

# **Senzor na principu zasít'ovaných uhlíkových trubiček na polymerním nosiči pro detekci pohybu lidského těla**

Bc. Tomáš Uhýrek

---

Diplomová práce  
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav inženýrství polymerů  
akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Uhýrek**  
Osobní číslo: **T13974**  
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Inženýrství polymerů**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Senzor na principu zasíťovaných uhlíkových nanotrubiček na polymerním nosiči pro detekci pohybu lidského těla**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma s využitím dostupné odborné literatury.
2. Připravte soustavu senzorických členů na principu CNT a termoplastického elastomeru umístěných na elastické kolenní bandáži s cílem získat v průběhu měření soubor deformačních odezev pro detekci pohybu kolene v různých směrech jeho osy.
3. Optimalizujte kroky přípravy. Posudte vhodnost použití takového členu z pohledu parametrů, jako jsou opakovatelnost, vratnost, citlivost a selektivita odezvy.
4. Získané poznatky zpracujte do diplomové práce.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

P. Slobodian, P. Riha, and P. Saha, A highly-deformable composite composed of an entangled network of electrically-conductive carbon-nanotubes embedded in elastic polyurethane, Carbon 50(10), 3446-3453, 2012.

Slobodian, P., Riha, P., Olejnik, R., Cvelbar, U., Saha, P. Enhancing effect of KMnO<sub>4</sub> oxidation of carbon nanotubes network embedded in elastic polyurethane on overall electro-mechanical properties of composite. Composites. Science and Technology, vol. 81, p. 54-60, ISSN 0266-3538, 2013.

P. Slobodian, P. Riha, R. Benlikaya, P. Svoboda, D. Petras, A flexible multifunctional sensor based on carbon nanotubes network/polyurethane composite. IEEE Sensors Journal 13, 4045-4048, 2013.

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. Petr Slobodian, Ph.D.**  
Centrum polymerních materiálů

Datum zadání diplomové práce:

**16. ledna 2015**

Termín odevzdání diplomové práce:

**15. května 2015**

Ve Zlíně dne 2. března 2015

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



  
Ing. Lubomír Beníček, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: UHÝREK TOMÁŠ

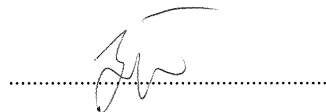
Obor: I.P.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 19.5.2015



<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlíádne k vyšší výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce popisuje přípravu kompozitu složeného z termoplastického polyuretanu a zapletených mnohostěnných uhlíkových nanotrubic. Vakuovou filtrací vodné disperze trubic byly trubice převedeny na polyuretanovou membránu a následně nažehleny na polyuretanovou nosnou vrstvu. Takto byl připraven kompozitní deformační senzor, u něhož byly následně testovány parametry možné detekce deformace a možnost použití pro monitorování pohybu lidského těla. Byl dále stanoven vliv navážky trubic na rozsah a přesnost měření, dále zvýšení citlivosti senzorického členu řízeným předpětím a nakonec možná aplikace jako snímač pohybu lidského kolene v zapojení jako více senzorického členu.

Klíčová slova: uhlíkové nanotrubičky, senzor deformace, polyuretan, více senzorická detekce, biomechanika

## **ABSTRACT**

In this thesis the preparation of thermoplastic composite based on polyurethane with entangled multiwalled carbon nanotubes is described. Carbon nanotubes were transferred to a polyurethane membrane by vacuum filtration of their aqueous dispersion and finally fixed on polyurethane base by ironing. It was found that the prepared composite structure is sensitive to strain. Subsequently parameters suitable for detection of human being movement were tested. Among others the influence of nanotubes amount on the range and accuracy of strain measurement was determined. Further, the effect of sensitivity to strain enhancement by controlled mechanical preloading was found. Finally, detection of human knee movement was set up as multi-sensor strain detection.

Keywords: Carbon nanotube, strain sensor, polyurethane, multi-sensor detection, biomechanics

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Petru Slobodianovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a spolupráci při tvorbě této práce.

Poděkování patří také mé rodinně za morální i jinou podporu.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské/diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem citoval(a). V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden(a) jako spoluautor(ka).

Ve Zlíně dne .....

.....

Tomáš Uhýrek

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 UHLÍKOVÉ TRUBIČKY OBECNĚ</b> .....	<b>12</b>
1.1 STRUKTURA .....	12
1.2 JEDNOSTĚNNÉ NANOTRUBICE (SWCNT) .....	13
1.3 MNOHOSTĚNNÉ NANOTRUBICE (MWCNT).....	13
1.3.1 Chemická reaktivita .....	14
1.3.2 Elektrická vodivost.....	15
1.3.3 Mechanická pevnost.....	15
1.4 VÝROBA .....	15
1.4.1 Laserová ablace .....	15
1.4.2 Chemická depozice v plynné fázi .....	16
1.4.3 Výboj v elektrickém proudu.....	17
<b>2 SENZORY</b> .....	<b>19</b>
2.1 TYPY SENZORŮ.....	19
2.2 MATERIÁLY PRO VÝROBY SENZORŮ .....	20
2.2.1 Slitina mědi a niklu .....	21
2.2.2 Nikl chromová slitina .....	22
2.2.3 Slitina 8% Platiny a Wolframu .....	22
2.2.4 Isoelastické slitiny .....	22
2.3 TLAKOVÉ SENZORY .....	22
2.4 POLYMER/CNT SENZORY .....	23
<b>3 KOMPOZITY</b> .....	<b>24</b>
3.1 ČLENĚNÍ KOMPOZITŮ .....	24
3.2 POLYMERNÍ KOMPOZITY.....	24
3.2.1 Výrobní technologie.....	27
3.2.2 Obecné charakteristiky .....	27
<b>4 POLYURETHANY</b> .....	<b>29</b>
4.1 TERMOPLASTICKÉ ELASTOMERY .....	30
4.1.1 Aplikace TPE .....	30
<b>5 BIOMECHANIKA</b> .....	<b>32</b>
5.1 HISTORIE .....	32
5.2 DEFINICE.....	33
5.3 EXPERIMENTÁLNÍ BIOMECHANIKA .....	34
5.3.1 Základní metody experimentální biomechaniky .....	35
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>36</b>
<b>6 CÍL PRÁCE</b> .....	<b>37</b>
6.1 POUŽITÉ MATERIÁLY .....	37
6.2 VYUŽÍVANÁ ZAŘÍZENÍ.....	39
<b>7 TEM ANALÝZA</b> .....	<b>44</b>
<b>8 SEM ANALÝZA</b> .....	<b>45</b>



<b>9</b>	<b>PŘÍPRAVA POLYMERNÍHO KOMPOZITU.....</b>	<b>48</b>
9.1	METODA PŘÍPRAVY VODNÍ DISPERZE MNOHOSTĚNNÝCH NANOTRUBIC .....	48
9.2	METODA FILTROVÁNÍ VODNÍ DISPERZE MNOHOSTĚNNÝCH NANOTRUBIC ....	48
9.3	METODA LISOVÁNÍ POLYURETANU A NÁSLEDNÉHO NAŽEHLOVÁNÍ MEMBRÁNY S MNOHOSTĚNNÝMI NANOTRUBICEMI .....	48
<b>10</b>	<b>TESTOVÁNÍ VLASTNOSTÍ POLYMERNÍHO KOMPOZITU .....</b>	<b>50</b>
<b>11</b>	<b>NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY .....</b>	<b>52</b>
11.1	CITLIVOST TESTOVANÉHO KOMPOZITU.....	52
11.2	OPTIMALIZACE TLOUŠŤKY VRSTVY MNOHOSTĚNNÝCH NANOTRUBIC.....	55
11.3	STIMULACE CITLIVOSTI SENZORU PŘEDPĚTÍM .....	57
11.4	PRAKTICKÁ APLIKACE POLYMERNÍHO KOMPOZITU.....	60
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>66</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>68</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>72</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>74</b>

## ÚVOD

V současnosti se průmysl stále rychleji vyvíjí a postupuje mílovými kroky vpřed. Tento bouřlivý vývoj nás však staví před otázku, jakým způsobem je možné tyto moderní provozy a technologie kontrolovat a ovládat. Je zřejmé, že pokud chceme dosáhnout, co nejlepších a nejefektivnějších výsledků je nutné mít co nejlepší a nejaktuálnější přístup k právě probíhajícím procesům a k datům, jež tyto procesy charakterizují. Z těchto požadavků vyplývá potřeba nových snímacích prvků – senzorů, které by s aktuálními potřebami a novými trendy drželi krok. Stávající technologie a materiály z kterých jsou senzory vyráběny již, dosahují vrcholu svých možností a je tudíž nutné hledat jejich alternativy, které přinesou novou přidanou hodnotu a univerzálnější možnosti použití.

Tato práce se snaží tuto alternativu nabídnout ve formě konceptu nano kompozitního senzoru jehož využití jako tenzometru se v budoucnosti jeví jako velmi dobrá náhrada stávajících technologií. Senzor byl připraven nafiltrováním MWCNT na membránu z termoplastického polyuretanu kde MWCNT vytvořily aktivní vrstvu, která je schopná detekovat relativní změnu odporu při probíhající deformaci. Tato membrána byla nažehlena na předem vylišovanou podkladní destičku složenou ze stejného materiálu jako membrána. Takto byl připraven polymerní nanokompozit, který byl následně testován, zda splňuje základní požadavky na senzor. Tyto testy potvrdily, že je schopen dostatečně citlivě detekovat deformace a jeho odezva je vratná i po více cyklech. Tímto se potvrdilo, že je připravený nano kompozit použitelný pro aplikace jako senzor deformace. Pro ověření praktické funkčnosti byla zvolena názorná ukázka na kolenní bandáži při, které byly zaznamenávány běžné lidské pohyby jako dřep nebo chůze.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 UHLÍKOVÉ TRUBIČKY OBECNĚ

Uhlíkové nanotrubičky si lze představit jako válcovou grafénovou plochu z uhlíku ve tvaru šestiúhelníků. Svým složením jsou to makromolekuly uhlíku, stejně jako tzv. fullereny (např. C60, C100). Fullereny jsou poměrně velké molekuly tvarově nejčastěji přirovnávané k fotbalovým míčům. Jejich stěny jsou tvořeny z pěti- a šesti- úhelníků s uhlíkem v každém vrcholu této struktury. Poprvé byly pozorovány v roce 1952 vědci L. V. Radushkevich a V. M. Lukyanovich [1,3,4,5].

Tabulka 1 Porovnání vlastností uhlíkových vláken a nanotrubic[1]

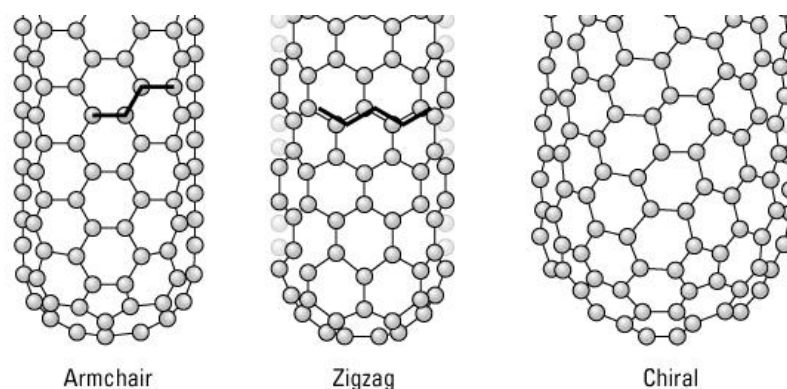
	Modul pružnosti v tahu (Gpa)	Pevnost v tahu (Gpa)	Prodloužení (%)	Hustota ( $g/cm^3$ )
Uhlíková vlákna	270 - 390	2,1	1,5	2,1
SWCNT	1000 - 4500	< 100	15 - 23	1,3 - 1,4
MWCNT	800 - 900	< 150	–	1,3 - 1,4

### 1.1 Struktura

Je dobré připomenout, že například v tuze (grafitu) jsou konkrétní atomové roviny uhlíku k sobě vázány slabými Van der Walsovými silami což, způsobuje, že po sobě tyto roviny klouzají a tuha se otírá. V kontrastu s tím jsou silné vazby mezi samotnými atomy. Tyto trubičky z uhlíku je tedy možné si představit jako sbalenou atomovou rovinu grafitu do tvaru ruličky [1,3,4,5].

Nejčastěji se nanotrubičky vyrábějí s průměry od 1 nm až do 50 nm a délkou až 300  $\mu m$ . Z těchto číselných údajů je patrný výrazný poměr mezi šířkou a délkou nanotrubic což je zároveň jeden z důležitých a využívaných aspektů tohoto materiálu. Jedním ze základních dělení nanotrubic je parametr tloušťky stěny. Tyto stěny mohou být jednostěnné, dvojstěnné, mnohostěnné a také tzv. peapod což jsou plněné nanotrubičky a to ionty nebo atomy, jež nejsou uhlíkové. Mřížka trubiček je hexagonální a dovoluje nanotrubicím větší možnosti uspořádání v prostoru. Hybridizace je stejně jako u grafitu a fullerenu  $sp^2$ . Nanotrubičky se také mohou vyskytovat ve třech možných typech mřížky a to podle směru ve, kterém dochází ke sbalení. Tyto typy jsou armchair, zig zag a chiral. První možnost je přímá struktura nebo

taky armchair, která vzniká tak že je grafénová vrstva sbalena do válce ve směru osy válce. Přímoúhelnou strukturou máme na mysli, že příčka, jež spojuje středy hexagonů grafénové vrstvy je rovnoběžná s osou vlákna. Druhou variantou, která může být podle velikosti úhlu buď to zig-zag nebo chiral je pak nepřímá struktura která je na rozdíl od předchozího typu charakterizována tak, že příčka spojující středy hexagonu grafénové vrstvy není rovnoběžná s osou vlákna [1,3,4,5].



Obrázek 1 Tři možné směry sbalení grafénové vrstvy

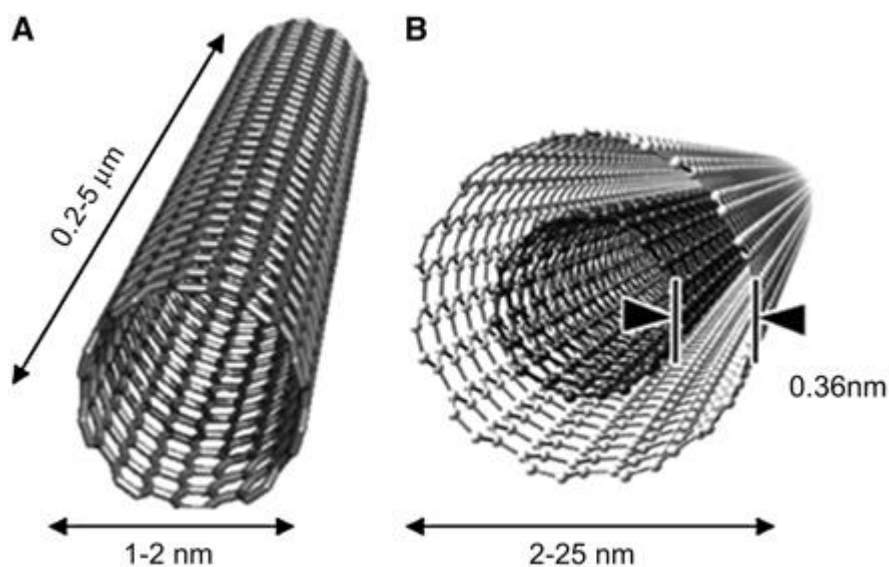
## 1.2 Jednostěnné nanotrubic (SWCNT)

Mají molekulární charakter a je možné si je představit jako jednu stočenou atomovou rovinu grafitu do ruličky. Struktura je bežešvá a jejich délka se pohybuje v rozmezí  $10^3 - 10^5$  nm. Jedním ze základních parametrů sledovaných u trubic je pak právě průměr, který se nachází v rozmezí 1 - 2 nm. Výhodou tohoto typu nanotrubic je úzká distribuce průměru a to opět v rozmezí 1 - 2 nm. U jednostěnných nanotrubic je značné omezení v čistotě chiralitě a elektrických vlastnostech u konečného produktu získaného syntézou. Nanotrubic mohou, ale také nemusí mít uzavřené konce. Jejich mechanické vlastnosti jsou lepší než u mnohostěnných přičemž Youngův modul pružnosti se pohybuje okolo 1 TPa a a pevnost v rozmezí 50-500 GPa [1,3,4,5].

## 1.3 Mnohostěnné nanotrubic (MWCNT)

Tento typ byl první objeven a detailněji zkoumán. Oproti tenkostěnným uhlíkovým trubicím jsou ty mnohostěnné (MWCNT) souosou soustavou několika jednostěnných nanotrubic. Je

možné je vyrobit jak samostatně tak i ve svazcích. Základní parametr průměr pak nabývá hodnot od 2 - 25 nm přičemž samotné grafitové vrstvy se nacházejí 0,34 nm od sebe a vnitřní průměr je pak v rozsahu 1-8 nm. U mnohostěnných nanotrubic nenastávají problémy jako u jednostěnných a dají se, proto se vyrábět ve větší čistotě mají stálé elektrické vlastnosti a mohou projít agresivnějším zpracováním. Jak již bylo výše zmíněno mechanické vlastnosti mají nižší hodnoty než u jednostěnných a to konkrétně u Youngova modulu od 0,1 do 1 TPa a pevnost se poté pohybuje v rozmezí 10-60 GPa což je, ale částečně kompenzováno jejich schopností vratné deformace. [1,3,4,5]



Obrázek 2 Konceptuální schéma zobrazení s typickými rozměry délky, šířky a u mnohostěnných trubíc i separačními vzdálenostmi mezi vrstvami A) Jednostěnných nanotrubic a B) Mnohostěnných nanotrubic [8]

### 1.3.1 Chemická reaktivita

Zásadní informací je to, že chemická reaktivita je u nanotrubic větší než u ploché grafitové vrstvy. Toto je způsobeno zakřiveností nanotrubic. Kdy právě kvůli jejímu zakřivení probíhají záměny pi-orbitalů. Z toho vyplývá, že je nezbytné rozlišovat tyto chemické vlastnosti pro boční stěny a zvláště pak pro konce nanotrubic. Důsledkem plynoucím z tohoto zjištění je, že kratší nanotrubice jsou reaktivnější. Dalším důležitým zjištěním je, že kovalentní

vazby se mohou vyskytovat jak na konci trubic tak i na stěnách. Takto lze upravovat smáčivost zvolených rozpouštědel [4,5,11,12].

