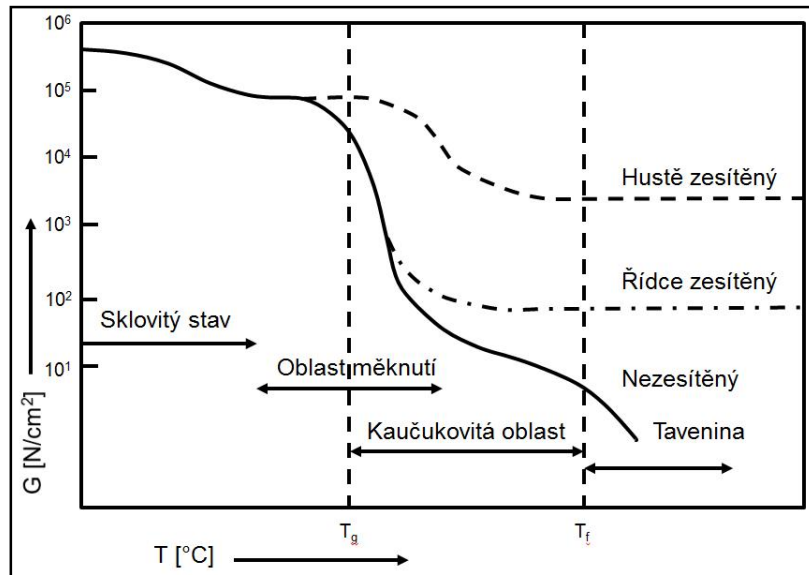
**Polykondenzace** je reakce relativně pomalá. Je možné ji v libovolné fázi zastavit a pokračovat v ní například až při finalizaci výrobku. Při polykondenzaci se spojují molekuly monomerů do dlouhých řetězců a při každém připojení další monomerní jednotky se uvolňuje vedlejší produkt (voda, amoniak). Díky tomu se výsledný polymer liší od výchozích sloučenin svým chemickým složením.

**Polyadice** je oproti tomu značně rychlá. Dochází při ní k reakci dvou odlišných druhů monomerů bez vzniku vedlejšího produktu. Adice je vlastně „slučování“ atomu vodíku reaktivní atomové skupiny prvního druhu monomeru s reaktivní atomovou skupinou z druhého monomeru. [1, 3 ,4]

### 2.1.2 Vlastnosti reaktoplastů

Obecně jsou vlastnosti polymerů velmi závislé na teplotě a při určitých teplotách se tyto vlastnosti mění velmi rychle. V tomto případě mluvíme o tzv. **přechodových teplotách** (Obr. 2-2), při kterých dochází ke skokové změně stavu polymeru.

V případě reaktoplastů je chování zcela jiné než u termoplastů. Při vytvrzení vzniká v reaktoplastu tuhá síť chemických vazeb, která zabraňuje následnému pohybu makromolekul jako celku. Z toho důvodu při zahřívání nepozorujeme u reaktoplastu výraznou změnu stavu při dosažení přechodové oblasti zeskenění, která je charakterizována teplotou  $T_g$ . Ani nad touto teplotou se modul pružnosti reaktoplastu výrazně nemění a zůstává téměř konstantní až do dosažení teploty, při které se takovýto polymer rozloží (degraduje). [1, 3 ,4]



Obr. 2-2: Vliv zesítěné struktury na modul pružnosti ve smyku  $G$  [28]

### 2.1.3 Druhy reaktoplastů

V zásadě máme pět základních druhů reaktoplastů – fenoplasty, aminoplasty, polyuretany, polyesterové pryskyřice a epoxidové pryskyřice.

**Fenoplasty**, jinak nazývané fenolické pryskyřice, se nejčastěji využívají jako lisovací hmoty při výrobě slévárenských pískových forem, dále jako tmely, lepidla, ale také jako pojivo laminátů při výrobě nábytku (Obr. 2-3). Nezreagovaný fenol je zdraví škodlivý a proto je nelze používat tam, kde by docházelo ke styku s potravinami. Typický zástupce této skupiny reaktoplastů je fenol-formaldehydová pryskyřice (PF).



Obr. 2-3: Příklad aplikace fenoplastů [4]

**Aminoplasty** neboli aminopryskyřice se stejně jako fenoplasty nejčastěji slučují s formaldehydem. Rozdíl mezi nimi je v tom, že aminoplasty jsou zdravotně nezávadné a proto se dají používat i v potravinářství (Obr. 2-4). Jsou bezbarvé a ve formě vodného roztoku se používají i jako licí a lakovací pryskyřice nebo lisovací hmoty.



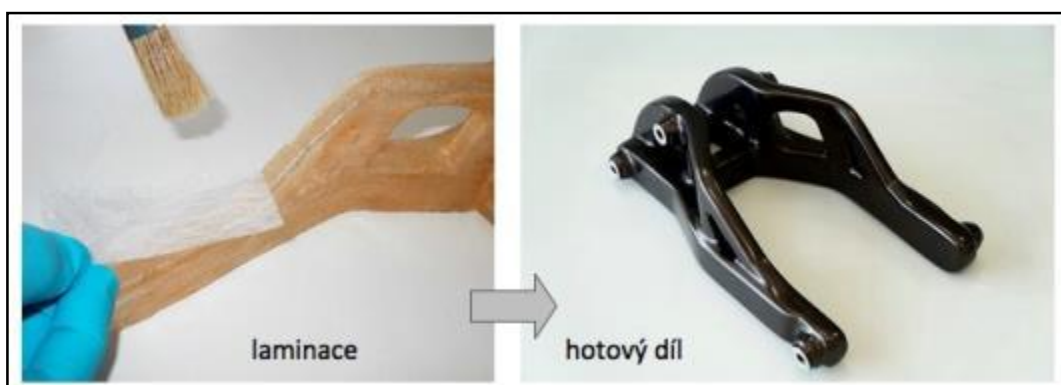
Obr. 2-4: Příklady aplikací aminoplastů [4]

**Polyuretany** lze jako směs isokyanátů, polyolů a dalších aditiv připravit nejen jako reaktoplast, ale také jako semikrystalický termoplast nebo elastomer. Jedním z jejich nejznámějších využití je výroba pěn různých struktur od měkkých přes polotvrdé až k tvrdým s pevným nenapěněným povrchem. Tyto pěny pak mají široké spektrum využití, měkké pěny např. jako matrace, výplně v sedadlech a hlavových opěrkách, tvrdé pěny se využívají například v automobilovém průmyslu na výrobu různých madel a ochranných lišt (Obr. 2-5).



Obr. 2-5: Příklady aplikací polyuretanů [4]

**Polyesterové pryskyřice** se využívají například při výrobě syntetického mramoru, kde slouží jako pojivo. Časté je také jejich využití k impregnaci (Obr. 2-6) a v bižuterii a galanterii na výrobu knoflíků.



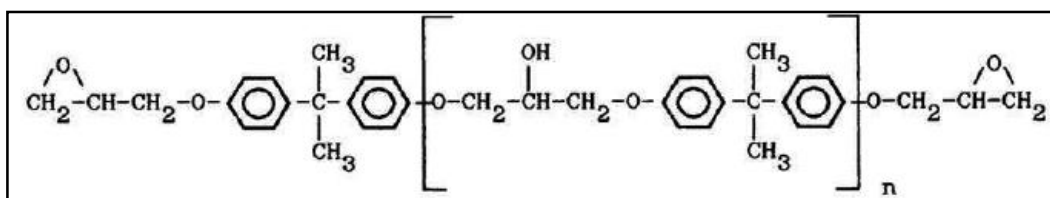
Obr. 2-6: Příklad impregnace polyesterovou pryskyřicí [4]

Epoxidovým pryskyřicím jako materiálu důležitému pro níže popisovaný experiment je věnována následující podkapitola. [1, 2, 3 ,4]

## 2.2 Epoxidové pryskyřice

**Epoxidové pryskyřice** (dále jen EP) tvoří významnou skupinu pryskyřic, zasahujících do různých aplikačních úseků. Jejich počátek sahá do padesátých let 20. století a v prvních fázích vývoje byly EP využívány zejména k

elektroizolačním aplikacím a později v zubní protetice. Jedná se o látky obsahující více než jednu epoxidovou vazbu. Nejčastěji jsou připravované EP na bázi bisfenolu A (Obr. 2-7). Díky svým specifickým vlastnostem jsou možnosti využití tohoto druhu reaktoplastu velmi široké, od lepidel, zalévacích a nátěrových hmot přes lisovací hmoty a lakařské pryskyřice až po využití jako pojiv pro lamináty a jiné kompozitní materiály (Obr. 2-8). [1, 3, 32]



Obr. 2-7: Vzorec nejběžnějšího typu EP [32]

### 2.2.1 Vlastnosti epoxidových pryskyřic

EP mají celou řadu výborných užitných vlastností. Jedná se především o velmi dobrou adhezi k celé řadě materiálů, vysokou tvrdost a chemickou i tepelnou odolnost po vytvrzení. V neposlední řadě vynikají výbornou tvarovou stálostí po vytvrzení a malým smrštěním při vytvrzování. Poslední dvě jmenované vlastnosti byly s výhodou využity pro tento experiment. [3]

### 2.2.2 Vytvrzování epoxidových pryskyřic

V základním nevytvrzeném stavu se jedná o viskózní, bezbarvé až nažloutlé materiály většinou s konzistencí kapalin nebo tvrdých křehkých látek. Pro potřeby finálního využití je tedy potřeba EP vytvrdit. Pro zahájení samotného procesu vytvrzování je potřeba do materiálu vložit primární energii, která způsobí vznik vazeb mezi molekulami. Jak bylo již uvedeno tato energie může být ve formě tepla, záření nebo katalyzátoru. Nejčastěji se k vytvrzování využívá katalyzátorů, tzv. **tvrdidel**, které se do pryskyřice přidávají buď při běžné teplotě (cca 21°C) nebo zvýšené teplotě až 200°C. Tvrdidla bývají nejčastěji polyaminy, anhydridy polykarboxylové kyseliny, polythioly nebo formaldehydové pryskyřice – fenolické, močovinnové nebo melaminové.



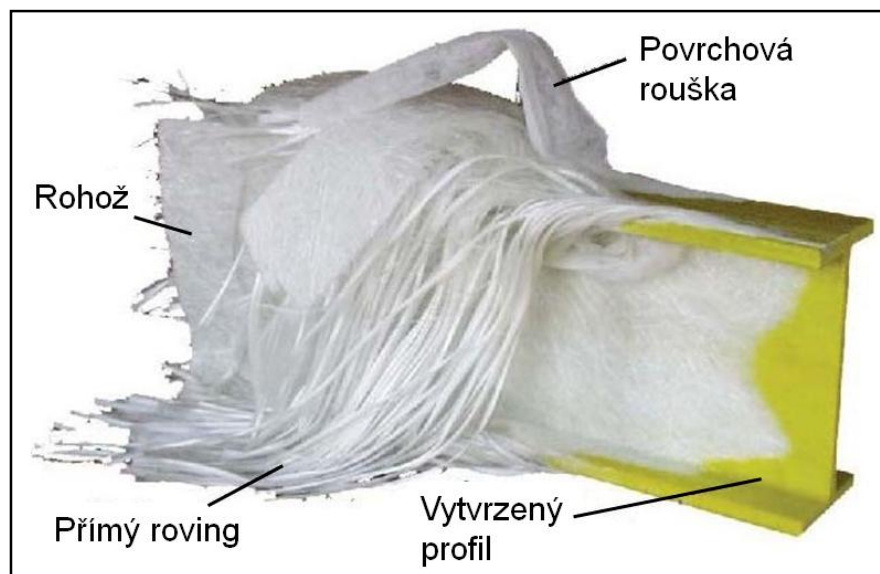


Obr. 2-8: Příklady aplikací EP [4]

Chemický princip vytvrzovacích reakcí je založený na přítomnosti epoxidových vazeb, které umožňují polyadici sloučenin s aktivním vodíkem, nebo polykondenzaci přítomných hydroxylových skupin. [3]

### 2.3 Kompozitní materiály

Jedním z charakteristických rysů moderní doby je stále častější používání **kompozitních materiálů** (dále jen kompozity), které přináší v klasické oblasti inženýrského konstruování a nejen v ní skutečnou revoluci. Kompozity (Obr. 2-9) jsou složeny zpravidla ze dvou, ale i více složek, tzv. **fází**. Tyto fáze jsou výrazně chemicky i fyzikálně odlišné a mají mezi sebou znatelné rozhraní. Spojením těchto složek vznikne zcela nový materiál s naprosto unikátními vlastnostmi, kterých nelze dosáhnout kteroukoliv složkou samostatně ani pouhým součtem vlastností jednotlivých fází. Tomuto jevu se říká **synergický efekt**. [5, 6, 8]



Obr. 2-9: Příklad kompozitu vyrobeného pultruzí [30]

Abychom mohli o materiálu hovořit jako o kompozitu je nutné, aby minimálně jedna jeho fáze byla tuhá. Zpravidla tuhá, tvrdší a pevnější složka se nazývá výztuž neboli **disperze**. Z důvodu zachování homogenity a izotropie vlastností kompozitu je nutné, aby v něm byla disperze rovnoměrně rozptýlená.

V některých případech je případná anizotropie materiálu žádoucí a dá se s výhodou využít, např. při výrobě luků a lyží.

Druhou složkou kompozitů je tzv. **matrice**. Matrice bývá obvykle poddajnější a slouží jako **pojivo**, které drží materiál pohromadě. Na rozdíl od nespojitě disperze je potřeba, aby pojivová část byla spojitá. [6, 8]

### 2.3.1 Vlastnosti kompozitních materiálů

Již ze samotné podstaty kompozitů vyplývá, že vlastnosti těchto vícefázových sloučenin se nedají jednoznačně určit. Výsledné vlastnosti se mohou diametrálně lišit podle vybraného druhu matrice a k tomu zvolené disperzi. Vhodnou volbou fází můžeme vytvořit materiál, který bude žárupevný, žáruvzdorný nebo korozivzdorný. Přesně zvoleným poměrem obsahu matrice a disperze je možné ovlivnit celou řadu vlastností, např. tepelnou a elektrickou

vodivost, tuhost a lomovou houževnatost. Pomocí disperze lze například zabránit rozvoji plastických deformací a tím zvýšit mez pevnosti, kluzu a tvrdost.

Jednou z velkých předností kompozitů je jejich nízká hmotnost, čehož se hojně využívá ve strojírenství, kde se jimi nahrazují tradiční těžké ocelové součásti. [5, 6, 8]

### 2.3.2 Rozdělení kompozitních materiálů

Základní dělení kompozitů je na tzv. **první, druhý a třetí druh**.

Nejdůležitější a nejvyužívanější jsou kompozity prvního druhu, u kterých se jako disperze využívá fáze pevná. U kompozitů druhého druhu představuje disperzi kapalná fáze. Tento druh kompozitů nachází uplatnění například jako materiál samomazných ložisek, kdy se spéká kov s olejem. Olej slouží jako disperze. Kompozity třetího druhu jsou takové, které mají jako disperzi vzduch nebo nějaký plyn. Jedná se například o speciální keramické tepelné izolace nebo pěnový polystyren.

Z hlediska materiálu použitého na matici rozlišujeme kompozity s **polymerní, kovovou, skleněnou, keramickou, sklokeramickou** nebo **uhlíkovou** maticí.

Dále lze dělit kompozity podle materiálu disperze na **kovové** a **nekovové**.

Kovové disperze mohou být buďto ve formě čistých kovů – W, Fe, Cr, Mo, Ti, Ni nebo jejich slitin. Nekovové anorganické materiály disperze se dále dělí na keramické materiály ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC, TiC atd.), sklo, čedič, bor a hlavně uhlík. V případě nekovových organických materiálů na disperze můžeme za všechny jmenovat například různá polymerová vlákna, aramidová vlákna (Kevlar) a polyamidová vlákna (Nylon).

Podle geometrického tvaru disperze dělíme kompozity na **vláknové, částicové** a **skeletové**.

Vláknové kompozity se dále dělí dle délky vláken na kompozity s **kontinuálními** vlákny, s **dlouhými** vlákny a s **krátkými** vlákny. Částicové kompozity lze ještě rozdělit na **sférické** (izometrické) a **destičkovité** (anizometrické). Pórovitá pojivová část protkaná souvislým nosným skeletem je pak typická pro skeletový kompozit.

Velmi významnou skupinou materiálů využívanou napříč všemi průmyslovými odvětvími jsou kompozity s polymerní matricí vyztuženou různými druhy vláken. [5, 7]

### 2.3.3 Polymerní matrice

Pojivová část, jinak nazývaná **matrice**, má u kompozitů několik významných úloh. Její hlavní úlohou je dokonalé spojení všech fází v jeden kompaktní celek. Tím matrice zároveň udává vnější tvar, funkční povrch součásti a vzhled (včetně barvy). Matrice dále zajišťuje přenos vnějšího zatížení na jednotlivé části disperze (vlákna, částice aj.).

Požadavek na co nejjednodušší přípravu kompozitů jde ruku v ruce s možností převedení matrice do kapalného stavu. Tuto vlastnost polymerní matrice vcelku bez větších problémů splňují. [5, 7]

Tab. 1: Porovnání mech. vlastností matric z reaktoplastů [5, 7]

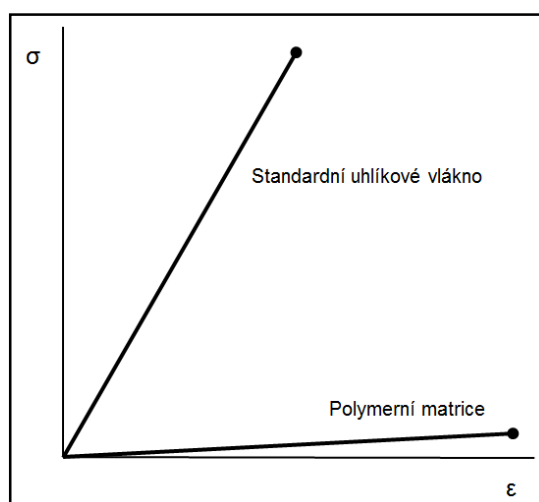
Materiál	Hustota $\rho$ [ $10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]	Pevnost v tahu $R_m$ [MPa]	Tažnost A [%]
Epoxidová pryskyřice	1,1 – 1,4	2,1 – 6	35 – 90	1 – 10
Polyestery	1,1 – 1,5	1,3 – 4,5	45 – 85	1 – 5
Fenolické pryskyřice	1,3	4,4	50 – 60	1 – 3
Polyimidy (až do teploty 350°C)	1,2 – 1,9	3,0 – 3,1	80 – 190	2 – 40

### 2.3.4 Disperze

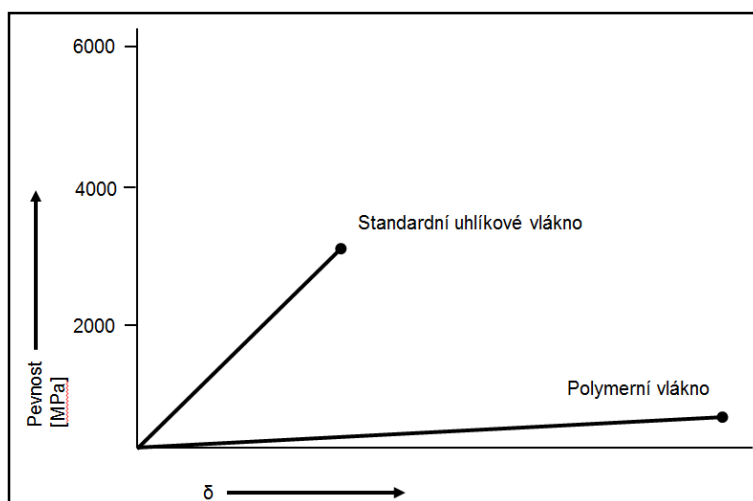
Jak bylo již uvedeno, disperze tvoří nosnou strukturu kompozitů. U kompozitů s polymerní matricí se používá především z důvodu zvýšení mechanických vlastností výsledné struktury, např. meze pevnosti, rázové houževnatosti a modulu pružnosti. Může být ve formě částic různého tvaru, whiskerů nebo kuliček. V současné době však patří mezi nejpoužívanější druh disperze pro polymerní matrice **vlákna**. [5, 7]

#### 2.3.4.1 Vláknohá disperze

Principem vyztužování vlákny je fakt, že vlákna, která mají o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost ve srovnání s polymerní matricí (Obr. 2-10, Obr. 2-11), se při vnějším namáhání deformují méně než polymer. [9]

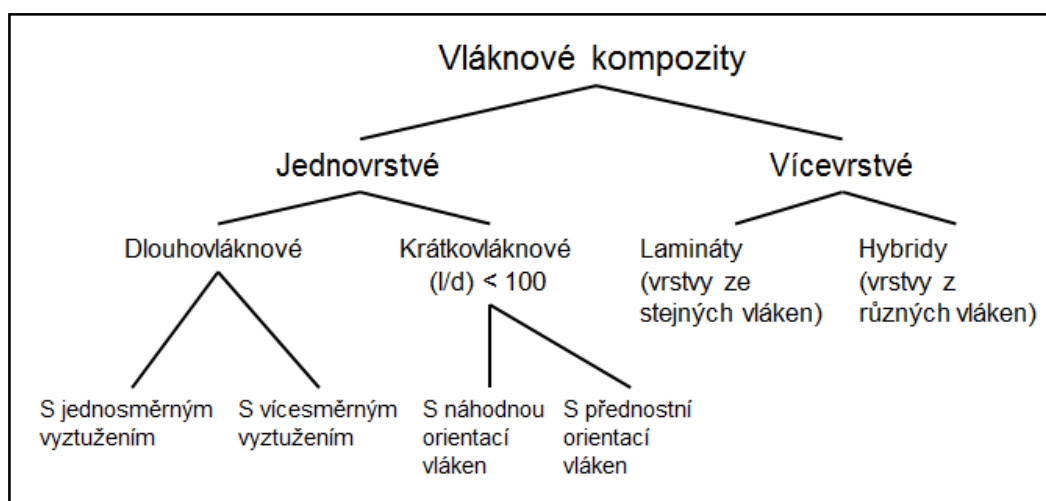


Obr. 2-10: Schématické znázornění rozdílů v křivkách napětí - poměrné prodloužení polymerní matrice a uhlíkového vlákna [7]



Obr. 2-11: Schematické znázornění pevností a tuhostí různých vláken [7]

Vyztužující plniva tvaru vláken jsou vyráběna z více druhů materiálu a v různých délkách. Vyráběná vlákna mají nejčastěji kruhový průřez o průměru 5 až 20  $\mu\text{m}$ . Pevnost vláken roste se zmenšujícím se průměrem. Přesto se ale vlákna s průměry pod 5  $\mu\text{m}$  nevyrábějí, neboť z technologického hlediska se výrobky s velmi tenkými vlákny složitě prosycují matricemi. Také délka vlákna ovlivňuje výslednou pevnost kompozitu. Nejčastěji se vyrábí vlákna skleněná, uhlíková, kovová, aramidová, minerální a přírodní, která se podle délky dělí na krátká (~ 3 mm) a dlouhá (10 až 16 mm), (Obr. 2-12).

