

Polymerní vlákna, jejich aplikace, výroba a vlastnosti

Jiří Vacl

Bakalářská práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav inženýrství polymerů
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří VACL**
Osobní číslo: **T080090**
Studijní program: **B 2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Chemie a technologie materiálů**

Téma práce: **Polymerní vlákna, jejich aplikace, výroba a vlastnosti**

Zásady pro vypracování:

Vypracujte literární rešerši zaměřenou na:

- přehled používaných polymerních vláken
- způsoby výroby polymerních vláken
- aplikace a vlastnosti těchto materiálů.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. L. H. SPERLING: Introduction to Physical Polymer Science. 3rd. edition, Wiley-Interscience, 2001. 671 s. ISBN 0-471-32921-5
2. Carreher, Charles E., Introduction to Polymer Chemistry, Boca Raton, 2007, 503 s., ISBN 9780849370472
3. P.R.LEWIS: High-performance polymer fibres, Rapra Technology LTD., 1999, 111 s., ISSN-0889-3114
4. Dostupné licencované databáze

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Kalous

Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání bakalářské práce:

10. února 2012


Termín odevzdání bakalářské práce:

1. června 2012

Ve Zlíně dne 10. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: VACL Jirni

Obor: CHTM

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 ¹⁾;
- 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit 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 21.5.2012

Jirni VACL

¹⁾ 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.*

²⁾ *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 vzdělávacího zařízení (školní dílo).*

³⁾ *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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Tato práce je přehledem v současnosti nejpoužívanějších polymerních vláken, jejich vlastností, modifikací a praktického použití.

V práci se zabývám materiály pro výrobu polymerních vláken, jejich konkrétním použitím a vlastnostmi výsledného produktu.

KLÍČOVÁ SLOVA: Polymerní vlákna, nanovláknenné materiály, vysokopevnostní vlákna, biodegradabilní vlákna, elektrostatické zvlákňování, ...

ABSTRACT

This bachelor thesis summarizes properties, modifications and practical applications of most frequently used polymer fibres.

This thesis is focused on materials, that high performance fibres are manufactured from, specific applications of these fibres and characteristics of final products.

KEYWORDS: Polymer fibres, nanofibrous materials, high performance fibres, biodegradable fibres, electrospinning..

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Jiřímu Kalousovi za odborné vedení, podporu a trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat za podporu svým blízkým.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	11
1 TEORIE	12
1.1. ZÁKLADNÍ VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ POLYMERNÍ VLÁKNA	12
2 VÝROBA VLÁKEN	19
2.1. TAVNÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ	19
2.2. SUCHÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ	20
2.3. MOKRÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ	21
2.4. ELEKTROSTATICKÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ	22
3 PŘEHLED POUŽÍVANÝCHCH POLYMERNÍCH VLÁKEN	26
3.1. POLYMERNÍ NANOVLÁKNA A JEJICH KOMPOZITY	26
3.1.1. VLASTNOSTI	26
3.1.2. DRUHY A APLIKACE	26
3.2. VYSOKOPEVNOSTNÍ POLYMERNÍ VLÁKNA	31
3.2.1. UHLÍKOVÁ VLÁKNA	31
3.2.1.1. VLASTNOSTI	31
3.2.1.2. DRUHY A APLIKACE	32
3.2.1.3. VÝROBA UHLÍKOVÝCH VLÁKEN	33
3.2.2. ARAMIDOVÁ VLÁKNA	35
3.2.2.1. VLASTNOSTI	35
3.2.2.2. DRUHY A APLIKACE	35
3.2.3. POLYETHYLENOVÁ, POLYPROPYLENOVÁ VLÁKNA	39
3.2.3.1. VLASTNOSTI	39
3.2.3.2. DRUHY A APLIKACE	39
3.2.4. LCP (LIQUID CRYSTAL POLYMER)	41
3.2.5.1. VLASTNOSTI	41
3.2.5.2. DRUHY A APLIKACE	41
3.2.5. BIOSTEEL	42
3.2.6.1. VLASTNOSTI	42
3.2.6.2. DRUHY A APLIKACE	43

3.3. BIODEGRADABILNÍ POLYMERNÍ VLÁKNA	45
3.3.1. VLASTNOSTI	45
3.3.2. DRUHY A APLIKACE	45
4 BUDOUCNOST POLYMERNÍCH VLÁKEN	47
ZÁVĚR	48
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	49
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	56
SEZNAM OBRÁZKŮ	57
SEZNAM TABULEK	58

ÚVOD

Polymerní vlákna jsou díky svým pozoruhodným vlastnostem a potenciálním možnostem využití objektem intenzivního zkoumání. V souvislosti s vědeckotechnickým pokrokem a růstem lidského poznání dochází v posledních letech k bouřlivému rozvoji v oblasti výroby a modifikací polymerních vláken. Nově vyvinuté výrobní postupy tak vedou k výrobě produktu vykazujícího ekonomicky a průmyslově zajímavé vlastnosti.

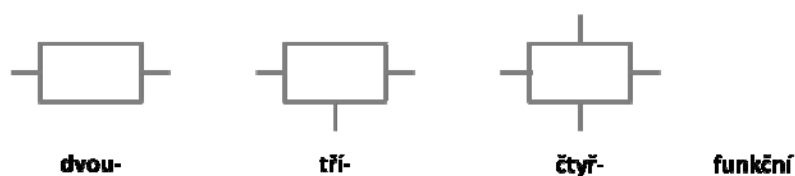
Požadované vlastnosti polymerních vláken se odvíjí od předpokládaného využití materiálu, který bude z těchto vláken zhotoven. Obecně však lze říci, že produkty vyrobené z polymerních vláken vynikají svou odolností, pevností, houževnatostí či biologickou odbouratelností. [1] Není tedy překvapením, že jsou polymerní vlákna často používána na výrobu vysoce namáhaných produktů, jako například ochranných oděvů a pomůcek, vysoce kvalitních a lehkých sportovních potřeb, komponent pro automobilový a letecký průmysl či ve tkáňovém inženýrství.

V této práci jsou popsány obecné vlastnosti polymerních vláken, jejich výroba a podstatná část práce je zaměřena na přehled, charakteristiku a využití v současnosti nejvíce používaných polymerních vláken.