### 1.3.2 Elektrická vodivost

Klíčovým parametrem elektrické vodivosti u nanotrubic je chirální vektor, který popisuje sbalení uhlíkového plátu. Tento vektor je také závislý i na průměru nanotrubic. O tom jestli budou nanotrubic vodivé nebo polovodivé rozhoduje molekulární struktura která má vliv na natočení vazeb a tím řídí vodivé pásy a potenciální bariery. Kovové vodivosti lze dosáhnout pouze, pokud je rozdíl  $(n-m)$  dělitelný třemi nebo je roven nule. Délka nanotrubic nemá na elektrický odpor žádný vliv [4,5,11,12].

### 1.3.3 Mechanická pevnost

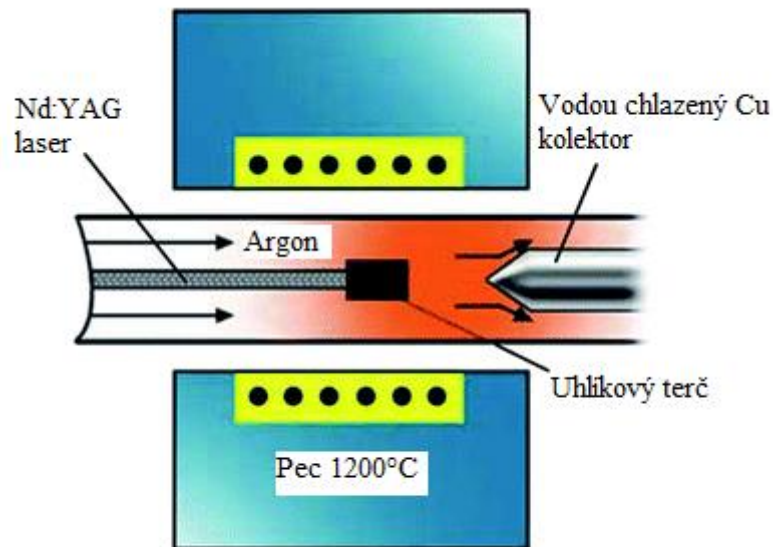
Díky vynikající mechanickým vlastnostem nanotrubic je výhodné tyto používat do kompozitních materiálů. Vysoký Youngův modul je ovšem pouze ve směru osy nanotrubic. Přízpůsobivost pramení z velké délky nanotrubic a přináší nám výhodné anizotropní vlastnosti, kterých se využívá ve výše zmíněných kompozitních aplikacích [4,5,11,12].

## 1.4 Výroba

### 1.4.1 Laserová ablace

Tato metoda byla poprvé použita v roce 1995. Principem výroby je, jak už je patrné z názvu, odpařování uhlíku s uhlíkové elektrody za pomoci laserového impulzu. K tomuto dochází při vysokých teplotách pohybujících se kolem 1200 °C v trubkové peci. V peci je nutné udržovat inertní atmosféru a lehce snížený tlak. Pro tuto metodu jsou téměř výhradně využívány lasery typu Nd: YAG a CO<sub>2</sub>. klíčovou součástí Laseru typu YAG je izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu (Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>) tento aktivní materiál ovšem musí být dopován ionty neodymu (Nd<sup>3+</sup>). Nejčastější pracovní vlnovou délkou tohoto typu laseru je 1064,1 nm. K buzení jsou používány převážně xenonová výbojka nebo laserovou dioda. Tento proces může probíhat buď kontinuálně, nebo jako jednotlivé impulzy. Hlavním faktorem určujícím konkrétní průběh je pak délka buzení. Typ CO<sub>2</sub> byl vynalezen již v roce 1964 a patří tudíž k jednomu z nejstarších laserů. Aktivní atmosférou tvoří dusík, vodík, helium, nebo

xenon a oxid uhličitý. Procentuální rozdělení plynů ve směsi je poté dáno konkrétním typem CO<sub>2</sub> laseru. Pro získání výsledného produktu vyrobeného laserovou ablací je nutné nakonec ochladit páry. Využití této metody se dá doporučit pro výrobu jednostěnných nanotrubic [6,7].



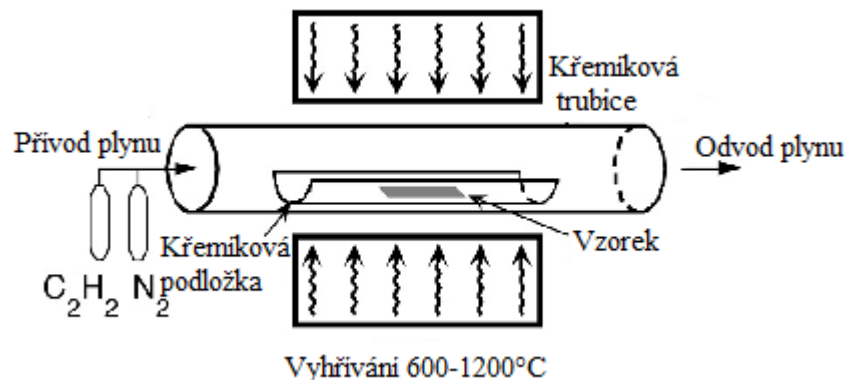
Obrázek 3 Schéma výroby nanotrubic laserovou ablací [13]

#### 1.4.2 Chemická depozice v plynné fázi

Pokud srovnáme metody obloukového výboje laserové ablace a chemické depozice par. Je chemická depozice par jednodušší a ekonomicky výhodnější a to hlavně díky nízké teplotě a tlaku potřebnému k syntéze. Díky tomu je chemická depozice par nejvyužívanějším postupem přípravy nanotrubic. Samotný proces se skládá z několika kroků. Na začátku prochází uhlovodík parní fázi v časovém rozmezí 15-60 minut. K syntéze se používá trubkový reaktor. Reaktor ve, kterém je katalyzátor se zahřívá na 600-1200°C proto, aby se rozložil uhlovodík. Uhlíkové nanotrubice rostou na katalyzátoru v reaktoru, kde se i shromažďují a nakonec ochladí na pokojovou teplotu. Nejčastěji používané prekurzory nanotrubic jsou metan, etylen, acetylen, benzen a xylen. K přípravě katalyzátoru se nejčastěji používá Fe, Ni a Co. Pro



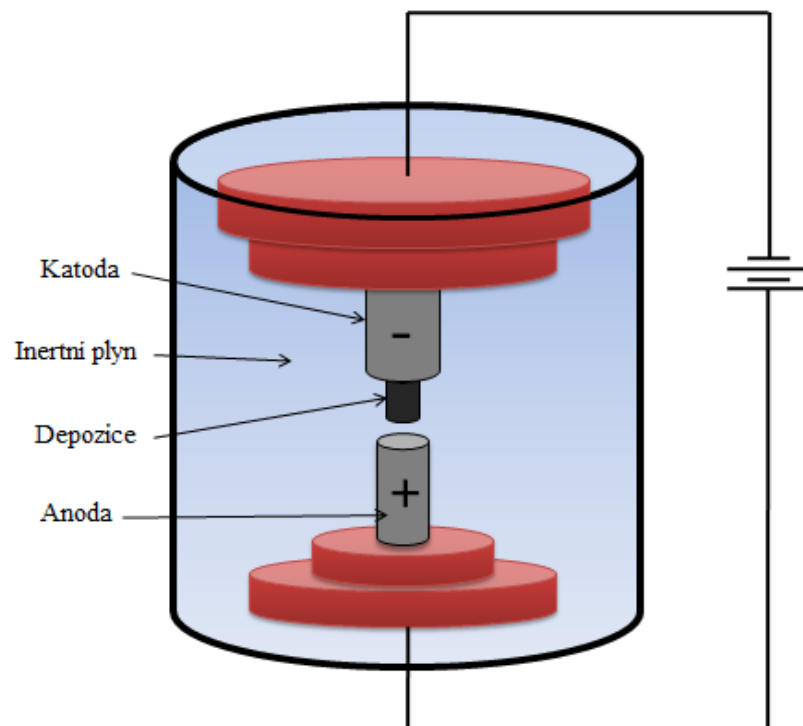
použití těchto konkrétních kovů jsou dva důvody. Prvním důvodem je dobrá rozpustnost uhlíku při vysokých teplotách a druhým vysoká rychlost difuze uhlíku v těchto kovech [10].



Obrázek 4 Schématické znázornění výroby nanotrubic chemickou depozicí v plynné fázi [9]

### 1.4.3 Výboj v elektrickém proudu

Tato metoda syntézy uhlíkových nanotrubic patří k metodám, při nichž využívají vyšší teploty nad 1700°C. Tento typ syntézy se vyznačuje menšími strukturálními defekty než ostatní. Výhodou této metody je její jednoduchost a nevýhodu nečistoty vznikající při syntéze. Jsou to hlavně saze, které obsahují fullereny, amorfni uhlík a aniony. Základním principem této metody je primárně stejnosměrný elektrický výboj (varianty se střídavým proudem se využívá méně) mezi dvěma grafitovými elektrodami. Je nutné, aby probíhal v inertní atmosféře a za sníženého tlaku. Elektrody mají rozměr 6-12 mm a je mezi nimi rozdíl potenciálů. Vznikající produkt se nachází na katodě, zatímco anoda je během syntézy vytěžena a musí se obnovovat. Anoda je nejčastěji uhlíková s příměsí jednotlivých kovů, jako je Fe, Ni, Co nebo kombinací těchto kovů navzájem. Katoda je vyrobená z uhlíku [6,7].

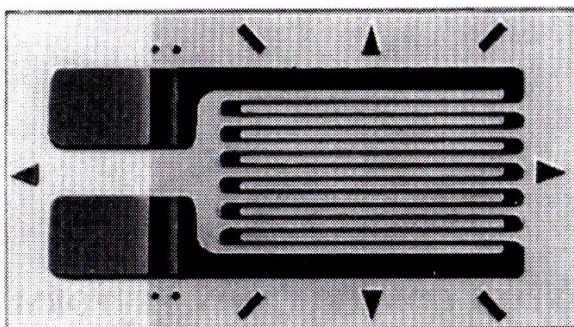


Obrázek 5 Princip výroby nanotrubic v elektrickém proudu

[14]

## 2 SENZORY

Obecně lze snímač definovat jako zařízení, které přímá signál/podnět a reaguje na něj. Toto je ovšem velmi obecná definice. Jiná konkrétnější říká, že senzor je prvek, jehož výstupem je změna a to buď chemická, fyzikální, mechanická nebo kapalinová. Aby mohl tuto změnu měřit je nutné, aby byl zásoben podněty z okolního prostředí, které tyto změny produkují. Senzor jako takový však nemůže plnit svoji úlohu samostatně, ale musí být zapojen v měřícím okruhu. Součástí měřícího okruhu snímač/převodník nebo vyhodnocovací jednotka. Klíčovou částí snímače je senzor kde probíhá přeměna okolního fyzikálního impulsu nebo pouhého snímání na signál nesoucí měřenou informaci. Část, která následuje po senzoru je převodník. Je to elektronický obvod, jehož hlavním úkolem je vyhodnotit primární signál ze senzoru a převést ho na elektricky unifikovaný signál veličiny, která je měřena [15,16].



Obrázek 6 Moderní foliový tenzometr [17]

### 2.1 Typy senzorů

Senzory je možné dělit podle mnoha parametrů a specifik. V této práci bylo zvoleno dělení podle druhu změny ve hmotě.

Senzory odporové, kapacitní, indukčnostní – tyto senzory zaznamenávají změny elektrických parametrů v materiálu na principu změn elektrického odporu, kapacity a indukčnosti.

Senzory ampérometrické, aktivní nábojové, indukční, potenciometrické – měřenými veličinami jsou elektrický náboj, elektrické napětí a elektrické potenciál.

Senzory optické – principiálně fungují díky změně směru a energie elektromagnetického záření. Příkladem je lom světla nebo absorpce elektromagnetického záření.

Senzory mechanické – principem funkce je mechanická změna v materiálu. Tou může být deformace vrstev, změna rozměru dilatací a změna Coriolisovy a odstředivé síly.

Senzory kapalinové – zaznamenává hydraulické veličiny při toku tekutin

Senzory elektro katalytické – principem je zaznamenávání chemických změn a reakcí

Senzory polovodičové – principem těchto sensorů je působení na polovodičový efekt ve snímaném polovodiči

senzory ionizační – principem je reakce senzoru na změny ionizačního záření [15]

## 2.2 Materiály pro výroby sensorů

Primárně užívaným materiálem při výrobě odporového tenzometru je mřížka (odporový prvek citlivý na napětí), některé důležitými parametry, jež po takovém zařízení požadujeme si nyní vyjmenujeme [17]:

- Lineárně probíhající napětí v rozsahu elastické deformace z důvodu větší přesnosti a lepší opakovatelnosti.
- Co nejvyšší odpor i při malých velikostech tenzometru
- Nízká hystereze pro větší přesnost a lepší opakovatelnost měření
- Vysoká citlivost i při maximálním elektrickém výkonu
- Co nejnižší a dobře kontrolovatelný teplotní koeficient kvůli možnosti lepší kontroly teplotní kompenzace
- Největší možný rozsah použitelných teplot pro co nejširší možnosti použití tenzometru
- Vysoká odolnost a životnost při dynamickém měření

V tabulce 1 můžeme nalézt některé materiály spolu s jejich citlivostí na změnu napětí. Tyto materiály, jež jsou použitelné pro výrobu tenzometrů a jsou vyráběny se slitin, které splňují výše zmíněné požadavky na tenzometry, a nejvýznamnější z nich si detailněji popíšeme [17].

Tabulka 2 Citlivost na změnu deformace pro různé materiály [17]

Materiál	Obchodní název	Typická citlivost k napětí
Měď-nikl (55-45)	Constantan	+ 2,1
Nikl-chrom (80-20)	Nichrome V	+ 2,2
Nikl-chrom (75-20) + železo a hliník	Karma	+ 2,1
Železo-chrom-hliník (70-20-10)	Armour D	+ 2,2
Nikl-chrom-železo-molybden (36-8-55,5-0,5)	Isoelastic	+ 3,5
Platina-wolfram (92-8)	-	+ 4,0
Měď-nikl-mangan (84-4-12)	Manganin	+ 0,6
Nikl	-	- 12
Železo	-	+ 4,0

### 2.2.1 Slitina mědi a niklu

Tenzometry vyrobený z této slitiny bývají obecně pojmenovány jako Constantan i když jsou používány i jiné obchodní názvy jako Cupron nebo Copels poměrem mědi a niklu 55:45. Je jedním z nejstarších stále používaných tenzometrů a to hlavně díky jedné z nejlepších kombinací požadovaných vlastností. Konkrétně se jedná velkou citlivost k změně deformace, nezávislé na jejich celkových hodnotách a nezávislé i na teplotě. Kromě toho má i dlouhou životnost a vysokou schopnost se prodloužit (až 5%). Rozsah teplot pro něž jsou použitelné se pohybuje od  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $+50^{\circ}\text{C}$ . Při vyšších teplotách dochází k oxidaci což vede k zvyšování odporu a nepřesnému měření [17].

### 2.2.2 Nikl chromová slitina

Je druhou nejpoužívanější slitinou materiálů pro výrobu tenzometrů. Hlavní typ je pak označován jako Karma nebo také K-slitina a skládá se z 75% niklu 20% chromu a malého množství železa a hliníku. Jeho hlavní výhodou je vynikající životnost, která předčí i slitinu mědi a hliníku. Zajímavou vlastností, jež musí být brána v potaz je snížená citlivost ke změně deformace se snižující se teplotou. Tuto vlastnost je proto nutné kompenzovat. Rozmezí teplot pro, než je tenzometr z této slitiny použitelný je od  $-269^{\circ}\text{C}$  do  $+269^{\circ}\text{C}$  ačkoliv při kratší době měření je použitelný až do  $400^{\circ}\text{C}$  [17].

### 2.2.3 Slitina 8% Platiny a Wolframu

Kombinace těchto materiálů byla použita pro eliminování nedostatků slitiny chromu a niklu a tím je myšlena hlavně nízká teplota, při které mohou být tenzometry použity. Tenzometry vyrobené ze slitiny platiny a wolframu jsou použitelné až do  $900^{\circ}\text{C}$  bez toho, aby se začali tavit a výhodou je také, že se jejich odpor s teplotou nemění. Další výhodou je větší citlivost ke změně deformace než předchozí slitiny. Ovšem tato slitina má i nevýhodu a to vysoký součinitel teplotního odporu, jež není možný upravit [17].

### 2.2.4 Isoelastické slitiny

Pod tímto názvem se skrývají slitiny molybdenu, niklu, železa a chromu. Výhodou je špičková životnost a poměrně vysoká citlivost. Nevýhodou pak nelineární průběh deformace. Z těchto charakteristik je patrné že se nejvíce hodí pro je dynamická měření [17].

## 2.3 Tlakové senzory

Senzor tlaku je komplexní snímač. To znamená, že je zapotřebí více než jeden krok přeměny energie, než může být tlak konečně převeden na elektrický signál. Princip funkce mnoha tlakových senzorů je založena na konverzi v důsledku tlakové námahy na citlivém prvku, který má definovaný povrch. Je ale nutné vzít na vědomí že, prvek je posunut nebo deformován. V důsledku toho, může být měření tlaku zkesleno o sílu vznikající právě při posunu a deformaci [15,16].

Tlaková čidla obsahují deformovatelné prvky, jejichž deformace nebo pohyby jsou měřeny a přeměněny pomocí senzorů na elektrické signály reprezentující hodnoty tlaku. V tlakových čidlech, je tento deformovatelný nebo snímací prvek mechanické zařízení, které prochází strukturálními změnami, kvůli mechanickým napětím vyplývajícím z působícího tlaku [15,16].

## 2.4 Polymer/CNT senzory

Snímače, jež zaznamenávají deformace jsou používány v mnoha oborech lidského snažení ať už pro sledování průběhu různých jevů, nebo pro odhalování kritických poškození materiálu. Možnosti tradičních tenzometrů jsou omezeny požadavky, jež musí splňovat a to hlavně měřitelnost napětí pouze v určitých směrech a místech. Zájem o senzory a jejich co nejuniverzálnější použití neustále stoupá a tímto se otvírá prostor pro senzory na bázi nano uhlíkových trubic jež mají vynikající mechanické a elektrické vlastnosti. Hlavními parametry proč jsou nano trubice považovány za budoucnost výroby senzorů je jejich bezvadná strukturální integrita, malé rozměry, vysoká pevnost a jak již bylo zmíněno vynikající elektrické vlastnosti. Všechny tyto zajímavé parametry nanotrubic vedou vědce k testování rozsáhlých možností využití pro různé aplikace.

Nejvíce testovanou vlastností je elektromechanická reverzibilita. Schädler a kol. při svém pokusu pozorovali posun Ramanova píku vzhledem k přenosu zatížení poté co byl kompozit s nanotrubic a epoxidové pryskyřice vystaven tlaku a tahu. Jang a kol. testovali jednotlivé víceštěnné nanotrubice a zjistili, že elektrický odpor trubiček se s deformací zvyšuje a jeho zvětšení je deformaci přímo úměrné. Další výzkumná skupina kolem vědce Parka testovala možnosti kompozitu složeného z mnohostěnných nanotrubic a polyetylen oxidu a výsledkem bylo zjištění opakovatelnosti procesu deformace a s tím spojené změny odporu [3].