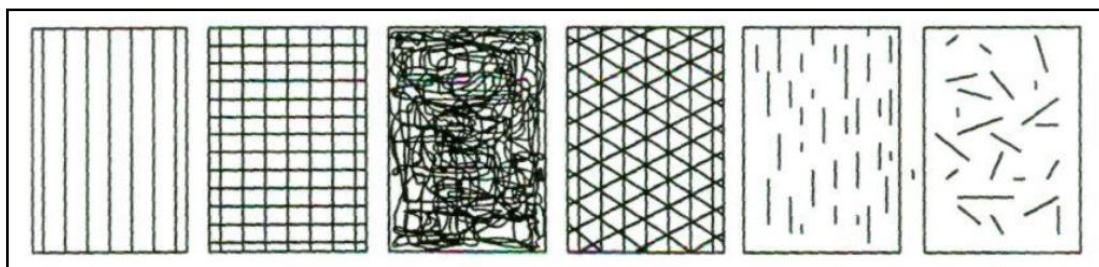


Obr. 2-12: Rozdělení vláknových kompozitů z geometrického pohledu [5]

Rovněž je více možností rozložení vláknové disperze v kompozitech (Obr. 2-13). U jednovrstvých kompozitů s dlouhými vlákny mohou být vlákna uspořádána jednosměrně, dvousměrně, vícesměrně nebo nahodile. U jednovrstvých kompozitů s krátkými vlákny mohou být vlákna uspořádána přednostně jednosměrně nebo nahodile.

K nejvíce využívaným vláknům z přírodních materiálů patří vlákna konopí, kokosu a lnu. Největší využití z pohledu mechanických vlastností mají v oblasti kompozitů s polymerní matricí vlákna skleněná a uhlíková. Pro většinu náročných aplikací (části letadel, hnací hřídele aj.) jsou však nejčastěji využívány **uhlíkové kompozity**, tzn. uhlíková vlákna v polymerní matrici.

Nová vlákna jsou dodávána navinutá na válcových cívkách nebo v podobě textilií. V dnešní době již však lze pořídit i vlákna recyklovaná, dodávaná například v plastových lahvičkách. [7]



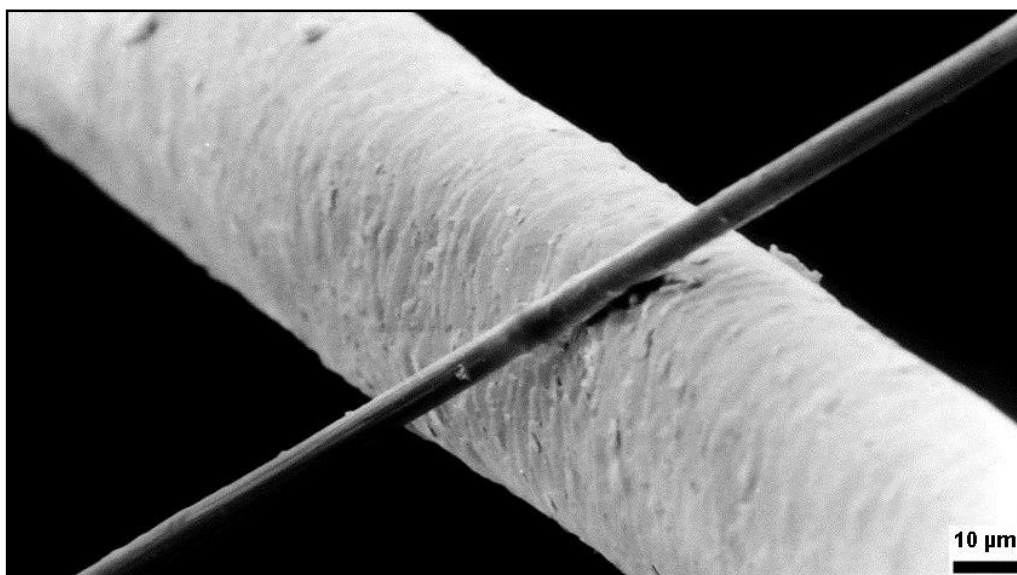
Obr. 2-13: Příklady uspořádání vláknové disperze v kompozitech [7]

### 2.3.5 Uhlíková vlákna

Převážná část uhlíkového vlákna (dále jen UV) je tvořena atomy uhlíku, které jsou dohromady spojeny v **krystaly**. Výsledné vlastnosti vlákna jsou určeny množstvím vnitřních defektů, velikostí a dokonalostí krystalů a jejich postavením vzhledem k dlouhé ose vlákna. Tyto vlastnosti jsou vysoce anizotropní a je možné je vhodným naorientováním krystalů měnit v širokém rozmezí. Zkombinováním určitého množství UV s vhodným pojivem je například možné připravit kompozit, který vykazuje minimální rozměrové změny při střídaní teplot ve velkém rozsahu, tzn. má velice malou teplotní roztažnost.

Surovina k výrobě vláken se nazývá **prekurzor**. Vlákná jsou nejčastěji vyráběna o průměru 6 až 8  $\mu\text{m}$  (Obr. 2-14). Povrchy vláken lze rovněž s výhodou upravovat. Například z důvodu zvýšení odolnosti proti poškození při vzájemném kontaktu se nejčastěji používá elektrochemická úprava povrchu. Pro zlepšení adheze s polymerními matricemi se vnější povrch okysličuje.

Prodejní cena UV poslední dobou vytrvale klesá a z nich připravované kompozity se tak stávají velmi žádaným materiálem. Nejen z tohoto důvodu jsou stále častěji využívány pro náročnější aplikace, kde jsou díly vystavované velkým mechanickým zatížením i vysokým teplotám. Z nich můžeme zmínit použití při výrobě součástí letadel, závodních vozů, lopatek generátorů, ale i hnacích hřídelů a sportovního vybavení. [5, 7, 10]



Obr. 2-14: Srovnání průměrů UV a lidského vlasu [10]

### 2.3.5.1 Technologie výroby uhlíkových vláken

Výroba UV z prekurzoru probíhá pomocí řízené pyrolýzy. Po prvotním zahřátí polyakrylonitrilových vláken následuje jejich protahování a tím dochází k potřebnému naorientování molekul a prodloužení na požadovanou jemnost. Následně se vlákna stabilizují v okysličující atmosféře do 230°C po dobu v řádech jednotek hodin. V dalším kroku přichází na řadu karbonizace, při které dochází k převodu prekurzoru na



UV. Ta probíhá při teplotách mezi 1000°C až 2000°C v inertní atmosféře. Po skončení karbonizace obsahuje vlákno 85% až 95% uhlíku. Následuje ještě jednou protahování a orientace krystalů. Posledním krokem v celém procesu je závěrečná grafitizace probíhající pod napětím a při vysokých teplotách až 3000°C.

Rozdílnými teplotami při grafitizaci můžeme získat širokou škálu vláken s různými hodnotami mechanických vlastností a modulu pružnosti. Pro představu UV zahřívání při grafitizaci mezi 1000°C až 2000°C získává nejvyšší pevnost v tahu na rozdíl od vlákna zahřívání při grafitizaci na teplotu dosahující 2400°C až 3000°C, které získá vysoký modul pružnosti v tahu. [5, 7, 10]

Tab. 2: Porovnání mech. vlastností vybraných vláken [5, 7]

Materiál	Hustota $\rho$ [10 <sup>3</sup> kg.m <sup>-3</sup> ]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]	Pevnost v tahu R <sub>m</sub> [MPa]	Tažnost A [%]
Skleněné vlákno typu E	2,54	73	2500 – 3500	2,5
Uhlíkové vlákno	1,9	230 – 950	2000 – 6000	0,7
Keramické vlákno SiC	2,6	250 – 300	2200 – 3000	0,9
UHMW polyethylenové vlákno	0,97	90 – 170	3000	1,7

### 2.3.6 Výroba vláknových kompozitů s reaktoplastickou maticí

Vlastní výrobní technologie spojování nosných vláken a polymerní matrice lze rozdělit dle skupenství, v jakém se nachází matrice při nanášení. Na základě tohoto rozdělení máme technologie **impregnace disperze kapalnou fází**, **infiltrace disperze plynnou fází** a **práškové metody** výroby kompozitů. Použití jednotlivých technologických postupů je závislé na druhu vyráběných

kompozitů (s krátkým či dlouhým vláknem). Pro matrice na bázi reaktoplastů se používají především metody impregnace kapalnou fází. [5, 7, 11]

Tab. 3: Technologické výrobní postupy používané u kompozitů [5]

Materiál	Dlouhé vlákno, (organická matrice)	Dlouhé vlákno, (kovová matrice)	Krátké vlákno, (polymerní matrice)
Ruční ukládání	x		x
Vakuově v autoklávu	x		x
Lisování v přípravku	x	x	x
Navíjení	x	x	
Válcování tlakem		x	
Nastříkávání			x
Přenos kapalné matrice	x	x	x
Vytlačování		x	x
Tváření tahem	x	x	
Vstřikování			x
Prášková metalurgie			x

### 2.3.6.1 Impregnace disperze kapalnou fází

V této podkapitole budou stručně popsány nejčastější technologie výroby kompozitů pomocí impregnace disperze kapalnou matricí.

Nejjednodušší a nejdostupnější technologií s matricí v kapalně formě je tzv. **ruční laminace za mokra**. Jedná se ruční kladení kapalně fáze na vlákno přímo ve formě a to buď za pomoci štětce nebo stříkací pistole. Pomocí tohoto postupu se vytvářejí vrstvy prosycené tekutou pryskyřicí s obsahem tvrdidla případně i urychlovače vytvrzování. Při tomto výrobním postupu jsou vlákna ve

formě tkanin nebo rohoží a lze tak docílit i výrobků značných rozměrů. Nevýhodou této technologie je značná nehomogenita struktury.

Při použití pro velmi náročné aplikace a namáhané konstrukce (např. v letectví) se používají tzv. **prepregy**. Prepregy s jednosměrně uloženými vláknovými tkaninami nebo rovingy jsou impregnované tekutou směsí polymerní matrice a tvrdidla. Výsledný prepreg obsahuje pouze mírný přebytek pryskyřice, která je v částečně vytvrzeném stavu. Prepregy je možné spojovat do vrstev, k čemuž se v sériové výrobě používají speciální CNC kladecí stroje. Vytvrzování dílů vyrobených z prepregů se provádí v tlakové nádobě, tzv. **autoklávu** (Obr. 2-15), do kterého se vkládá forma s dílem. V autoklávu se díl vakuuje a ohřívá na vytvrzovací teplotu použitého reaktoplastu. Po vytvrzení následuje pomalé ochlazování.

Ve formě je díl složen a opatřen řadou technologických vrstev, v pořadí – separační film formy, odtrhovací vrstva (folie), orientované nařezané prepregy, odtrhovací vrstva, vrstva umožňující průnik přebytečné pryskyřice do odsávací vrstvy, odsávací vrstva, odvzdušňovací vrstva.

V dnešní době již existuje i možnost mikrovlnného ohřevu formy s dílem. Mezi jeho výhody patří lepší kontrola teploty, nižší spotřeba energie a vyšší rychlost vytvrzování. V budoucnu by tak mohlo dojít k nahrazení dražších autoklávů.



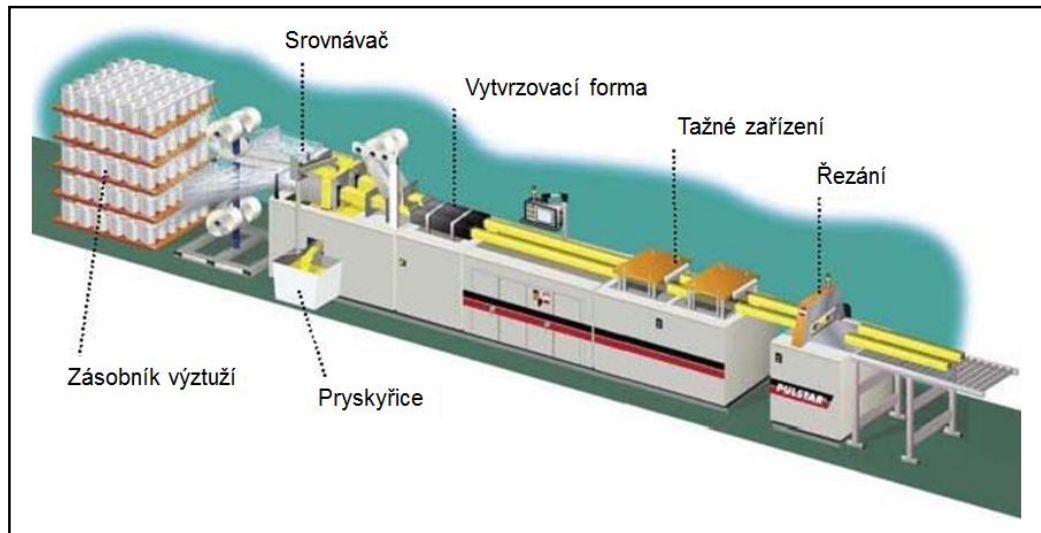
Obr. 2-15: Vytvrzování dílů v autoklávu [33]

Další metodou, kterou lze využít v případě požadavků na vysokou kvalitu povrchu a přesnost výsledného dílu je **RTM** (Resin Transfer Molding). Podstata metody spočívá v prosycování preformy tekutou pryskyřicí, která je již smíchaná s tvrdidlem. Preforma je vazebným prostředkem spojená předem vytvarovaná disperze, která je uzavřená v dutině formy. Kapalná směs je do formy dopravena pomocí čerpadla, případně přímo vstřikována pro urychlení výrobního cyklu. V případě vstřikování kapalné směsi je třeba zajistit disperzi proti posunutí v dutině formy. Touto metodou lze připravit rozměrné i menší, tvarově složitě výrobky.

Pro výrobu menších a tvarově složitých dílů se často používají i injektážní metody **R-RIM** (Reinforced Reaction Injection Molding) a **S-RIM** (Structural Reaction Injection Molding). U S-RIM metody je pryskyřice injektována do dutiny uzavřené formy, ve které je disperze. Oproti tomu při metodě R-RIM je do dutiny uzavřené formy injektována již směs pryskyřice a krátkých vláken.

Při metodě zvané **pultruze** je kontinuálně impregnované vlákno v podobě rovingů, rohoží nebo tkanin vtahováno do tvarovací a vytvrzovací části pultruzního stroje přes zužující se otvor, který zajišťuje odstranění přebytečné pryskyřice (Obr. 2-16).

Ve vytvrzovací části je pryskyřice zahřívána a vytvrzena. Hotové nekonečné profily jsou pak odtahovány a řezány na potřebné délky pilou s diamantovým kotoučem. Některé novější a dražší pultruzní stroje jsou vybaveny vstřikovacím modulem, který vstřikuje pryskyřici přímo do tvarovací hlavy, čímž je zajištěno lepší prosycení disperze. Takto vyráběné profily a sendvičové panely nacházejí uplatnění převážně ve stavebnictví.



Obr. 2-16: Pultruzní výrobní linka [30]

Pro hromadnou výrobu dílů například v automobilovém průmyslu je využívána technologie **SMC** (Sheet Moulding Compound), kde je s výhodou využíváno rychlé vytvrzovací reakce polyesterových pryskyřic (UP). Pro použití této metody je nezbytný hydraulický lis a dvoudílná vytápěná ocelová forma, ve které je lisována směs UP, vláken, plniv a dalších přísad do tvaru ohebných měkkých plátů. Nevýhodou této technologie je velmi vysoká cena potřebného vybavení (hydraulického lisu a ocelové formy). [5, 7, 11]

### 2.3.7 Moduly pružnosti krátkovláknového kompozitu

Moduly pružnosti krátkovláknového kompozitu je možné stanovit pro každý konkrétní případ pomocí metody konečných prvků (MKP). Pro první konstrukční návrhy se však většinou používají přibližné obecnější vztahy.

Níže jsou uvedeny vztahy pro podélný  $E_L$  a příčný  $E_T$  modul pružnosti **usměrněného** kompozitu, které vznikly na základě analýzy mikromechaniky krátkovláknových kompozitů.

$$\frac{E_L}{E_m} = \frac{1 + \frac{2l}{d} * \eta_L * v_f}{1 - \eta_L * v_f} \quad (1.1)$$

$$\frac{E_T}{E_m} = \frac{1 + 2 \cdot \eta_T \cdot v_f}{1 - \eta_T \cdot v_f} \quad (1.2)$$

, kde  $E_m$  je modul pružnosti matrice,  $l/d$  je štiřlostnř pomř vlřken,  $v_f$  je objemovř podřl vlřken urřenř vztahem:

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad (1.3)$$

, kde  $V_f$  je celkovř objem vlřken ve vzorku a  $V_c$  je celkovř objem vzorku a kde se parametry  $\eta_L$  a  $\eta_T$  urřř nřsledovně:

$$\eta_L = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + 2 \frac{l}{d}} \quad (1.4)$$

$$\eta_T = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + 2} \quad (1.5)$$

, kde  $E_f$  je modul pružnosti vyztuřujřcř vlřken.

Z uvedenřch vztahř (1.1) – (1.5) vyplřvř, že velikost přřchnřho modulu pružnosti  $E_T$  nezávisř na velikosti štiřlostnřho pomřru  $l/d$ .