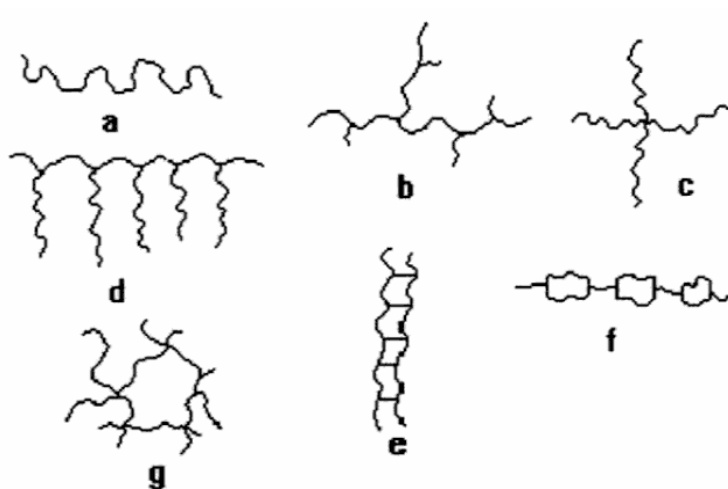
1 TEORIE

1.1. ZÁKLADNÍ VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ POLYMERNÍ VLÁKNA

Polymer je látka o velmi vysoké molekulové hmotnosti, která vzniká polymerizací základních jednotek, tzv. monomerů [1]. Podle počtu funkčních vazeb můžeme monomery rozdělit na dvou-, tří-, či více-funkční (obr. č. 1), což významně ovlivňuje strukturu výsledného polymeru (obr. č. 2). [2, 3]



Obr. 1. Rozdělení monomerů podle počtu funkčních vazeb [2]



Obr. 2. Přehled tvarů polymerních molekul. (a) lineární, (b) rozvětvený, (c) hvězdicovitý, (d) hřebínkovitý, (e) žebříčkový, (f) polo-žebříčkový, (g) zesíťovaný polymer. [3]

Složení a způsob výroby polymerních vláken určují výsledné vlastnosti a tedy i využití těchto vláken. Charakteristika polymerních vláken je také velmi ovlivněna vazbami mezi atomy hlavního řetězce polymeru i mezi jednotlivými řetězci. [4]

Zatímco v hlavním řetězci polymeru jsou atomy poutány silnými kovalentními vazbami, vedlejší vazby mezi řetězci jsou slabé, nejčastěji vyvolané vodíkovými můstky nebo van der Waalsovými silami. Tyto slabé elektrostatické vazby jsou však přítomny ve velkém množství, a tak i ony významně modifikují chování polymerních vláken. Jsou zodpovědné za soudržnost neboli kohezi polymerního vlákna, za množství tepla potřebného k tání polymeru a za interakce s plyny nebo kapalinami. Tabulka 1 znázorňuje hodnoty energie vazeb, které se uplatňují v polymerních vláknech. [4]

Typ vazby	Energie [eV]
kovalentní vazby	4–8
vodíkové můstky	0,2–0,5
van der Waalsovy síly	0,01–0,1
tepelná energie při 30°C	0,03

Tab. 1. Energie typů vazeb v polymerních vláknech [eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J] [4]

Důkladné studium vlastností a struktury syntetických vláken je nezbytné pro rozšíření našeho poznání o polymerních vláknech a umožňuje lépe předvídat chování a konečné vlastnosti vláken. [4] Polymerní vlákna mohou být charakterizována na základě různých kritérií: délka, tloušťka, pružnost, hustota, odolnost proti abrazi, termální stabilita atd. [5] Tyto a další vlastnosti jsou podrobněji popsány v následujícím textu.

DÉLKA VLÁKEN

Jednou ze základních charakteristik polymerních vláken je jejich délka. [6] Podle poměru p délky vlákna L k jeho průměru d rozlišujeme vlákna:

- krátká (poměr L/d 10 – 50)
- střední (poměr L/d 50 – 500)
- dlouhá (poměr L/d 500 – 5000)
- nekonečná (poměr L/d 5000 – ∞)

$$p = L / d$$

MODUL PRUŽNOSTI (YOUNGŮV MODUL)

Účinkem vnějších sil může dojít ke změně tvaru tuhého tělesa, tedy k jeho deformaci. Jakmile přestanou deformující síly působit, dojde u většiny tuhých látek k návratu do původního tvaru. V momentě, kdy je silami překonána tzv. mez pružnosti, dochází k trvalému poškození tělesa. [7]

Pružnost v tahu zkoumané látky je posuzována pomocí konstanty zvané Youngův modul pružnosti (E). [7] Hodnota E představuje úměru mezi normálovým napětím (σ) a poměrným prodloužením (ε) v tahu, tedy vztah:

$$E = \sigma / \varepsilon$$

Při změně ideálně pružného tělesa z nedeformovaného do deformovaného stavu je spotřebována tzv. deformační práce W , která se v tělese ukládá jako potenciální deformační energie U_D . [5] Tato energie je uvolněna při přechodu tělesa zpět do nedeformovaného stavu. Deformační práce je charakterizována následujícím vztahem, kde veličina V_o představuje původní objem vlákna. [7]

$$W = V_o \cdot U_D$$

OHEBNOST VLÁKEN

S modulem pružnosti souvisí také jejich ohebnost a moment setrvačnosti příčného řezu vláknem (I). [5] Pro kruhové vlákno a průměru d platí při výpočtu I následující vztah:

$$I = \pi \cdot d^4 / 64$$

Jako míra ohebnosti vláken je používán parametr definující ohebnost (F_e), který je charakterizován vztahem:

$$F_e = I / (M \cdot R)$$

M vyjadřuje ohybový moment a jako R označujeme poloměr křivosti vlákna. Pro průhyb nosníku tedy platí vztah $M \cdot R = E \cdot I$, a míra ohebnosti vláken o průměru d je potom vyjádřena vztahem:

$$F_e = 64 / E \cdot \pi \cdot d^4$$

Z uvedených vztahů je zřejmé, že čím vyšší je hodnota modulu E , tím menší průměr vlákna je nutno použít, aby byla zachována jeho ohebnost. [5]

TLOUŠŤKA VLÁKEN

Mezi další základní charakteristiku vláken patří jejich tloušťka. Ta se vyjadřuje veličinou zvanou měrná lineární hmotnost (T), nebo též jemnost, jejíž jednotkou je [tex]. [5] Jemnost vlákna se definuje jako hmotnost vlákna m v gramech na jednotku délky vlákna l . Z této definice vyplývá, že při zachování stejné jemnosti bude průměr vláken s menší hustotou větší než průměr vláken, která mají vyšší hustotu.

Zároveň tu platí vztah nepřímé úměry mezi ohebností a čtvrtou mocninou tloušťky. Obecně tedy platí, že čím je vlákno tlustší, tím je tužší, čili méně ohebné. [5]

ODOLNOST PROTI ABRAZI

Při výrobě vláken a během jejich používání dochází k tvorbě rýh a k oddělování částic z povrchu, což způsobuje, že povrch vláken není dokonale hladký. Taková poškození způsobují zhoršení mechanických vlastností vlákna. Toto působení se nazývá oděr neboli abraze. Náchylnost vláken k abrazi či jejich odolnost před tímto typem působení je možné kvantifikovat. Překročení odolnosti proti oděru vede k přetržení vlákna (nebo více vláken), což se vyjadřuje množstvím period, za které se vlákno přetrhne působením abraziho mechanismu. [8]

MĚRNÁ HMOTNOST (HUSTOTA)

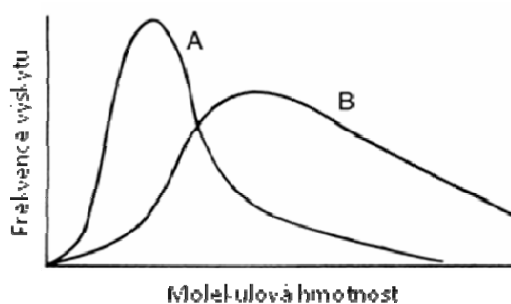
Měrná hmotnost neboli hustota (značí se řeckým písmenem $\rho = [\text{ró}]$) je fyzikální veličina, která se vypočítá jako poměr hmotnosti látky (m) a jejího objemu (V). Základní jednotkou SI pro hustotu je $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, dalšími používanými jednotkami jsou také $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ nebo $\text{kg}\cdot\text{l}^{-1}$. [9] Vysokopevnostní polymerní vlákna se vyznačují nízkou hustotou a právě tato vlastnost se využívá při mnoha aplikacích vysokopevnostních materiálů jako náhrady za materiály s vyšší hmotností.