### 3 KOMPOZITY

Kompozity jsou heterogenní materiály, které se skládají minimálně ze dvou materiálů, jež mají různé fyzikální a mechanické vlastnosti. Tyto materiály jsou zpravidla rozdílného složení, ale nemusí tomu tak být vždy. První z částí kompozitu se nazývá matrice a má spojitý charakter. Druhou částí je pak vyztužovací materiál, jež obvykle spojitý není a vyskytuje se v různých tvarech jako destičkové, vláknité nebo kulovité částice. Zajímavým jevem vyskytujícím se u kompozitů je synergický efekt. Tento můžeme popsat tak, že při kombinaci jednotlivých materiálů jsou vlastnosti celku lepší, než při prostém sečtení jednotlivých částí [18].

#### 3.1 Členění kompozitů

Vzhledem k stále se vyvíjejícím materiálům, možnostem jejich použití a různým kombinacím je dělení kompozitů stále složitější. Jednou z možností je selekce podle materiálu z, něhož jsou části kompozitu vyrobeny [18].

A) Podle materiálového složení matrice: kovové, polymerní a anorganické (převážně keramické).

B) Podle materiálového složení vyztužující fáze: částicové, vláknité, deskové a v neposlední řadě také kombinace těchto typů [18].

#### 3.2 Polymerní kompozity

Plasty, které jsou vyztužovány pomocí vláken se vyskytují nejčastěji v kombinaci skelných, uhlíkových nebo aramidových vláken s nekonečnou nebo konečnou délkou s průměrem 3,5 – 24  $\mu\text{m}$  a termoplastické či termosetové matrice [19].

Velmi často jsou u těchto materiálu vyžadované anizotropní vlastnosti což se projeví jako různé projevy materiálu při namáhání v různých směrech. Materiál je tudíž konstruován tak aby ve směru nejvyššího namáhání byly jeho vlastnosti nejlepší [19].

Jedněmi z největších výhod těchto polymerních kompozitů je vysoká pružnost při deformaci, dobrá surovinová základna a v neposlední řadě také vysoká odolnost proti stárnutí a korozi.



Jako nevýhody pak mohou být klasifikovány velké náklady při dimenzování konstrukcí, neexistence standardizovaného kompozitu a tudíž široké škála alternativ materiálového složení a také komplikované nedestruktivní testování materiálu[19].

Objem výroby kompozitů konkrétně těch sklem vyztužovaných se neustále zvyšuje a přehledně je uveden v tabulce 3. Z této tabulky je dále patrné že výroba kompozitů na termoplastické matrici se neustále a velmi progresivně zvyšuje zatímco výroba kompozitů s termosetovou matricí stagnuje [19].

Tabulka 3 Objem výroby sklem vyztužených plastů v Evropě (v tisících tun) [19]

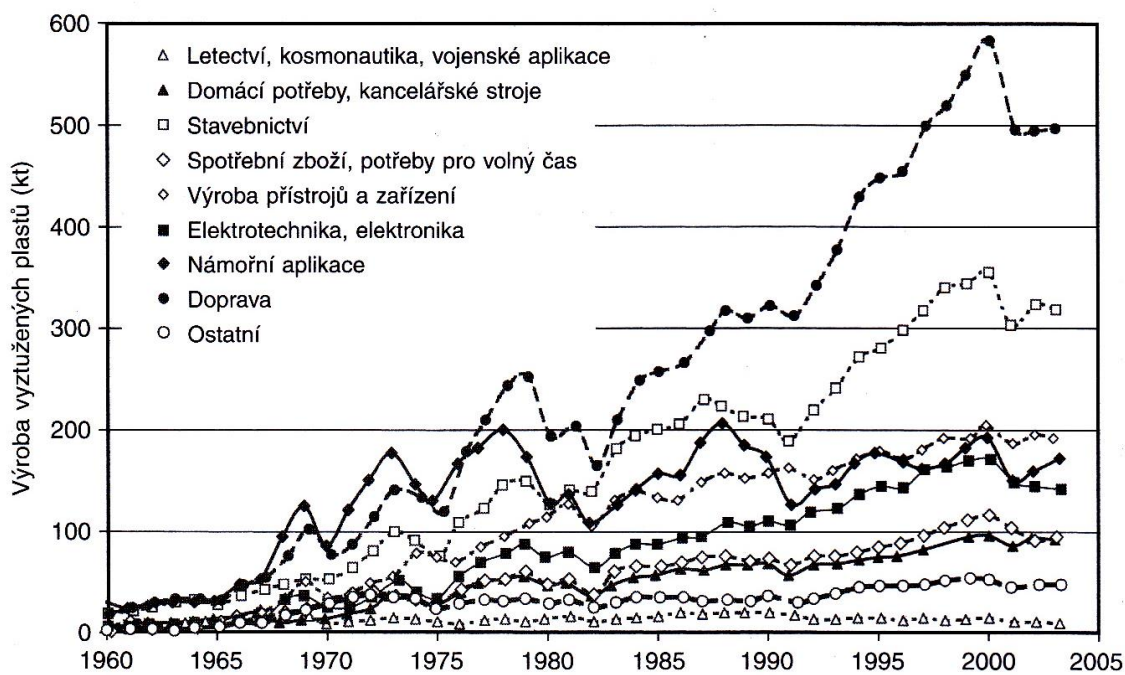
Rok	Termoset (kt)	Termoplast (kt)	Sklem vyztužené plasty celkem (kt)
1970	320	-	320
1975	380	-	380
1980	510	0	510
1985	640	4	644
1990	700	15	715
1992	780	25	805
1995	950	35	985
1998	857	35	892
1999	905	38	943
2000	985	45	1030
2001	1013	47	1060
2002	930	62	992
2003	942	67	1009
2004	967	74	1041
2005	969	83	1052
2006	1014	90	1104

Podle možnosti užití dělíme tyto vyztužené plasty do 3 skupin:

Spotřební zboží – rohož je použita jako výztuž a důraz je kladen na vynikající kvalitu úpravy zevnějšku.

Průmyslové aplikace – jako matrice jsou použity speciální pryskyřice a výztuží jsou pak nejčastěji skelná vlákna.

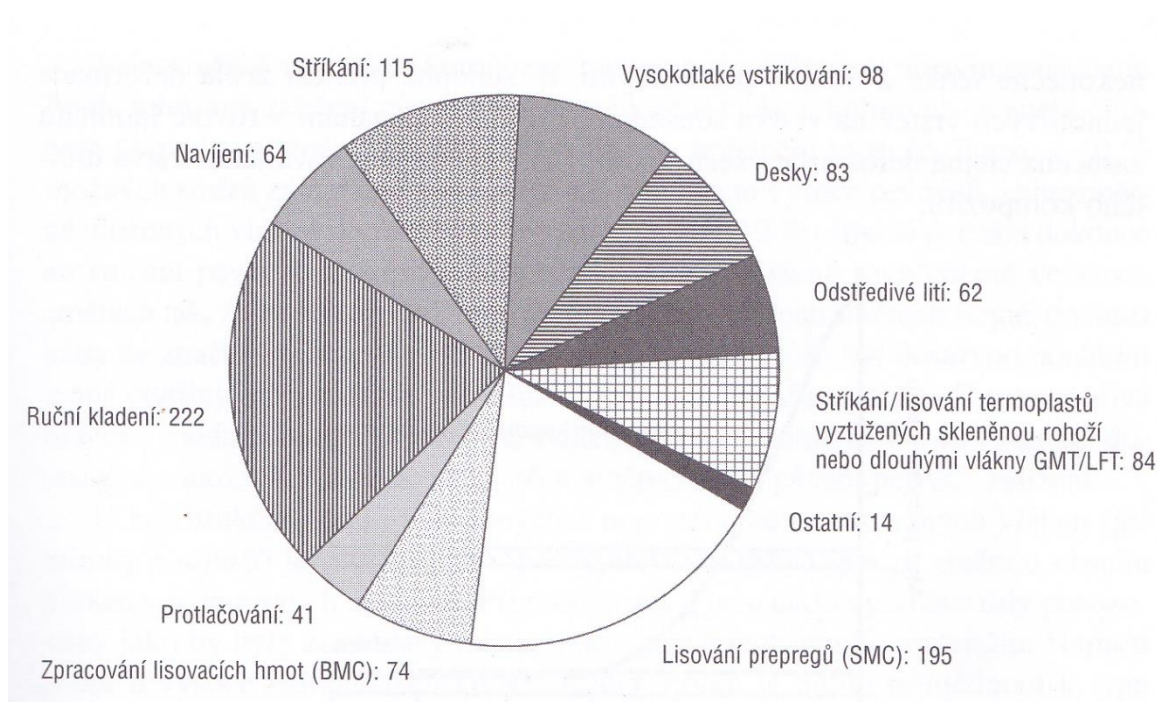
Výrobky pro speciální aplikace – pro tyto technologicky vyspělé aplikace jsou použity ty nejlepší pryskyřice hlavně epoxidové a jako výztuže pak poměrně drahá, ale mechanicky velmi odolná vlákna ať už aramidová nebo uhlíková. Přehledný vývoj aplikačních oblastí vyztužených plastů na americkém trhu v rozmezí 45 let můžeme vidět v grafu na obrázku 7 [19].



Obrázek 7 Vývoj aplikačních oblastí vyztužených plastů v USA v letech 1960-2005 [19]

### 3.2.1 Výrobní technologie

V delším časovém horizontu lze vypočítat srovnatelný objem výroby u rozměrově větších dílů vyráběných v menších sériích a výrobků produkovaných ve velkých sériích vyráběných metodou lisování. Novinkami jsou pak stále častěji využívána technologie ručního kladení a užívání dlouhých vláken v termoplastické matrici. U konvenčních technologií je pak možné pozorovat pozvolný nárůst objemu výroby, který je patrný z grafu na obrázku 8 [19].



Obrázek 8 Podíl jednotlivých technologií zpracování sklem vyztužených plastů v Evropě v roce 2005 (v tisících tun) [19]

### 3.2.2 Obecné charakteristiky

Složkou kompozitu, jež má nejvyšší vliv na celkovou pevnost a tuhost kompozitního materiálu jsou vlákna. Tyto však ovlivňují i jiné mechanické vlastnosti a záleží i na jejich orientaci. V kompozitu se vytvářejí složité stavy napjatosti, jež jsou zapříčiněny výrazně jinými

mechanickými vlastnostmi dvou rozdílných částí z, nichž je tvořen. Rozborem těchto jevů se zabývá mikromechanika. Klíčovým jevem, jež je zkoumán je vazba mezi matricí a vlákny a vlastnosti elementárního seřazení vláken tj. jednosměrného vyztuženého elementárního členu při přesně určeném mechanickém zatěžování [19].

Tyto jednotlivé parametry a charakteristiky, které můžeme nazvat jako nehomogenity kompozitního materiálu se ovšem dále neřeší jednotlivě, ale při kalkulacích se zohledňuje inženýrské hledisko a jsou brány jako celek s konkrétními reprezentativními vlastnostmi[19].

#### Adheze polymerních kompozitů

Klíčovým pro požadované vlastnosti kompozitu je přenesení všech sil, jež mají na kompozit vliv na vlákna. Z toho vyplývá, že je zásadní kvalitní a pevné spojení mezi vláknem a matricí. Problém pak představuje skutečnost, že značná část plastů má jiné chemické složení než vlákna, kterými se vyztužují. Z tohoto důvodu se vyztužující složky v kompozitu před-upravují apreturou [19].

## 4 POLYURETHANY

Jsou součástí velké skupiny polyesteramidů. Vyrábějí se obecně z vícefunkčních izokyanátů polyadici. Tyto izokyanáty obsahují ve své struktuře hydroxilové skupiny například polyalkoholy. Vznikajícím produktem jsou pak estery kyseliny karbamové. Konkrétní nejčastěji využívaná výroba je polyadice hexamethylendiizokyanátu a 1,4-butylenglykolu. Ideální rozmezí hodnot střední molární hmotnosti je u lineárních polyuretanů od  $7 \text{ kg mol}^{-1}$  do  $12 \text{ kg mol}^{-1}$ . Pokud se střední molární hmotnost zvýší nad  $15 \text{ kg mol}^{-1}$  nastávají problémy ze sítováním, které je nižší [20].

Pokud polyuretany porovnáme s polyamidy zjistíme, že proti nim mají několik lepších vlastností. Tyto parametry jsou vyšší odolnost proti kyselinám, povětrnostním vlivům a vodě. Neméně důležitou informací je pak snížená navlhavost a v neposlední řadě také zlepšené elektroizolační parametry [20].

Nejtypičtějším použitím polyuretanů je výroba pěnových materiálů obecně pak lehčených hmot. Pěny jsou vyráběny ve dvou variantách a to tvrdá a měkká. Klíčovým parametrem který je definuje je rozsah hustot v jakých jsou produkovány. Měkké mají tento rozsah nižší a to konkrétně od  $15 \text{ kg mol}^{-1}$  do  $70 \text{ kg mol}^{-1}$ . U tvrdých jsou možnosti širší a pěny je možné vyrábět o hustotách od  $10 \text{ kg mol}^{-1}$  do  $600 \text{ kg mol}^{-1}$ . Aplikace tvrdých pěn je nejčastěji jako tepelná izolace ve stavebnictví a strojírenství. Měkké pěny se používají převážně pro obalové účely, laminaci textilu a jako matrace [20].

Jak je patrné výrobky z polyuretanů jsou velmi rozmanité. Je možné produkovat měkké i tuhé a lineární i sítované. Z toho plyne, že i rozsah rozmanitých parametrů musí být stejně široký. Elementárními jsou pak výborná adheze k různým druhům materiálů, zachování všech vlastností pokud jsou vystaveny zředěným roztokům kyselin, zásad a také vodě. V neposlední řadě taky vysoká houževnatost proti oděru. Polyuretany se v relativně krátké době prosadili v mnoha různorodých odvětvích a i do budoucna jsou velmi perspektivním materiálem [20].

## 4.1 Termoplastické elastomery

Je to speciální typ polymerů, který kombinuje vlastnosti elastomerů a termoplastů. Elastomerní složka se projevuje za normálních teplot, zatímco termoplastické vlastnosti začnou převládat až při zvýšení teploty. Výhodou je, že tyto materiály již nemusejí složitě procházet vulkanizací, ale přesto mají podobné vlastnosti jako by vulkanizací prošli. Všechny tyto vlastnosti jsou způsobeny kombinací měkkých a tvrdých segmentů přičemž každá část má svou unikátní teplotu tání  $T_m$  a teplotu skelného přechodu  $T_g$ . Zásadním rozdílem mezi termoplastickými polymery a klasickými pryžemi je v uzlových bodech, které u termoplastických polymerů nemají chemický původ [21,22].

Struktura polyurethanových elastomerů ve, které se pravidelně nahrazují tvrdé a měkké segmenty vzniká polyadici diolu a diisokyanátu. U tohoto kopolymeru plní funkci tvrdých krystalických částí polymočovina nebo polyurethan. Polyestery a polyethery pak mají funkci elastomerní a jsou amorfní [21,22].

### 4.1.1 Aplikace TPE

Zjištění, že mají velmi dobré mechanické vlastnosti a to především houževnatost vedlo nejprve k aplikacím, které se snažili nahradit klasické termoplasty. Ovšem první ekonomicky výhodnou aplikací a tudíž i komerčně využitelnou se stalo nahrazování vulkanizovaných kaučuků. Jak již bylo řečeno hlavní výhodou těchto materiálů oproti klasicky vulkanizovaným je úspora nákladu, protože materiál nemusí procházet energeticky náročnou vulkanizací, která má i další nevýhody jako pomalý průběh a nevratnost procesu. Proces změny kapalného TPE na kaučukovitou podobu má podmínky přesně opačné, tudíž probíhá rychle je vratný a je nutné chlazení. Díky tomuto technologickému procesu je možné využívat rychlejších výroby a výhodou je, i že odpad je převážně znovu použitelný. Důležitým faktorem je že měkké TPE hůře odolávají rozpouštědlům a olejům tudíž se musí používat v aplikacích, kde tento parametr není zásadní. U tvrdých TPE jako například polyuretany tento problém není a díky tomu jsou velmi často využívány v automobilovém průmyslu [21,22].

Výhody a nevýhody termoplastický elastomerů:

Výhody:

- oproti kaučukovým materiálům TPE nevyžadují tak precizní těsnost formy
- není nutné výrazně se zabývat přetoky vzhledem k jejich opětovnému použití ve výrobě
- nižší náklady na zhotovený produkt
- široké možnosti barvení výrobků
- stálá kvalita vyráběných produktů

Nevýhody:

- hlavní nevýhodu termoplastických elastomerů je jejich vysoká citlivost na vlhkost, která pokud je přítomna v materiálu může způsobit poruchy uvnitř i vně vyráběného produktu [19].

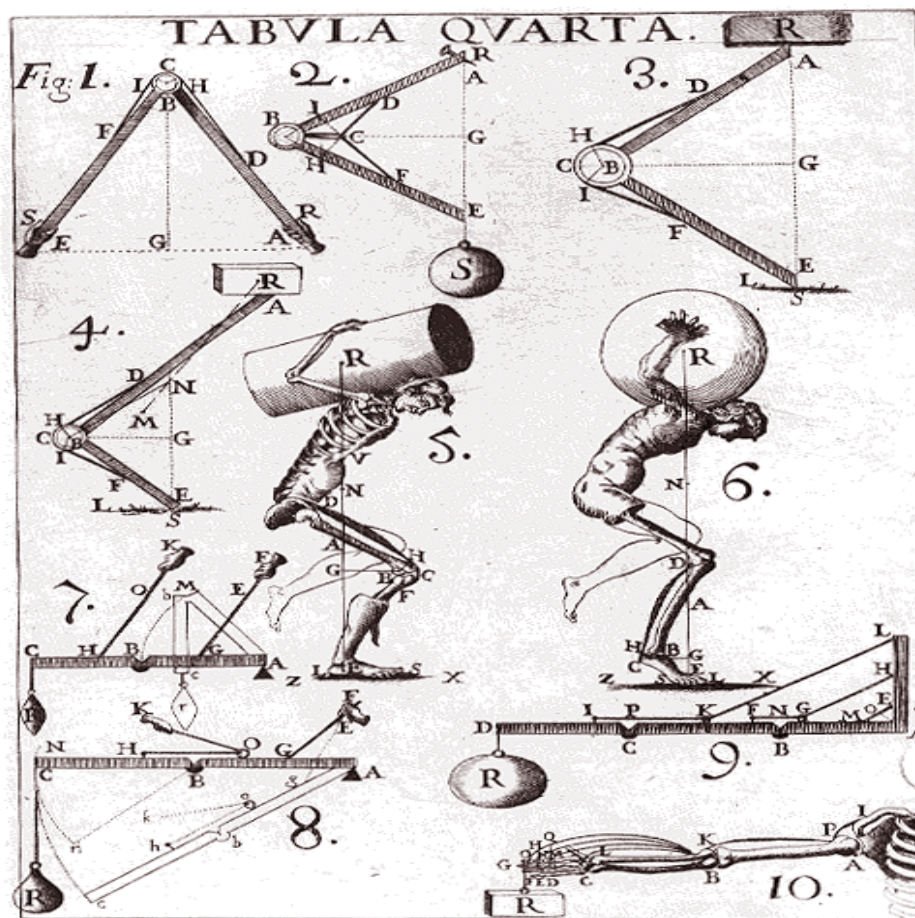
## 5 BIOMECHANIKA

### 5.1 Historie

Již od středověku se lidé zabývali přírodními vědami. Intuitivně se snažili popsat vše, co kolem sebe vidí. Není proto překvapením, že mnoho tehdejších vědců se začalo zajímat o pohyb živých organismů. Jeden z nejslavnějších Leonardo da Vinci prováděl pozorování letu ptáků a zajímal se také o strukturu a stavbu kostí atd. Obecně lze za zakladatele tehdy ještě neexistujícího vědního oboru biomechaniky pokládat Giovaniho Alfonsa Borelliho (1604 – 1680), jehož práci *De motu animalium* lze považovat za první opravdovou publikaci v tomto oboru [23].