V přřpadě **nřhodnř smřrově orientace** krřtkřch vlřken v matrici dochřzř k izotropickému chovřnř kompozitu a modul pružnosti zřstřvř pro vřechny smřry neměnnř. V literatuře se uvřdř dřležitř empirickř vztah pro jeho urřenř:

$$E = \frac{3}{8} E_L + \frac{5}{8} E_T \quad (1.6)$$

Dosazovaně hodnoty  $E_L$  a  $E_T$  se mohou stanovit buď podle předchozřch vztahř pro usmřrněnnř krřtkovlřknovř kompozit se stejnřm pomřrem  $l/d$  a měrnřm objemem vlřken  $v_f$  nebo se stanovř experimentálně. [5]

## **2.4 Měřicí a automatizační technika**

### **2.4.1 Měření ve strojírenství**

Ve strojírenské výrobě je obvyklé vyrábět strojní součásti nebo obrábět funkční plochy s přesností na setiny milimetru. Při zvýšených nárocích na přesnost někdy i v toleranci 0,001 mm. Jednou ze zásadních otázek ve strojírenské výrobě tedy je nejen jak těchto přesností dosáhnout, ale také jak takové míry a rozměry měřit.

Pro běžná měření menších součástí ve strojírenské výrobě se používají nestanovená (tj. kalibrovaná) měřidla, jako jsou posuvná měřidla, mikrometrická měřidla, měřidla na otvory, úhlooměry, elektronické digitální váhy, optické kolimátory a další přístroje používané pro kontrolu drsnosti povrchu, kruhovitosti atd.

Nutnost kontroly rozměrných součástí, například celých karosérií v automobilovém průmyslu, však vyžaduje specifitější přístup a vede k používání mobilních měřicích zařízení a souřadnicových měřicích strojů.

Souřadnicové měřicí stroje se vyznačují velkou přesností, univerzálností a flexibilitou. Jejich velkou výhodou je možnost využití CAD modelů součástí určených k měření a možnost určení problematických oblastí nutných k proměření. Výstupy z těchto měření se pak zaznamenávají přímo do modelů společně s úchytkami měření, což dává jasnou představu o přesnosti výroby dané součásti.

Nejpokrokovější jsou zařízení na bázi kamerových systémů, která zajišťují bezkontaktní měření zvolených součástí. Těmito zařízeními lze bez problémů provádět průběžnou automatizovanou kontrolu i 10 – 15 ks za sekundu. [12, 13, 14, 15, 16]

### **2.4.2 Materiály pro měřicí a automatizační techniku**

Za jeden z prvních důležitých materiálů, použitých na měřicí techniku v našich zemích, by se dala považovat slitina platiny a iridia. Z této slitiny byl

vyroben etalon metru, zakoupený roku 1928 za čtvrt milionu tehdejších Kčs. Od té doby prošly nástrojové materiály používané na měřicí a později i automatizační techniku dlouhým vývojem.

V dnešní době se používá široké spektrum přírodních i syntetických materiálů. Velmi sledovanou vlastností materiálů používaných pro výrobu měřicí techniky je **délková teplotní roztažnost** (dále jen DTR). Z důvodu minimální reakce materiálu měřidla na změnu teploty a z důvodu zachování maximální přesnosti měřidla je velmi důležité, aby **koeficient délkové teplotní roztažnosti  $\alpha$**  (dále jen koeficient  $\alpha$ ) použitého materiálu byl co nejnižší.

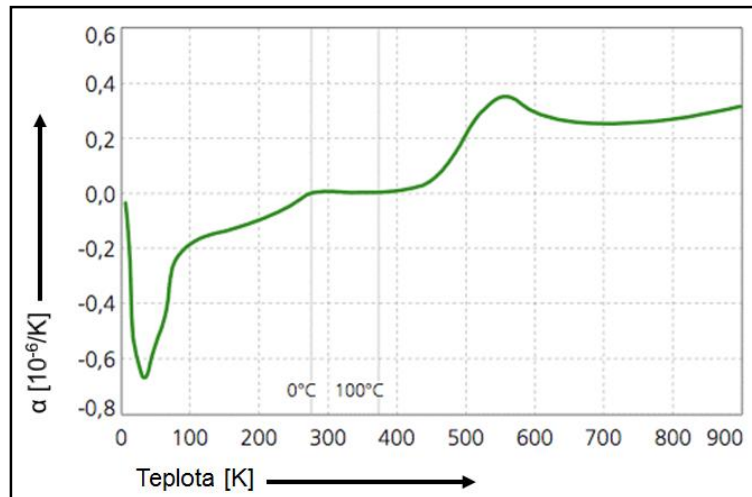
Jedním z běžně používaných materiálů s velmi nízkým koeficientem  $\alpha$  (cca  $3,3 \mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ ) je **křemenné sklo**, které se používá například v optických přístrojích nebo optických vláknech.

Existuje však i materiál s ještě nižším koeficientem  $\alpha$  než má křemenné sklo. Jmenuje se **ZERODUR®** a má koeficient  $\alpha$  cca  $0,007 \mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ . Díky svým vlastnostem je vhodný k použití v nestandardních podmínkách (např. v místech s extrémně nízkou teplotou). Zejména proto se používá k výrobě zrcadel a čoček pro teleskopy umístěné ve vesmíru. Nevýhodou tohoto materiálu je velmi vysoká cena a proto není vhodný na běžné aplikace (např. výroba měřicí techniky) (Obr. 2-17).

**Invar** je další běžně dostupný materiál s velmi nízkou hodnotou koeficientu  $\alpha$  (cca  $1,2 \mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ ), který je často používaný pro výrobu měřicí techniky. Invar je slitina niklu (36%) a železa. Vyrábí se z něj například nosné části souřadnicových měřicích strojů.

Běžná dílenská měřidla (posuvná měřidla, mikrometry, úhlooměry aj.) se standardně vyrábějí z **nástrojové oceli**. V ČR se jedná nejčastěji o nástrojovou ocel třídy 19422. Dříve se používala ocel bez jakýchkoli tepelných úprav, ta ale postupem času díky zvyšujícím se nárokům vyplývajícím z technických norem přestala vyhovovat. Proto se později začala tepelně zpracovávat, aby dosahovala požadovaných kvalit. Například pro výrobu úhelníků se kalí ocel uhlíková, slitinová, nástrojová, cementační nebo korozivzdorná.





Obr. 2-17: Koeficient  $\alpha$  materiálu ZERODUR® [34]

Také v přírodě se nachází materiály s malou teplotní roztažností, např. **žula**. Žula má oproti oceli téměř poloviční koeficient  $\alpha$  (cca  $7,9 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ) a proto se i žula hodí na výrobu měřicí a automatizační techniky. Používá se například k výrobě teplotně a dynamicky stabilních měřicích a zkušebních granitových desek.

V poslední době lze zaznamenat rychlý rozvoj materiálů, které svými vlastnostmi lépe odpovídají požadavkům kladeným na měřicí techniku. Těmito vlastnostmi jsou například rozměrová stálost, malá teplotní roztažnost, dobré tlumicí vlastnosti apod.. Jedná se o materiály na bázi **karbidů wolframu**, **karbidů chromu**, **keramiky** a dále jsou to **slitiny mědi** a **kompozity**. Tyto materiály se používají například pro výrobu rozměrově náročných koncových a úhlových měrek.

Kompozit s názvem **polymerbeton** s dobrými tlumicími vlastnostmi se používá pro výrobu rámu souřadnicových měřicích strojů.

Slitina mědi a niklu s názvem **konstantan** se využívá při výrobě mřížky tenzometrů.

Společnost Murtfeldt Plasty, která se zabývá vývojem a výrobou plastů, dodává na trh nepřeberné množství druhů **plastů** pro širokou škálu strojírenských aplikací. Pro různé druhy automatizační techniky lze za všechny

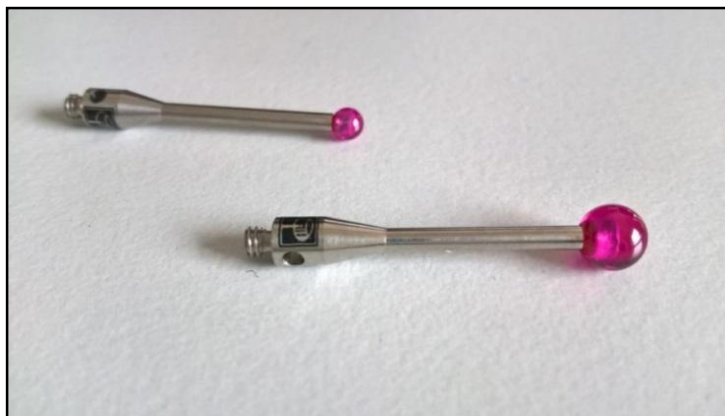
jmenovat materiál s názvem “S”® **zelený (S-grün)**. Jedná se o ultravysokomolekulární nízkohustotní polyetylén s řadou speciálních vlastností: extrémně vysoká otěruvzdornost a odolnost abrazivnímu prostředí, vynikající kluzné vlastnosti, odolnost vůči chemikáliím, vysoká rázová houževnatost, nelepivost a nenasákavost. Díky uvedeným vlastnostem je možné využít tento materiál pro kluzná ložiska, vedení řetězů, kluzné profily dopravníkové techniky, jako navádění při svařování atd. [2, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26]

### 2.4.3 Materiály pro výrobu měřicích doteků

Samostatnou kapitolou jsou materiály určené na výrobu měřicích doteků pro skenování a měření na souřadnicových měřicích strojích.

U převážné většiny měřicích aplikací je vyhovujícím materiálem na výrobu dotekové kuličky **rubín** (Obr. 2-18). Syntetický rubín je vlastně oxid hlinitý s čistotou 99%. Existují jen dva případy, kdy rubínová kulička požadavkům nevyhovuje. Prvním případem je skenování hliníkových dílů a odlitků, kdy se z důvodu tzv. adhezního otěru doporučuje použití kuličky vyrobené z **nitridu křemíku**. Druhým případem je skenování litinových dílů. Zde je z důvodu zvýšeného opotřebení povrchu rubínové kuličky otěrem lepší alternativou **oxid zirkoničitý**.

Jako materiály pro výrobu dřívků měřicích doteků se používají **nemagnetická nerezová ocel**, karbid wolframu, keramika, **UV**, **hliník** a **titan**. [25]



Obr. 2-18: Měřicí dotek RENISHAW s rubínovou kuličkou [35]

### 3. Experiment

Na základě zadání firmy MESING spol. s.r.o., Brno se začal vyvíjet nový kompozit na bázi reaktoplastu plněný UV pro výrobu měřicí a automatizační techniky. Firma by ho v budoucnu ráda využila zejména na výrobu měřicích doteků pro 3D souřadnicové měřicí stroje a jako dotykových měřicích ploch na nestanovených měřidlech (posuvných, mikrometrických aj.). Základním požadavkem na vyvíjený kompozit byla nízká DTR s koeficientem  $\alpha$  v rozmezí 10 – 20  $\mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ . Koeficient  $\alpha$  se běžně určuje v laboratorních podmínkách při teplotě  $20^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  a tlaku 101325 Pa.

Níže bude podrobně popsán experiment, pomocí kterého byl vyvinut výše uvedený kompozit, metodika tohoto experimentu, použité materiály, problémy, které přípravu a měření provázely a výsledky získané na základě těchto měření [31].

#### 3.1 Metodika výroby vzorků

Pro účely experimentu byly od každého materiálového složení vyrobeny vždy tři druhy vzorků ve tvaru kvádrů o rozměrech **35 x 24,5 x 9**, **30 x 10 x 9** a **30 x 5 x 9** mm. Vzorky byly připraveny z devíti typů různého materiálového složení od čisté (neplněné) EP po vzorky s plněním 10, 20, 40, 60, 80, 85, 90 a 100 DSK (dále podrobněji popsáno v kapitole 3.3.1).

Pro výrobu vzorků z kompozitu byla jako matrice použita EP CHS-EPOXY 520 (3.2.1) a jako disperze byla zvolena recyklovaná UV o průměru 7  $\mu\text{m}$  (3.2.3). Do zvoleného množství EP byla ručně vmíchána odpovídající hmotnost recyklovaných UV a celá směs byla poté na minimálně 24 hodin odložena (3.3.1). Po potřebném čase odležení bylo do směsi přimícháno odpovídající množství tvrdidla P11 (3.2.2). Výsledná směs byla vlita do připravených silikonových forem (3.3.2). Tyto formy byly předem vyrobeny ze silikonové pryže Silastic T1 (3.2.4). Naplněné formy byly následně na 24 hodin umístěny do přetlakové nádoby. Po vyjmutí z přetlakové nádoby, bylo potřeba nechat vzorky ještě cca 10 dní odležet při konstantní teplotě, aby došlo k jejich dokonalému dotvrzení (3.3.2).

## 3.2 Použité materiály pro výrobu vzorků

### 3.2.1 Matrice – epoxidová pryskyřice

Jako matrice pro výrobu vzorků z kompozitu byla zvolena dvousložková, nízkomolekulární EP CHS – EPOXY 520 (EPOXY 15), (Obr. 3-1), která se nejčastěji využívá k odlévání, impregnaci, zalévání a lepení v různých průmyslových odvětvích. Tato pryskyřice s lehce nažloutlou barvou má vlastnosti viskózní kapaliny s hustotou  $1,16 - 1,17 \text{ g.cm}^{-3}$  při  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , viskozitou  $12,0 - 14,5 \text{ Pa.s}$  při  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , obsahu epoxidových skupin  $5,2 - 5,5 \text{ mol.kg}^{-1}$  a epoxidový hmotnostní ekvivalent  $182 - 192 \text{ g.mol}^{-1}$ . Další doplňující údaje jsou uvedeny v technicko-aplikačním listu v příloze (Příloha P1).

Koeficient  $\alpha$  čisté (neplněné) EP se dle naměřených hodnot pohybuje v rozmezí  $49 - 53 \text{ } \mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$ . Naměřené hodnoty korespondují s údaji nalezenými v odborné literatuře [27]. Tyto naměřené hodnoty byly však pro uvažované budoucí využití vyvíjeného materiálu pro měřicí a automatizační techniku nevyhovující. Pro dosažení hodnoty koeficientu  $\alpha$  adekvátní hodnotám nástrojové oceli, která má hodnotu koeficientu  $\alpha$   $11,5 \text{ } \mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$ , bylo nutné použít vhodné plnivo. Toto plnivo mělo sloužit nejen jako disperze kompozitu, ale zároveň muselo splňovat potenciál snížení koeficientu  $\alpha$  výsledného kompozitu.

### 3.2.2 Tvrdidlo – P11

Pro vytvrzení pryskyřice bylo použito tvrdidlo P11 v poměru 100 : 11 při hmotnostním a 100 : 13,5 při objemovém poměru (pryskyřice : tvrdidlo). Tvrdidlo P11 je tzv. rychlé tvrdidlo s menší dobou zpracovatelnosti a typickým dolepem na povrchu vzorku. Ten se dá snadno odstranit omytím vzorku v 3 % roztoku kyseliny citronové, následným omytím vodou a osušením. Další doplňující údaje jsou uvedeny v bezpečnostním listu v příloze (Příloha P2).



Obr. 3-1: EP CHS EPOXY 520 [35]

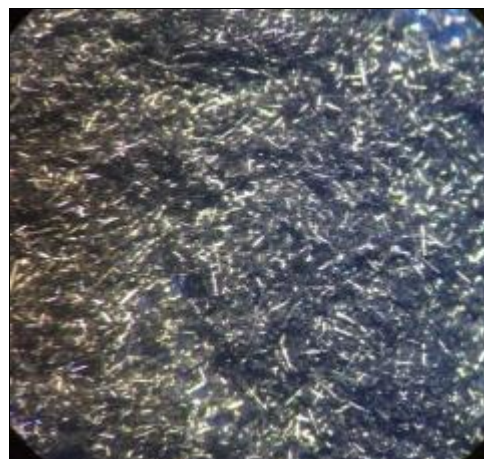
### 3.2.3 Plnivo – recyklovaná uhlíková vlákna

Materiálem s potenciálem snížit DTR výsledného kompozitu jsou UV, která mají koeficient  $\alpha$  v rozmezí 4 – 8  $\mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ . Z důvodu cenové úspory a šetrnosti k životnímu prostředí byla zvolena recyklovaná UV.

Recyklovaná UV Carbiso<sup>TM</sup> MF byla zakoupena od společnosti Easy Composites Ltd., která se na jejich distribuci specializuje. Výrobcem vláken je firma ELG Carbon Fibre Ltd. (Obr. 3-2).

Zvolený typ recyklovaných UV má průměr 7  $\mu\text{m}$ , střední délku 100  $\mu\text{m}$ , nízké množství nečistot a dobrou adhezi k polymerní matici. Další doplňující údaje jsou uvedeny v materiálovém listu v příloze (Příloha P3).

Při vytváření metodiky celého experimentu bylo zohledněno, že v porovnání s EP je koeficient  $\alpha$  standartních UV velmi malý. Přítomnost těchto vláken by tedy ve výsledku měla pozitivně ovlivnit chování výsledného kompozitu ve smyslu snížení DTR.



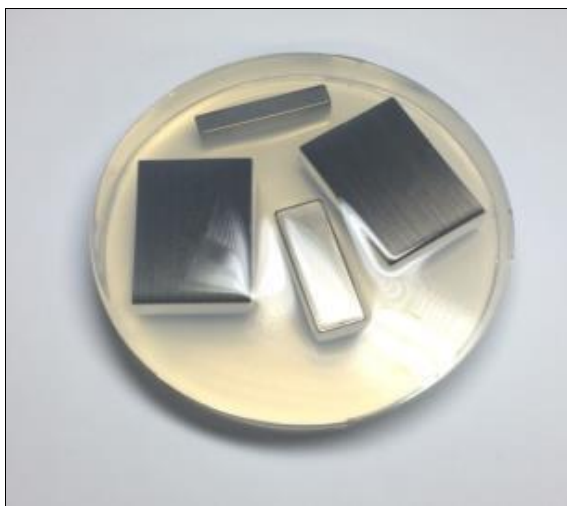
Obr. 3-2: Recyklovaná UV Carbiso<sup>TM</sup> MF [35]

### 3.2.4 Formy – silikonová pryž Silastic T1

Pro výrobu kompozitních vzorků byl zvolen přetržitý proces odlévání materiálových směsí do předem připravených forem. Tyto formy byly vyrobeny z dvousložkové silikonové pryže Silastic T1 (Obr. 3-3). Silikonová pryž byla pro výrobu forem zvolena jak z důvodu její snadné zpracovatelnosti, tak z důvodu snadné manipulace. Takto vyrobené formy nebylo nutné separovat, vzorky z nich bylo možné snadno vyjmát a formy se nemusely po použití komplikovaně čistit. Silikonové formy byly vyrobeny pro všechny tři typy vzorků s rozměry 35 x 24,5 x 9, 30 x 10 x 9 a 30 x 5 x 9 mm (Obr. 3-4).



Obr. 3-3: Silikonové formy pro odlévání vzorků [35]



Obr. 3-4: Originály vzorků zalité v silikonu [35]

### 3.3 Příprava vzorků

#### 3.3.1 Volba složení a příprava směsí

Do silikonových forem byly odlévány předem připravené směsi EP a recyklovaných UV. Směsi byly navrženy tak, aby bylo možné detekovat změny v hodnotách koeficientu  $\alpha$  související s přítomností použitého vyztužujícího plniva – recyklovaných UV. Štíhlostní poměr daný poměrem délky vlákna a průměru vlákna ( $L / d$ ) je v tomto případě 14,2.

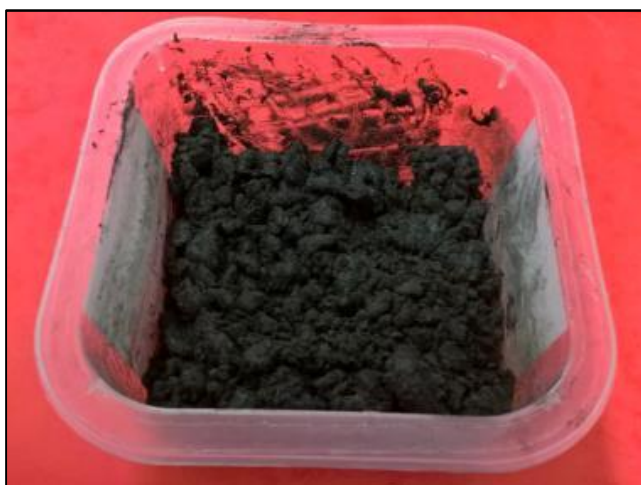
Do přesně odváženého množství EP bylo přidáno odvážené množství recyklovaných UV. Vlákna byla do pryskyřice vmíchána ručně. Míchání probíhalo tak dlouho, dokud nebyla směs homogenní. Postačující doba byla cca 5 minut. Poté byla směs ponechána v nádobě po dobu minimálně 24 hodin, aby unikly bubliny, které byly do směsi zaneseny mícháním. Do připravené směsi bylo následně po odstátí vmícháno adekvátní množství tvrdidla P11 dle doporučení výrobce. Po přidání tvrdidla byla směs míchána po dobu dalších cca 3 minut a následně vlita nebo vtlačena do připravené silikonové formy.