MOLEKULOVÁ HMOTNOST

Mezi další základní charakteristiku polymerních řetězců patří jejich průměrná molekulová hmotnost M_p , respektive jejich průměrný polymerační stupeň PPS . [4] Pokud do vztahu dosadíme veličinu M_M , molekulovou hmotnost monomeru, potom platí následující vztah:

$$M_p = PPS \cdot M_M$$

Uvedené veličiny mají vliv na celou řadu vlastností polymerů, například na jejich minimální pevnost atd. [4] Reálné polymery však vždy obsahují řetězce o různých délkách, jak je znázorněno na obrázku 3. [1]



Obr. 3. Molekulové hmotnosti stejného polymeru pocházejícího z různých zdrojů, A a B [1]

Molekulové hmotnosti reálných polymerů jsou charakterizovány buď číselnou střední molekulovou hmotností M_n ,

$$M_n = \frac{\sum_i N_i M_i}{\sum_i N_i}$$

kde N_i představuje počet molekul o molekulové hmotnosti M_i . Nebo mohou být vyjádřeny hmotnostní střední molekulovou hmotností M_w . [1]

$$M_w = \frac{\sum_i N_i M_i^2}{\sum_i N_i M_i}$$

TEPELNÉ VLASTNOSTI POLYMERNÍCH VLÁKEN

Tepelné vlastnosti polymerních vláken jsou dány jejich chemickým složením a nadmolekulární strukturou a jsou kritickým faktorem, jež rozhoduje o mnoha dalších fyzikálních charakteristikách vláken (viskozita, tepelná kapacita, modul pružnosti, koeficient tepelné expanze). Při zahřívání polymeru dochází vlivem zvýšené pohyblivosti makromolekulárních řetězců k jejich následnému rozpadu a degradaci vlákn. [10]

Mezi důležité tepelné charakteristiky polymerních vláken patří tepelná kapacita a měrné teplo vláken. Tepelná kapacita je vyjádřena měrným teplem za stálého tlaku C_p v jednotkách $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$. Druhá zmíněná veličina, měrné teplo, je charakterizována jako teplo Q , které je potřebné k ohřátí 1 kg látky o 1 stupeň Kelvina a je závislá na molekulární a nadmolekulární struktuře vláken, teplotě a rychlosti ohřevu. [10]

K dalším tepelným vlastnostem polymerních vláken patří například teploty tání a zeskelnění a tepelná vodivost vláken. [10]

ORIENTACE VLÁKEN

Orientace řetězců polymerního vlákna, tj. úhel sklonu řetězců k ose vlákna α , je charakterizována tzv. orientačním faktorem f : [11]

$$f = (3 \langle \cos^2 \alpha \rangle - 1) / 2$$

Pro neorientované vlákno je $f = 0$. Hodnota f při perfektní orientaci, tedy stav, kdy řetězce leží rovnoběžně s osou vlákna, je rovna 1:

$$\langle \cos^2 \alpha \rangle = 1; \alpha = 0^\circ$$

Dloužení vláken tahem má za následek zvýšení pevnosti, snížení tažnosti a vznik fibrilární struktury. [11]

2 VÝROBA VLÁKEN

Pro výrobu polymerních vláken je v praxi využíváno několika odlišných výrobních procesů. Přestože se od sebe jednotlivé technologické postupy liší, základní kroky výroby jsou totožné.

Při výrobě vláken je počátečním krokem *příprava vláknotvorné látky* (roztok polymeru, tavenina) ke zvlákňování. Následně jsou vláknotvorné látky při procesu *zvlákňování* protlačeny přes otvory ve zvlákňovací trysce do prostředí, ve kterém dochází ke koagulaci nebo pozvolnému tuhnutí. Takto vzniká nedloužené vlákno, jehož hlavními charakteristikami jsou nestabilita, malá orientace řetězců a náchylnost k rychlému křehnutí. [11, 12]

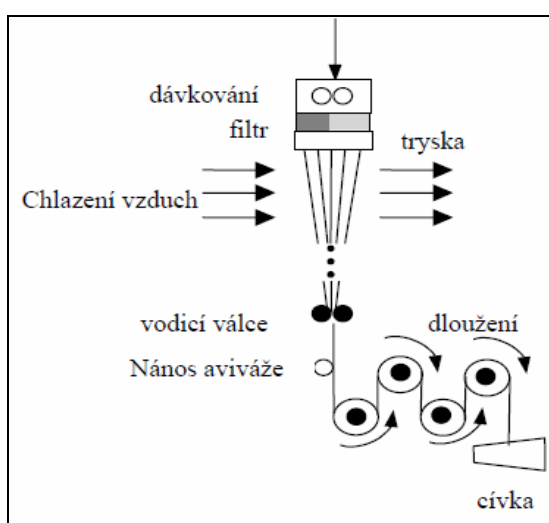
V další fázi výroby polymerního vlákna dochází k procesu *dloužení*, při kterém jsou nastavovány finální vlastnosti vlákna. Principem tohoto kroku je podélná deformace tahem o 20–2000 % původní délky. Důležitým parametrem dloužených vláken je tzv. dloužicí poměr λ , který vyjadřuje relaci mezi délkou nataženého a nenataženého úseku vlákna. Hodnota této veličiny se pohybuje mezi 3 až 5, mimořádně i více. [11] Před dloužením je většina řetězců ve vláknech orientovaná náhodně. Avšak procesem dloužení dochází u přibližně 80–90 % řetězců ke změně orientace, a to ve směru osy polymerního vlákna (vznik orientované struktury – viz kapitola 1.1). Dloužení tak vede ke zvýšení pevnosti, snížení tažnosti a vzniku vlákenné struktury. [8, 11, 13]

Po dloužení vlákna následuje krok *fixace*, neboli tepelná stabilizace vlákna, jejíž účelem je ustálení rozměrů a relaxace napětí ve vláknech. V závislosti na typu fixace tak dochází k modifikaci pevnosti či tažnosti vlákna. Fixace se provádí za pomoci horkého vzduchu (170–210°C), vodní páry (115–130°C) či tzv. plastifikačních činidel (bobtnadla). [11]

V praxi je zvlákňování realizováno čtyřmi hlavními způsoby (zvlákňování tavné, suché, mokré a elektrostatické) a to v závislosti na tom, zda je prováděno z taveniny nebo z roztoku. V následujícím textu jsou všechny čtyři metody podrobněji popsány.