Nejvýznamnější rozvoj této vědní disciplíny však přineslo 20. století a to hlavně díky technologickému rozkvětu, který sebou, ale mimo jiné přinesl degenerativní onemocnění. Dalším novým bylo velké množství válečných veteránů a jejich specifických zranění. Nesmíme také zapomenout na vývoj sportu do jeho vrcholové podoby, kdy jsou na sportovce kladeny stále vyšší nároky a tím se i zvyšuje zátěž na jejich tělo. Je však třeba zmínit, že s technologickým pokrokem přišli i nové přesnější a komplexnější metody a pohledy na biomechaniku a přinesli poznatky, které vědcům pomohli rozšířit počet metod použitých při výzkumu a tím i dosažení přesnějších výsledků [23].





Obrázek 9 Působení vertikální gravitace na lidské tělo – ukázka z knihy *De motu animalium* [23]

## 5.2 Definice

Biomechanika je multioborová vědecká disciplína jejíž naplní je pozorování a klasifikování mechanických vlastností, chování a v neposlední řadě také struktury živých jedinců. Neřeší však pouze organismy jako celek ale také chování jednotlivých segmentů a jejich vzájemné působení ať už vzájemně na sebe nebo s okolním prostředím. Důvodem proč je biomechanika klasifikována jako multioborová disciplína je ve spojení poznatků a vědomostí z různých vědních oborů jako např. matematika, technická kybernetika, mechanika atd. Využití takto získaných poznatků je taktéž široké počínaje technickými obory a přírodními vědami a konče ekologií nebo některými obory klinického lékařství [23,24].

Obecně lze biomechaniku a to ne jen člověka rozdělit na mikrobiomechaniku a makrobiomechaniku. První z nich jak už je patrné z názvu se zabývá detailním drobnohledným pohledem na chování a strukturu na buněčné úrovni, jež zahrnuje také rozpoznávání buněčných komplexů a mezibuněčných složek. Nezanedbatelným aspektem je také vzájemná interakce těchto makroskopických komponent. Naproti tomu pomocí makrobiomechaniky přistupujeme k problémům ve větších celcích a řešíme biomechaniku jednotlivých orgánů tkání a samozřejmě jejich interakce navzájem [23,24].

### 5.3 Experimentální biomechanika

Pod tímto pojmem si lze představit součást biomechaniky, jejíž primární náplní je naměření a následné vyhodnocení dat z konkrétních praktických pokusů na konkrétních sledovaných objektech. Tyto naměřené číselné informace jsou pak použity k analyticko – syntetickým pojednáním. Tento postup však nelze aplikovat na všechny řešené problémy a proto je nutné použít i matematicko-fyzikální emulace. Díky tomuto teoretickému výpočtu je možné dosáhnout detailnějších dat a také získat data, které by bylo reálným pokusem nemožné dostat. Díky těmto postupům je pak možné pomocí experimentální biomechaniky ověřit výstupy z měření a aplikovat je v praxi. Výhodou je také, že tyto poznatky je možné využít pro řešení teoretických problémů [23,24].

Elementární metody měření biomechaniky je možné rozčlenit na přímé a nepřímé. U první varianty je informací dosaženo přímým odečtem. Analogicky pak u nepřímé metody dostaneme výstupy zprostředkované u, kterých je např. nutné provést ještě propočet. Jiným parametrem podle, kterého je možné další dělení je invazivnost. Invazivní postup ruší sledovaný objekt, protože je měřící zařízení umístěno přímo na těle testovaného subjektu například měřič tepu. Opačně je pak neinvazivní postup definován jako neobtěžující testovaný objekt, příkladem může být měření času [23,24].

### 5.3.1 Základní metody experimentální biomechaniky

Kinematická analýza – analyzuje veličiny, jako jsou rychlost, zrychlení, geometrii trajektorie atd. Velmi často se při ní využívá obrazová technika, jejíž záznam může být ve 2D nebo 3D. Z dat zjištěných při kinematické analýze poté čerpá analýza dynamická, přičemž je obohacuje o dynamometrická měření [23].

Dynamometrie a dynamografie – zabývají se primárně zdrojem pohybu a jeho charakterizací.

Topografie – využívá soustavu souřadnic a vrstevnic k zjištění dat o výšce a poloze.

Elektromyografie – monitoruje a vyhodnocuje dat naměřená z elektrické aktivity kosterních svalů.

Experimentální biomechanika tkání: principem je měření reakcí tkání na mechanické podněty a jejich zpětnou vazbu. Dělí se na přímou a nepřímou. Přímá metoda pracuje pouze s teoretickými výpočty vycházejícími s konstitutivní rovnice díky které zjistíme jakým způsobem se testovaný objekt pohybuje. Nepřímá k tomu přidává ještě další důležitý parametr a to odezvu materiálu.

Zjišťování mechanických vlastností tkání - na testované vzorky je působeno zvolenou silou a výstupem jsou poté data mechanických vlastností daného vzorku. Tyto data jsou poté porovnána s teoreticky výpočtem. Obvykle jsou tato měření prováděna na tkáních odstraněných z lidského těla [23].

Analýza vnějšího zatížení a vnitřní napjatosti - lidské tělo a jeho pohyb je velmi komplikovaný proto se většina měření provádí teoreticky pomocí výpočtů mechaniky. Tyto teoretické výpočty se ovšem opírají a experimentálně naměřená data vnějších podnětů a posouvají je k výpočtům vnitřních mechanických vlastností testované konstrukce [23].

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce byla příprava kompozitu skládajícího se z termoplastického polyuretanu a zapletených mnohostěnných uhlíkových nanotrubic, který by byl následně využitelný jako deformační senzor. Výroba tohoto kompozitu měla několik kroků. Prvním krokem bylo nafiltrování mnohostěnných uhlíkových nanotrubic na polyuretanovou membránu, jež byla exkluzivně vyrobena firmou SPUR a.s. elektrostatickým zvlákňováním. Druhým krokem bylo přilehnutí této membrány na podkladní/nosnou destičku ze stejného materiálu z něhož byla vyrobena membrána. Třetím a posledním krokem bylo vyseknutí lopatek pro samotné testování.

Pro ověření zdali, vyrobený kompozit může být použit, jako senzor bylo provedeno několik testů. V pořadí první z nich byl test citlivosti daného senzoru, kdy bylo u 3 vybraných navážek mnohostěnných uhlíkových nanotrubic zjišťováno, jaký citlivostní faktor by tento senzor mohl mít a jestli se jeho hodnota vyrovná nebo překoná hodnoty citlivostních faktorů u klasických tenzometrů. Dalším krokem pak byla optimalizace navážek mnohostěnných uhlíkových nanotrubic, přičemž hlavním kritériem výběru byl citlivostní faktor. Třetím krokem v pořadí byla stimulace kompozitu předpětím a tím zvýšení citlivostního faktoru. Posledním testem pak byla aplikace kompozitu jako senzoru na kolenní bandáž a měření standardních lidských pohybů jako jsou dřep nebo chůze. Vzhledem k omezeným možnostem měřicí ústředny Hewlett Packard 34970 A (sběr dat 1x za sekundu) byl pro prezentování výsledků vybrán pomalý dřep.

### 6.1 Použité materiály

#### Mnohostěnné uhlíkové nanotrubičky (MWCNT)

Jako jedna ze dvou klíčových složek byly použity mnohostěnné nanotrubičky z produkce firmy Sun Nanotech Co Ltd. se sídlem v Číně. Dle informací od výrobce byly připraveny technikou chemické depozice par.

#### Termoplastický polyuretan (Desmopan 385 S)

Druhou klíčovou složkou připraveného kompozitu pak byl termoplastický polyuretan konkrétně typ Desmopan 385 S jehož výrobcem je německá firma Bayer. Hlavním důvodem

proč byl tento typ materiálu vybrán je jeho vysoká elasticita a garantovaná medicínální neškodnost. Výrobce preferovaný typ zpracování je vstřikování ovšem je možné použít i jiné typy zpracování použitelné pro termoplastické materiály jako například vytlačování nebo lisování.

Vybrané mechanické a tepelné vlastnosti:

Mez pevnosti v tahu – 40 Mpa

Hustota – 1200 kg/m<sup>3</sup>

Deformace při přetržení – 450 %

Tvrdość metoda Shore A – 85

Tvrdość metoda Shore D – 32

Teplota tání – 210 až 230°C

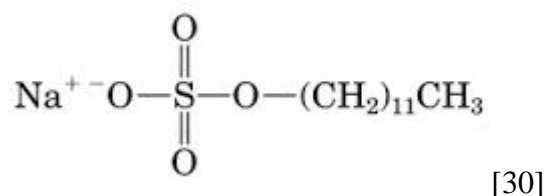
Maximální teplota sušení – 80°C

#### Hydroxid sodný (NaOH)

Je klasifikován jako silně zásaditá anorganická sloučenina. Koncentrace použitého roztoku byla 1M. Byl použit jako jedna ze složek vodní disperze k úpravě pH.

#### Dodecylsulfát sodný (SDS)

Je to další součást disperze k přípravě nanotubic. Hlavním znakem je povrchově aniontová aktivita a velmi dobrá stabilita a rozpustnost.



#### 1- Pentanol (pentylalkohol)

Jedna ze složek připravené disperze nanotubic. Jedná se o nasycený alkohol.



Destilovaná voda

Byla použita jako prostředí pro přípravu disperze nanotrubic.

## 6.2 Využívaná zařízení

### Ultrazvukový přístroj UP 400S

Je to přístroj, jež dokáže vyvozovat ultrazvuk o výkonu 400 W s frekvencí 24 kHz. Je vhodný i pro větší objemy až do 4000 ml, spodní hranicí je pak 5 ml. Nejčastěji se využívá pro homogenizaci, deaglomeraci, dezintegraci buněk, extrakci proteinů a emulgaci kapalin. Je také vybaven funkcí nastavování času probíhajícího děje.



Obrázek 10 Ultrazvukový přístroj UP 400S[20]

### Digitální multimetr UNI – T UT 71C

Jedná se o digitální multimetr, jež má mnoho funkcí včetně měření kapacity, odporu, frekvence, teploty a jiných. Je také vybaven USB koncovkou, jež mu umožňuje ukládat data do počítače. Pro uložení dat do počítače byl použit příložený software.



Obrázek 11 Digi-  
tální multimetr UNI  
– T UT 71C

### Transmisní elektronový mikroskop Jeol Jem 2010 (TEM)

Pro tento mikroskop je nutné použití tenkých materiálů. Používá vysokých urychlovacích napětí a je schopen rozlišení na úrovni atomů. Tento konkrétní transmisní elektronový mikroskop s vysokým rozlišením může být provozován s urychlovacím napětím v rozmezí 80 a 200 kV.



Obrázek 12 Transmisní elektronový  
mikroskop – Jeol Jem 2010 [28]



Skenovací elektronové mikroskopy Tescan vega 3 lmu a Phenom pro desktop (SEM)

Je schopen zobrazovat povrchy zkoumaných materiálů a to díky zpětně odraženým, sekundárním a prošlým elektronům. Díky rentgenovému záření je pak schopen určit i složení vzorku. Pro pořízení snímků byly použity dva mikroskopy a to Tescan vega 3 LMU a Phenom pro desktop.



Obrázek 13 Skenovací elektronový mikroskop – Tescan Vega 3 Lmu [29]



Obrázek 14 Skenovací elektronový mikroskop - Phenom pro desktop [31]

Pájecí stanice ZD 931

Byla použita pro výrobu elektrod.



Obrázek 15 Pájecí stanice  
ZD 931

Žehlička ETA 7246

Byla použita pro nažehlení desmopanové membrány s nafiltrovanými mnohostěnnými uhlíkovými nanotrubicemi na podkladní desmopanovou destičku.



Obrázek 16 Žehlička  
ETA 7246

Laboratorní kyvadlo včetně závaží

Toto zařízení bylo použito pro testování vlastností polymerního kompozitu.



Obrázek 17 Laboratorní  
kyvadlo včetně závaží

Digitální úchylkoměr Mahr MarCator 1080

Toto zařízení bylo spolu se softwarem použito pro snímání podélného prodloužení namáhaného kompozitu.



Obrázek 18 Digitální  
úchylkoměr Mahr  
MarCator 1080 [21]

Měřicí ústředna Hewlett Packard 34970 A opatřena kartou Hewlett Packard 34901 (20 kanálový multiplex)

Tento přístroj byl použit pro testování senzoru umístěného na kolenní bandáži. Jedná se o spínací jednotku vybavenou třemi sloty s vestavěným digitálním multimetrem. Přičemž každý kanál může být nezávisle konfigurován na míru bez přidaných nákladů nebo problémů ze signálem. Náš konkrétní model byl navíc vybaven kartou, jež je schopná zpracovat až 20 kanálů.

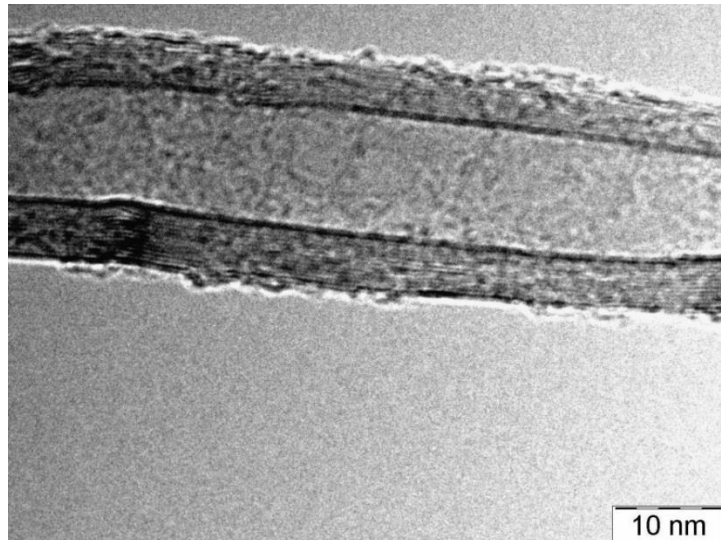


Obrázek 19 Měřicí ústředna Hewlett Pac-  
kard 34970 A opatřena kartou Hewlett Pac-  
kard 34901 A (20 kanálový multiplex)

## 7 TEM ANALÝZA

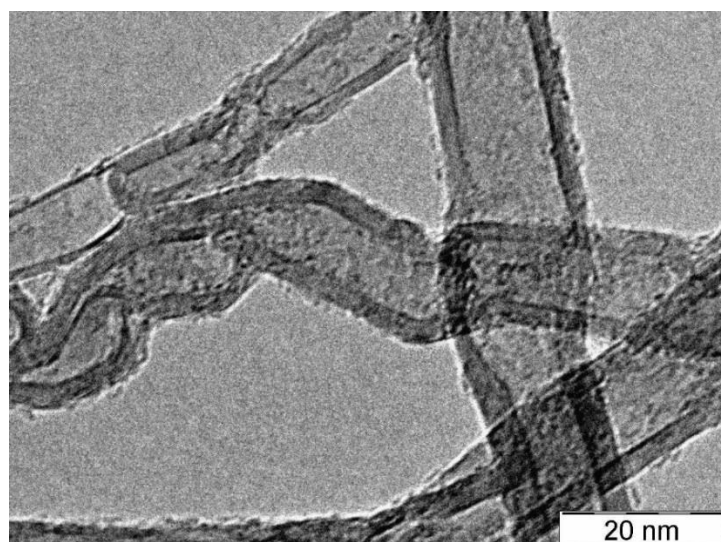
Pro lepší pochopení chování a detailnější charakterizaci materiálu a jeho struktury byli pořízeny snímky na mikroskopu TEM Jeol Jem 2100. Tyto snímky byly pořízeny ve spolupráci s Univerzitou Palackého v Olomouci.

Na tomto prvním snímku 20 je možné vidět jednotlivou nanotrubicí v měřítku 10 nm.



Obrázek 20 Snímek individuální nanotrubicí pořízený mikroskopem TEM

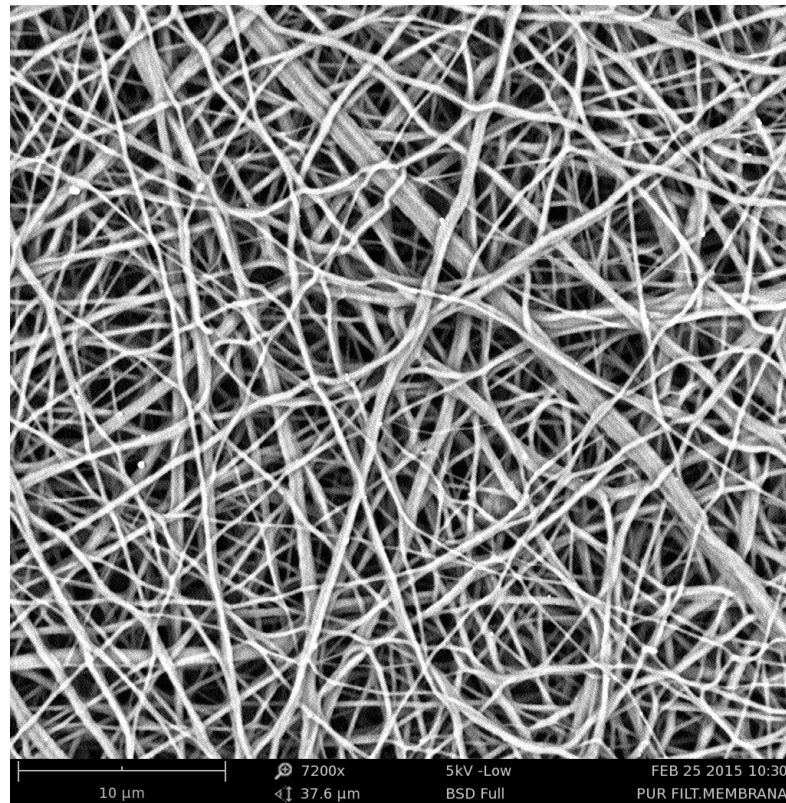
Na druhém snímku je zobrazen shluk nanotrubic v měřítku 20 nm.