Pro účely výzkumu byly připraveny vzorky z devíti typů materiálového složení od čisté (neplněné) EP po vzorky s plněním 10, 20, 40, 60, 80, 85, 90 a 100 DSK. Množství plniva v matrici je udáváno zkratkou DSK, která udává, že k 100 g pryskyřice je přidáno 10 g plniva – tedy 10 DSK. Tato jednotka je běžně

využívána v gumárenském průmyslu a eliminuje nutnost přepočítávání na hmotnostní procenta.

### 3.3.2 Odlévání vzorků

Připravené směsi (Obr. 3-5 a Obr. 3-6) byly přeneseny do čistých a suchých silikonových forem. Formy byly mírně přelity přes svůj okraj, aby nedocházelo ke zmetkovitosti způsobené jejich nedolitím.



*Obr. 3-5: Směs s plnivem 80 DSK [35]*



*Obr. 3-6: Směs s plnivem 80 DSK pod mikroskopem [35]*



Naplněné silikonové formy (Obr. 3-7) byly následně umístěny do přetlakové nádoby, kde byly směsi ve formách vytvrzovány při přetlaku 0,7 MPa a teplotě  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  po dobu 24 hodin. Použitím přetlaku byly eliminovány bubliny v objemu připravovaného kompozitního vzorku a zároveň bylo dosaženo precizního okopírování povrchu formy.



Obr. 3-7: Naplněné silikonové formy [35]

Takto odlité vzorky (Obr. 3-8) byly dále hodnoceny až po dokonalém dotvrzení, které probíhalo při stálé laboratorní teplotě  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  po dobu minimálně 10 dní. Dotvrzování EP bylo možné urychlit také zvýšením teploty.



Obr. 3-8: Vzorky z vyvíjeného kompozitu [35]

### 3.4 Hodnocení vzorků

U každého ze vzorků byla sledována a měřena závislost prodloužení vytvořeného kompozitu  $\Delta l$  na teplotě  $t$  (dilatace). Z těchto hodnot byl vypočítán koeficient  $\alpha$  pro všechny kompozitní vzorky různého plnění EP recyklovanými UV.

#### 3.4.1 Měření délkové roztažnosti vzorků

Měření DTR u polymerů je složitější problém než u klasické oceli. Vzhledem k délce polymerních řetězců jsou všechny veličiny závislé také na čase a tedy i na rychlosti ohřevu. Střední koeficient  $\alpha$  je proto konstantní pouze v oblasti teplot, kde se polymer roztahuje lineárně a neprobíhají náhlé strukturní změny v důsledku relaxačních pohybů polymerních řetězců.

Důležitým předpokladem určování koeficientu  $\alpha$  je izotropní chování, což znamená, že zkoumaný polymerní vzorek má stejné vlastnosti v celém objemu. Je-li vzorek anizotropní, roztažnost polymeru v daném rozměru v závislosti na teplotě je složitější a závisí na změnách ve struktuře materiálu při ohřevu vzorku.

Roztažnost pevných látek se měří na zařízeních, které nazýváme dilatometry. Bohužel na TUL/FS pro tato měření nebyl žádný funkční dilatometr k dispozici.

Měření DTR bylo realizováno pomocí mrazicí komory (mrazáku) a zjednodušeného měřicího systému. Měřicí systém byl sestaven ze stojanu pro úchylkoměr s průměrnou základnou, digitálního úchylkoměru a šablony pro umístění měřeného vzorku. Tato šablona byla umístěna na křížovém stolku s mikrometrickými hlavicemi (Obr. 3-9).

Dalšími nezbytnými pomůckami používanými při měření byly digitální posuvné měřítko, digitální teploměr a vlhkoměr, plastové kolíčky a gumové rukavice.



Obr. 3-9: Detail měřicího systému s křížovým stolem [35]

Zjištěné hodnoty z měření DTR byly zpracovány dle níže uvedeného vzorce (1.7) pro výpočet DTR:

$$l_t = l_0 * (1 + \alpha * \Delta t) \quad (1.7)$$

Daný vztah vychází z následujícího.

Při určování DTR stanovujeme závislost  $l = f(t)$ . U vzorku, který má při teplotě  $t_0$  délku  $l_0$  a při teplotě  $t$  délku  $l_t$ , je prodloužení:

$$\Delta l = l_t - l_0 \quad (1.8)$$

Toto prodloužení  $\Delta l$  je přímo úměrné délce  $l_0$  a změně teploty  $\Delta t$ . Platí tedy:

$$\Delta l = \alpha * \Delta t * l_0 \quad (1.9)$$

, kde  $\alpha$  je koeficient délkové teplotní roztažnosti udávající závislost na druhu látky, pro který platí:

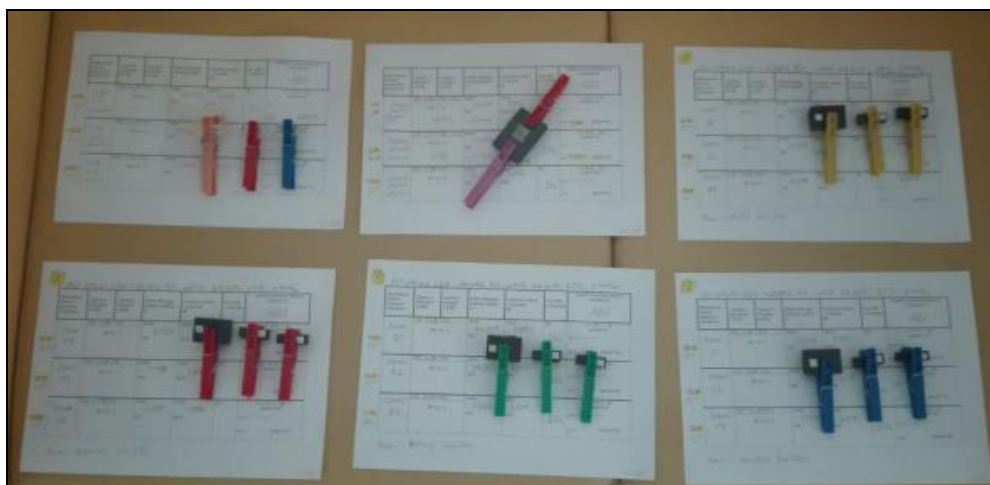
$$\alpha = \frac{1}{l_0} * \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{1}{m} * \frac{\mu m}{^\circ C} = \mu m * (m * ^\circ C)^{-1} \quad (1.10)$$

Délku vzorku při teplotě  $t$  lze pak vyjádřit vztahem (1.7). Hodnota koeficientu  $\alpha$  je číslo velmi malé, řádově  $10^{-6}$  m ( $10^{-6}$  m = 1  $\mu$ m).

### 3.4.2 Příprava měřicího zařízení a metodika vlastního měření vzorků

Pro potřeby uskutečnění měření DTR byla vytvořena metodika, která následně sloužila jako postup pro vlastní měření.

Před započítím každého měření byla pomocí digitálního teploměru a vlhkoměru změřena teplota a vlhkost v místnosti, kde měření probíhalo. Poté byly na jednotlivých materiálových vzorcích pomocí digitálního třmenového mikrometru změřeny délky vzorku a na měřicím systému s křížovým stolkem byly změřeny odchylky délky vzorku před vložením do mrazící komory. Všechny zjištěné hodnoty se zapisovaly do předem vytvořených měřicích listů (Obr. 3-10).



Obr. 3-10: Měřicí listy se vzorky [35]

Proměření na měřicím systému s křížovým stolkem pro zjištění odchylky délky vzorku před vložením do měřicí komory probíhalo následovně.

Nejprve se úchylkoměr přisunul nad vzorek, aby se na displeji digitálního úchylkoměru ukázala hodnota  $\pm 3,000$  mm. To bylo důležité z důvodu

zajištění dostatečného rozsahu přístroje při měření DTR, stabilnímu přítlaku doteku na vzorek a vyjímání vzorku (maximální rozsah digitálního úchylkoměru je 14,000 mm).

Následně se digitální úchylkoměr vynuloval. V případě proměřování většího počtu vzorků se stejným jmenovitým rozměrem proběhlo vynulování pouze při prvním vzorku a u dalších vzorků se pouze opisovala hodnota zobrazená na displeji.

Vzorky po proměření na měřicím systému byly i s přístrojem na měření teploty a vlhkosti umístěny na 24 hodin do mrazicí komory.

Po 24 hodinách v mrazicí komoře byly vzorky postupně vyndávány a z důvodu co možná nejmenšího zvýšení teploty byly rychle přeměřovány na měřicím systému pro zjištění výsledné odchylky délky vzorku po vyjmutí z mrazicí komory.

Získané hodnoty z měření odchylky délky vzorků, včetně teploty v mrazicí komoře, byly nejprve zapsány na měřicí listy a poté zadány do vytvořeného programu v softwaru Microsoft Excel, který následně vypočítal požadované koeficienty  $\alpha$  [ $\mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ ]. Náhled vytvořeného programu je uveden v příloze (Příloha P4).

Sestavený program v Microsoft Excelu vycházel ze vzorce (1.7).

### **3.4.3 Nedostatky při přípravě vzorků**

V průběhu přípravy vzorků, bylo zjištěno několik nedostatků, které budou v následujícím textu podrobněji popsány.

Základní nedostatek byl zjištěn při přípravách materiálových směsí. Jejich homogenita se zajišťovala ručním mícháním a často docházelo ke shlukování přidávaných UV. Tento problém byl vyřešen zahřátím míchané směsi na teplotu cca 60°C. Díky lepší tekutosti se shluky vláken snadno rozrušily a směs byla homogenní.

Dalším nedostatkem byla změna rozměru silikonové formy po vyjmutí vzorku. Silikonová forma změnila svůj rozměr, respektive objem prostoru, do kterého se odlévala materiálová směs. Tento objem se zmenšil v důsledku roztažnosti silikonu, která se pohybuje podle jeho typu a teplotního rozsahu v rozmezí  $\alpha = 200 - 340 \mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ . DTR silikonových kaučuků je zhruba třetinová než objemová teplotní roztažnost.

Nedostatkem bylo také vlastní smrštění kompozitního vzorku v průběhu vytvrzování. To souvisí se standardním smrštěním EP po vytvrzení, které je na úrovni cca 4%, jak udávají výrobci těchto hmot.

### 3.5 Vlastní experiment

V rámci výzkumu a vývoje nového kompozitu pro měřicí a automatizační techniku byly odlity dvě sady vzorků, z nichž každá byla proměřována v průběhu dvou měsíců. První sada byla vyrobena v červnu 2017 a testována od srpna do září 2017. Druhá sada byla vyrobena na konci srpna 2017 a testována od konce září do listopadu 2017.

V první sadě byly vždy tři rozměrové typy vzorků pro každé z 9 materiálových složení. První sada tedy obsahovala 27 vzorků k proměření. Z průběžných výsledků, získaných při měření první sady, se pro druhou sadu podařilo vytipovat dvě materiálová složení, jejichž výsledky neměly natolik vypovídající hodnotu. Proto se při výrobě druhé sady tato materiálová složení vynechala. Jednalo se o kompozity s plněním 10 DSK a 85 DSK. Ve výsledku tedy bylo ve druhé sadě 21 vzorků, na kterých se provádělo měření.

Každý ze tří vzorků z jednotlivých materiálových složení byl měřen vždy po 7 dnech po dobu 6 týdnů. K jednotlivým naměřeným hodnotám bylo třeba stanovit nejistotu měření. Ta má hodnotu  $U = \pm 0,02 \mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$  a je výsledkem všech nejistot vyskytujících se v průběhu měření. Nakonec byl z 6 naměřených hodnot ke každému vzorku statisticky vypočten aritmetický průměr  $\bar{X}$  a určena jeho směrodatná odchylka  $s$ .

### 3.5.1 První série měření: srpen – září 2017

Tab. 4: Hodnoty koeficientu  $\alpha$  z prvního měření – čistá EP [35]

<b>ChS EPOXY 520 + P11 – čistá</b>			
<b>Série a datum měření</b>	<b>Rozměr vzorků</b>		
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>
1. série – 4.8.2017	56,353	49,765	51,194
2. série – 11.8.2017	53,472	52,144	53,574
3. série – 18.8.2017	52,252	55,868	55,915
4. série – 25.8.2017	55,364	52,587	51,933
5. série – 1.9.2017	51,574	50,664	52,884
6. série – 8.9.2017	53,118	51,560	51,618

Tab. 5: Hodnoty koeficientu  $\alpha$  z prvního měření – 10 DSK [35]

<b>ChS EPOXY 520 + P11 10 DSK RCF</b>			
<b>Série a datum měření</b>	<b>Rozměr vzorků</b>		
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>
1. série – 4.8.2017	47,375	40,834	52,908
2. série – 11.8.2017	45,186	29,460	36,422
3. série – 18.8.2017	49,138	31,132	36,186
4. série – 25.8.2017	43,684	27,258	30,199
5. série – 1.9.2017	46,390	30,010	35,995
6. série – 8.9.2017	40,425	29,411	35,284

Tab. 6: Hodnoty koeficientu  $\alpha$  z prvního měření – 20 DSK [35]

<b>ChS EPOXY 520 + P11 20 DSK RCF</b>			
<b>Série a datum měření</b>	<b>Rozměr vzorků</b>		
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>
1. série – 4.8.2017	40,975	30,101	34,294
2. série – 11.8.2017	41,852	40,745	57,117
3. série – 18.8.2017	43,545	21,694	32,529
4. série – 25.8.2017	39,888	30,881	27,230
5. série – 1.9.2017	40,600	23,208	34,423
6. série – 8.9.2017	35,998	30,827	34,496

Tab. 7: Hodnoty koeficientu  $\alpha$  z prvního měření – 40 DSK [35]

<b>ChS EPOXY 520 + P11 40 DSK RCF</b>			
<b>Série a datum měření</b>	<b>Rozměr vzorků</b>		
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>
1. série – 4.8.2017	30,763	23,609	28,663
2. série – 11.8.2017	47,631	26,432	30,257
3. série – 18.8.2017	27,711	15,410	24,559
4. série – 25.8.2017	30,483	19,526	20,283
5. série – 1.9.2017	27,226	19,132	21,380
6. série – 8.9.2017	27,709	22,472	24,012



Tab. 8: Hodnoty koeficientu  $\alpha$  z prvního měření – 60 DSK [35]

<b>ChS EPOXY 520 + P11 60 DSK RCF</b>			
<b>Série a datum měření</b>	<b>Rozměr vzorků</b>		
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>
1. série – 4.8.2017	35,159	24,266	28,449
2. série – 11.8.2017	29,495	17,516	29,451
3. série – 18.8.2017	32,951	20,253	20,270
4. série – 25.8.2017	29,109	16,929	19,156
5. série – 1.9.2017	28,339	19,487	17,246
6. série – 8.9.2017	25,879	18,362	31,610

Tab. 9: Hodnoty koeficientu  $\alpha$  z prvního měření – 80 DSK [35]

<b>ChS EPOXY 520 + P11 80 DSK RCF</b>			
<b>Série a datum měření</b>	<b>Rozměr vzorků</b>		
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>
1. série – 4.8.2017	29,536	20,043	22,220
2. série – 11.8.2017	23,818	17,631	45,399
3. série – 18.8.2017	26,507	15,416	16,149
4. série – 25.8.2017	29,236	17,365	18,113
5. série – 1.9.2017	25,960	16,198	14,744
6. série – 8.9.2017	26,425	17,986	25,518

Tab. 10: Hodnoty koeficientu  $\alpha$  z prvního měření – 85 DSK [35]

<b>ChS EPOXY 520 + P11 85 DSK RCF</b>			
<b>Série a datum měření</b>	<b>Rozměr vzorků</b>		
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>
1. série – 4.8.2017	28,356	27,808	24,185
2. série – 11.8.2017	28,045	33,260	25,379
3. série – 18.8.2017	22,840	11,783	27,297
4. série – 25.8.2017	26,479	21,724	21,783
5. série – 1.9.2017	22,788	24,233	20,614
6. série – 8.9.2017	23,368	19,100	22,070

Tab. 11: Hodnoty koeficientu  $\alpha$  z prvního měření – 90 DSK [35]

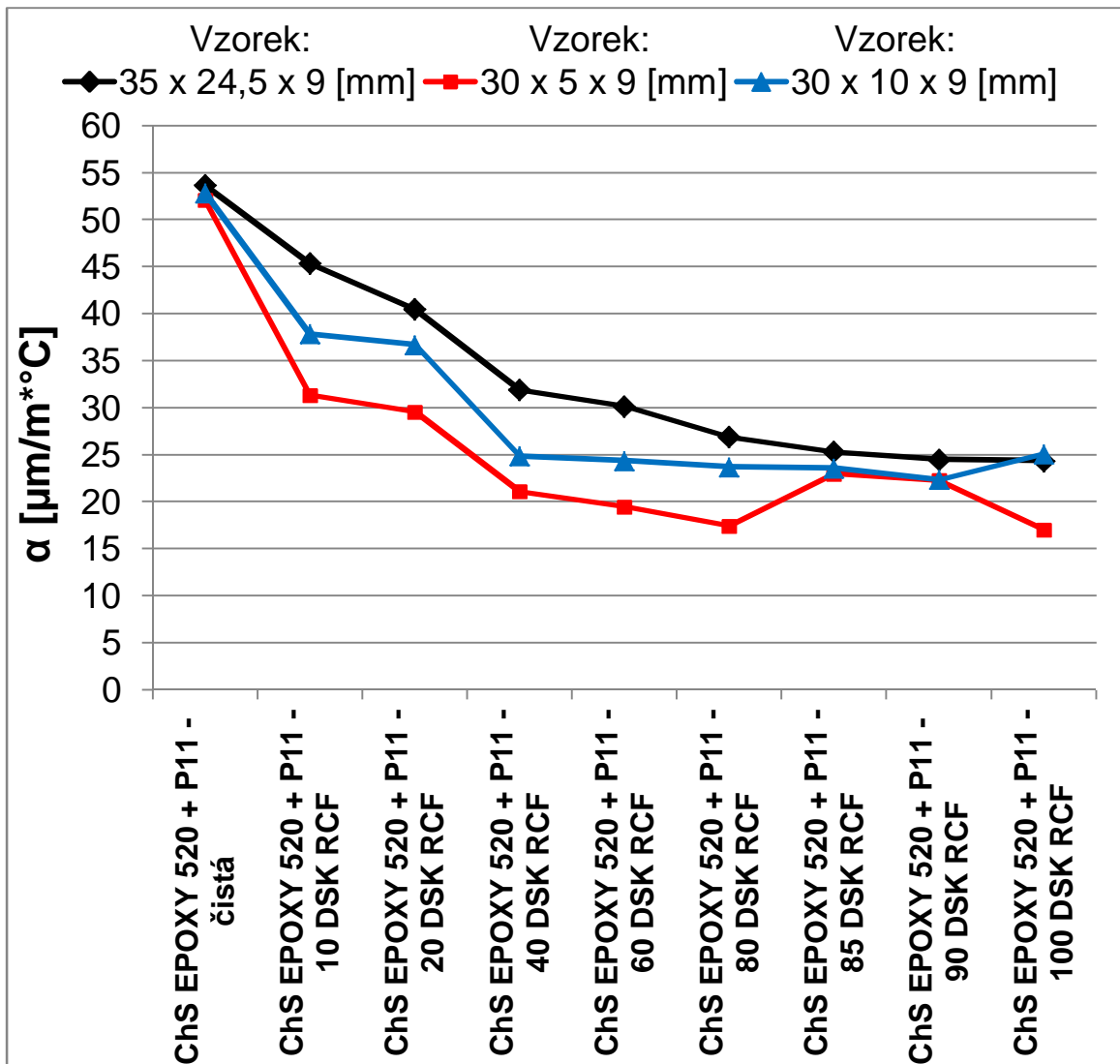
<b>ChS EPOXY 520 + P11 90 DSK RCF</b>			
<b>Série a datum měření</b>	<b>Rozměr vzorků</b>		
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>
1. série – 4.8.2017	26,166	25,004	26,266
2. série – 11.8.2017	24,697	17,486	20,999
3. série – 18.8.2017	27,355	26,126	21,680
4. série – 25.8.2017	24,682	19,648	18,372
5. série – 1.9.2017	23,828	24,505	23,954
6. série – 8.9.2017	20,201	20,857	22,741