2.1. ZVLÁKŇOVÁNÍ TAVNÉ

Tento způsob zvlákňování je využíván u polymerů, které měknou a taví se při teplotách, které jsou nižší než teplota jejich termického rozkladu. Vláknna vznikají průchodem taveniny polymeru přes štěrby zvlákňovacích trysek, které musí mít specifický průměr (viz obr. č. 4). Po průchodu filtrem a tryskami tuhnou pramínky polymeru v chladné atmosféře. Takto připravená polymerní vlákna mohou přejít do dalších fází procesu výroby, jako je například nános aviváže pro snížení tření a elektrostatického náboje, dloužení a odvíjení vláken na cívky. [11, 12]



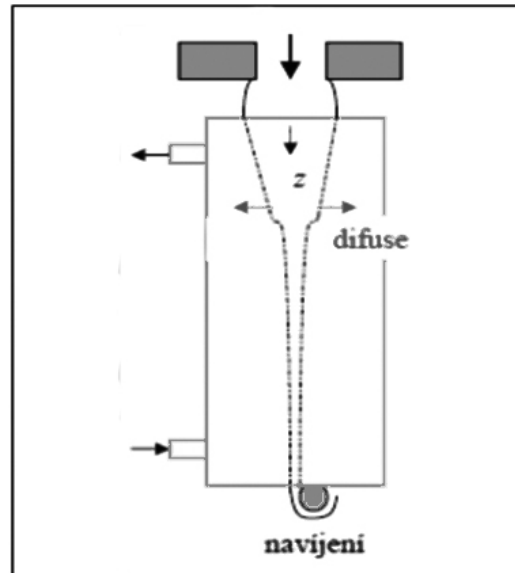
Obr. 4. Schéma tavného zvlákňování [11]

Polymery, u kterých dochází při tavení k jejich rozkladu, se zvlákňují z roztoku. V praxi se využívají dvě základní varianty zvlákňování z roztoku: zvlákňování za sucha a za mokra. [11]

2.2. ZVLÁKŇOVÁNÍ SUCHÉ

Principem metody zvlákňování za sucha je rozpuštění polymeru v těkavém rozpouštědle, které se po průchodu tryskami rychle odpařuje v chladící šachtě, viz schéma na obr. č. 5. [11] Pro optimální zvlákňování suchým způsobem musí být koncentrace polymeru v rozmezí 15–32 % a bod varu rozpouštědla maximálně 150 – 170 °C. Důležitou roli hraje také rychlost zvlákňování, která by měla být mezi 100 a

1000 m.min⁻¹. Suchým způsobem jsou zvlákňována například polyvinylchloridová, acetátová nebo polyakrylonitrilová vlákna. [12]

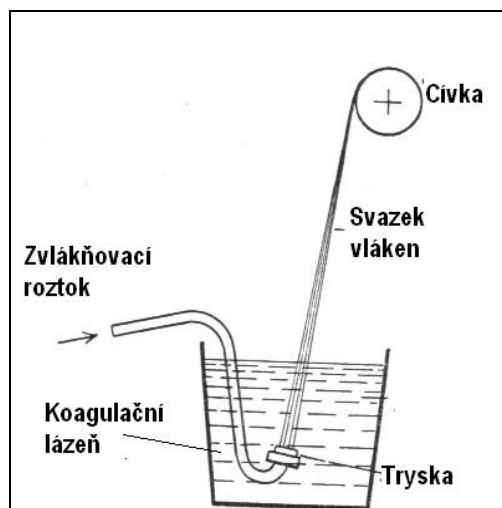


Obr. 5. Zvlákňování za sucha [11]

2.3. ZVLÁKŇOVÁNÍ MOKRÉ

Na rozdíl od zvlákňování za sucha je polymer při mokřém způsobu rozpuštěn v netěkavém či jen málo těkavém rozpouštědle. Při tomto typu zvlákňování je používána nižší koncentrace polymeru než u suchého způsobu (5–25 % polymeru). Rozpouštědlo je následně vymýváno v kapalinové lázni a následně je vlákno vysráženo a odvíjeno (viz obr. č. 6). Rychlost srážení (koagulace) závisí na difúzi do vlákna a z vlákna a pohybuje se v rozmezí 5–200 m.min⁻¹. [11, 12]

Povrchová vrstva vzniklého vlákna je uspořádanější než vnitřní část, čímž vzniká tzv. skin efekt. Mokřé zvlákňování bývá obvykle používáno při výrobě vláken z polymerů, vyskytujících se v přírodě. [12]



Obr. 6. Schéma procesu mokrého zvlákňování [12]

Typické systémy zvlákňování za sucha a za mokra jsou znázorněny v tab. č. 2.

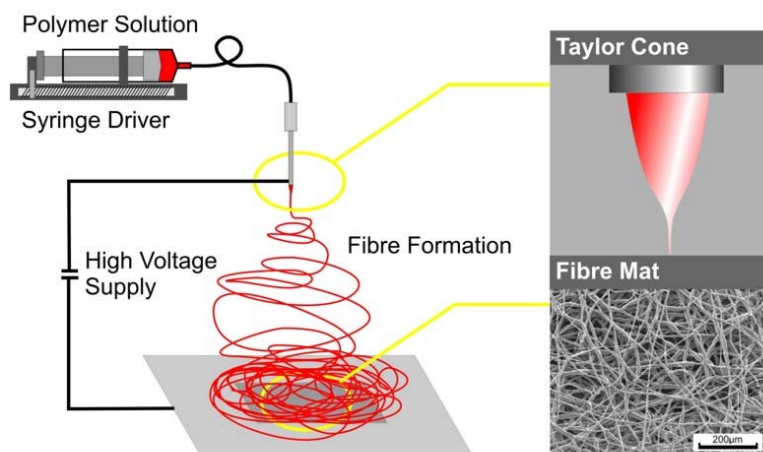
ZA SUCHA	Vlákno	Rozpouštědlo	Koncentrace polymeru
	diacetát	aceton + 2 % vody	20–30 %
	triacetát	metylenchlorid + 5 % methanolu	20–22 %
	PAN	dimethylformamid (DMF)	25–32 %
modakryl	aceton	25–30 %	
ZA MOKRA	Vlákno	Rozpouštědlo	Srážedlo
	viskóзовé	vodný roztok NaOH	zředěná H ₂ SO ₄
	alginátové	vodný roztok NaOH	kyselý roztok s Ca ²⁺
	PAN	DMF	vodný roztok DMF
modakryl	aceton	vodný roztok acetonu	

Tab. 2. Systémy zvlákňování za sucha a za mokra [11]

2.4.ELEKTROSTATICKÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ

V současné době je věnována velká pozornost především zvlákňování elektrostatickému (anglicky electrospinning), jelikož představuje dnes nejběžnější metodu pro přípravu všech typů nanovláken. Podstatou postupu je využití účinku elektrostatického pole na polymerní roztok nebo taveninu. Jak ukazuje obr. č. 7 polymerní roztok (tavenina) putuje ze zásobníku do zvlákňovací trysky, na jejímž konci vzniká pomocí vysokého elektrického napětí mezi špičkou kapiláry a uzemněným kolektorem tzv. Taylorův kužel. Z něho je vypuzen nabitý proud kapaliny. Mezitím se odpaří rozpouštědlo a zanechá po sobě nabitě polymerní vlákno,

které vytvoří vláknennou vrstvu na povrchu kolektoru. Počet a forma vytvořených vláken závisí na mnoha faktorech, například na přiváděném elektrickém napětí a proudu, na koncentraci, síle odsávání, vodivosti, povrchovém napětí a viskozitě polymerního roztoku a rozpouštědla. V případě taveniny polymer ztuhne na své dráze vzduchem od trysky ke kolektoru. [14, 15, 16]



Obr. 7. Schéma elektrostatického zvlákňování [17]