Obrázek 21 Snímek shluku nanotrubicí pořízený mikroskopem TEM

## 8 SEM ANALÝZA

Za použití mikroskopu Phenom Pro Desktop byli pořízeny snímky polyuretanové membrány, na zakázku vyrobené firmou Spur a. s.



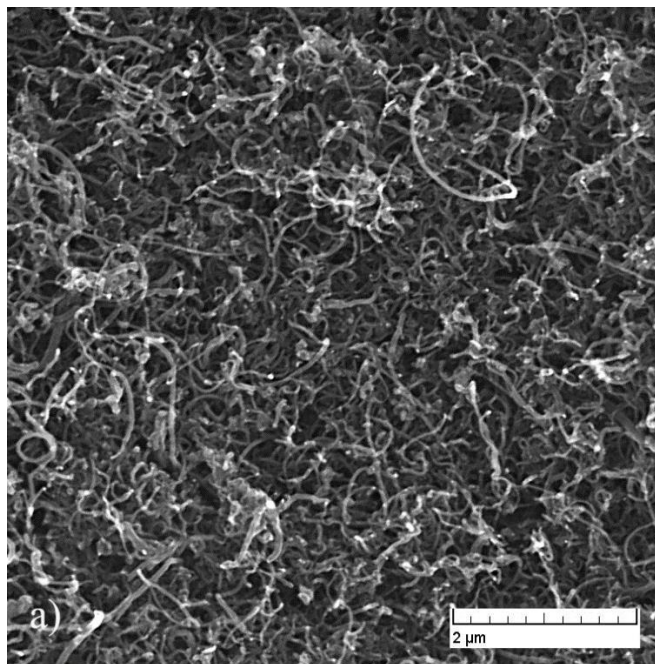
Obrázek 22 Snímek polyuretanové membrány pořízený mikroskopem SEM

Pomocí programu Eidos micro byli změřeny průměry vláken. Pro zvýšení přesnosti bylo změřeno 100 různých vláken na snímku. Poté byl spočítán průměr a nakonec směrodatná odchylka.

Tabulka 4 Průměry vláken PU membrány

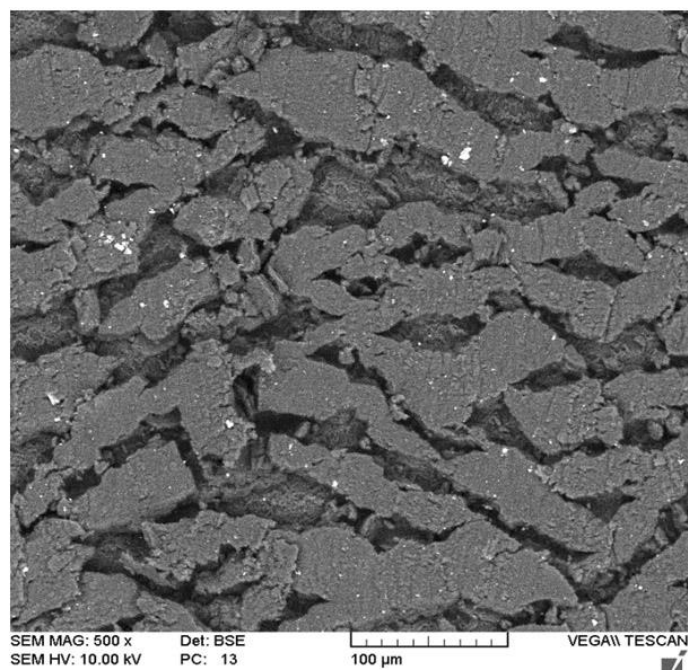
Průměry vláken PU membrány (nm)			
325	234	170	170
239	250	252	196
219	212	198	197
304	211	209	241
268	184	227	208
225	184	249	156
426	174	121	315
272	271	183	202
267	219	181	233
219	178	268	196
252	277	246	241
321	199	141	163
251	263	199	239
266	208	290	222
219	215	229	177
328	184	242	206
180	223	188	209
229	170	257	303
241	232	171	156
250	227	165	208
246	192	239	206
289	179	157	165
196	239	188	170
239	252	196	246
260	213	203	156
Průměr: 222,71			Smodch.: 47,05

Pomocí mikroskopu SEM Tescan Vega 3 LMU byl pořízen snímek, který zobrazuje povrch nafiltrované vrstvy nanotrubic na polyuretanové membráně



Obrázek 23 Snímek nafiltrované vrstvy nanotrubic na polyuretanové membráně

Další snímek nám ukazuje povrch deformované vrstvy nanotrubic v měřítku 100 μm.



Obrázek 24 Snímek deformované vrstvy nanotrubic pořízený mikroskopem SEM

## 9 PŘÍPRAVA POLYMERNÍHO KOMPOZITU

### 9.1 Metoda přípravy vodní disperze mnohostěnných nanotubic

Byly připraveny 4 varianty vodní disperze a to podle množství navažovaných mnohostěnných nanotubic. Tyto navážky byly 50, 100, 150 a 200 mg. Nejprve bylo na analytických vahách naváženo do nádobky s víčkem zadané množství nanotubic, k těmto pak byl přidán předem připravený roztok v objemu 30 ml. Tento roztok byl připraven z 530 ml destilované vody, 15,4 g SDS, 8,5 ml 1-pentanolu, a 15 ml M NaOH. Poté co byla vodní disperze připravena byla umístěna na 15 minut do ultrazvukového zařízení, jež mělo za úkol tyto mnohostěnné trubičky pomocí ultrazvuku rozptýlit a tím zvýšit dispergaci těchto trubic v roztoku.

### 9.2 Metoda filtrování vodní disperze mnohostěnných nanotubic

Připravená vodní disperze byla za použití vakua nafiltrována na polyuretanovou filtrační membránu. Výroba membrány technologií elektrostatického zvlákňování byla zadána firmě SPUR a.s. Takto byly mnohostěnné trubice převedeny na základní podkladní materiál (membránu) kde byly ještě několikrát promyty nejprve vodou a poté etanolem. Nakonec byla membrána opatrně sundána, aby se nepoškodila vrstva nanotubic, napnuta aby se nezkroutila a vysušena.

### 9.3 Metoda lisování polyuretanu a následného nažehlování membrány s mnohostěnnými nanotubicemi

Nejprve bylo nutné nalisovat podkladní materiál na, který se membrány s mnohostěnnými nanotubicemi budou nažehlovat. Tímto materiálem byl termoplastický polyuretan konkrétně Desmopan 385 S. Bylo spočítáno a naváženo množství potřebné k úplnému zaplnění lisovacích desek (včetně přetoků) o rozměrech 17,5 x 17,5 x 0,2 mm. Samotný proces lisování je pak možno popsat několika parametry a to 5 minutovým předehřevem, 15 - 20 minutami samotného lisování a teplotou lisování 175°C.



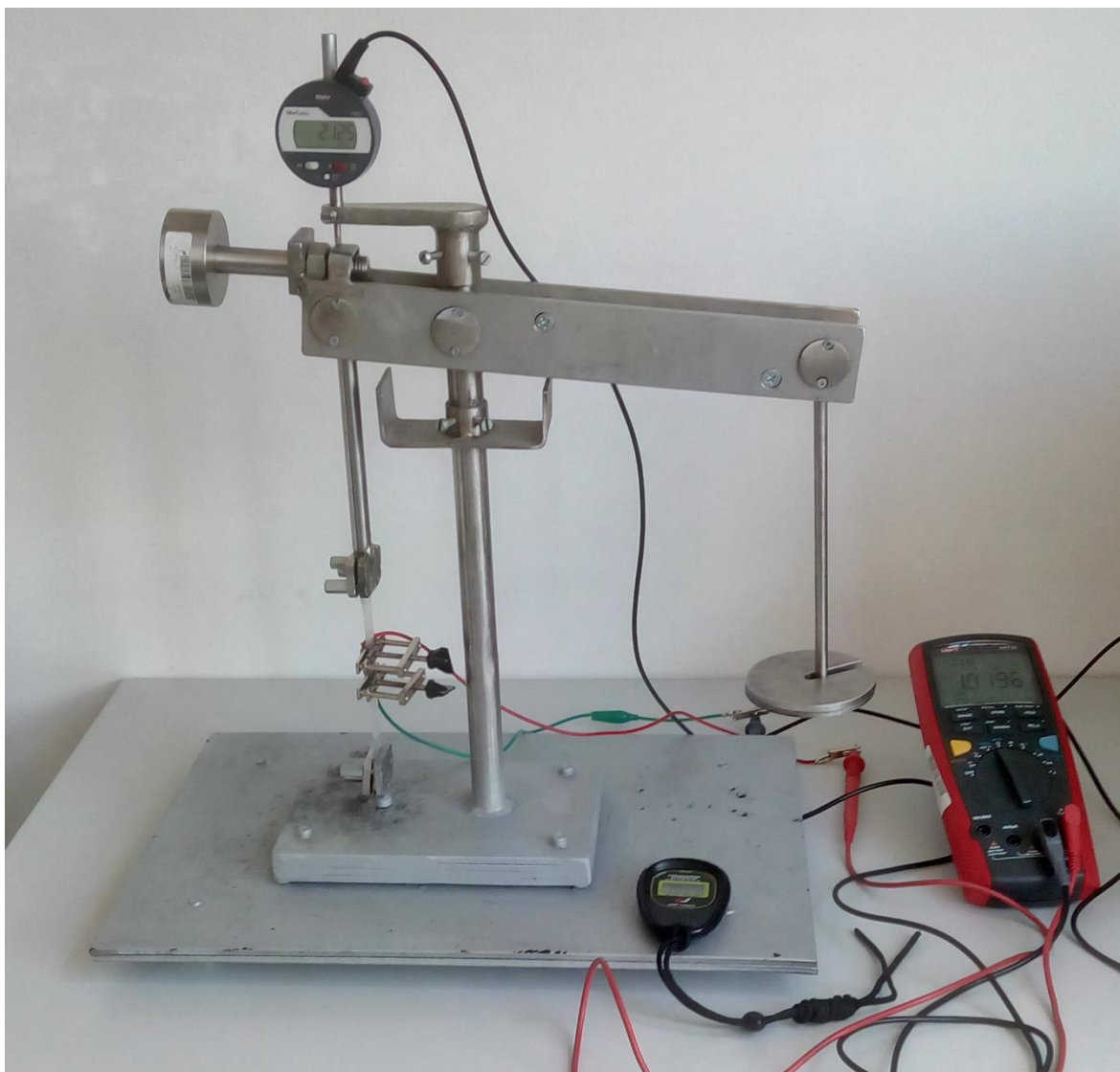
Druhou fází přípravy testovacích vzorků pak bylo nažehlení polyuretanové membrány s nafiltrovanými mnohostěnnými nanotrubicemi. Připravené membrány, které měly tvar kruhu, byly opatrně rozstříhány na dvě části, z nichž s každé byl vystříhnut obdélník vhodný k nažehlení. Tyto vzorky k nažehlení měli jak již, bylo výše zmíněno různě vrstvy nafiltrovaných nanotrubic. Následně za pomoci žehličky byly tyto obdélníky nažehleny na předem vyliisované desky Desmopanu 385 S. Z těchto desek bylo následně pomocí hydraulického lisu podle normy ČSN EN ISO 3167 vyseknuto několik lopatiček pro všechny čtyři navážky nanotrubic. Pracovní část lopatiček měřila 110 mm. Na tuto část pak byla nažehlena 25 – 30 mm dlouhá část membrány s nanotrubicemi. Posledním krokem přípravy zkušebních tělísek pak bylo vyseknutí otvoru na konci každé lopatičky pro upevnění do testovacího přístroje.



Obrázek 25 Testovací PU lopatička s aktivní vrstvou s nanotrubic

## 10 TESTOVÁNÍ VLASTNOSTÍ POLYMERNÍHO KOMPOZITU

Testovaná tělíska ve formě lopatiček byla upnuta pomocí šroubu do kyvadla, jež se využívá pro měření kríповé deformace. K samotnému měření a zvláště pak k odečtu hodnot byla tato sestava vybavena ještě dvěma měřicími přístroji a to indikátorem změny deformace a multimetrem jež snímá změnu odporu. Obě tyto zařízení byli vybaveny výstupem USB tudíž se všechny naměřená data shromažďovala v počítači. Před samotným upnutím do testovacího přístroje byly na část, kde byla nažehlena membrána s nanotubicemi připevněny elektrody pro snímání změny odporu. Vzhledem k nehomogenímu koláči, jež byl nafiltrován při navažce 50 mg byla tato varianta vyloučena z dalšího testování.



Obrázek 26 Měřicí sestava sestávající se z kyvadla se závažím, multimetru, úchylkoměru a stopek

Zbylé varianty lopatiček a to konkrétně 100, 150 a 200 mg pak byly testovány. Pomocí závaží o stejných hmotnostech a to 105 g. Testované lopatička procházela cyklem, kdy byla 5 minut zatěžována a poté 5 minut relaxovala. V každém dalším cyklu pak bylo závaží zvýšeno o stejnou hmotnost, která byla v prvním cyklu a postup se opakoval až do deformace 3,5 %. Takto lopatička prošla 5 krát cyklem přičemž při každém dalším z nich byla více zatěžována. Po této sérii byl vzorek vystaven silnému předepnutí pod dobu 10 minut při kterém dosáhla deformace 7 % a následně tu samou dobu relaxoval, aby následně znovu prošel výše zmíněnými 5 cykly. Tato fáze se pak provedla ještě jednou s tím rozdílem, že bylo použito větší předpnutí při kterém dosáhla deformace 9 %. Stejně jako u předchozí sérií pak vzorek opět prošel 5 krát cyklem zatížení a relaxace.

## 11 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY

### 11.1 Citlivost testovaného kompozitu

Jak již bylo v předchozí kapitole zmíněno kompozit prošel 5 cykly, jež obsahovali zatížení a následné relaxování. Při každém dalším cyklu se zvyšovalo závaží o pevně stanovenou hodnotu 105 g. Díky přístrojům jež snímali odpor (multimetr) a deformaci (úchylkoměr) byli data exportována do počítače a následně z nich byli vytvořeny grafy závislosti deformace na čase, závislosti odporu na čase a nakonec závislosti odporu na změně deformace, z něhož byl následně vypočítán citlivostní (anglicky: gauge factor) faktor.

K vyhodnocení časových změn deformace a odporu byly použity tyto vzorce:

Relativní změna odporu:

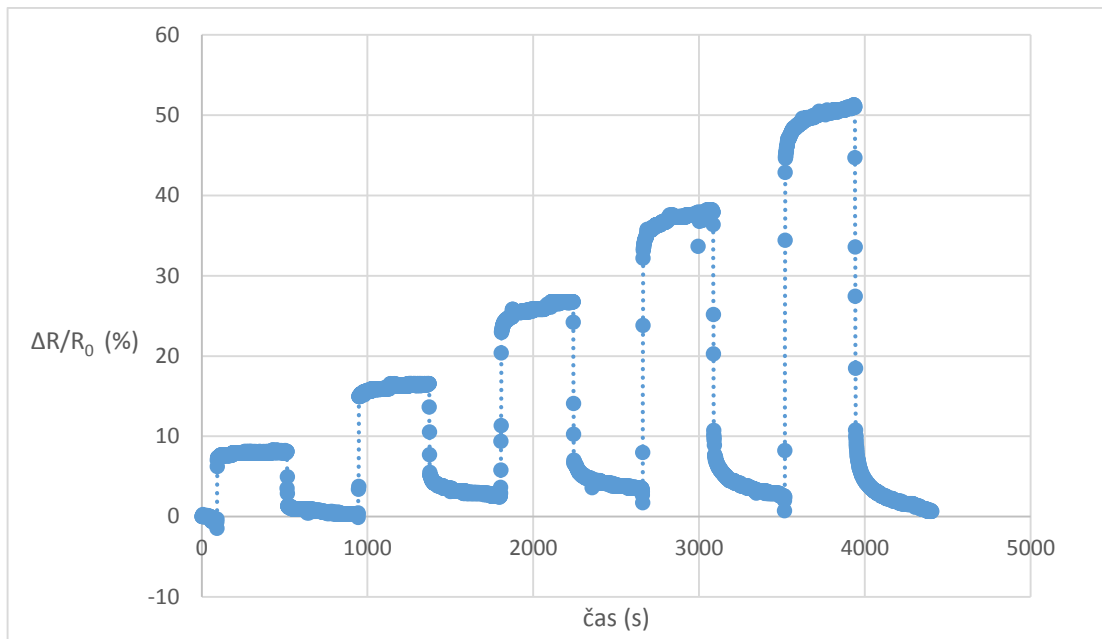
$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R - R_0}{R_0} (\%)$$

$\Delta R$  – změna odporu vzorku,  $R_0$  – odpor vzorku na počátku

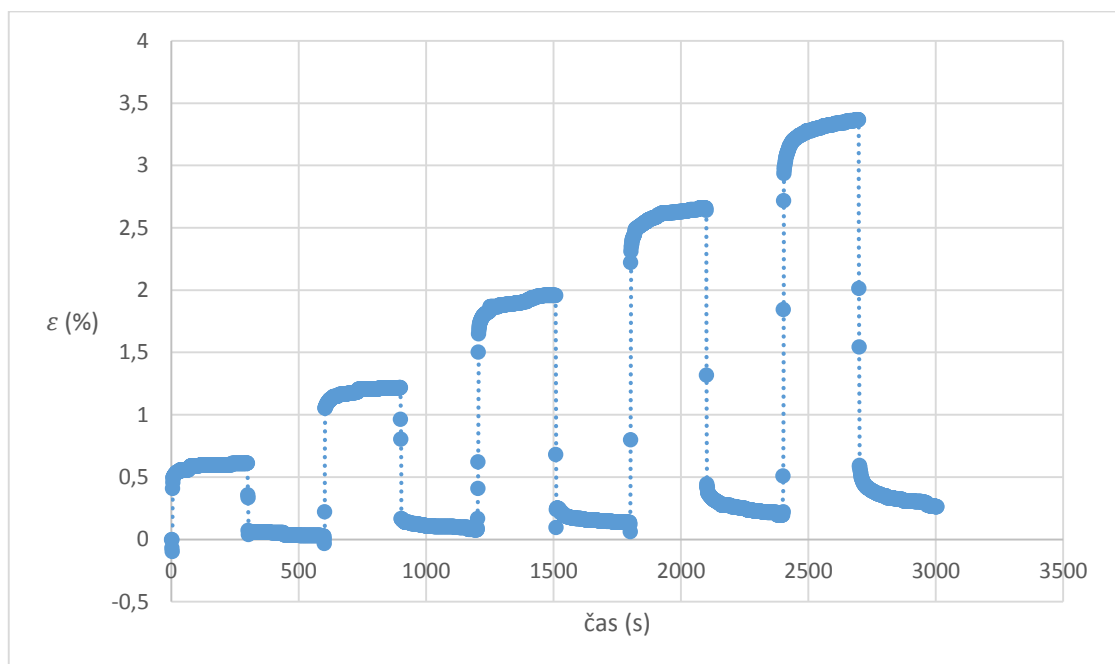
Poměrné prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} (\%)$$