Tab. 12: Hodnoty koeficientu  $\alpha$  z prvního měření – 100 DSK [35]

<b>ChS EPOXY 520 + P11 100 DSK RCF</b>			
<b>Série a datum měření</b>	<b>Rozměr vzorků</b>		
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>
1. série – 4.8.2017	22,059	22,838	35,192
2. série – 11.8.2017	27,160	14,721	25,156
3. série – 18.8.2017	27,430	16,646	24,530
4. série – 25.8.2017	22,836	15,465	20,560
5. série – 1.9.2017	25,820	13,493	23,916
6. série – 8.9.2017	20,882	19,108	21,247

Tab. 13: Výsledné průměrné hodnoty koeficientu  $\alpha$  z prvního měření [35]

<b>Materiálové složení vzorků</b>	<b>Rozměr vzorků</b>					
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>		<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>		<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
ChS EPOXY 520 + P11 – čistá	53,689	± 1,834	52,098	± 2,109	52,848	± 1,731
ChS EPOXY 520 + P11 10 DSK RCF	45,366	± 3,053	31,351	± 4,814	37,832	± 7,747
ChS EPOXY 520 + P11 20 DSK RCF	40,476	± 2,529	29,576	± 6,797	36,681	± 10,390
ChS EPOXY 520 + P11 40 DSK RCF	31,921	± 8,748	21,097	± 4,116	24,859	± 3,876
ChS EPOXY 520 + P11 60 DSK RCF	30,155	± 3,346	19,469	± 2,650	24,363	± 6,158
ChS EPOXY 520 + P11 80 DSK RCF	26,914	± 2,153	17,440	± 1,597	23,691	± 11,356
ChS EPOXY 520 + P11 85 DSK RCF	25,313	± 2,621	22,985	± 7,383	23,555	± 2,519
ChS EPOXY 520 + P11 90 DSK RCF	24,488	± 2,447	22,271	± 3,438	22,335	± 2,689
ChS EPOXY 520 + P11 100 DSK RCF	24,365	± 2,797	17,045	± 3,420	25,100	± 5,273



Graf 1: Výsledné průměrné hodnoty koeficientu  $\alpha$  z prvního měření [35]

### 3.5.2 Druhá série měření: září – listopad 2017

Tab. 14: Hodnoty koeficientu  $\alpha$  z druhého měření – čistá EP [35]

<b>ChS EPOXY 520 + P11 – čistá</b>			
<b>Série a datum měření</b>	<b>Rozměr vzorků</b>		
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>
1. série – 22.9.2017	45,436	47,689	50,670
2. série – 29.9.2017	50,516	48,730	50,928
3. série – 6.10.2017	48,815	48,546	51,533
4. série – 13.10.2017	49,332	50,746	50,015
5. série – 20.10.2017	50,492	51,370	46,995
6. série – 27.10.2017	49,644	49,678	48,985

Tab. 15: Hodnoty koeficientu  $\alpha$  z druhého měření – 20 DSK [35]

<b>ChS EPOXY 520 + P11 20 DSK RCF</b>			
<b>Série a datum měření</b>	<b>Rozměr vzorků</b>		
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>
1. série – 22.9.2017	34,123	26,439	37,458
2. série – 29.9.2017	33,312	30,080	38,027
3. série – 6.10.2017	34,075	33,599	36,621
4. série – 13.10.2017	34,835	31,598	33,135
5. série – 20.10.2017	36,020	36,692	32,315
6. série – 27.10.2017	32,719	29,210	32,917

Tab. 16: Hodnoty koeficientu  $\alpha$  z druhého měření – 40 DSK [35]

<b>ChS EPOXY 520 + P11 40 DSK RCF</b>			
<b>Série a datum měření</b>	<b>Rozměr vzorků</b>		
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>
1. série – 22.9.2017	28,392	13,919	23,564
2. série – 29.9.2017	27,735	15,731	23,735
3. série – 6.10.2017	26,985	21,631	23,241
4. série – 13.10.2017	27,205	14,685	22,881
5. série – 20.10.2017	27,144	23,436	22,104
6. série – 27.10.2017	28,282	17,503	21,990

Tab. 17: Hodnoty koeficientu  $\alpha$  z druhého měření – 60 DSK [35]

<b>ChS EPOXY 520 + P11 60 DSK RCF</b>			
<b>Série a datum měření</b>	<b>Rozměr vzorků</b>		
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>
1. série – 22.9.2017	35,940	22,025	22,073
2. série – 29.9.2017	25,250	18,641	25,854
3. série – 6.10.2017	23,104	15,693	27,708
4. série – 13.10.2017	24,020	21,345	24,349
5. série – 20.10.2017	24,597	19,096	22,062
6. série – 27.10.2017	24,497	13,980	24,166

Tab. 18: Hodnoty koeficientu  $\alpha$  z druhého měření – 80 DSK [35]

<b>ChS EPOXY 520 + P11 80 DSK RCF</b>			
<b>Série a datum měření</b>	<b>Rozměr vzorků</b>		
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>
1. série – 22.9.2017	25,242	22,033	25,735
2. série – 29.9.2017	22,187	21,517	24,412
3. série – 6.10.2017	21,842	20,194	25,443
4. série – 13.10.2017	20,243	30,200	22,107
5. série – 20.10.2017	15,778	29,385	19,849
6. série – 27.10.2017	22,624	20,477	23,431

Tab. 19: Hodnoty koeficientu  $\alpha$  z druhého měření – 90 DSK [35]

<b>ChS EPOXY 520 + P11 90 DSK RCF</b>			
<b>Série a datum měření</b>	<b>Rozměr vzorků</b>		
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>
1. série – 22.9.2017	24,007	21,341	25,048
2. série – 29.9.2017	20,794	20,554	22,041
3. série – 6.10.2017	23,222	21,933	22,700
4. série – 13.10.2017	24,368	26,943	20,379
5. série – 20.10.2017	21,868	26,215	24,018
6. série – 27.10.2017	22,493	23,302	23,290

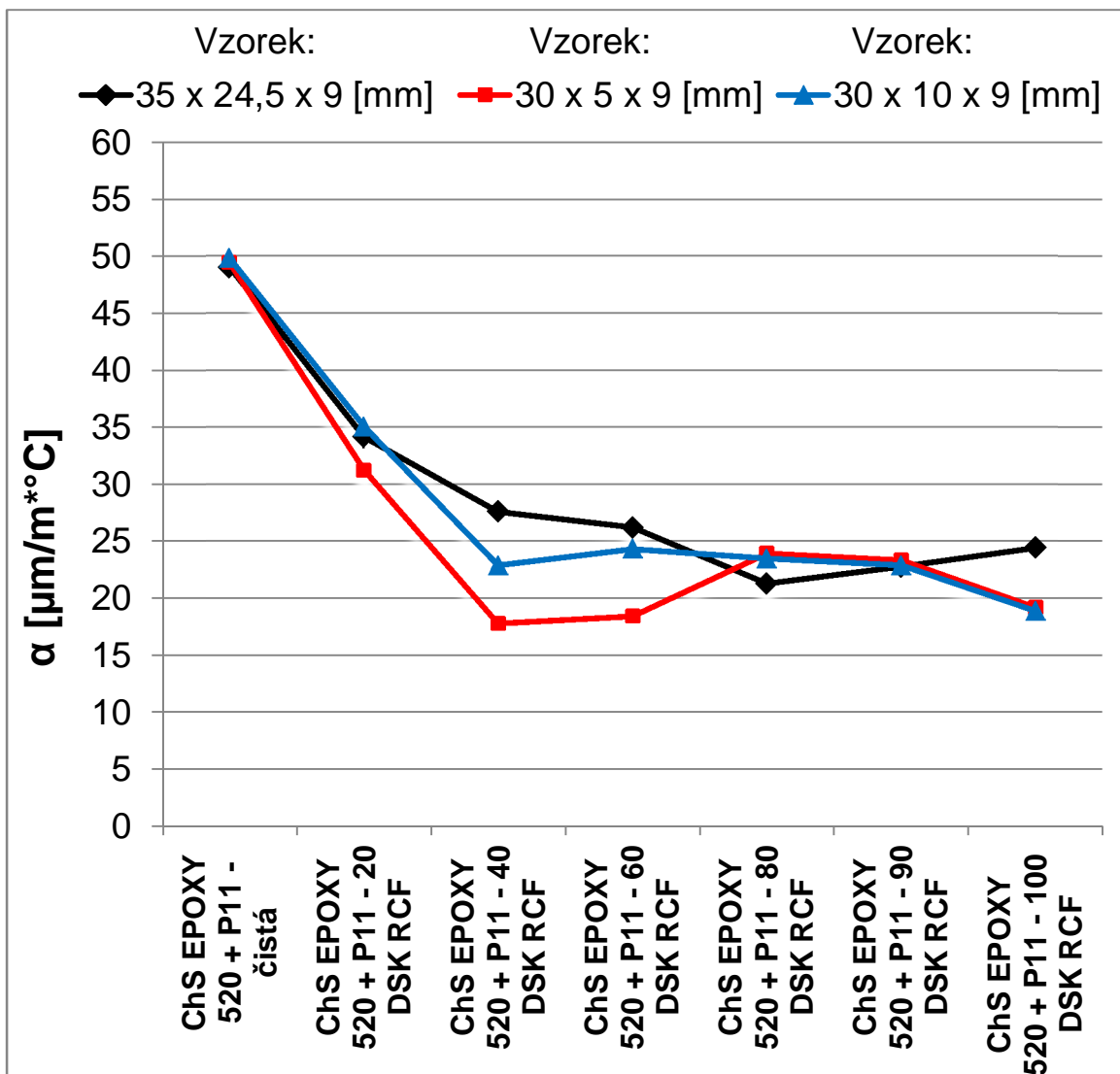
Tab. 20: Hodnoty koeficientu  $\alpha$  z druhého měření – 100 DSK [35]

<b>ChS EPOXY 520 + P11 100 DSK RCF</b>			
<b>Série a datum měření</b>	<b>Rozměr vzorků</b>		
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>	<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>
1. série – 22.9.2017	32,196	19,120	19,166
2. série – 29.9.2017	23,948	16,152	19,855
3. série – 6.10.2017	21,964	20,465	17,573
4. série – 13.10.2017	23,744	20,369	18,956
5. série – 20.10.2017	21,869	18,187	18,227
6. série – 27.10.2017	23,119	21,097	19,685

Tab. 21: Výsledné průměrné hodnoty koeficientu  $\alpha$  z druhého měření [35]

<b>Materiálové složení vzorků</b>	<b>Rozměr vzorků</b>					
	<b>35 x 24,5 x 9 [mm]</b>		<b>30 x 5 x 9 [mm]</b>		<b>30 x 10 x 9 [mm]</b>	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
ChS EPOXY 520 + P11 – čistá	49,039	± 1,886	49,460	± 1,404	49,854	± 1,649
ChS EPOXY 520 + P11 20 DSK RCF	34,181	± 1,159	31,270	± 3,575	35,079	± 2,562
ChS EPOXY 520 + P11 40 DSK RCF	27,624	± 0,608	17,817	± 3,888	22,919	± 0,737
ChS EPOXY 520 + P11 60 DSK RCF	26,235	± 4,808	18,448	± 3,163	24,369	± 2,190
ChS EPOXY 520 + P11 80 DSK RCF	21,319	± 3,162	23,968	± 4,569	23,496	± 2,230
ChS EPOXY 520 + P11 90 DSK RCF	22,792	± 1,347	23,381	± 2,645	22,913	± 1,622
ChS EPOXY 520 + P11 100 DSK RCF	24,473	± 3,882	19,232	± 1,838	18,911	± 0,874





Graf 2: Výsledné průměrné hodnoty koeficientu  $\alpha$  z druhého měření [35]

### 3.5.3 Zhodnocení výsledků měření

Na základě podrobné analýzy všech připravených vzorků z realizovaných experimentů s kompozity na bázi EP plněné vláknovou disperzí z uhlíku bylo zjištěno, že koeficient  $\alpha$  oproti neplněné EP významně klesá s přidávkem UV, a to až do plnění 40 DSK. Od této hranice již další přidávání UV do matrice zásadně nesnižuje koeficient  $\alpha$  výsledného vzorku. Naopak má negativní vliv, neboť dochází k velmi významnému zvyšování obtížnosti ručního zpracování vláken do polymeru (viz Obr. 3-4 a Obr. 3-5) důsledkem čehož se snižuje homogenita výsledného vzorku.

Vzorky z neplněné EP měly hodnoty koeficientu  $\alpha$  v rozmezí 49 – 53  $\mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ . Oproti tomu hodnoty optimálně plněných vzorků 40 DSK dosahovaly hodnoty 17 - 31  $\mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ , dle velikosti vzorku.

Při další důkladné analýze hodnot koeficientů  $\alpha$  všech tří skupin připravených vzorků lišících se svými rozměry byla zjištěna následující fakta.

Pokud jsou vzorky připraveny pouze z neplněné EP, nejsou v koeficientech  $\alpha$  vzorků lišících se svými rozměry žádné významné rozdíly. Po přidávku recyklovaných UV dochází ve všech skupinách vzorků lišících se svými rozměry k významnému poklesu koeficientu  $\alpha$ . Maximálně však do hodnoty plnění 40 DSK. Od této hranice již další přidávání UV do matrice zásadně nesnižuje koeficient  $\alpha$  u žádného z výsledných vzorků lišících se svými rozměry.

Nejvýraznější pokles koeficientu  $\alpha$  byl zaznamenán u vzorků s nejmenšími rozměry (nejmenším objemem). Tyto vzorky vykazovaly také nejstabilnější chování. U vzorků s většími rozměry (větším objemem) byla patrná mírná nestabilita systému, která byla pravděpodobně způsobena jejich větším objemem. Koeficient  $\alpha$  u těchto větších vzorků je také o něco vyšší ve srovnání se vzorky s menším objemem.

Z podrobné analýzy provedených experimentů je zřejmý pozitivní vliv recyklovaných UV na snížení koeficientu  $\alpha$ . Toto snížení je však prakticky konečné při použití plnění 40 DSK a dalšími přídatky vláken se již významně nemění.

Použití vyššího plnění pro dosažení nižšího koeficientu  $\alpha$  proto nedává smysl. Stejně tak nedává smysl využití vyššího plnění z hlediska materiálových nákladů na vzorek.

Z důvodu vysoké pořizovací ceny recyklovaných UV je zřejmé, že s dalším přidáváním tohoto plniva do matrice neúměrně roste cena výsledného vzorku.

Ve spojitosti s minimálními vlivy na snížení koeficientu  $\alpha$  a zvyšujícími se energetickými nároky na uvedení směsi do homogenního stavu bylo zjištěno, že použití vyššího plnění než 40 DSK nemá praktický význam.

Použitými vlákny daných rozměrů při štíhlostním poměru 14,2 není možné více snížit hodnoty koeficientu  $\alpha$ . Alternativou je použití vláken delších, kde by se uplatnil vyšší štíhlostní poměr.

#### **3.5.4 Finanční zhodnocení a kalkulace**

Dalším významným kritériem sledovaným při analýze provedených experimentů byly materiálové náklady na výrobu vzorků.

Cena jednoho kilogramu EP při maloobchodním prodeji je 300 Kč. Stejně množství plniva z recyklovaných UV lze pořídit od společnosti Easy Composites Ltd. za cca 900 Kč. Pokud uvažujeme váhu jednoho vzorku vyrobeného ze zkoumaného kompozitu cca 10 g, pak jich lze z jednoho kilogramu EP připravit cca 100 kusů. Při ceně plniva použitého pro výrobu jednoho vzorku pohybující se mezi 0,1 až 2 Kč podle množství plnění lze vypočítat, že materiálové náklady na výrobu jednoho vzorku se pohybují mezi 3,1 až 5 Kč.

<b>Materiálové náklady na výrobu jednoho vzorku</b>	
<b>1 kg epoxidové pryskyřice</b>	<b>300 Kč</b>
<b>1 kg recyklovaných uhlíkových vláken</b>	<b>900 Kč</b>
<b>Cena plniva do epoxidové pryskyřice</b>	<b>0,1 až 2 Kč</b>
<b>Váha jednoho standardního vzorku</b>	<b>10 g</b>
<b>Počet vyrobených vzorků z 1 kg epoxidové pryskyřice:</b>	<b>100 kusů</b>
<b>Materiálový náklad na 1 vzorek</b>	<b>3,1 až 5 Kč</b>

*Tab. 22: Materiálové náklady na výrobu jednoho vzorku [35]*

### **3.6 Porovnání s jinými materiály na výrobu měřicí techniky**

Současná kalibrovaná měřidla používaná ve firmách zabývajících se strojírenskou výrobou jsou v naprosté většině případů vyrobená z oceli. Pořizovací cena takových měřidel je vysoká a práce s nimi je náročná, neboť je zapotřebí dodržovat přesné postupy, aby nedošlo k jejich poškození. Dodržování přesných postupů práce s těmito měřidly však může vést ke snížení produktivity práce.

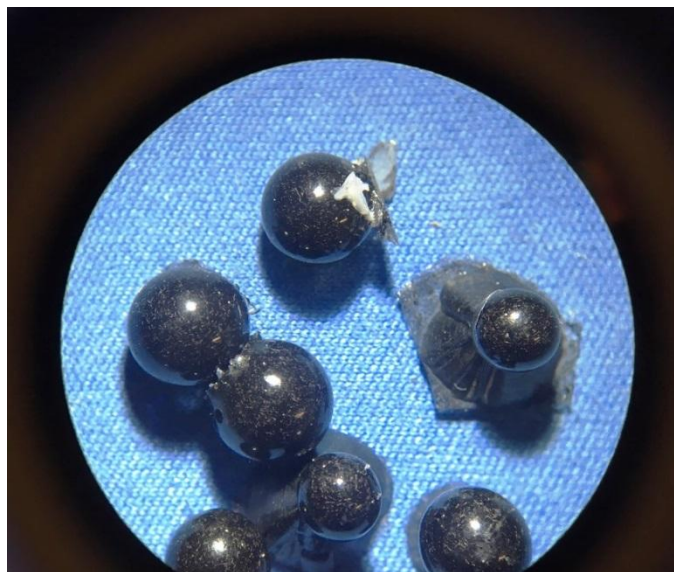
Proto často dochází k poptávce po vhodnějších druzích měřidel, která by splňovala vysoké nároky spojené se strojírenskou výrobou. Zejména v případech, kdy není bezpodmínečně nutné využití kovových měřidel, je možné s výhodou využívat měřidla jiných materiálových složení, kterými je možné zajistit požadovanou přesnost. V takových případech je vhodné využít kompozitní měřidla s polymerní matricí plněné různými disperzemi, například výše zkoumaný kompozit.

Pro přesné souřadnicové měření na 3D měřicích strojích jsou v dnešní době nejčastěji používány měřicí doteky ve tvaru kuličky ze syntetického rubínu. Pro některé speciální aplikace se dále používají kuličkové doteky vyrobené

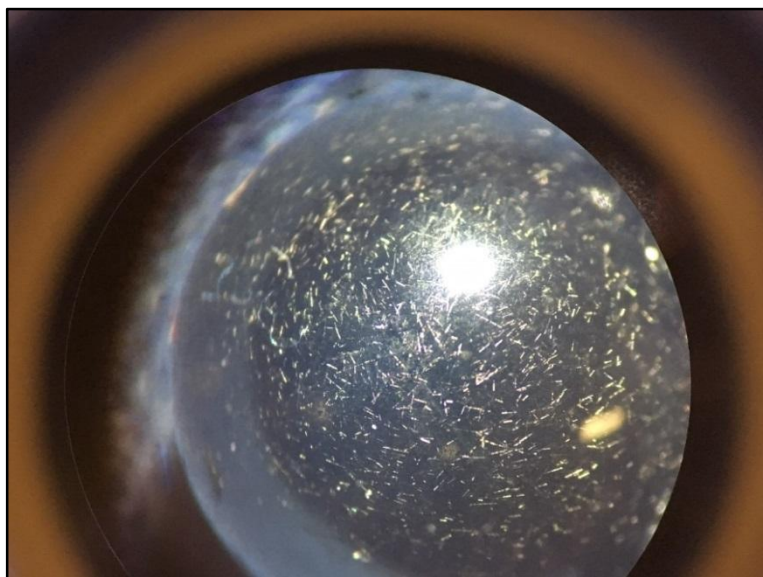
z oxidu zirkoničitého, nitridu křemíku či syntetického diamantu. Všechny shora uvedené materiály jsou však extrémně drahé a i v tomto případě by bylo maximálně vhodné použít k výrobě doteků zkoumaný kompozit, (Obr. 3-11 a Obr. 3-12).