Modifikace procesu elektrostatického zvlákňování (orientace na preciznost procesu, přídavné elektrody stabilizující elektrické pole) vede k optimalizaci výroby a možnostem uplatnění v rozličných aplikacích na poli výroby nanovláken. [18]

Technologie Nanospider

Nanospider představuje moderní technologii pro výrobu nanovláknenných materiálů. Princip této technologie byl objeven a vyvinut vědeckým týmem prof. Jirsáka na Technické univerzitě v Liberci a jako světový patent představen v roce 2004. [19]

Podstata metody spočívá v možnosti vytvoření Taylorových kuželů i na tenké vrstvě polymerního roztoku. Jedná se tak vlastně o proces zvlákňování z volné hladiny roztoku polymeru v elektrickém poli. [15, 20]

Tato technologie je unikátní využitím beztryskového způsobu výroby nanovláken (viz obr. č. 8), která umožňuje mnohem větší výrobní produkci nanovláken než u běžného elektrostatického zvlákňování, navíc bez zanášení trysek. [21]



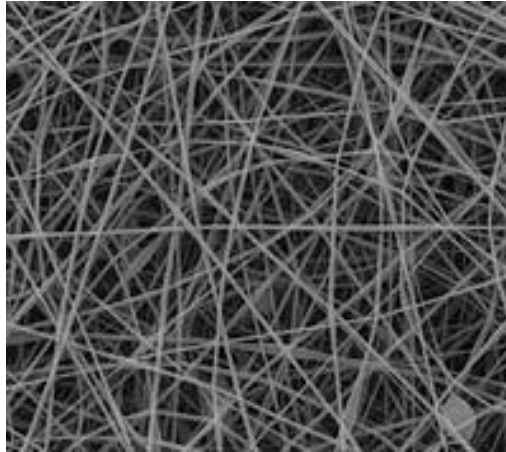
Obr. 8. Vlákna tvořená metodou nanospider [68]

Mezi další přednosti stroje Nanospider patří poměrně snadné ovládání, široké spektrum využitelných podkladových materiálů, přesné řízení průměru nanovláken nebo také rovnoměrnost nanosené nanovlákněné vrstvy. [22]

Aplikace vláken připravených technologií nanospider:

- filtry, textilie, které nepustí bakterie a viry
- výrobky, které mají vynikající zvukově absorpční vlastnosti, což znamená, že jsou schopny absorbovat zvuk v daleko širším spektru kmitočtů, než to dokáží dosud známé materiály
- materiály, které vhodně vyplňují prostor tak, aby v něm pak mohly růst lidské buňky – náhrady kůže, míchy, chrupavek. [19]

Na obr. č. 9 je zachycena typická ukázka produkce nanovláken (PAN) metodou nanospider. Konkrétní příklady použití nanovláken zvlákněných metodou nanospider jsou uvedeny v následující kapitole Polymerní nanovlákná a jejich kompozity.



Obr. 9. PAN nanovlákná [22]

Modifikace procesu elektrostatického zvlákňování

Proces elektrostatického zvlákňování prochází neustálým vývojem a vylepšováním. Tak například při navíjení zvlákněných nanovláken se užívá sběrného válcového kolektoru s vysokou úhlovou rychlostí. Takto zpracovaná vlákna jsou orientována po obvodu rotačního válce. [15]

Další možností vylepšení je použití pomocného elektrického pole. To se tvoří v okolí hliníkové mřížky, která zajišťuje lepší vlákenné zarovnání. Ke sběru vláken se používá rotující teflonová trubička. [15]

Bylo popsáno použití techniky vícenásobného pole. V této modifikaci procesu zvlákňování se na cestě vlákenného proudu využívá kladně nabitých kruhových kolektorů, zatímco sběrná mřížka je nabita záporně. Touto metodou lze připravit uspořádané vlákenné příze. [15, 69]

3 PŘEHLED POUŽÍVANÝCH POLYMERNÍCH VLÁKEN

3.1. POLYMERNÍ NANOVLÁKNA A JEJICH KOMPOZITY

3.1.1. VLASTNOSTI

Nanovlákná, jako novodobý progresivní materiál, v dnešní době představují přední proud ve vývoji a výzkumu materiálů. Nanovlákná je definována jako vlákno o tloušťce menší než 1 μm , jehož délka bývá zpravidla o dva či více řádů vyšší. Polymerní nanovlákná tedy mají malý průměr, z čehož plyne jejich velký měrný povrch. V případě nanovláken vzniklých metodou elektrostatického zvlákňování lze považovat délku vzhledem k průměru za nekonečnou. [23, 66]

3.1.2. DRUHY A APLIKACE

Membrány tvořené nanovlákná

Jeden z největších trendů současnosti v oblasti nanotechnologie je využití nanovláken pro výrobu membrán a filtrů. [15] Při výrobě vláken, membrán a nanofiltrů se konstruktéři snaží o dosažení jednotného průměru vláken a stejné orientace vláken. [18] Jelikož je filtrace elementární metoda pro oddělení pevné látky od kapaliny, staly se tak filtry z nanovláken neodmyslitelnou součástí v mnoha průmyslových oblastech. [15]

Vysoká plocha povrchu nanovláknových membrán nabízí pozoruhodnou kapacitu pro absorpci, a také může sloužit k dočasnému přichycení funkčních skupin, iontů nebo biochemických látek. Tato plocha se dá ještě zvětšit výrobou membrán z porézních nanovláken, a umožňuje tak výrobu materiálů se specifickým povrchem (plocha povrchu pevné látky vztažená na jednotku hmotnosti) vyšším než $60\text{m}^2/\text{g}$. Specifický povrch porézních vláken je mnohem vyšší, než jaký by se dal dosáhnout pouze snížením poloměru vláken. [18]

Metoda pro začlenění pórů o velikostech od 2 do 50 nm (i více) je jednou z novinek ve výrobních procesech. Tyto póry vznikají na základě principu rychlého přednostního odpařování vysoce těkavého rozpouštědla z povrchu vznikajícího vlákna. Takovou metodou mohou být připravena vlákna s povrchem $60\text{m}^2/\text{g}$ o průměru kolem

900 nm. [18] Zvětšený specifický povrch se dá dobře využít v oblasti membránové filtrace či proliferace buněk na nanovlákných vrstvách ve tkáňovém inženýrství. [24]

Nanovláknenné membránové filtry, vyrobené elektrostatickým zvlákňováním, umožňují několikrát větší průtok vody než komerčně vyráběné membrány za stejného tlaku. V praxi jsou také využívány membrány, které nepropouští kapaliny, ale naopak propouští plyny. [18]

Díky své struktuře a vysoké pórovitosti vykazují membrány vyrobené z porézních nanovláken vysokou účinnost filtrace, silnou chemickou a mechanickou odolnost a jsou tak předurčeny k filtraci kapalin a plyných látek. Modifikace postupů metod elektrostatického zvlákňování v budoucnosti přinese vysokopevnostní výrobky či efektivnější použití membrán v systémech úpravy vody nebo filtraci vzduchu. Své uplatnění mají tyto produkty také při katalytických aplikacích. [18]