$L_0$  – délka vzorku na počátku,  $L$  – délka vzorku při konkrétním protažení



Obrázek 27 Závislost změny odporu na čase v cyklech zatížení a odlehčení po 5 minutách pro 200 mg navážku nanotrubic



Obrázek 28 Závislost změny podélného prodloužení na čase v cyklech zatížení a odlehčení po 5 minutách pro 200 mg navážku nanotrubic

Na rozdíl od přechozích testování tohoto typu kompozitu byl použit jiný typ poluretanu a to konkrétně Desmopan 385 S. Zároveň s tím byla užitá i jiná membrána vyrobená pro přípravu aktivní vrstvy mnohostěnných nanotrubic opět z Desmopanu 385 S. Tato inovace vycházela s potřeby více poddajného materiálu. Na obou grafech je patrné, že změna odporu kompozitu roste z jeho deformací. Oba tyto grafy patří jednomu vzorku kompozitu k jehož výrobě bylo použito 200 mg mnohostěnných nanotrubic. Z průběhu lze říct, že jsou si svým průběhem velmi podobné. Díky důležitému zjištění, že při protažení kompozitu se mění odpor můžeme říci, že tento kompozit je vhodný pro užití jako senzor. V obou grafech lze vidět cyklus kdy při první fázi je materiál zatěžován po dobu 5 minut v druhé části cyklu poté stejnou dobu relaxován. Při každém testování tímto cyklem kompozit prošel 5 krát. Z grafu závislosti deformace na čase je dobře patrná rychlá elastická deformace. Kompozit je velmi pružný. Tento typ deformace jež se označuje také jako vratná se vyznačuje tím, že se po čase opět materiál vrací do svého původního rozměru. Tato deformace však není jediná jež probíhá v namáhaném kompozitu. Jiným typem deformace jež v testovaném polymerním kompozitu probíhá je plastická nebo-li nevratná deformace. Třetím typem deformace jež je patrná z grafu je deformace viskoleastická, která je charakteristická tím, že reaguje na deformaci vždy se zpožděním. Tato je dobře patrná z grafu závislosti deformace na čase kdy se při každém dalším cyklu zvyšuje její podíl a materiál je tedy trvale deformován. Při posledním cyklu zatížení pak na kompozit působí 525 g závaží. Při této konečné a nejvyšší zátěži jež působí na kompozit se hodnota deformace zvyšuje až téměř k hodnotě 3,5 %.

Tabulka 5 Procentuální prodloužení kompozitu po 5 minutových cyklech zatížení

Hmotnost závaží (g)	$\varepsilon$ (%)
105	0,6
210	1,2
315	2
420	2,6
525	3,4

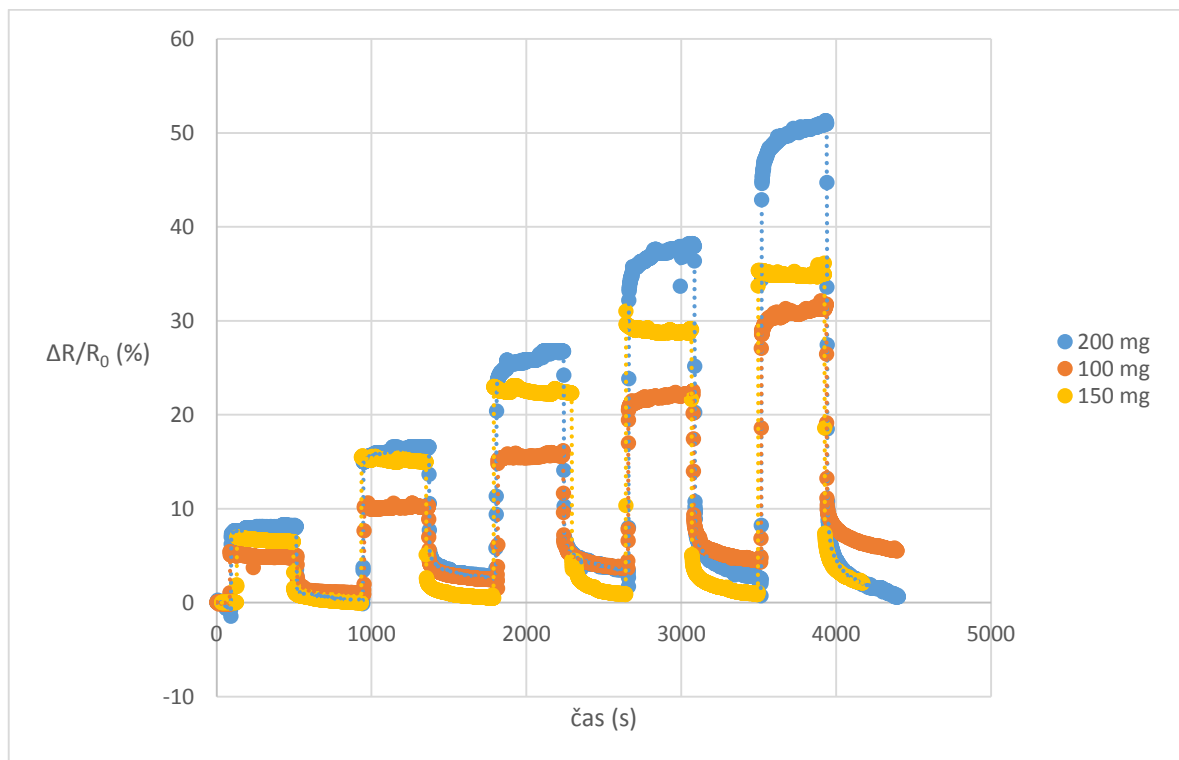
## 11.2 Optimalizace tloušťky vrstvy mnohostěnných nanotrubic

Dalším krokem vedoucím v konečné fázi k výrobě plně funkčního senzoru z mnohostěnných nanouhlíkových trubic a termoplastického polyuretanu je optimalizace tloušťky nanotrubic nafiltrovaných na desmopanové membráně. Cílem bylo zjistit, jak tloušťka této vrstvy může ovlivňovat výsledné parametry testovaného senzoru. Klíčovým parametrem podle, něhož byla nakonec vybrána optimální tloušťka nanotrubic byl citlivostní neboli gauge faktor. Tento pro senzory zásadní parametr je definován jako poměr relativní změny elektrického odporu a mechanického namáhání (deformace). Dalším důležitým kritériem je pak hodnota relativní změny odporu v závislosti na působící deformační síle. Při optimalizaci pak nebylo zapomenuto ani na nevratnou složku deformace, jež byla taky důležitým faktorem při výběru tloušťky vrstvy filtrovaných nanotrubic.

K výpočtu citlivostního faktoru byl použit tento vzorec:

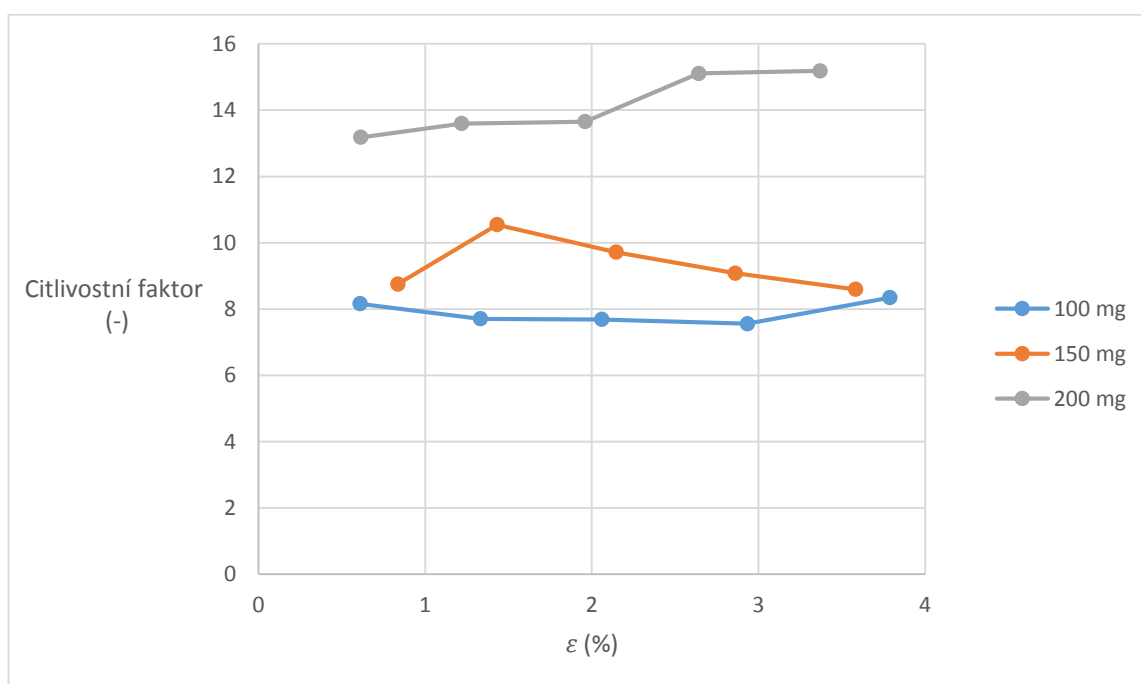
$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\varepsilon}$$

$\Delta R$  – změna odporu vzorku,  $R_0$  – odpor vzorku na počátku  $\varepsilon$  – poměrné prodloužení



Obrázek 29 Závislost relativní změny odporu na čase pro 3 různé navážky MWCNT

Na tomto grafu 29 závislosti změny odporu na čase jsou zobrazeny tři křivky, jež reprezentují každou testovanou navážku nanotrubic a to konkrétně 100, 150 a 200 mg. Z grafu je patrné, že změna odporu vzhledem k působící deformaci je nejvyšší u navážky 200 mg. Následně se úměrně snižuje spolu s klesající navážkou mnohostěnných uhlíkových nanotrubic. Dalším sledovaným kritériem byla nevratná složka deformace. Pro aplikaci kompozitu jako senzoru je pro nás výhodné, aby byla tato nevratná složka co nejmenší.



Obrázek 30 Graf typických hodnot citlivostního faktoru pro 3 testované navážky nanotrubic

Jak již bylo výše zmíněno klíčovým faktorem podle kterého byla optimalizována vrstva použitých nanotrubic byl citlivostní faktor. Z grafu 30 kde jsou zobrazené křivky typických hodnot je pak patrné, že se zvyšující se navážkou mnohostěnných uhlíkových nanotrubic se zvyšuje i tento citlivostní faktor. Tento trend je pozvolný při přechodu ze 100 mg navážky na 150 mg. Ovšem při přechodu na další 200 mg navážku z předchozí je tento trend výraznější. Z tohoto důvodu, a také kvůli nejvyšším hodnotám citlivostního faktoru, byla nakonec po optimalizaci zvolena nejvyšší navážka 200 mg. Graf nebo přímka citlivostního faktoru



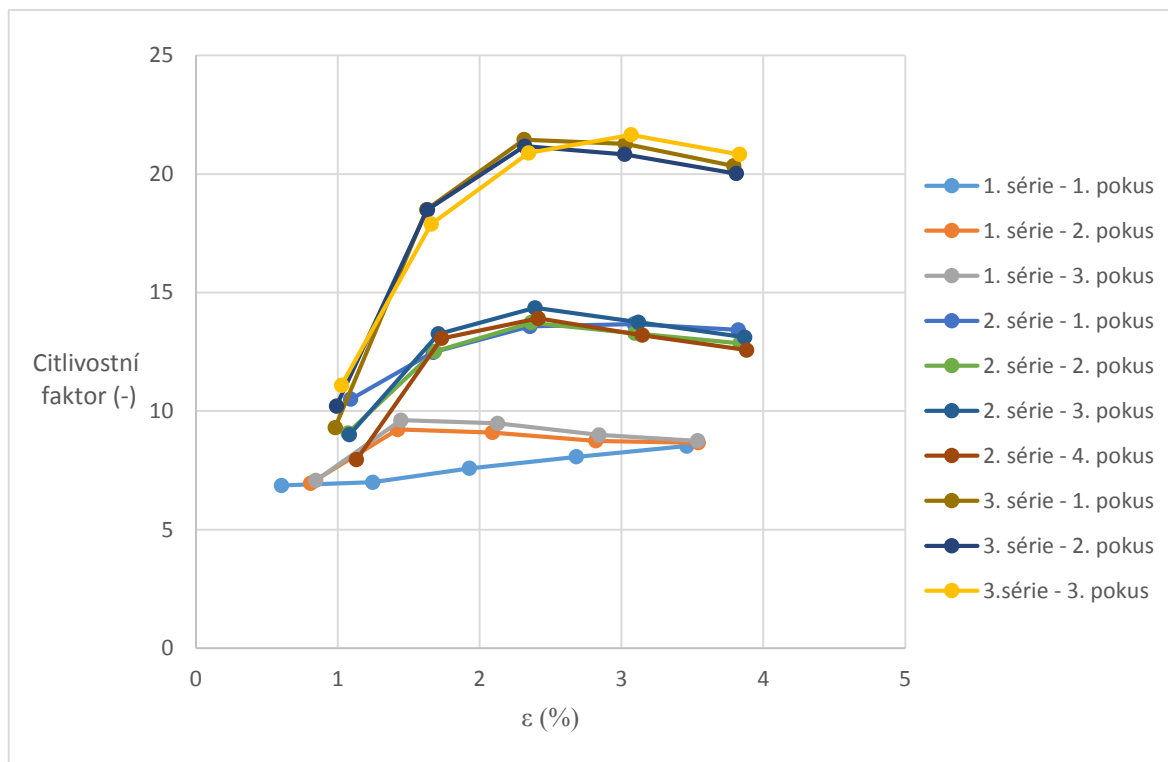
pro připravovanou navážku 50 mg zde není uvedena, protože kompozit z ní vyrobený nebyl vůbec testován. Klíčem k vytvoření správně fungující vrstvy je totiž její spojitost. Již po nafiltrování na membránu byla pouhým okem patrná silná nehomogenita vrstvy mnohostěnných uhlíkových nanotrubic. Z tohoto důvodu byla tato navážka hned na začátku vyloučena z všech následujících testů. Přehledné číselné znázornění citlivostních faktorů pro konkrétní deformace a různé navážky je uvedeno v tabulce.

Tabulka 6 Citlivostní faktor pro 3 různé navážky

Navážka nanotrubic (mg)					
100		150		200	
$\varepsilon$ (%)	GF (-)	$\varepsilon$ (%)	GF (-)	$\varepsilon$ (%)	GF (-)
0,61	8,2	0,84	8,8	0,61	21,9
1,33	7,7	1,43	10,5	1,22	20,2
2,06	7,7	2,15	9,7	1,96	18,8
2,93	7,6	2,86	8,1	2,64	17,9
3,79	8,3	3,58	9,6	3,37	17,8

### 11.3 Stimulace citlivosti senzoru předpětím

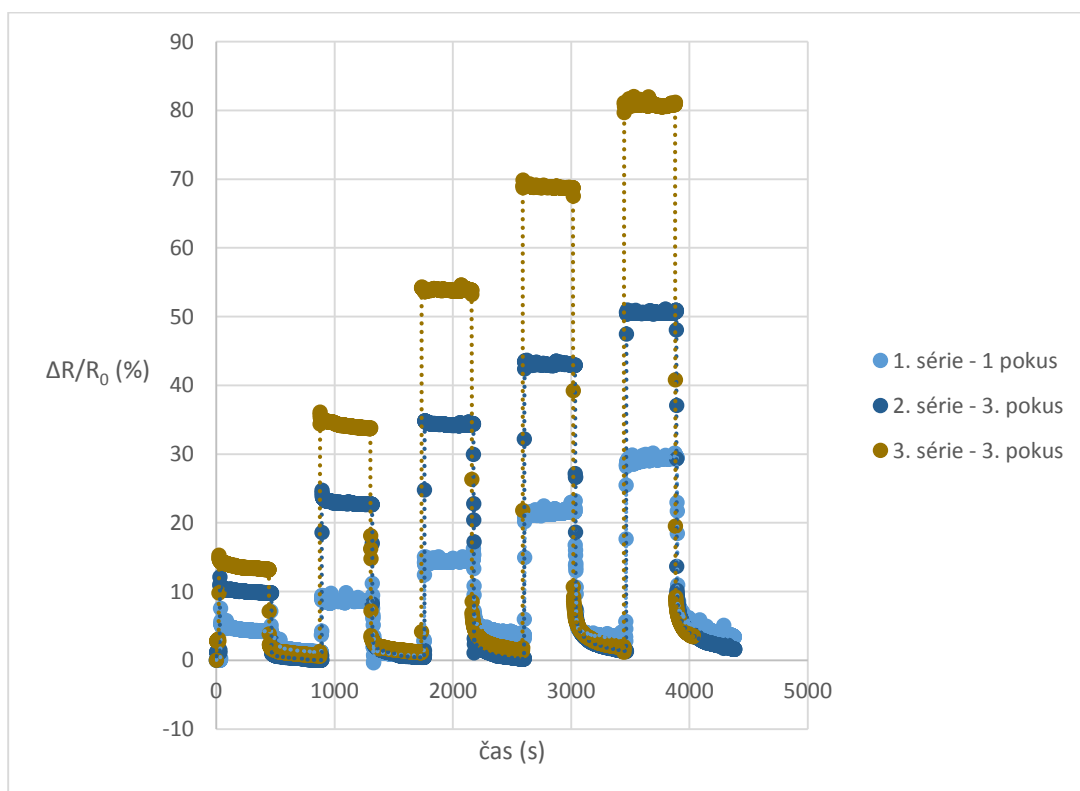
Jak již bylo několikrát v této práci zmíněno klíčovým parametrem podle, něhož lze hodnotit kvality senzoru je jeho citlivostní faktor neboli gauge faktor. Již v předchozím bodě byl díky optimalizaci navažovaného množství trubic tento faktor zvýšen. Další možností jak je možné citlivost vrstvy mnohostěnných uhlíkových nanotrubic zvýšit je jednorázové předepnutí senzoru pomocí závaží.