### 3.6.1 Cenové srovnání měřicích doteků

Náklady na materiál potřebný k výrobě doteku (kuličky) by nepřesáhly 2 Kč. Samozřejmě je nutné zohlednit ještě další náklady (např. na materiál potřebný k výrobě dřívku, na kterém je kulička uchycena). I přesto však zůstává výše nákladů na materiál takového měřicího doteku hluboko pod hodnotou materiálu, ze kterého se měřicí doteky v současnosti vyrábí. Avšak neoddělitelnou a zároveň nejvyšší součástí celkových nákladů na výrobu měřicího doteku je dodržení tolerance kruhovitosti kuličky v předepsaných hodnotách (to však není součástí zadání a výzkumu této práce).



Obr. 3-11: Vzorokly měřicích doteků zvětšené pod mikroskopem [35]



Obr. 3-12: Vzorek měřicího doteku zvětšený pod mikroskopem [35]

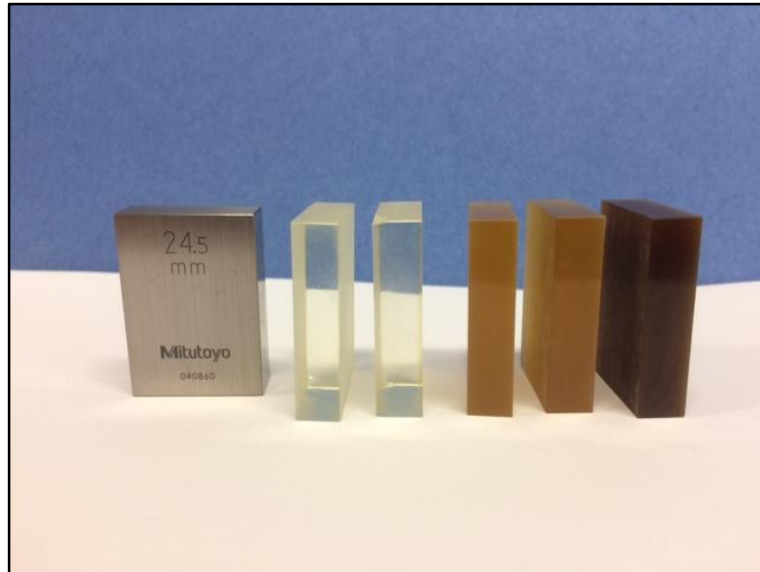
### 3.6.2 Porovnání vlastností

Jak bylo již uvedeno, ocelová měřidla v současnosti používaná v běžných průmyslových podnicích jsou velmi drahá. Mají však i další negativní vlastnosti, které je znevýhodňují v porovnání se zkoumaným kompozitem. Jedná se například o jejich elektrickou vodivost, náchylnost k poškození vlivem koroze při nesprávném skladování a nemožnost měření plastových dílců a lakovaných povrchů z důvodu vysoké pravděpodobnosti poškození povrchu.

Oproti tomu u měřicí a automatizační techniky vyrobené z výše zkoumaného kompozitu lze díky znalosti vstupujících materiálů předpokládat zvýšenou chemickou odolnost, dobré elektroizolační vlastnosti a nižší tvrdost.

Zvýšená chemická odolnost by se dala s výhodou využít při výrobě měřidel pro petrochemický průmysl, dobré elektroizolační vlastnosti lze uplatnit například v biomedicíně.

Měřicí a automatizační technika vyrobená z materiálu s nižší tvrdostí by mohla najít uplatnění v případech, kdy by docházelo k jejímu kontaktu s dílcí s velmi přesnými a hladkými povrchy. Toho by se dalo využít například při měření plastových a lakovaných dílců bez obavy z poškození povrchu.



Obr. 3-13: Ocelové měřidlo a vzorky na bázi čisté a plněné EP [35]

### 3.6.3 Porovnání užité hodnoty

Při porovnávání užité hodnoty lze vycházet z nutnosti správného skladování a šetrného zacházení s ocelovými měřidly, aby se předcházelo jejich poškození nebo korozi (**Obr. 3-13**). To může mít v určitých případech vliv na produktivitu práce uživatele. U ocelových měřidel jsou také nutností častější mezikalibrační kontroly, kontroly měřidel po opravě nebo před nasazením do výroby. Velmi nákladná je také jejich pravidelná kalibrace.

Nově vyvinutý kompozit v sobě nese potenciál zvýšení produktivity práce svoji nenáročností na skladování, zacházení a na provozní prostředí obecně. Přidanou hodnotou by byla také absence rekalibrace měřidel, neboť by se provedla pouze jejich prvotní kalibrace a po uplynutí předem stanovené doby platnosti by se přestala používat. Materiál by mohl najít uplatnění při výrobě měřidel pro automobilový průmysl, letectví, petrochemii a biomedicíně, stejně jako ve velkém množství průmyslových a inženýrských aplikací po celém světě.

## 4. Diskuze

Hlavním cílem předkládané diplomové práce bylo vyvinout a otestovat nový kompozit na bázi reaktoplastu plněný UV, který bude vynikat velmi nízkým koeficientem  $\alpha$  a bude vhodný pro použití při výrobě měřicí a automatizační techniky ve firmě MESING spol. s.r.o., Brno. Firma by ho v budoucnu ráda využila zejména na výrobu měřicích doteků pro 3D souřadnicové měřicí stroje a jako dotykových měřicích ploch na nestanovených měřidlech (posuvných, mikrometrických aj.).

Základní informace k problematice řešené v této práci jsou obsaženy v teoretické části v kapitole 2.

Kapitola 2 je věnována souhrnným informacím o reaktoplastech, způsobu jejich vzniku, jejich vlastnostem a jednotlivým druhům reaktoplastů (podkapitola 2.1). Dále jsou zde podrobně rozebrány EP, vlastnosti EP a způsoby jejich vytvrzování (podkapitola 2.2). Součástí této kapitoly je rovněž rozbor kompozitů, jejich vlastností, rozdělení kompozitů, druhy matric, druhy disperzí, UV jako druh disperze důležitý pro tento experiment a technologie výroby UV (Podkapitola 2.3). Poslední podkapitola teoretické části seznamuje s měřicí a automatizační technikou používanou ve strojírenství a s mnoha druhy materiálů, které se pro výrobu měřicí a automatizační techniky využívají (Podkapitola 2.4).

Hlavním informacím vedoucím k dosažení cíle předkládané diplomové práce je věnována celá kapitola 3.

Kapitola 3 na začátku nejprve stručně přibližuje metodiku celého experimentu. Dále obsahuje informace o druzích, typech a počtech vzorků, použitých materiálech a způsobu přípravy vzorků (Podkapitola 3.1). V následující podkapitole jsou podrobně popsány materiály použité při tomto výzkumu, jejich základní vlastnosti a jejich objemové a váhové poměry (Podkapitola 3.2). Příslušné materiálové listy jsou uvedeny v přílohách (Příloha P1, Příloha P2). V další podkapitole je uveden postup přípravy vzorků, tzn. příprava materiálových směsí, volba jejich složení a postup odlévání připravených směsí do forem (Podkapitola 3.3).



V kapitole 3 jsou také uvedena kritéria hodnocení vzorků, podrobný popis postupu měření DTR vzorků, pomůcky, zařízení a měřidla nutná k realizaci měření a v neposlední řadě empirické vztahy a vzorce použité k výpočtům výsledných hodnot. Rovněž bylo nutné uvést postup sestavení, přípravy a kalibrace měřicího zařízení, metodiku vlastního procesu měření a nedostatky při přípravě vzorků. Tyto nedostatky bylo potřeba brát v úvahu, předejít jim nebo se jich vyvarovat, protože by ve svém důsledku mohly vést ke znehodnocení výsledků (Podkapitola 3.4). Hlavní částí této kapitoly je pak samotný průběh experimentu, hodnocení DTR, přehledné shrnutí výsledků měření, jejich zhodnocení a cenová kalkulace (Podkapitola 3.5). Nedílnou součástí experimentu je porovnání vyvinutého kompozitu s jinými materiály, používanými v současné době při výrobě měřicí techniky. Při porovnávání byla zohledněna zejména cena, vlastnosti a užitná hodnota materiálů (Podkapitola 3.6).

Ze souboru vlastností, postupů, zkoušek, měření a získaných výsledků uvedených v kapitolách 3.1 – 3.6 je možno zdůraznit následující:

- **Použité materiály**

K výrobě vzorků z kompozitního materiálu byla jako matrice použita dvousložková nízkomolekulární epoxidová pryskyřice CHS-EPOXY 520 a jako disperze byla zvolena recyklovaná uhlíková vlákna Carbiso<sup>TM</sup> MF o průměru 7  $\mu\text{m}$  a střední délkou vláken 100  $\mu\text{m}$ . Pro vytvrzení pryskyřice bylo použito tvrdidlo P11 v poměru 100 : 11 při hmotnostním a 100 : 13,5 při objemovém poměru (pryskyřice : tvrdidlo).

Bylo bráno v potaz, že v porovnání s EP je koeficient  $\alpha$  standardních UV velmi malý a přítomnost těchto vláken by tedy ve výsledku měla pozitivně ovlivnit chování výsledného kompozitu ve smyslu snížení DTR.

- **Volba materiálového složení vzorků**

Byly připraveny vzorky z devíti typů materiálového složení od čisté (neplněné) EP po vzorky s plněním 10, 20, 40, 60, 80, 85, 90 a 100 dsk.

- **Formy pro výrobu vzorků**

Pro výrobu vzorků byl zvolen přetržitý proces odlévání materiálových směsí do forem, které byly vyrobeny z dvousložkové silikonové pryže Silastic T1.

- **Tvar a rozměry vzorků**

Pro účely experimentu byly od každého materiálového složení vyrobeny vždy tři typy vzorků ve tvaru kvádrů s rozměry 35 x 24,5 x 9, 30 x 10 x 9 a 30 x 5 x 9 mm.

- **Nedostatky při přípravě vzorků**

Základním nedostatkem bylo shlukování UV při jejich zapracování do pryskyřice. Při ručním míchání směsí s vyšším plněním bylo náročnější docílit potřebné homogenity směsi. Tento problém byl vyřešen zahřátím míchané směsi na teplotu cca 60°C. Díky lepší tekutosti se shluky vláken snadno rozrušily a směs byla homogenní.

Dalším nedostatkem bylo vlastní smrštění kompozitního vzorku v průběhu vytvrzování a také změna rozměru silikonové formy po vyjmutí vzorku.

- **Technika a zařízení použité při měření**

Měření bylo realizováno pomocí zjednodušeného měřicího systému. Měřicí systém byl sestaven ze stojanu pro úchylkoměr s průměrnou základnou, digitálního úchylkoměru a šablony pro umístění měřeného vzorku. Tato šablona byla umístěna na křížovém stolku s mikrometrickými hlavicemi.

- **Průběh experimentu**

Pro účely výzkumu byly odlity dvě sady vzorků. První sada obsahovala 27 vzorků k proměření. Druhá sada obsahovala 21 vzorků, na kterých se provádělo měření. Každý ze tří vzorků z jednotlivých materiálových složení byl měřen vždy po 7 dnech po dobu 6 týdnů. Nakonec byl z 6 naměřených hodnot ke každému vzorku statisticky vypočten aritmetický průměr a určena jeho směrodatná odchylka.

- **Výsledky**

Vzorky z neplněné EP měly hodnoty koeficientu  $\alpha$  v rozmezí:

49 – 53  $\mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ .

Vzorky s plněním 10 DSK měly hodnoty koeficientu  $\alpha$  v rozmezí:

31 – 45  $\mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ .

Vzorky s plněním 20 DSK měly hodnoty koeficientu  $\alpha$  v rozmezí:

29 – 40  $\mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ .

Vzorky s plněním 40 DSK měly hodnoty koeficientu  $\alpha$  v rozmezí:

17 – 31  $\mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ .

Vzorky s plněním 60 DSK měly hodnoty koeficientu  $\alpha$  v rozmezí:

18 – 30  $\mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ .

Vzorky s plněním 80 DSK měly hodnoty koeficientu  $\alpha$  v rozmezí:

17 – 26  $\mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ .

Vzorky s plněním 85 DSK měly hodnoty koeficientu  $\alpha$  v rozmezí:

22 – 25  $\mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ .

Vzorky s plněním 90 DSK měly hodnoty koeficientu  $\alpha$  v rozmezí:

22 – 24  $\mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ .

Vzorky s plněním 100 DSK měly hodnoty koeficientu  $\alpha$  v rozmezí:

17 – 25  $\mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ .

Na základě podrobné analýzy vzorků bylo zjištěno, že koeficient  $\alpha$  oproti neplněné EP významně klesá s přidávkem UV, a to až do plnění 40 DSK. Od této hranice již další přidávání UV do matrice zásadně nesnižuje koeficient  $\alpha$ . Naopak má negativní vliv, neboť se velmi významně zvyšuje obtížnost ručního zapracování vláken do polymeru.

Pokud jsou vzorky připraveny pouze z neplněné EP, nejsou v koeficientech  $\alpha$  vzorků lišících se svými rozměry žádné významné rozdíly. Po přidavku recyklovaných UV dochází ve všech skupinách vzorků lišících se svými rozměry k významnému poklesu koeficientu  $\alpha$ . Od hranice 40 DSK již další přidávání UV do matrice zásadně nesnižuje koeficient  $\alpha$  u žádného z výsledných vzorků lišících se svými rozměry.

Nejvýraznější pokles koeficientu  $\alpha$  byl zaznamenán u vzorků s nejmenšími rozměry (nejmenším objemem). Koeficient  $\alpha$  u rozměrově větších vzorků (s větším objemem) je ve srovnání se vzorky s menším objemem o něco vyšší.

Použitými vlákny daných rozměrů při štíhlostním poměru 14,2 není možné více snížit hodnoty koeficientu  $\alpha$ . Alternativou je použití vláken delších, kde by se uplatnil vyšší štíhlostní poměr.

Z analýzy provedených experimentů je zřejmý pozitivní vliv recyklovaných UV na snížení koeficientu  $\alpha$ . Toto snížení je však prakticky konečné při použití plnění 40 DSK. Z důvodu vysoké pořizovací ceny recyklovaných UV by se s dalšími přidavky UV významně měnily materiálové náklady na výrobu jednoho vzorku. To se ve spojitosti s minimálními vlivy na snížení koeficientu  $\alpha$  a zvyšujícími se energetickými nároky na zhomogenizování směsi jeví jako bezvýznamné.

Z pohledu nezbytných nákladů na vstupující zdroje lze konstatovat, že odhadovaná výše na výrobu jednoho vzorku z námi vyvinutého kompozitu se pohybuje okolo 5 Kč. Do vstupujících zdrojů byla započtena cena za odpovídající množství EP, recyklovaných UV a tvrdidla.

Náklady na materiál potřebný k výrobě měřicího doteku (kuličky) z námi vyvinutého kompozitu by nepřesáhly 2 Kč. Jejich výše by tak byla nesrovnatelně nižší než náklady na materiál, ze kterého se měřicí doteky v současnosti vyrábí (syntetický rubín, oxid zirkoničitý, nitrid křemíku či syntetický diamant).

U měřicí a automatizační techniky vyrobené z výše vyvinutého kompozitu lze díky znalosti vstupujících materiálů předpokládat zvýšenou chemickou odolnost, dobré elektroizolační vlastnosti a nižší tvrdost.

Zvýšená chemická odolnost by se dala s výhodou využít při výrobě měřidel pro petrochemický průmysl, dobré elektroizolační vlastnosti lze využít například v biomedicíně.

Měřicí a automatizační technika vyrobená z materiálu s nižší tvrdostí by mohla najít uplatnění v případech, kdy by docházelo k jejímu kontaktu s dílci s velmi přesnými a hladkými povrchy. Toho by se dalo využít například při měření plastových a lakovaných dílců bez obavy z poškození povrchu.

Nově vyvinutý kompozit v sobě nese potenciál zvýšení produktivity práce svoji nenáročností na skladování, zacházení a na provozní prostředí obecně. U měřidel vyrobených z tohoto materiálu by přidanou hodnotou byla také absence recalibrace, neboť by se provedla pouze jejich prvotní kalibrace a po uplynutí předem stanovené doby platnosti by se přestala používat.

Materiál by mohl najít uplatnění při výrobě měřidel pro automobilový průmysl, letectví, petrochemii a biomedicínu, stejně jako ve velkém množství průmyslových a inženýrských aplikací po celém světě.

Firma MESING spol. s.r.o., Brno by ho v budoucnu ráda využila zejména na výrobu měřících doteků pro 3D souřadnicové měřicí stroje a jako dotkových měřících ploch na nestanovených měřidlech (posuvných, mikrometrických aj.) (Obr. 4-1).



Obr. 4-1: Měřidlo osazené doteky z vyvinutého kompozitu [35]

## 5. Závěr

Předložená diplomová práce zpracovaná na téma „Měření vybraných charakteristik nově vyvíjeného kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny na bázi reaktoplastu pro měřicí a automatizační techniku firmy MESING spol. s.r.o., Brno“ se zabývala vývojem a testováním kompozitu na bázi reaktoplastu plněného UV. Nově vyvinutý materiál vyniká velmi nízkým koeficientem  $\alpha$ . Firma MESING spol. s.r.o., Brno by ho v budoucnu ráda využila zejména na výrobu měřicích doteků pro 3D souřadnicové měřicí stroje a jako dotykových měřicích ploch na nestanovených měřidlech (posuvných, mikrometrických aj.).

Po vyhodnocení rozsáhlého souboru dat získaného z provedených experimentů bylo zjištěno, že:

- Přidáním recyklovaných UV do EP lze výrazně snížit koeficient  $\alpha$  v porovnání s čistou EP. Z původních  $53 \mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$  u čisté EP až na  $17 \mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$  u EP plněné recyklovanými UV.
- Maximální plnění je na úrovni 40 DSK. Použití většího množství plniva nemá žádný praktický význam, nebylo by to již ekonomické.
- Koeficient  $\alpha$  se v případě neplněné EP neliší v závislosti na velikosti/objemu vzorků.
- Koeficient  $\alpha$  se v případě plnění recyklovanými UV liší v závislosti na velikosti/objemu vzorků. Čím jsou vzorky menší, tím jsou z hlediska hodnot koeficientu  $\alpha$  stabilnější a naopak.
- Dosažení nižších hodnot koeficientu  $\alpha$  lze pravděpodobně dosáhnout použitím vláken s vyšším štíhlostním poměrem.
- Materiálové náklady na přípravu jednoho vzorku z vyvinutého uhlíkového kompozitu jsou nesrovnatelně nižší, než náklady na přípravu stejného vzorku z nástrojové oceli.