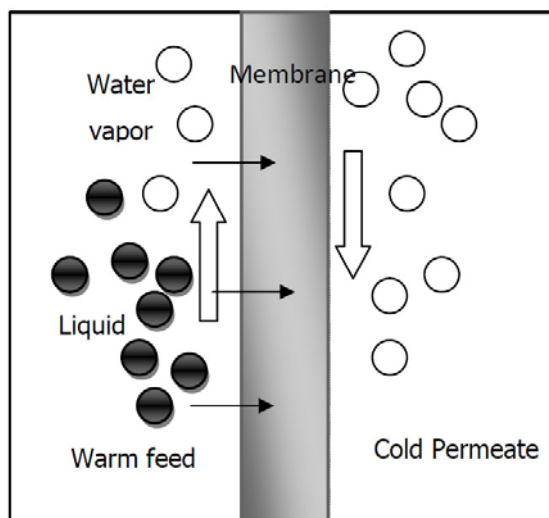
Nanovláknenné membrány pro získávání pitné vody – membránová destilace

Jedním z celosvětových problémů je nedostupnost pitné vody. Tento nedostatek nyní mimo jiné pomáhají řešit i membrány tvořené nanovláknem. [25] Nedávno publikovaná studie vědců z Malajsie popisuje metodu získání pitné vody z geotermálních pramenů za pomoci nanovláknových membrán. Voda pocházející z geotermálních pramenů musí nejprve být zbavena solí vápníku, mědi, síry, chloru a jiných. [25]

Konvenční PVDF (polyvinylidenfluorid) membrány jsou nahrazovány nanovláknennými membránami stejného polymeru ale s vyšším specifickým povrchem. Je také dobře známo, že proces odsolování membránami spotřebovává hodně energie. Právě energie geotermálních pramenů (kolem 60°C) pomáhá při tomto procesu odsolování, aniž by bylo nutno vynaložit další velké množství energie. [25]

Metodou membránové destilace je možno vyprodukovat velice čistou vodu. Princip této metody je založen na rozdílu volatility jednotlivých látek, hybnou silou celého procesu je rozdíl tlaku páry na obou stranách membrány vyvolaný rozdílnou teplotou. Voda se vypařuje při vstupu do membrány, poté se pohybuje přes membránu, až dosáhne oblasti s nízkou koncentrací vodní páry na výstupu z pórů. Zde kondenzuje a je shromažďována jako čistá voda. Hydrofobní charakter membrány zabraňuje

pronikání kapalné vody skrze póry a zároveň umožňuje průchod vodní páry. Schéma procesu je na obr. č. 10. [25]



Obr. 10. Schéma principu fungování membrány filtrující vodu [25]

Uhlíkové nanotrubičky podporující klíčivost semen

Uhlíkové nanotrubičky mohou sloužit jako podpůrné činidlo ke klíčení rostlin. Experimentálně bylo zjištěno, že přidavek nanotrubiček do vody, ve které klíčila semena rajčat, vyvolal významné zvýšení klíčivosti těchto semen. V tomto testu bylo přidáno 40 μ g uhlíkových nanotrubiček na litr vody. V pokusném médiu klíčilo 270 semen. Tři dny po zahájení experimentu vyklíčilo v médiích s nanotrubičkami více jak 30 % semen, zatímco ve skupině bez přídavku žádné. Dvanáctý den pokusu vyklíčilo již 70 % semen rajčat v médiích s nanotrubičkami, (v kontrolní skupině 32 %). Na konci experimentu byly semenáčky rostoucí v médiu s nanotrubičkami ve srovnání s kontrolními semenáčky dvakrát vyšší a také vytvořily dvakrát více rostlinného materiálu. [28]

Autoři experimentu tento jev vysvětlují tím, že nanotrubičky pronikají obaly semen a usnadňují tak průnik vody, který hraje v klíčení rostlin stěžejní roli. [28]

Kompozit PAN / H₃BO₃

Nanokompozit, tvořený z polyamidových nanovláken a nanočástic kyseliny borité, výrazně snižuje hořlavost textilií. Tato nanokompozitní vlákna se nanášejí na bavlněnou tkaninu. Výsledky ukazují, že již 0,05% hm. obsah nanočástic kyseliny borité má výrazně pozitivní efekt na ohnivzdorné vlastnosti textilií. Proto se dají očekávat potenciální aplikace tohoto kompozitu na ochranné oděvy pro hasiče nebo například v domácích textiliích. [27]

Nanovláknenné – zvuk pohlcující materiály

Nanovláknna, jako novodobý progresivní materiál mohou také nahradit konvenční materiály používané pro absorpci zvukových vln. Nanovláknenná vrstva, jež plní funkci rezonující membrány, je z hlediska pohltivosti, díky velkému specifickému povrchu, kvalitním absorbérem zvuku (viz obr. č. 12). [16]

Dopadne-li na nanovláknennou membránu zvukové vlnění, uvede ji do vynucených kmitů, jejichž amplituda je maximální v případě rezonance. Vláknenný materiál zajišťuje dostatečný útlum rezonující membrány. Zvuková energie, která je nashromážděná v rezonátoru, se přeměňuje v teplo. Nanovláknenné vrstvy jsou vyrobeny elektrostatickým zvlákňováním vodného roztoku polymeru na vláknennou netkanou textilií, která plní funkci tlumiče rezonátoru. [16]

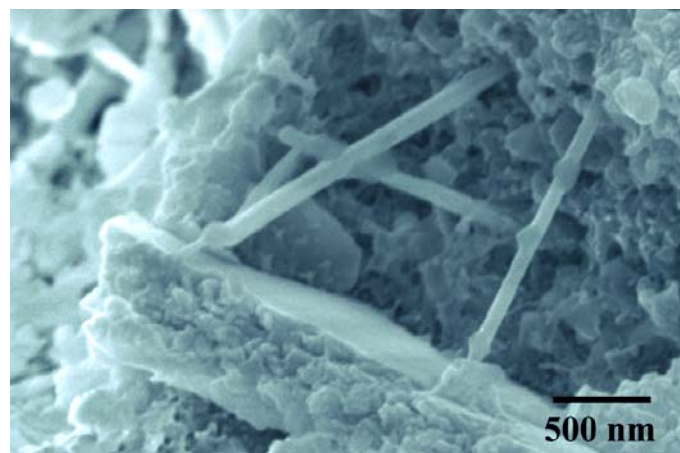


Obr. 11. Snímek zvukově pohltivého materiálu z nanovláknenné vrstvy nanosené na vláknennou netkanou textilií [16]

Kompozit PVA / beton

Vlákna PVA (polyvinylalkohol) lze přidávat do betonu jako jeho výztuž. (viz obr. č. 11). Bylo prokázáno, že tato mikrovlákna v betonu zabraňují vzniku trhlin, které způsobují zhoršení jeho mechanických vlastností a v krajním případě až poškození stavebního prvku. Nejlepších výsledků bylo dosaženo, pokud byl připraven betonový kompozit vyztužený zároveň uhlíkovými nanovláknými a PVA mikrovláknými. Bylo zjištěno, že již 0,048 hm. % CNT, resp. 0,54 hm. % PVA mikrovláken kombinované výztuže významně zvyšuje Youngův modul (až o 75%) a tvrdost výsledného kompozitu (až o 35%). [26] Bylo také zjištěno zlepšení pevnosti v ohybu až o 50%.

Nanovlákna jsou užívána pro zpevnění nanotrhlín v betonu, mikrovlákna PVA proti mikrotrhlinám. PVA mikrovlákna mají velmi dobré vazby s cementovou maticí. Začlenění CNT a PVA mikrovláken vždy vedlo k tvrdšímu kompozitu ve srovnání s betonem bez výztuže.