Obrázek 31 Vliv předpětí na citlivostní faktor

Z grafu je patrné, že tento předpoklad je pravdivý a čím více je senzor předeptnutý tím se jeho citlivost zvyšuje. V 1. sérii byla testovací lopatička s aktivní vrstvou mnohostěnných uhlíkových nanotrubic podrobena výše popsanému cyklu zatěžování a relaxace, jež se 5x opakoval, přičemž při každém dalším bylo přidáno 105 g závaží navíc. Jak je patrné z grafu tak těmito cykly prošla lopatička 3x. Ze získaných dat byl poté pro každý pokus vypočítán příslušný citlivostní faktor. Před 2. sérií byla lopatička jednorázově předeptnuta po dobu 10 minut závažím o hmotnosti 949 g, při kterém se poměrné prodloužení zvýšilo na 7 %. Následně byla 10 minut relaxována a poté opět prošla výše popsaným testovacím cyklem. Po vyhodnocení dat je z grafu patrné, že se citlivostní faktor skokově zvýšil u všech 4 pokusů této série. Před poslední 3. sérií byla lopatička opět vystavena jednorázovému přepětí po dobu 10 minut pro k, jehož vyvození bylo použito vyšší závaží o hmotnosti 1168 g, které vyvolalo poměrné prodloužení 9 %. Následně byla opět 10 minut relaxována. V grafu se toto předeptání projevilo dalším zvýšením „gauge faktoru“ pro oba pokusy této série. Zvyšování odporu a tím i citlivosti nanotrubic po předeptání je dáno rozpraskáním aktivní vrstvy nanotrubic, které mezi sebou ztrácejí kontakt. Po první deformaci se vytvoří praskliny, kvůli kterým se vrstva nanotrubic nevrátí do původního stavu což při další deformaci vede k snad-

nějšímú přerušení vrstvy nanotrubic a to pak vede k strmějšímú nárůstu změny odporu s deformací. Pro detailnějí pochopení dějů, které probíhají při deformaci v senzoru připraveném s nano uhlíkových trubic a termoplastického polyuretanu je potřeba si uvědomit že, tento senzor obsahuje 3 vrstvy, z nichž každá má svůj podíl na výsledném chování a parametrech. První vrstvou, jež elektrický proud vůbec nevede je podkladní vrstva připravená z termoplastického polyuretanu. Druhou je pak vrstva vodivá a skládá se mnohostěnných nano uhlíkových trubic nafiltrovaných na polyuretanové membráně. Při nažehlování membrány pak vzniká nano kompozitní film a nano trubice jsou uzavřeny v polymeru a zakotveny v polyuretanové podkladní vrstvě. Třetí a poslední vrstvu pak tvoří síť mnohostěnných uhlíkových nanotrubic, jež jsou pevně spojeny s polyuretanem a jsou vratně roztahitelné. Pro výslednou citlivost jsou pak klíčové druhá a třetí vrstva kompozitu [25].



Obrázek 32 Vliv předpětí na relativní změnu odporu

V grafu číslo 32 změny odporu pro různá předpětí je patrné skokové zvýšení změny odporu které se zvyšuje s předpětím. Jsou zde jasně viditelné významné změny odporu, kdy lze zřetelně rozpoznat jednotlivé série.

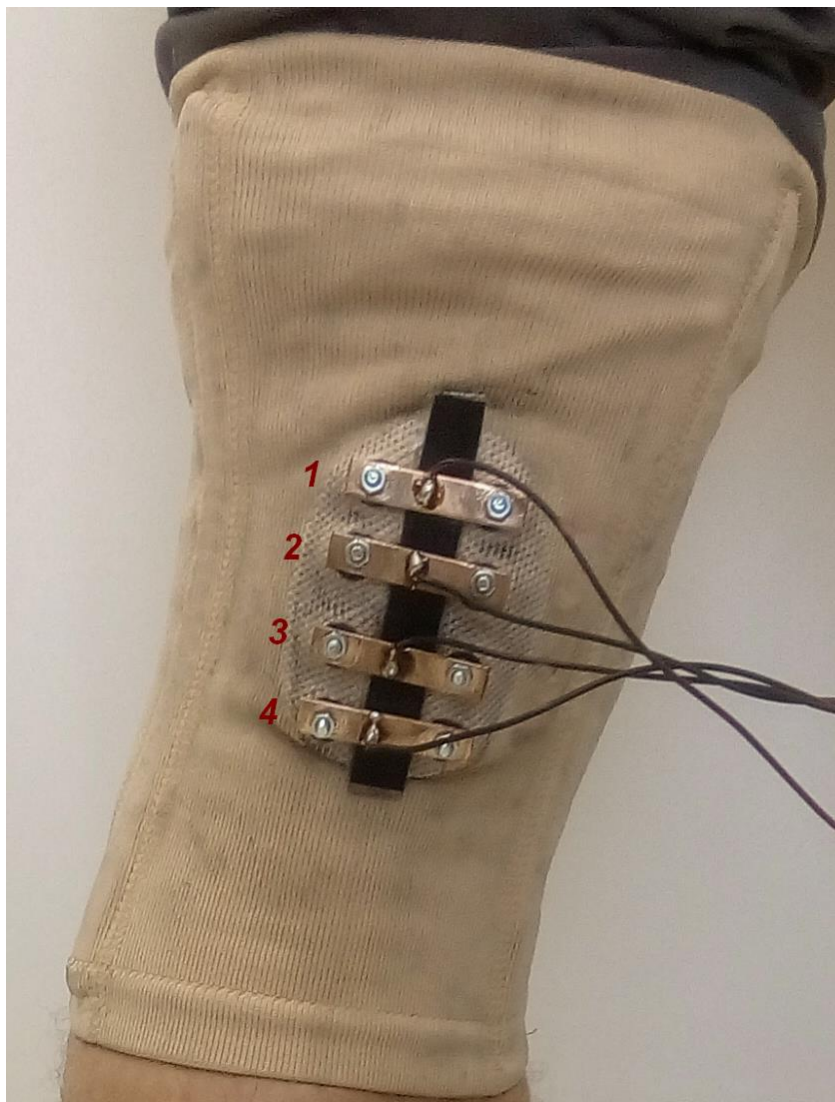
## 11.4 Praktická aplikace polymerního kompozitu

Poslední fází testování, jež nano kompozit prošel, byla aplikace na kolenní bandáž pro detekci pohybu lidského těla. Použitá kolenní bandáž byla MAXIS® S-LINE složená z 18 % elastanu a 83 % polyamidu v tělové barvě, jež byla po stranách opatřena výztuhami. Tato poslední fáze testování měla několik částí přípravy kolenní bandáže. V první části byl testovací vzorek kompozitu upraven tak aby se dal dobře umístit a upevnit na bandáž. Před umístěním senzoru na kolenní bandáž byla bandáž upravena. Tato úprava se skládala z vyztužení usní v střední části, kde byl umístěn testovaný kompozit a proražení děr pro upevnění čtyřech měděných elektrod.



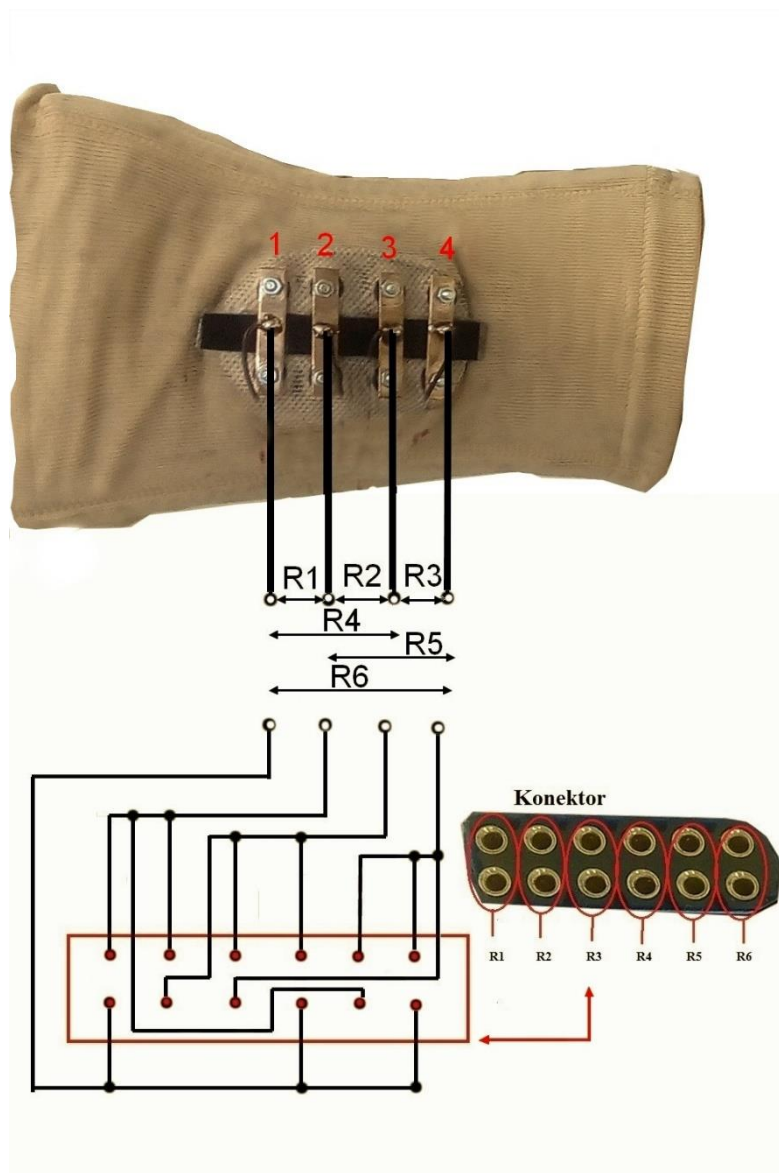
Obrázek 33 Kolenní bandáž upravená pro testování

V druhé fázi byly na upevněné měděné elektrody připájeny dráty pro získání dat z měření. Poslední úpravou před umístěním senzoru na kolenní bandáž bylo nalepení oboustranné lepicí pásky pro lepší fixaci senzoru při testování.

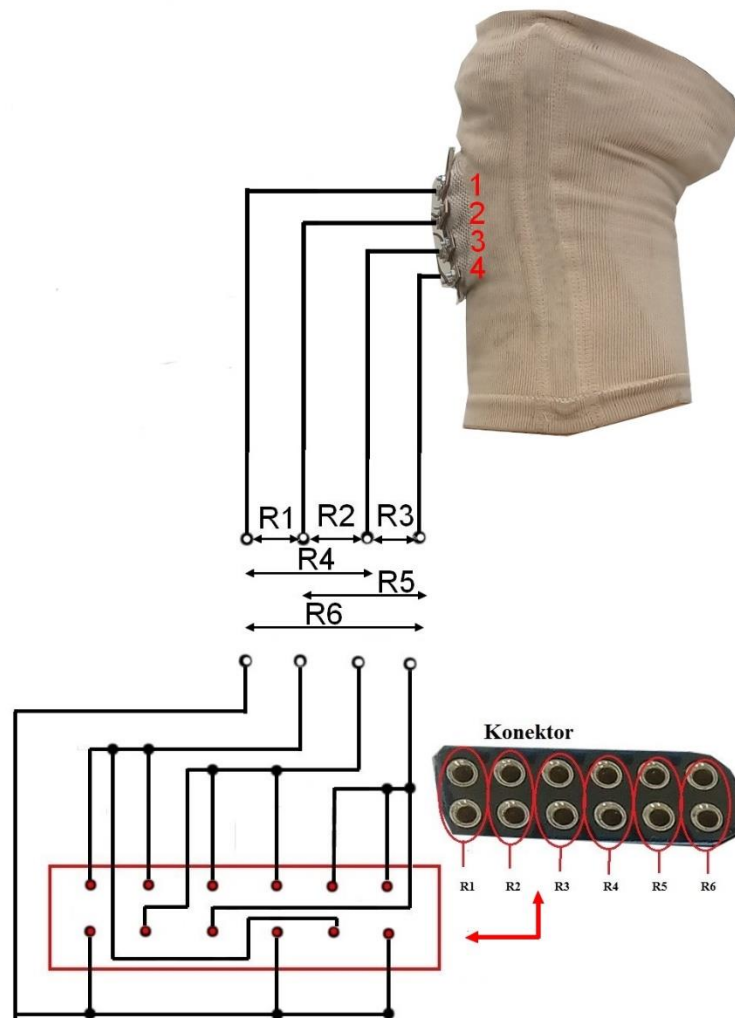


Obrázek 34 Kolenní bandáž na koleni připravená k měření

Pro tento test byl využita měřicí ústředna Hewlett Packard 34970 A, která byla osazena kartou Hewlett Packard 34901 (20 kanálový multiplex). Před samotným testem byla pro komfortnější a stabilnější propojení přístroje speciálně vyrobena konektor, která celý testovací proces usnadnila. Schématický náčrt této koncovky i s jejím zapojením můžeme vidět na obrázcích 35 a 36.



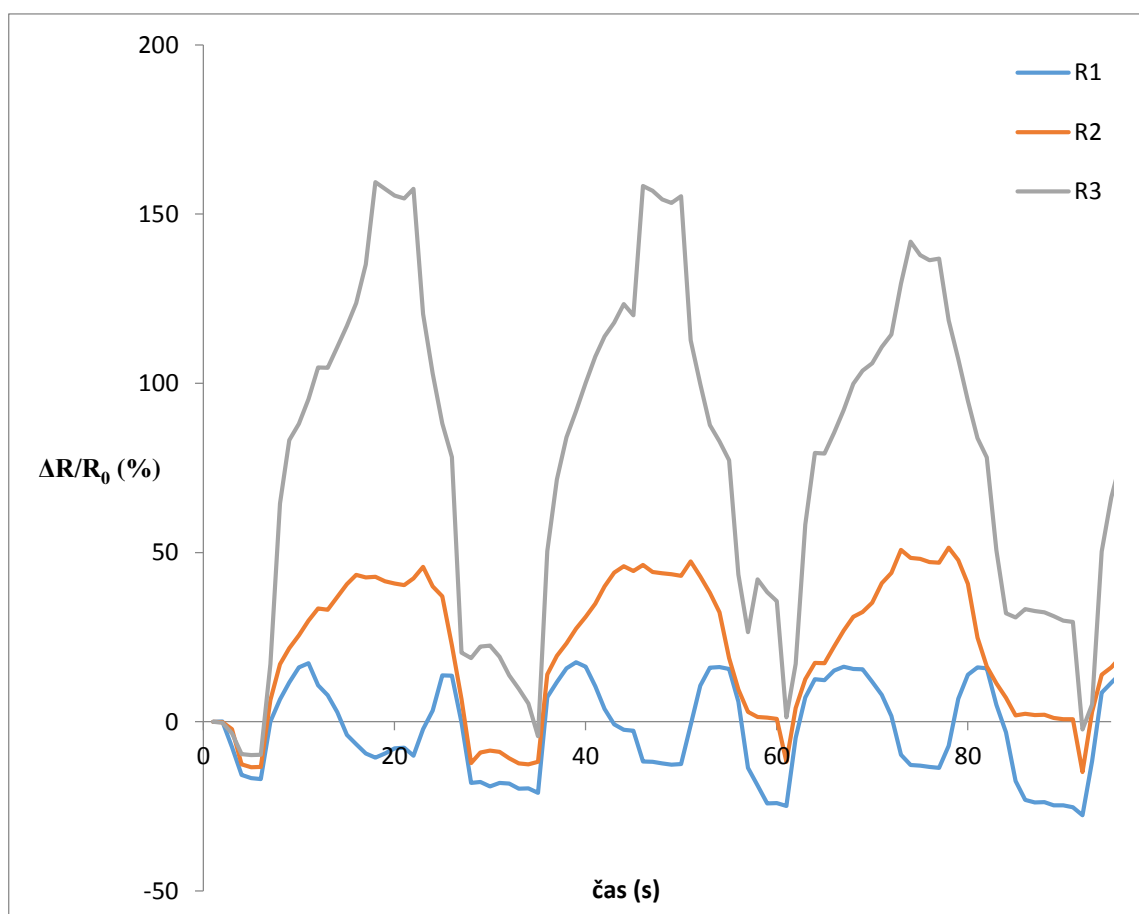
Obrázek 35 Schématické znázornění konektoru i s bandáží  
– čelní pohled



Obrázek 36 Schématické znázornění konektoru i s bandáží – boční hled

Po všech dílčích úpravách, kterými bandáž prošla, bylo nakonec přikročeno k samotnému testování na lidském koleni. Testující subjekt prováděl běžné lidské pohyby jako chůze nebo dřep a pomocí výše zmíněno měřící ústředny Hewlett Packard 34970 A (s kartou Hewlett Packard 34901) byli, tyto pohyby ve formě dat převedeny do počítače kde z nich následně byli vytvořeny grafy. Vzhledem k omezeným možnostem měřící ústředny Hewlett Packard 34970 A (max. rychlost vzorkování 1x za sekundu) byl pro lepší prezentování výsledků vybrán pomalý dřep.