## Seznam použité literatury

- [1] LIDAŘÍK, Miloslav a kolektiv. *Epoxidové pryskyřice*. 3. rozšířené vydání. Praha: SNTL, 1983.
- [2] KOLOUCH, Jan. *Strojní součásti z plastů*. Praha: SNTL, 1981.
- [3] In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Epoxidov%C3%A1\\_prysky%C5%99ice](https://cs.wikipedia.org/wiki/Epoxidov%C3%A1_prysky%C5%99ice)
- [4] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. [online]. Liberec, 2014 [cit. 2018-01-27]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [5] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. [online]. Brno, 2008 [cit. 2018-01-27]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=83340](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340)
- [6] In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kompozitn%C3%AD\\_materi%C3%A1l](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kompozitn%C3%AD_materi%C3%A1l)
- [7] MACEK, Karel a Petr ZUNA A KOL. *Strojírenské materiály*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02798-8.
- [8] DAĎOUREK, Karel. *Kompozitní materiály: Definice a rozdělení. Katedra materiálu* [online]. Liberec, 2008 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf)
- [9] VNOUČEK, Milan. *Kompozitní materiály. Oddělení povrchového inženýrství* [online]. Plzeň [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09\\_10.pdf](https://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf)

- [10] In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9\\_vl%C3%A1kno](https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9_vl%C3%A1kno)
- [11] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity* [online]. Praha, 2016 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>
- [12] Měření ve strojírenství. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2003, **2003**(6), 24 [cit. 2018-03-19]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-ve-strojirenstvi.html>
- [13] Měřicí technika pro obráběcí stroje. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2003, **2003**(6), 30 [cit. 2018-03-19]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-ve-strojirenstvi.html>
- [14] Souřadnicová měření ve strojírenské výrobě. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002, **2002**(6), 12 [cit. 2018-03-19]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/souradnicova-mereni-ve-strojirenske-vyrobe.html>
- [15] Vývoj strojírenské měřicí techniky. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2003, **2003**(6), 20 [cit. 2018-03-19]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyvoj-strojirenske-merici-techniky.html>
- [16] Směry v provozní strojírenské metrologii. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004, **2004**(6), 27 [cit. 2018-03-19]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/smery-v-provozni-strojirenske-metrologii.html>
- [17] Kouzelný svět metrologie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004, **2004**(6), 12 [cit. 2018-03-19]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kouzely-svet-metrologie.html>



- [18] Strojírenská měřicí technika. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, **2005**(6), 18 [cit. 2018-03-19]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/strojirenska-merici-technika.html>
- [19] Měřicí technika mechanických veličin s kovovými tenzometry. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, **2007**(3), 58 [cit. 2018-03-19]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/merici-technika-mechanickych-velicin-s-kovovymi-tenzometry.html>
- [20] In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/K%C5%99emenn%C3%A9\\_sklo](https://cs.wikipedia.org/wiki/K%C5%99emenn%C3%A9_sklo)
- [21] In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Zerodur>
- [22] DVOŘÁČKOVÁ, Štěpánka, KARÁSEK Jiří. *Strojírenská metrologie - II. díl*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-130-6.
- [23] In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Invar>
- [24] In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Konstantan>
- [25] Materiály. *Renishaw* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/materialy--6423>

- [26] S-zelený. *Murtfeldt Plasty* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z:  
<http://www.murtfeldt.cz/produkty/materialy/technicke-materialy-1/originalni-material-s-zeleny-prirodni/>
- [27] Thermal expansion coefficients for some common materials. *The Engineering ToolBox* [online]. [cit. 2018-03-23]. Dostupné z:  
[https://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d\\_95.html](https://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html)
- [28] Schéma struktury sítě vytvrzeného reaktoplastu. In: *Katedra strojírenské technologie* [online]. Liberec, 2018 [cit. 2018-03-23]. Dostupné z:  
[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/01-plasty%20uvod/09-zesiteni.jpg](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01-plasty%20uvod/09-zesiteni.jpg)
- [29] Jak zalít stůl pryskyřicí. In: *Obchod pro bydlení* [online]. 2018 [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: <http://www.obchodprobydleni.cz/clanky/jak-zalit-stul-pryskyrici/>
- [30] Technologie výroby kompozitů: Pultruze. In: *Prefa kompozity* [online]. Brno [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/pultruze-tazeni/>
- [31] Podklady z provedených měření z TUL
- [32] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: Výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [33] POPOV, Miroslav. Autokláv. In: *Plastic: Carbon composite technology* [online]. 2017 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z:  
<http://www.plastic.cz/technologie-autoklav-cz>
- [34] Zerodur: *Thermal length expansion* [online]. In: . [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: [https://www.pgo-online.com/intl/curves/zerodur\\_dkurve.html](https://www.pgo-online.com/intl/curves/zerodur_dkurve.html)

[35] Vlastní zdroje


## **Seznam příloh**

**Příloha P1:** Technicko-aplikační list epoxidové pryskyřice CHS – EPOXY 520

**Příloha P2:** Bezpečnostní list tvrdidla P11

**Příloha P3:** Technický list recyklovaných uhlíkových Carbiso™ MF

**Příloha P4:** Náhled programu ze softwaru Microsoft Excel

 TECHNICKO-APLIKAČNÍ LIST		PRYSKYŘICE	
CHS-EPOXY 520 EPOXY 15			
<b>POPIS</b>	Nízkomolekulární epoxidová pryskyřice připravená reakcí bisfenolu A s epichlorhydrinem bez modifikujících složek.		
<b>POUŽITÍ</b>	K impregnaci, zalévání, odlévání a lepení v různých odvětvích průmyslu. Pro výrobu a opravy sportovních laminátových potřeb. K přípravě laminátů a k výrobě modifikovaných pryskyřic. Je vhodná pro výrobu tmelů, lepidel a stěrkových hmot. Pryskyřice ani natužená směs před aplikací nesmí být zředována přidávkem jakéhokoliv rozpouštědla či ředidla.		
<b>VLASTNOSTI</b>	<i>Vzhled:</i> <i>Hustota (20 °C):</i> <i>Viskozita (25 °C):</i> <i>Obsah epoxidových skupin (mol.kg<sup>-1</sup>):</i> <i>Epoxidový hm. ekvivalent (g.mol<sup>-1</sup>):</i> Neobsahuje VOC.	nažloutlá čirá viskózní kapalina 1,16-1,17 g.cm <sup>3</sup> 12,0-14,5 Pa.s 5,2-5,5 182-192	
<b>PŘÍPRAVA POVRCHU</b>	Povrch musí být suchý, čistý, odmaštěný a zbavený mechanických nečistot (prach po broušení, atd.), nejlépe mírně zdrsňený. Teplota podkladu by měla dosahovat 15-25 °C při max. 50% relativní vlhkosti vzduchu. Nevytvrzenou kompozici lze z povrchu nářadí umýt acetonem.		
<b>TUŽENÍ</b>		poměr hmotností/ poměr objemový	
	CHS-Epoxy 520 : Tvrdidlo P 11	100 : 11	100 : 13,5
	CHS-Epoxy 520 : Tvrdidlo T 0492	100 : 26	100 : 32
	CHS-Epoxy 520 : Tvrdidlo T 0503	100 : 50	100 : 58
	CHS-Epoxy 520 : Tvrdidlo AN 2609	100 : 40	100 : 44
	CHS-Epoxy 520 : Tvrdidlo AN 2712	100 : 50	100 : 58
<b>ZPRACOVÁNÍ</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li> <b>Tvrdidlo P 11</b> je rychle tvrdidlo s kratší dobou zpracovatelnosti. Vyznačuje se <b>dolepem</b> na povrchu po vytvrzení. Dolep lze odstranit omytím vodou nebo 3% roztokem kyseliny citronové. Vytvrzená kompozice zůstává transparentní.  <i>Doba želatinace:</i> 20 – 30 min. při 23 °C (dle připraveného množství)  <i>Nejnižší doporučená teplota zpracování:</i> 15 °C  <i>Vytvrzení:</i> 24 hodin při teplotě 23 ± 5 °C  <i>Plné vytvrzení:</i> 7 dní při teplotě 23 ± 5 °C                              1-2 dny při 23 ± 5 °C a dotvrzení 3 dny při 50-60 °C (infrazářiče)                              uzavřené nádoby: po 7 dnech vytvrzování se dotvrzuje při teplotě 23 ± 5 °C                              naplněním nádoby vlažnou vodou, jejíž teplota se postupně zvýší až na 60 °C a udržuje se 2-3 dny.                         </li> <li> <b>Tvrdidlo T 0503</b> snižuje vývin tepla při reakci, proto je vhodné použití tohoto tvrdidla za účelem prodloužení doby želatinace. Použití tvrdidla T 0503 umožňuje natužení a zpracování většího množství pryskyřice najednou. Vytvrzená kompozice je zabarvená do žluta a bez dolepu.  <i>Doba želatinace:</i> 45 - 70 min. při 23 °C (dle připraveného množství)  <i>Vytvrzení:</i> 24 hodin při teplotě 23 ± 5 °C  <i>Plné vytvrzení:</i> 7 dní při teplotě 23 ± 5 °C                         </li> <li> <b>Tvrdidlo T 0492</b> snižuje vývin tepla při reakci, proto je vhodné použití tohoto tvrdidla za účelem prodloužení doby želatinace. Vytvrzená kompozice je transparentní a bez dolepu.                         </li> </ul>		

IČ: 25248294, DIČ: CZ25248294, [www.sincolor.cz](http://www.sincolor.cz)

## CHS-EPOXY 520 EPOXY 15

*Doba želatinace:* 50 - 80 minut při 23 °C (dle připraveného množství)  
*Vytvrzení:* 24 hodin při teplotě 23 ± 5 °C  
*Plné vytvrzení:* 7 dní při teplotě 23 ± 5 °C

- **Tvrdidlo AN 2609** je rychlé tvrdidlo vhodné k vytvrzování za snížené teploty (do 5 °C). Vzhledem ke své zvýšené reaktivitě není vhodné pro vytvrzování čistých pryskyřic ve větším množství. Větší odlitky je nutno zhotovovat po částech. Vytvrzená kompozice je transparentní a bez dolepu.

*Doba želatinace:* 20 – 35 minut, při 23 °C (dle připraveného množství)  
*Vytvrzení:* 24 hodin při teplotě 23 ± 5 °C  
*Plné vytvrzení:* 5 dní při teplotě 23 ± 5 °C

- **Tvrdidlo AN 2712** je rychlé tvrdidlo vhodné k vytvrzování za snížené teploty (do 5 °C). Vzhledem ke své zvýšené reaktivitě není vhodné pro vytvrzování čistých pryskyřic ve větším množství. Větší odlitky je nutno zhotovovat po částech. Vytvrzená kompozice je nažloutlá, čirá a bez dolepu.

*Doba želatinace:* 15 – 25 minut, při 23 °C (dle připraveného množství)  
*Vytvrzení:* 24 hodin při teplotě 23 ± 5 °C  
*Plné vytvrzení:* 5 dní při teplotě 23 ± 5 °C

- |                                       |  |                             |                              |                                       |                    |                             |                           |                                      |               |                                     |                              |
|---------------------------------------|--|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------|------------------------------|
| • <b>UPOZORNĚNÍ</b>                   | <p><b>POZOR!</b> Při aplikaci je třeba zajistit takové teplotní podmínky, aby nedošlo k vysrážení vlhkosti na povrchu natíraného předmětu (rosný bod). Větráním je nutné omezit případný výskyt kyselých plynů a par (např. CO<sub>2</sub>), které reagují s tužidlem a znemožňují dokonalé vytvrzení materiálu.</p> <p><b>POZOR!</b> Natužením velkého množství pryskyřice dochází k vývinu tepla a tím ke zkrácení doby zpracovatelnosti! <b>Výška odlitku</b> by neměla přesáhnout <b>2 cm</b>. Větší odlitky je nutno zhotovovat po částech. Odvod tepla je možno zlepšit přidávkou vhodného plniva, např., suchého křemičitého písku.</p> |                             |                              |                                       |                    |                             |                           |                                      |               |                                     |                              |
| • <b>UŽITNÉ VLASTNOSTI</b>            | <table border="0"> <tr> <td><i>Mez pevnosti v tahu:</i></td> <td>min. 40 MPa</td> </tr> <tr> <td><i>Mez pevnosti v ohybu:</i></td> <td>min. 90 MPa</td> </tr> <tr> <td><i>Rázová houževnatost:</i></td> <td>min. 10 kJ/m<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td><i>El. průrazná pevnost (23 °C):</i></td> <td>min. 10 kV/mm</td> </tr> <tr> <td><i>Měrný vnitřní odpor (23 °C):</i></td> <td>min. 10<sup>14</sup> Ohm.cm</td> </tr> </table>  | <i>Mez pevnosti v tahu:</i> | min. 40 MPa                  | <i>Mez pevnosti v ohybu:</i>          | min. 90 MPa        | <i>Rázová houževnatost:</i> | min. 10 kJ/m <sup>2</sup> | <i>El. průrazná pevnost (23 °C):</i> | min. 10 kV/mm | <i>Měrný vnitřní odpor (23 °C):</i> | min. 10 <sup>14</sup> Ohm.cm |
| <i>Mez pevnosti v tahu:</i>           | min. 40 MPa  |                             |                              |                                       |                    |                             |                           |                                      |               |                                     |                              |
| <i>Mez pevnosti v ohybu:</i>          | min. 90 MPa  |                             |                              |                                       |                    |                             |                           |                                      |               |                                     |                              |
| <i>Rázová houževnatost:</i>           | min. 10 kJ/m <sup>2</sup>  |                             |                              |                                       |                    |                             |                           |                                      |               |                                     |                              |
| <i>El. průrazná pevnost (23 °C):</i>  | min. 10 kV/mm  |                             |                              |                                       |                    |                             |                           |                                      |               |                                     |                              |
| <i>Měrný vnitřní odpor (23 °C):</i>   | min. 10 <sup>14</sup> Ohm.cm   |                             |                              |                                       |                    |                             |                           |                                      |               |                                     |                              |
| • <b>BALENÍ</b>                       | Set 1,11 kg (v setu s Tvrdidlem P11). Obaly 10 kg, 30 kg.<br>Jiné obaly je možno dohodnout s výrobcem.   |                             |                              |                                       |                    |                             |                           |                                      |               |                                     |                              |
| • <b>SKLADOVÁNÍ</b>                   | 12 měsíců od data výroby při skladování v původních uzavřených obalech za teploty 15–25 °C. Nevystavovat přímému slunečnímu záření.  |                             |                              |                                       |                    |                             |                           |                                      |               |                                     |                              |
| • <b>BEZPEČNOST</b>                   | Podrobné údaje týkající se bezpečného zacházení a ochrany zdraví jsou uvedeny v bezpečnostním listu výrobku.   |                             |                              |                                       |                    |                             |                           |                                      |               |                                     |                              |
| • <b>DOKUMENTACE</b>                  | <table border="0"> <tr> <td>Bezpečnostní list</td> <td>Stavební-technické osvědčení</td> </tr> <tr> <td>Protokol o ověření shody typu výrobku</td> <td>Prohlášení o shodě</td> </tr> </table>  | Bezpečnostní list           | Stavební-technické osvědčení | Protokol o ověření shody typu výrobku | Prohlášení o shodě |                             |                           |                                      |               |                                     |                              |
| Bezpečnostní list                     | Stavební-technické osvědčení   |                             |                              |                                       |                    |                             |                           |                                      |               |                                     |                              |
| Protokol o ověření shody typu výrobku | Prohlášení o shodě   |                             |                              |                                       |                    |                             |                           |                                      |               |                                     |                              |

**CHS-EPOXY 520  
EPOXY 15**

- 
- **ODVOLÁNÍ** Informace uvedené v tomto technickém listu se opírají o naše nejlepší znalosti, podložené výsledky laboratorních testů a praktické zkušenostmi. Nicméně, vzhledem k tomu, že výrobek je často používán mimo rámec naší kontroly, nemůžeme ručit za nic jiného než za kvalitu výrobku jako takového. Neručíme za chyby vzniklé špatnou aplikací, použitím jiných ředidel než doporučených, použitím po době skladovatelnosti
- 

- **DATUM VYDÁNÍ** 11.11.2005

---

- **DATUM REVIZE** 1.9.2013

---

## Příloha P2: Bezpečnostní list tvrdidla P11

### BEZPEČNOSTNÍ LIST

Stránka: 1 / 7

Datum vydání 1.6.2007 Datum revize: 7.4.2011

## 1. IDENTIFIKACE LÁTKY / SMĚSI A SPOLEČNOSTI / PODNIKU

### 1.1. Identifikátor výrobku

Název výrobku: TVRDIDLO P 11

Identifikace o výrobku: Dietylentiain

Registrační číslo látky:

### 1.2. Příslušná určená použití látky nebo směsi a nedoporučená použití

Určená použití

Nedoporučená použití

### 1.3. Podrobné údaje o dodavateli bezpečnostního listu

Výrobce/dovozce:

Jméno nebo obchodní jméno: KM PLUS spol. s r.o.

Místo podnikání nebo sídlo: Tyršova 86, 538 51 Chrást, Česká republika

Identifikační číslo: 25961101

Telefon: 777 948 022

Informace k výrobkům: [www.kmplus.cz](http://www.kmplus.cz)

Informace k bezpečnostnímu listu: Mgr. Kovárník [kmplus@kmplus.cz](mailto:kmplus@kmplus.cz)

### 1.4. Telefonní číslo pro naléhavé situace

CZ: +420 477 162 094/ EN: +420 476 709 826 nepřetržitá služba

## 2. IDENTIFIKACE NEBEZPEČNOSTI

dle 1272/2008/ES:

### 2.1. Klasifikace látky nebo směsi

Acute Tox.4: H302, Acute Tox.3: H311, Acute Tox.2: H330, Skin Corr.1B: H314, Skin Sens.1: H317, STOT SE3: H335

dle 67/548/EHS,1999/45/ES: Xn; T; C, R21/22, R23, R34, R43, S1/2, S26, S36/37/39, S45

Rizika pro člověka a životní prostředí :Zdraví škodlivý při požití. Toxický při styku s kůží. Způsobuje těžké poleptání kůže a poškození očí. Může vyvolat alergickou kožní reakci. Při vdechování může způsobit smrt. Může způsobit podráždění dýchacích cest.

### 2.2. Prvky označení

Úplné znění H, EUH, P, R, S vět je uvedeno v bodě 16 tohoto bezpečnostního listu.

NEBEZPEČÍ



Zdraví škodlivý při požití. Toxický při styku s kůží. Způsobuje těžké poleptání kůže a poškození očí. Může vyvolat alergickou kožní reakci.

Při vdechování může způsobit smrt. Může způsobit podráždění dýchacích cest.

Nevdechujte prach/dým/plyn/mlhu/páry/aerosoly. Používejte ochranné rukavice/ochranný oděv/ochranné brýle/obličejový štít. PŘI STYKU S

KUŽÍ (nebo s vlasy): Veškeré kontaminované části oděvu okamžitě svlékněte. Opláchněte kůži vodou/osprchujte. PŘI VDECHNUTÍ:

Přeneste postiženého na čerstvý vzduch a ponechte jej v klidu v poloze usnadňující dýchání. PŘI ZASAŽENÍ

OČÍ: Několik minut opatrně

vyplachujte vodou. Vyměňte kontaktní čočky, jsou-li nasazeny, a pokud je lze vyjmout snadno. Pokračujte ve vyplachování. Okamžitě volejte

TOXIKOLOGICKÉ INFORMAČNÍ STŘEDISKO nebo lékaře.

CAS: 111-40-0 Indexovní číslo: 612-058-00-X



Obsahuje: Dietyltriain (2,2'-iminodi(ethan-1-amin))

Povinná textace:

Doplňující informace:

### 2.3. Další nebezpečnost

Hodnocení PBT a vPvB : tato látka není považována za perzistentní, bioakumulativní, toxickou (PBT).

## 3. SLOŽENÍ / INFORMACE O SLOŽKÁCH

Identifikátor CAS/ EINECS/	Klasifikace dle 67/548/EHS	Klasifikace dle 1272/2008/ES	Obsah %
Registrační číslo Dietyltriain (2,2'-iminodi(ethan-1-amin))		Acute Tox.4: H302, Acute Tox.3: H311,  Acute Tox.2: H330, Skin Corr.1B: H314, Skin Sens.1: H317, STOT SE3: H335	50-100
111-40-0/ 203-865-4/	Xn; R21/22 T; R23 C; R34 R43		

Úplné znění H, EUH, P, R a S vět je uvedeno v bodě 16 tohoto bezpečnostního listu.

## 4. POKYNY PRO PRVNÍ POMOC

V případě úrazu nebo necítíte-li se dobře, okamžitě vyhledejte lékařskou pomoc (je - li možno, ukažte tento bezpečnostní list).

### 4.1. Popis první pomoci

Při nadýchání Dopravit postiženého na čerstvý vzduch, odstranit z postiženého znečištěný oděv (převléknout). Zajistit lékařskou pomoc.

Při styku s kůží Odstranit znečištěný oděv a co nejintenzivněji oplachovat zasažená místa proudem čisté teplé (30-32°C) vody.  
Dopravit k lékaři.

Při zasažení očí Co nejrychleji provést výplach proudem vody, provádět ho co nejdéle min. 20 minut, zajistit lékařské ošetření a ve výplachu pokračovat i při transportu postiženého.

Při požití NEVYVOLÁVAT ZVRACENÍ! Vypláchnout ústa vodou. Zajistit okamžitou lékařskou pomoc.

### 4.2. Nejdůležitější akutní a opožděné symptomy a účinky

### 4.3. Pokyn týkající se okamžité lékařské pomoci a zvláštního ošetření

Nestanoveno.

## 5. OPATŘENÍ PRO HAŠENÍ POŽÁRU

Vhodná hasiva: Oxid uhličitý, pěna, suché chemikálie, vodní mlha.

### 5.1. Hasiva

Nevhodná hasiva: Plný vodní proud.