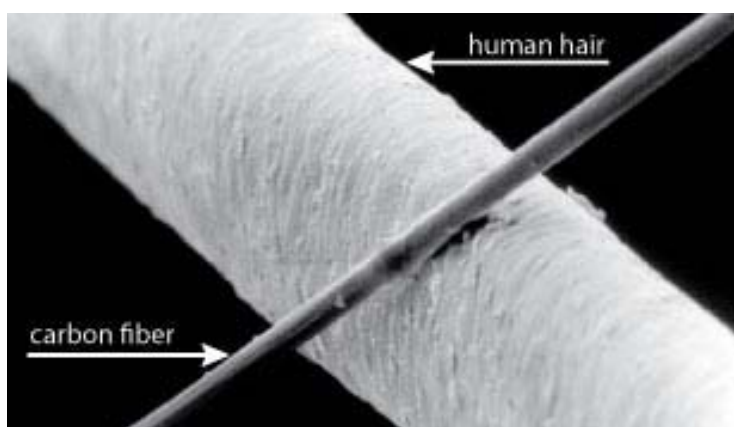
Obr. 12. Zobrazení lomové plochy betonového kompozitu vyztuženého PVA nanovláknými [26]

3.2. VYSOKOPEVNOSTNÍ POLYMERNÍ VLÁKNA

3.2.1. UHLÍKOVÁ VLÁKNA

3.2.1.1. VLASTNOSTI

Uhlíková vlákna jsou složená výhradně z uhlíkových atomů. Tato vlákna mají průměr 5 až 10 μm . Uhlíkové vlákno, v porovnání s lidským vlasem, je znázorněno na obr. č. 13. Velká pozornost je věnována těmto uhlíkovým vláknům, protože se vyznačují specifickými vlastnostmi, jako jsou vysoké hodnoty E-modulu (až 10^6 MPa) či pevností o hodnotě až 10 MPa. Materiály, připravené z těchto vláken, vynikají nízkým opotřebením a vyznačují se také rozměrovou stálostí. [8, 29, 30]



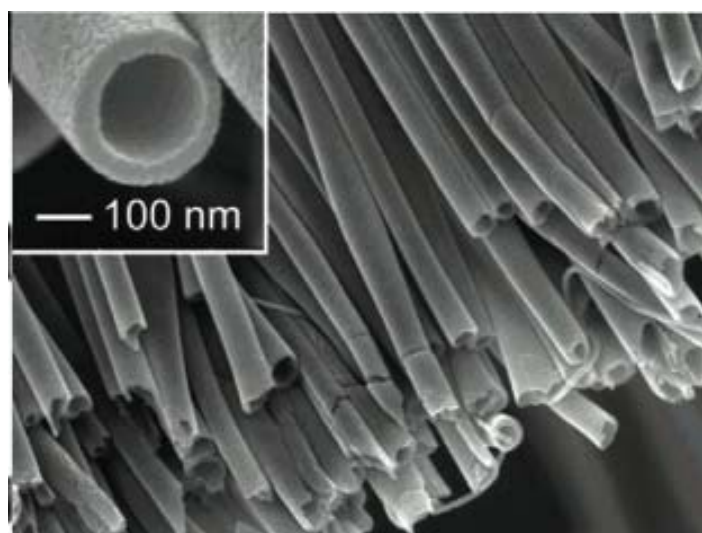
Obr. 13. Porovnání tloušťky lidského vlasu a uhlíkového vlákna, které má výrazně menší průměr [31]

Určitým omezením uhlíkového vlákna je jeho křehkost. V porovnání se skleněnými vlákny je prodloužení uhlíkového vlákna při přetržení menší. Uhlíková vlákna mají obecně menší průměry než vlákna skleněná. Je zajímavé, že uhlíková mají záporný koeficient délkové teplotní roztažnosti, což znamená, že při zvýšené teplotě se uhlíkové vlákno zkracuje. Je také dobře známé, že vyniká velmi malým elektrickým odporem v podélném směru ($1,9 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$). [6, 32]

3.2.1.2. DRUHY A APLIKACE UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

3.2.1.2.1. DUTÁ UHLÍKOVÁ VLÁKNA (CNT)

Dutá uhlíková vlákna jsou v současné době jedním z nejzajímavějších materiálů. Hlavní předností dutých uhlíkových vláken (CNT – carbon nanotubes) je fakt, že jsou výrazně lehčí (až o 40%) a zároveň mají pouze mírně sníženou pevnost v tahu ve srovnání s obyčejnými uhlíkovými vlákny. Dutá uhlíková vlákna se řadí mezi vlákna s větším průměrem (obvykle kolem 15 – 20 μm), viz obr. č. 14. Při výrobě dutých vláken se používají zvlákňovací trysky ve tvaru písmene C. [33]

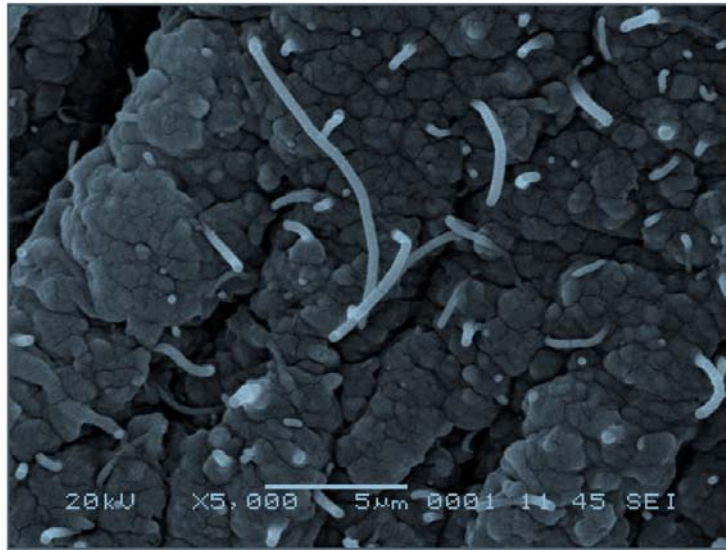


Obr. 14. Fotografie dutého uhlíkového vlákna [34]

Kompozit CNT / LLDPE

V loňském roce byly publikovány výsledky výzkumu zabývajícího se kompozitním materiálem složeným z LLDPE (linear low-density polyethylene – lineární nízkohustotní polyethylen; používá se hojně v obalovém průmyslu) a CNT (carbon nano tubes – uhlíkové nanotrubičky). [33] Bylo prokázáno, že toto spojení zlepšuje mechanické vlastnosti LLDPE, a proto je možné výsledný kompozitní materiál použít pro náročnější aplikace. Ukázalo se také, že ke zlepšení mechanických vlastností dochází přidáním již malého množství uhlíkových nanotrubiček do vláken LLDPE. Pokud byl přírůstek CNT do LLDPE 1 hm. %, došlo ke zvýšení pevnosti v tahu o 38%. Stejně tak pokud byl přírůstek CNT do LLDPE 0,3 hm. %, došlo ke

zvýšení tuhosti o 105%. Obr. č. 15 představuje distribuci uhlíkových nanotrubiček v LLDPE / CNT kompozitu. [33]