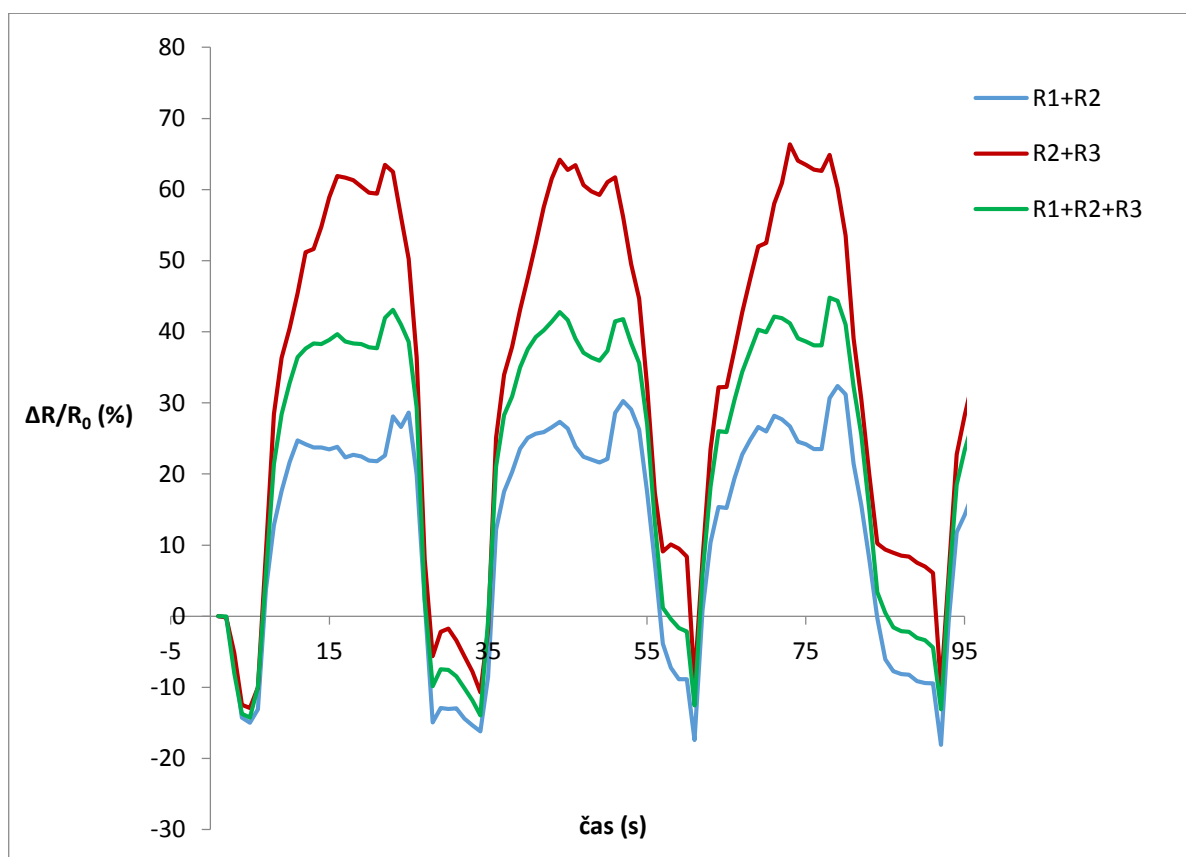
V grafu 37 můžeme vidět 3 cykly, které znázorňují průběhy dřepu. Proti předchozím pracím, kdy byly použity elektrody pouze 2, nám použití 4 elektrod umožnilo komplexnější představu o pohybu kolena. Kdy místo snímání jedné části kolene jako celku můžeme koleno pomyslně rozdělit do 3 částí a získat tak trojnásobek dat. Zásadním zjištěním je, že odezva v každé části kolene reprezentována 3 odlišnými odpory je různá. Ve vrchní části kolene, kterou nám zobrazuje křivka odporu R1 je patrný vzestup odporu představující pohyb figuranta dolů. Poté následuje výrazný pokles, který vypovídá o nejnižší poloze dřepu a opět vzestup, jež představuje pohyb směrem nahoru. V střední části kolene reprezentované křivkou relativní změny odporu R2 je z průběhu deformace zřejmé, že tato část kolene je nejvíce zatěžována při nejnižší poloze figuranta. Z křivky relativní změny odporu R3 je pak možné usoudit, že v této spodní části kolene se při dřepu průběžně zvyšuje deformace. Vrcholu pak deformace dosáhne při nejnižší poloze figuranta. Kde je 3 x větší ve srovnání se stejnou (nejnižší) polohou pro střední část kolene reprezentovaného křivkou odporu R2.



Obrázek 37 Graf 3 cyklů průběhu dřepu ve 3 různých částech kolene zobrazené jako relativní změny odporu



V dalším grafu číslo 38, který zobrazuje opět 3 cykly průběhu dřepu jsou jednotlivé odpory sečteny. Z výsledků je patrné, že největší pohyb vykonává koleno ve své spodní části, kterou reprezentuje křivka relativních změn odpor R2 a R3. Z křivky odporů R1 a R2 jež představují vrchní část kolene je zřejmý stejný průběh jako u předchozího grafu kdy je znatelný pokles deformace při nejnižší poloze figuranta.



Obrázek 38 Graf 3 cyklů průběhu dřepu zobrazené jako součet relativních změn odporu

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byla příprava polymerního kompozitu z mnohostěnných uhlíkových nano trubic a termoplastického polyuretanu, který by byl v budoucnu využitelný jako senzor pro měření deformace. Tato změna pak byla detekována jako změna odporu. Základními kritérii pro aplikaci materiálu jako senzoru jsou dostatečná citlivost při detekci deformace a její vratná odezva i po několika cyklech použití. Oproti předchozím pracím na podobné téma byl použit jiný elastičtější termoplastický polyuretan Desmopan 385 S.

Tento kompozit byl připraven nafiltrováním mnohostěnných uhlíkových nanotubic na membránu z termoplastického polyuretanu, která byla vyrobena metodou elektrostatického zvlákňování. Na povrchu membrány se takto vytvořila aktivní vrstva nanotubic, jež má klíčový vliv na správnou funkci senzoru, protože při deformaci detekuje změnu odporu. Při tomto kroku bylo zjištěno, že z původně uvažovaných 4 navážek a to konkrétně 50, 100, 150 a 200 mg MWCNT jsou pro další testování použitelné pouze 3 nejvyšší z důvodu nehomogenního filtračního koláče (aktivní vrstvy) MWCNT u navážky 50 mg. Poté se membrána nažehlila na podkladní destičku opět vyrobenou s termoplastického polyuretanu, jejíž funkcí bylo zvýšení mechanických vlastností kompozitu díky vynikajícím elastickým vlastnostem termoplastického polyuretanu. Takto byly připraveny zkušební vzorky, které následně prošly sérií pokusů pro ověření použitelnosti jako senzor a pro optimalizaci klíčových parametrů například citlivostního faktoru.

Pro lepší seznámení, hlubší pochopení struktury a způsobu jakým se bude kompozit chovat, byly pořízeny snímky na mikroskopech SEM a TEM. Po tomto úvodu bylo přikročeno k samotnému testování připravených vzorků. Prvním krokem byla optimalizace navážky MWCNT. Jak již bylo výše zmíněno do tohoto kroku byli zahrnuti 3 různé navážky MWCNT a to 100, 150 a 200 mg. Klíčovým parametrem podle něhož byla konečná a nejlepší navážka zvolena byl citlivostní faktor. Nezanedbatelným vliv má i relativní změna odporu  $z$ , které výpočet citlivostního faktoru vychází. Nejvyšší a tudíž žádaná hodnoty těchto parametrů byly naměřeny pro navážku 200 mg MWCNT a ta byla proto zvolena jako nejlepší. Jak již bylo zmíněno, zásadním parametrem u senzorů je jejich citlivostní faktor, proto se další test zabýval možností jeho zvýšení a to konkrétně předpětím. Testováním bylo prokázáno, že předpětí má významný vliv na zvýšení citlivostního faktoru. Konečnou fází testování pak byla aplikace polymerního nano kompozitu na kolenní bandáž pro ověření reálného využití jak senzoru deformace (tenzometru). Oproti předchozím pracím na podobné téma

byl senzor vylepšen díky použití většího množství elektrod a to konkrétně 4 místo 2, které měli logicky i více vývodů a tudíž bylo možné detekovat detailněji pohyb a to díky 3 násobnému množství informací proti minulosti. Tyto data bylo možné sbírat jen díky použití měřící ústředny Hewlett Packard 34970 A opatřenou kartou Hewlett Packard 34901 (20 kanálový multiplex). Z grafů je patrné že vyrobený kompozit je možné (po dalších úpravách a vylepšeních) použít jak senzor pohybu lidského těla a to ne jen pro koleno, ale i pro další části těla, které vykonávají podobný pohyb, jako například loketní kloub.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] DULEBA, B. - GREŠKOVIČ F. - KRASYNSKIY V. Uhlíkové nanotrubičky – materiál pre budúcnosť. *Transfer inovácií*, 2011, roč. 12, č. 21, s. 192-197
- [2] *Electrical properties depend on the orientation of the hexagons.* [online]. [cit. 4-5-2015] Dostupné na WWW <<http://www.understandingnano.com/electrical-properties-carbon-nanotubes.html>>
- [3] VEMURU S. M. - WAHI R. - NAGARAJAIAH S. - AJAYAN P. M. Strain sensing using a multiwalled carbon nanotube film. *Journal strain analysis*, 2009, vol. 42, p. 555-562
- [4] TOMÁNEK, David. *The Nanotube site.* [online]. last revision 12th of April 2013 [cit. 7-4-2015] Dostupné na WWW: <<http://www.pa.msu.edu/cmp/csc/nanotube.html>>
- [5] LHOTÁK P., *Chemie fullerénů.* [online]. [cit. 7-4-2015] Dostupné na WWW: <<http://uoch.vscht.cz/files/uzel/0015868/fullereny.pdf>>
- [6] PRÁŠEK, J. et al. Methods for carbon nanotubes synthesis—review. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, vol. 21, p. 15872-15884.
- [7] CHOUDHARY, V. - GUPTA, A. Polymer/Carbon Nanotube Nanocomposites, Carbon Nanotubes - Polymer Nanocomposites, Dr. Siva Yellampalli (Ed.), (2011). ISBN: 978-953-307-498-6, InTech, Dostupné na WWW: <<http://www.intechopen.com/books/carbon-nanotubes-polymer-nanocomposites/polymer-carbon-nanotube-nanocomposites>>
- [8] *The journal of nuclear medicine.* [online]. [cit. 11-4-2015] Dostupné na WWW: <<http://jnm.snmjournals.org/content/48/7/1039/F1.expansion.html>>
- [9] *Schematics of a CVD deposition oven.* [online]. [cit. 10-4-2015] Dostupný na WWW: <<http://ipn2.epfl.ch/CHBU/NTproduction1.htm>>
- [10] KUMAR M. - ANDO Y. Chemical Vapor Deposition of Carbon Nanotubes: A Review on Growth Mechanism and Mass Production. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2010, Vol. 10, p. 3739–3758.
- [11] DAENEN, M., FOUW, R. D., HAMERS, B., JANSSEN, P. G. A., SCHOUTEDEN, K., VELD, M. A. J.: The Wondrous World of Carbon Nanotubes (a review of current

- carbon nanotube technologies), Eindhoven University of Technology, 2003 Dostupné na WWW: <[http://oes.tamu.edu/web/guidelines/Wondrous\\_World\\_of\\_Carbon\\_Nanotubes\\_Final.pdf](http://oes.tamu.edu/web/guidelines/Wondrous_World_of_Carbon_Nanotubes_Final.pdf)>
- [12] GABRYŠ, J. Nanotrúbky [online]. 2005. [cit. 9-4-2015]. Dostupné na WWW: <<http://disk.jabbim.cz/sef@njs.netlab.cz/nanotrúbky.pdf>>.
- [13] *Schéma výroby nanotrubic laserovou ablací* [online]. [cit. 13-4-2015] Dostupné na WWW: <http://www.kazuli.com/UW/4B/ME%20541/Nano%20Tubes.htm>
- [14] *Princip výroby nanotrubic v elektrickém proudu* [online]. [cit. 29.3.2015 ] Dostupné na WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon\\_nanotube\\_nanomotor](http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube_nanomotor)>
- [15] HRUŠKA, František. *Senzory: Fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití*. 2. Vydání. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2010. ISBN 978-80-7454-096-7
- [16] FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer, 2010. ISBN 1441964665
- [17] WINDOW, A. *Strain gauge technology*. 2nd ed. London: Elsevier Applied Science, c1992, xii, 358 s. ISBN 1-851-66864-0.
- [18] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. *Fyzika polymerů: struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 306 s.
- [19] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [20] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011, 276 s. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [21] DUCHÁČEK, V. *Termoplastické elastomery – Moderní polymerní materiály*. *Chemické listy*, 1997, roč. 91, s: 23 – 29
- [22] DUCHÁČEK, V. *Poslední směry ve vývoji termoplastických elastomerů*. *Chemické listy*, 1998, roč. 92, s: 655 - 660
- [23] *Biomechanika*. [online]. [cit. 16-4-2015] Dostupné na WWW: <<http://biomech.ftvs.cuni.cz/pbpk/kompendium/biomechanika/index.php>>

- [24] KŘEN, Jiří, Přemysl JANÍČEK a Josef ROSENBERG. Biomechanika. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Fakulta aplikovaných věd, 2001, 380 s. ISBN 8070827920.
- [25] SLOBODIAN, P. – ŘÍHA, P. – SAHA, P. A highly-deformable composite composed of an entangled network of electrically-conductive carbon-nanotubes embedded in elastic polyurethane. *Carbon 50(10)*, 3446-3453, 2012
- [26] *Ultrazvukový přístroj UP 400S*. [online]. [cit. 28-4-2015] Dostupné na WWW: <<http://www.hielscher.com/cs/lab.htm>>
- [27] *Digitální úchylkoměr Mahr MarCator 1080* [online]. [cit. 28-4-2015] Dostupné na WWW: <<https://www.mahr.com/index.php?NodeID=5457>>
- [28] *Transmisní elektronový mikroskop – Jeol Jem 2010* [online]. [cit. 28-4-2015]. Dostupný na WWW: <<https://imf.ucmerced.edu/pages/major-instrumentation>>
- [29] *Skenovací elektronový mikroskop – Tescan Vega 3 Lmu* [online]. [cit. 28-4-2015]. Dostupný na WWW: <<http://www.aub.edu.lb/fas/crsl/Pages/SEM.aspx>>
- [30] *SDS vzorec* [online]. [cit. 28-4-2015] Dostupný z <http://bbs.biogo.net/>
- [31] *Skenovací elektronový mikroskop – Phenom pro desktop* [online]. [cit. 28-4-2015]. Dostupný na WWW: <<http://www.edlin.cz/phen/phenpro.htm>>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

SWCNT	Single wall carbon nanotubes - jedностěnné nanouhlíkové trubice
MWCNT	Double wall carbon nanotubes - mnohostěnné nanouhlíkové trubice
Nd	Neodym
YAG( $Y_3Al_5O_{12}$ )	Yttrium aluminium granát
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
Cu	Měď
Ni	Nikl
Co	Kobalt
SEM	Scanning Electron Microscope, skenovací elektronový mikroskop
TEM	Transmission Electron Microscope, transmisní elektronový mikroskop
SDS	dodecyl sulfát sodný
NaOH	hydroxid sodný
GF	Gauge Factor, citlivostní faktor
T <sub>m</sub>	Teplota tání
T <sub>g</sub>	Teplota skelného přechodu
TPE	Termoplastický elastomer
pH	Záporný dekadický logaritmus aktivity oxoniových kationtů
M	Molární hmotnost
PU	Polyuretan
CNT	Carbon nano tubes – uhlíkové nanotrubičky

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1 Tři možné směry sbalení grafénové vrstvy .....	13
Obrázek 2 Konceptuální schéma zobrazení s typickými rozměry délky, šířky a u mnohostěnných trubic i separačními vzdálenostmi mezi vrstvami A) Jednostěnných nanotrubic a B) Mnohostěnných nanotrubic [8] .....	14
Obrázek 3 Schéma výroby nanotrubic laserovou ablací [13] .....	16
Obrázek 4 Schématické znázornění výroby nanotrubic chemickou depozicí v plynné fázi [9] .....	17
Obrázek 5 Princip výroby nanotrubic v elektrickém proudu [14] .....	18
Obrázek 6 Moderní foliový tenzometr [17] .....	19
Obrázek 7 Vývoj aplikačních oblastí vyztužených plastů v USA v letech 1960-2005 [19] .....	26
Obrázek 8 Podíl jednotlivých technologií zpracování sklem vyztužených plastů v Evropě v roce 2005 (v tisících tun) [19] .....	27
Obrázek 9 Působení vertikální gravitace na lidské tělo – ukázka z knihy De motu animalium [23] .....	33
Obrázek 10 Ultrazvukový přístroj UP 400S[20] .....	39
Obrázek 11 Digitální multimetr UNI – T UT 71C .....	40
Obrázek 12 Transmisní elektronový mikroskop – Jeol Jem 2010 [28] .....	40
Obrázek 13 Skenovací elektronový mikroskop – Tescan Vega 3 Lmu [29] .....	41
Obrázek 14 Skenovací elektronový mikroskop - Phenom pro desktop [31] .....	41
Obrázek 15 Pájecí stanice ZD 931 .....	42
Obrázek 16 Žehlička ETA 7246 .....	42
Obrázek 17 Laboratorní kyvadlo včetně závaží .....	42
Obrázek 18 Digitální úchylkoměr Mahr MarCator 1080 [21] .....	43
Obrázek 19 Měřicí ústředna Hewlett Packard 34970 A opatřena kartou Hewlett Packard 34901 A (20 kanálový multiplex) .....	43
Obrázek 21 Snímek individuální nanotrubic pořízený mikroskopem TEM .....	44
Obrázek 22 Snímek shluku nanotrubic pořízený mikroskopem TEM .....	44
Obrázek 23 Snímek polyuretanové membrány pořízený mikroskopem SEM .....	45
Obrázek 24 Snímek nafiltrované vrstvy nanotrubic na polyuretanové membráně .....	47
Obrázek 25 Snímek deformované vrstvy nanotrubic pořízený mikroskopem SEM ..	47
Obrázek 20 Testovací PU lopatička s aktivní vrstvou s nanotrubic .....	49



Obrázek 26 Měřicí sestava sestávající se z kyvadla se závažím, multimetru, úchylkoměru a stopek.....	50
Obrázek 27 Závislost změny odporu na čase v cyklech zatížení a odlehčení po 5 minutách pro 200 mg navážku nanotrubic .....	53
Obrázek 28 Závislost změny podélného prodloužení na čase v cyklech zatížení a odlehčení po 5 minutách pro 200 mg navážku nanotrubic.....	53
Obrázek 29 Závislost relativní změny odporu na čase pro 3 různé navážky MWCNT.....	55
Obrázek 30 Graf typických hodnot citlivostního faktoru pro 3 testované navážky nanotrubic .....	56
Obrázek 31 Vliv předpětí na citlivostní faktor .....	58
Obrázek 32 Vliv předpětí na relativní změnu odporu.....	59
Obrázek 33 Kolenní bandáž upravená pro testování .....	60
Obrázek 34 Kolenní bandáž na koleni připravená k měření.....	61
Obrázek 35 Schématické znázornění konektoru i s bandáží – čelní pohled.....	62
Obrázek 36 Schématické znázornění konektoru i s bandáží – boční hled.....	63
Obrázek 37 Graf 3 cyklů průběhu dřepu ve 3 různých částech kolene zobrazené jako relativní změny odporu.....	64
Obrázek 38 Graf 3 cyklů průběhu dřepu zobrazené jako součet relativních změn odporu.....	65

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 3 Porovnání vlastností uhlíkových vláken a nanotrubic [1]

Tabulka 4 Citlivost na změnu deformace pro různé materiály [17]

Tabulka 3 Objem výroby sklem vyztužených plastů v Evropě (v tisících tun) [19]

Tabulka 4 Průměry vláken PU membrány

Tabulka 5 Procentuální prodloužení kompozitu po 5 minutových cyklech zatížení

Tabulka 6 Citlivostní faktor pro 3 různé navážky