Hořením vznikají oxidy uhlíku, aldehydy, kyseliny, čpavek a nedefinovatelné směsi organických sloučenin.

### 5.2. Zvláštní nebezpečnost vyplývající z látky nebo směsi

Nevstupovat do prostoru požáru bez odpovídajícího ochranného oblečení a nezávislého dýchacího přístroje.

### 5.3. Pokyny pro hasiče

## 6. OPATŘENÍ V PŘÍPADĚ NÁHODNÉHO ÚNIKU

Ochranný oblek včetně ochrany očí, dýchacích cest a rukou.

### 6.1. Opatření na ochranu osob, ochranné prostředky a nouzové postupy

Zabránit uvolňování produktu nebo složek do životního prostředí, kanalizace a povrchových vod nebo do půdy.

### 6.2. Opatření na ochranu životního prostředí

Přehradit rozlitý produkt. Zachytit inertním materiálem (např. křemelinou, pískem). Umístit do nepropustného obalu a zneškodnit uložením na skládce chemického odpadu, případně likvidovat ve schválené spalovně.

### **6.3. Metody a materiál pro omezení úniku a pro čištění**

Další pokyny: viz oddíly 8, 13

### **6.4. Odkaz na jiné oddíly**

## **7. ZACHÁZENÍ A SKLADOVÁNÍ**

### **7.1. Opatření pro bezpečné zacházení**

Dodržovat pracovní předpisy. Zajistit dostatečnou ventilaci a lokální odsávání na pracovištích. Během práce nejíst, nepít a nekouřit.

### **7.2. Podmínky pro bezpečné skladování látek a směsí včetně neslučitelných látek a směsí**

Skladovat v uzavřených skladech mimo dosah zdrojů zapálení, odděleně od ostatních druhů látek, v originálních a uzavřených obalech.

Sklad musí být dobře větraný (včetně havarijního větrání), suchý, s teplotou +5 až +25°C, vybavený lékárníčkou, zdrojem pitné vody a zabezpečen před nepovolanými osobami.

### **7.3. Specifické konečné / specifická konečná použití**

Skladovat odděleně od oxidačních látek.

## **8. OMEZOVÁNÍ EXPOZICE / OSOBNÍ OCHRANNÉ PROSTŘEDKY**

### **8.1. Kontrolní parametry**

DETA - PEL: 4 mg/m<sup>3</sup>, NPK-P: 8 mg/m<sup>3</sup>

### **8.2. Omezování expozice**

Doporučuje se místní odsávání.

#### **8.2.1 Omezování expozice pracovníků**

Ochrana dýchacích cest: Při vyšších koncentracích par (nad povolený limit) použít masku s filtrem pro organické páry.

#### **8.2.2 Omezování expozice pracovníků**

Ochrana rukou: Ochranné rukavice z PVC.

Ochrana očí a obličeje: Ochranné brýle případně obličejový štít.

Ochrana kůže: Keprový oblek, pracovní obuv.

#### **8.2.3 Omezování expozice životního prostředí**

## **9. FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ VLASTNOSTI**

### **9.1. Informace o základních fyzikálních a chemických vlastnostech**

Skupenství: Kapalné.

Barva: Nažloutlá.

Zápach: Po aminech.

pH: > 11

Bod varu / rozmezí bodu varu (°C): Nestanoveno.

Bod tání/ bod tuhnutí (°C): -39

Bod vzplanutí (°C): 90°C

Hořlavost (pevné látky, plyny): Hořlavina III.třídy.

Výbušné vlastnosti: 1-10

Oxidační vlastnosti: Nestanoveno.

Tenze par: Nestanoveno.

Relativní hustota (g/cm<sup>3</sup>): 0,958 (20°C)

Rozpustnost:

Rozpustnost ve vodě (g/l): Nestanoveno.

Rozdělovací koeficient n-oktanol/voda: Nestanoveno.

Bod samozápalu (oC): 395

Viskozita: Nestanoveno.

Hustota par: Nestanoveno.

Rychlost odpařování:

Daší informace: Nestanoveno.

Mítelnost: Nestanoveno.

## **9.2. Další informace**

Rozpustnost v tucích (specifikace oleje): Nestanoveno.

Vodivost:

Třída plynů: Nestanoveno.

## **10. STÁLOST A REAKTIVITA**

### **10.1. Reaktivita**

### **10.2. Chemická stabilita**

### **10.3. Možnost nebezpečných reakcí**

### **10.4. Podmínky, kterým je třeba zabránit**

Zvýšená teplota.

### **10.5. Neslučitelné materiály**

Silná oxidační činidla, silné Lewisovy nebo minerální kyseliny.

### **10.6. Nebezpečné produkty rozkladu**

Oxidy uhlíku, aldehydy, kyseliny, čpavek a nedefinovatelné směsi organických sloučenin.

## **11. TOXIKOLOGICKÉ INFORMACE**

Akutní toxicita: LD50oral.: 1 620 mg/kg

### **11.1. Informace o toxikologických účincích**

LD50derm.: 672 mg/kg

LC50inhal.: 0,3 mg/l 4hod.

Žíravost/dráždivost pro kůži:

Vážné poškození podráždění očí

Senzibilizace dýchacích cest/kůže: Může vyvolat senzibilizaci při styku s kůží.

Mutagenita:

Karcinogenita:

Toxicita pro reprodukci:

Toxicita pro specifické cílové orgány-jednoráz.exp.:

Toxicita pro specifické cílové orgány-opak.exp.:

Nebezpečnost při vdechnutí

Další informace

## **12. EKOLOGICKÉ INFORMACE**

### **12.1. Toxicita**

LC 50 (96 h, ryby, mg/l): Nestanoveno.

EC 50 (48 h, dafnie, mg/l): Nestanoveno.

IC 50 (72 h, řasy, mg/l):

Další nepříznivé činky:  
Nestanoveno.

### **12.2. Persistence a rozložitelnost**

Nestanoveno.

CHSK: 1 315 mg/g

BSK:

### **12.3. Bioakumulační potenciál**

### **12.4. Mobilita v půdě**

### **12.5. Výsledky posouzení PBT a vPvB**

### **12.6. Jiné nepříznivé účinky**

## **13. POKYNY PRO ODSTRAŇOVÁNÍ**

Zbytky (odpad kategorie N, kód druhu odpadu 16 03 05) umístit do nepropustného obalu a zneškodnit spálením ve vhodné spalovně průmyslového odpadu.

### **13.1. Metody nakládání s odpady**

Odpad kategorie N, kód druhu odpadu 15 01 10. Po důkladném vyprázdnění se obal likviduje uskladněním na skládce nebezpečného odpadu.

Nakládání s odpady se řídí Směrnicí Rady 75/442/EHS ze dne 15. července 1975 o odpadech a Směrnicí Rady 91/689/EHS ze dne 12.

prosince 1991 o nebezpečných odpadech.

Nakládání s odpady se řídí Zákonem 185/2001 Sb.

## **14. INFORMACE PRO PŘEPRAVU**

Číslo OSN, Náležitý název OSN pro zásilku, Třída nebezpečnosti pro přepravu,

Obalová skupina

2079, DIETHYLENTRIAMIN, Dietylenetriamin, 8, II

80

2079

### **14.1. Nebezpečnost pro životní prostředí**

### **14.2. Zvláštní bezpečnostní opatření pro uživatele**

Poznámka:

EmS: F-A/S-B

Další přepravní informace: ADR/RID, IMDG, IATA

### **14.3. Hromadná přeprava dle přílohy MARPOL73/78 a předpisu IBC**

## **15. INFORMACE O PŘEDPÍSECH**

### **15.1. Nařízení týkající se bezpečnosti, zdraví a životního prostředí / specifické právní předpisy týkající**

#### **se látky nebo směsi**

Směrnice Rady 67/548/EHS ze dne 27. června 1967 o sblížování právních a správních předpisů týkajících se klasifikace, balení a označování nebezpečných látek.

Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1907/2006 ze dne 18. prosince 2006 o registraci, hodnocení, povolování a omezování

chemických látek, o zřízení Evropské agentury pro chemické látky, o změně směrnice 1999/45/ES a o zrušení nařízení Rady (EHS) č. 793/93, nařízení Komise (ES) č. 1488/94, směrnice Rady 76/769/EHS a směrnice Komise 91/155/EHS, 93/67/EHS, 93/105/ES a 2000/21/ES.

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 1999/45/ES ze dne 31. května 1999 o sblížení právních a správních předpisů členských států týkajících se klasifikace, balení a označování nebezpečných přípravků.  
Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1272/2008 ze dne 16. prosince 2008 o klasifikaci, označování a balení látek a směsí, o změně a zrušení směrnic 67/548/EHS a 1999/45/ES a o změně nařízení (ES) č. 1907/2006.  
Směrnice Rady 75/442/EHS ze dne 15. července 1975 o odpadech.  
Směrnice Rady 91/689/EHS ze dne 12. prosince 1991 o nebezpečných odpadech.  
Směrnice Rady 94/55/ES ze dne 21. listopadu 1994 o sblížení právních předpisů členských států týkajících se silniční přepravy nebezpečných věcí.  
Směrnice Rady 96/49/ES ze dne 23. července 1996 o sblížení právních předpisů členských států týkajících se železniční přepravy nebezpečných věcí.  
Směrnice Rady 1999/13/ES, o omezování emisí těkavých organických látek (VOC) vznikajících při užívání organických rozpouštědel při některých činnostech a v některých zařízeních.  
Směrnice Rady 89/391/ ze dne 12. června 1989 o zavádění opatření pro zlepšení bezpečnosti a ochrany zdraví zaměstnanců při práci.  
Nařízení Komise (EU) č. 453/2010 ze dne 20. května 2010, kterým se mění nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1907/2006 o registraci, hodnocení, povolování a omezování chemických látek (REACH).

Další právní předpisy:

### **15.2. Posouzení chemické bezpečnosti**

## **16. DALŠÍ INFORMACE**

### **Znění H-vět, EUH-vět, P-vět, R-vět, S-vět**

H302 Zdraví škodlivý při požití.  
H311 Toxický při styku s kůží.  
H314 Způsobuje těžké poleptání kůže a poškození očí.  
H317 Může vyvolat alergickou kožní reakci.  
H330 Při vdechování může způsobit smrt.  
H335 Může způsobit podráždění dýchacích cest.  
P260 Nevdechujte prach/dým/plyn/mlhu/páry/aerosoly.  
P261 Zamezte vdechování prachu/dýmu/plynu/mlhy/par/aerosolů.  
P264 Po manipulaci důkladně omyjte ruce. (vodou a mýdlem)  
P270 Při používání tohoto výrobku nejezte, nepijte ani nekuřte.  
P272 Kontaminovaný pracovní oděv neodnášejte z pracoviště.  
P280 Používejte ochranné rukavice/ochranný oděv/ochranné brýle/obličejový štít.  
P301 + P312 PŘI POŽITÍ: Necítíte-li se dobře, volejte TOXIKOLOGICKÉ INFORMAČNÍ STŘEDISKO nebo lékaře.  
P301 + P330 + P331 PŘI POŽITÍ: Vypláchněte ústa. NEVYVOLÁVEJTE zvracení.  
P302 + P352 PŘI STYKU S KŮŽÍ: Omyjte velkým množstvím vody a mýdla.  
P303 + P361 + P353 PŘI STYKU S KŮŽÍ (nebo s vlasy): Veškeré kontaminované části oděvu okamžitě svlékněte. Opláchněte kůži vodou/osprchujte.  
P304 + P340 PŘI VDECHNUTÍ: Přeneste postiženého na čerstvý vzduch a ponechte jej v klidu v poloze usnadňující dýchání.  
P305 + P351 + P338 PŘI ZASAŽENÍ OČÍ: Několik minut opatrně vyplachujte vodou. Vyměňte kontaktní čočky, jsou-li nasazeny a pokud lze vyjmout snadno. Pokračujte ve vyplachování.  
P310 Okamžitě volejte TOXIKOLOGICKÉ INFORMAČNÍ STŘEDISKO nebo lékaře.  
P312 Necítíte-li se dobře, volejte TOXIKOLOGICKÉ INFORMAČNÍ STŘEDISKO nebo lékaře.  
P321 Odborné ošetření (viz ... na tomto štítku).  
P322 Specifické opatření (viz ... na tomto štítku).  
P330 Vypláchněte ústa.  
P333 + P313 Při podráždění kůže nebo vyrážce: Vyhledejte lékařskou pomoc/ošetření.  
P363 Kontaminovaný oděv před opětovným použitím vyperte.  
P405 Skladujte uzamčené.  
P501 Odstraňte obsah/obal ...  
R21/22 Zdraví škodlivý při styku s kůží a při požití.  
R23 Toxický při vdechování.

R34 Způsobuje poleptání.

R43 Může vyvolat senzibilizaci při styku s kůží.

S1/2 Uchovávejte uzamčené a mimo dosah dětí.

S20 Nejezte a nepijte při používání.

S26 Při zasažení očí okamžitě důkladně vypláchněte vodou a vyhledejte lékařskou pomoc.

S36/37/39 Používejte vhodný ochranný oděv, ochranné rukavice a ochranné brýle nebo obličejový štít.

S45 V případě nehody, nebo necítíte-li se dobře, okamžitě vyhledejte lékařskou pomoc (je-li možno, ukažte toto označení).

**Údaje o revizi**

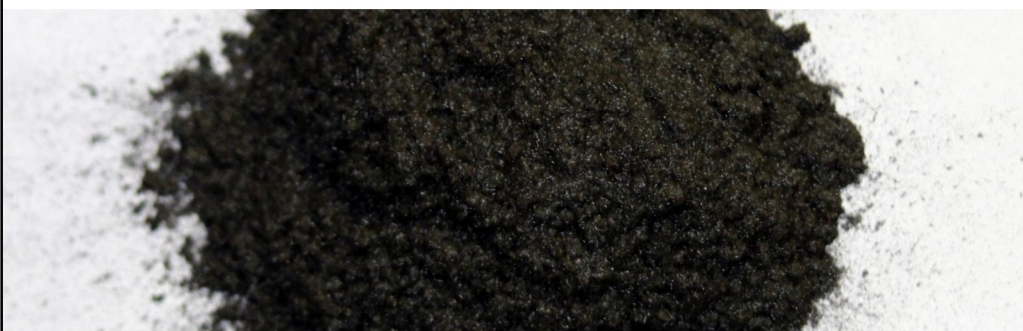
Změny provedeny v souvislosti s Nařízením 453/2010 ES a Nařízením 1272/2008 ES.

Změna klasifikace dle Nařízení 67/548/EHS (DSD).

## Příloha P3: Technický list recyklovaných uhlíkových Carbiso™ MF



**CARBISO™** MF Milled Fibre



**Carbiso™ MF is recycled carbon fibre milled to 80µm or 100µm.**

Milled fibres are used in demanding applications to increase mechanical properties and provide tailored electrical and thermal conductivity of the chosen matrix.

The milled carbon fibres have excellent dispersibility as the fibres are unsized and are compatible with most thermoset and thermoplastic matrices.

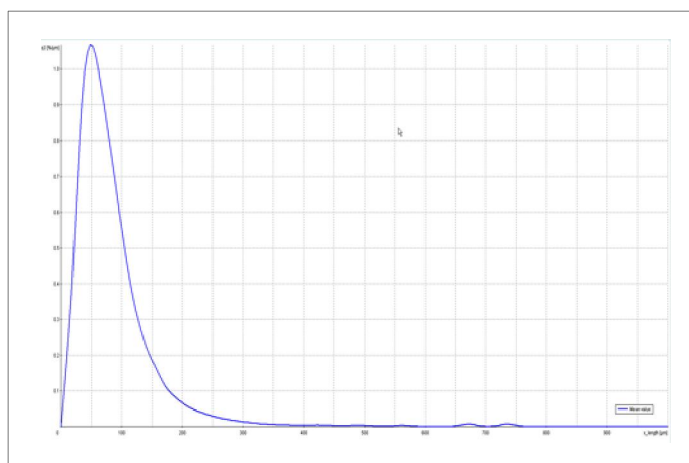


## Material data of Carbiso™ MF80

Typical properties	Units	Values
Carbon fibre content	%	>95
Other fibre content	%	<5
Fibre diameter	µm	7
Fibre length	µm	80
Sizing content	%	0
Bulk density	g/l	400
Metal contamination *		<0.5g / 1000g
Packaging (Pillow bag)	kg	17.5

\* Our milled fibres have passed through our metal detection and separation systems, metal contamination figures are a guide

## Fibre length distribution of Carbiso™ MF80





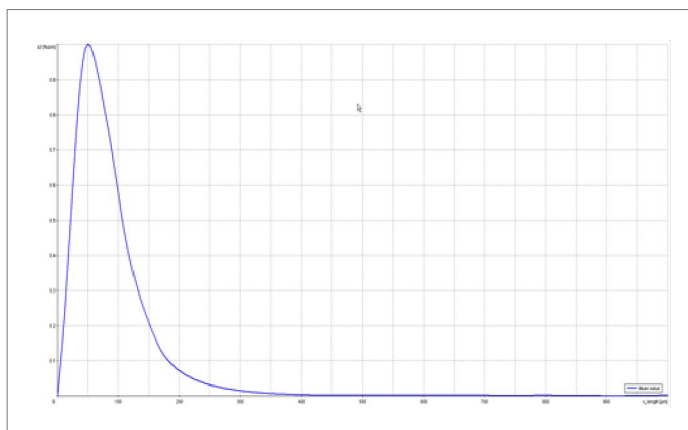


## Material data of Carbiso™ MF100

Typical properties	Units	Values
Carbon fibre content	%	>95
Other fibre content	%	<5
Fibre diameter	µm	7
Fibre length	µm	100
Sizing content	%	0
Bulk density	g/l	400
Metal contamination *		<0.5g / 1000g
Packaging (Pillow bag)	kg	17.5

\* Our milled fibres have passed through our metal detection and separation systems, metal contamination figures are a guide

## Fibre length distribution of Carbiso™ MF100



**Mechanical properties of Carbiso™ MF**

Typical properties	Units	Values
Tensile strength **	MPa	3470
Tensile modulus	GPa	246
Fibre density	kg/m <sup>3</sup>	1800

\*\* Single filament tests, typically 700MPa lower than impregnated strand testing.

The information presented in this document is provided in good faith, but no warranty is given or is to be implied regarding its accuracy or relevance to any particular application. Users must satisfy themselves regarding the suitability and safety of their use of the information and products in the application concerned.

**ELG Carbon Fibre Ltd.** Cannon Business Park, Gough Road, Coseley, West Midlands, WV14 8XQ  
+44 1902 406010 [www.ELGCF.com](http://www.ELGCF.com)

## Příloha P4: Náhled programu ze softwaru Microsoft Excel

Soubor Domů Vložení Rozložení stránky Vzorce Data Revize Zobrazení									
Vložit		Vymout		Kopírovat		Kopírovat formát		Schránka	
Calibri		12		A <sup>+</sup> A <sup>-</sup>		B I U		Písmo Zarovnání	
O26 fx									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	<b>Základní údaje</b>								
2	<b>Materiálové složení vzorku:</b>			ChS EPOXY 520 + 10 dsk recykl. uhlíkové vlákno / B1					
3	<b>Datum výroby vzorku:</b>			4. srpen 2017					
4	<b>Výrobní podmínky vzorku:</b>								
5	Teplota:			25 °C					
6	Tlak:			0,7 Mpa					
7	<b>Tepotní roztažnost</b>								
8	<b>Výpočet tepotní roztažnosti vzorku:</b>								
9	Teplota v laboratoři $t_1$ [°C]:			27,7		°C			
10									
11	Teplota v mrazáku $t_2$ [°C]:			-19,1		°C			
12									
13	Délka KM před změnou teploty $l_1$ [mm]:			34,729		mm		0,034729 m	
14									
15	Čas KM v mrazáku [hod]:			24		hod			
16									
17	Odečtená hodnota úchylkoměru $\Delta l_1$ [mm]:			7,552		mm			
18									
19	Odečtená hodnota úchylkoměru $\Delta l_2$ [mm]:			7,475		mm			
20									
21	Změna teploty KM - odchylka $\Delta t$ [°C]:						46,8		°C
22									
23	Změřená změna délky - odchylka $\Delta l$ [mm]:			0,077		mm		77 $\mu\text{m}$	
24	<b><math>\alpha</math> [<math>\mu\text{m}/\text{m}^*\text{°C}</math>]:</b>			<b>47,375</b>					
25									
26	<b>Komentář k dosaženým výsledkům:</b>								
27									