Obr. 15. Fotografie distribuce uhlíkových nanotrubiček v LLDPE / CNT vláknech [33]

Superplastické uhlíkové nanotrubičky

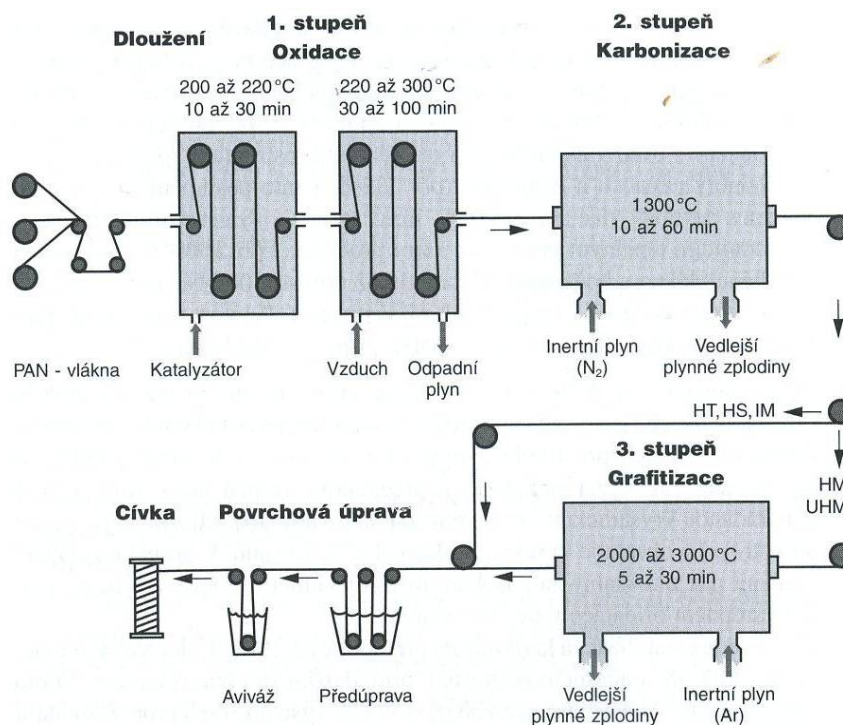
Při běžné teplotě je možno u jedinstěnných uhlíkových nanotrubic dosáhnout teoreticky prodloužení kolem 20%, v praxi se však dosahuje pouze kolem 6%. [35] Ve studii, otisknuté ve vysoce impaktovaném časopise Nature, však autoři popisují chování superplastických uhlíkových nanotrubic, které při zvýšené teplotě umožňují prodloužení až o 280%. Ukázalo se tak, že zmíněné superplastické uhlíkové nanotrubičky bude v budoucnosti možné použít jako zpevňující složku kompozitů používaných při vysokých teplotách. [35]

3.2.1.3. VÝROBA UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

VÝROBA UHLÍKOVÝCH VLÁKEN Z POLYAKRYLONITRILU

Nejčastěji se uhlíková vlákna (C-vlákna) vyrábějí z polyakrylonitrilu (PAN), viz obr. č. 16. Nejdříve polyakrylonitril podléhá dlužení a stabilizuje se zahříváním na teplotu 300 °C. Při této teplotě dochází k dehydrataci PAN a jeho přeměně na žebříčkový polymer. Dále prochází procesem oxidace za přítupu vzduchu a následně je při teplotě kolem 1300 °C v atmosféře inertního plynu (aby nedocházelo k hoření)

přeměněn na grafitickou strukturu. Takto vyráběný PAN dosahuje velmi dobré orientace vláken, což se odráží ve vysokých hodnotách E modulu (až 400 000 MPa) a pevnosti (více než 5000 MPa). [30]



Obr. 16. Nákres výroby uhlíkových vláken z PAN [36]

Výsledné uhlíkové vlákno je produkováno grafitizací (vytváření grafitové struktury) meziproductu při teplotách až 3000 °C v atmosféře argonu. Vlákno pak prochází povrchovou úpravou leptáním kyselinou dusičnou a po průchodu aviváží se namotává na cívku. [30]

VÝROBA UHLÍKOVÝCH VLÁKEN Z ROPNÝCH SMOL

Vysokopevnostní uhlíková vlákna se mohou vyrábět také z mezofázových smol, (odpadních látek, vznikajících při destilaci č. uhlí a ropy), což je levný a efektivní způsob výroby s výtěžkem až kolem 90 %. [8, 30]

V procesu výroby nejprve dochází k ohřevu ropných smol v kondenzační peci na teplotu 400 °C. Při této teplotě se tvoří ploché molekuly, které mají schopnost vytvářet vrstevnaté krystaly. Poté smoly procházejí karbonizační pecí, za teploty 1000 °C –

1400 °C, v inertní atmosféře dusíku a argonu. Posledním krokem při tomto způsobu výroby je grafitizace při teplotě až 3000 °C. [8, 30]

Vysokopevnostní uhlíková vlákna se mohou vyrábět i jinými metodami, nověji je lze připravovat například z fenol-aldehydových vláken. [32]

3.2.2. ARAMIDOVÁ VLÁKNA

3.2.2.1. VLASTNOSTI

Aramidová vlákna, vycházející ze struktury aramidu (zkratka sousloví *aromatický polyamid*), patří mezi polyamidy. Tyto látky vznikají napojením aromatického benzenového jádra na polyamidový řetězec. [32]

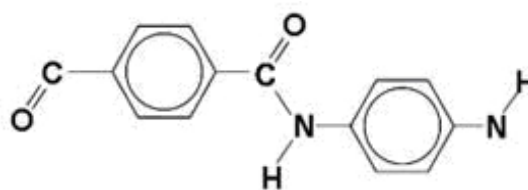
Mezi základní vlastnosti aramidových vláken patří vysoká pevnost a vysoký Youngův modul pružnosti. Jsou také odolné vůči oděru a rovněž dobře odolávají žáru a plamenům. Na druhé straně je ale pro ně typické, že při výrobě jsou těžko barvitelné. [37]

Nejpoužívanějšími vysokopevnostními aramidovými vlákny jsou Kevlar a Twaron, o nichž se zmiňuji v následujících kapitolách.

3.2.2.2. DRUHY A APLIKACE

3.2.2.2.1. KEVLAR (P ARAMID)

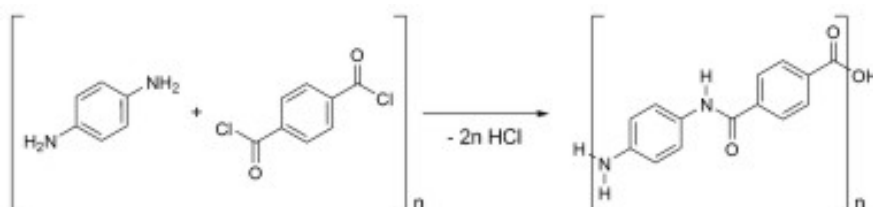
Dalším typem aramidových vláken je para-aramid neboli Kevlar, jehož chemická struktura je znázorněna na obr. č. 17. Kevlar byl vyvinut firmou DuPont v roce 1971, která jej také jako první začala vyrábět. Tento materiál se vyznačuje vysokou pevností, nízkou hustotou a dobrou tepelnou odolností. [37]



Kevlar

Obr. 17. Chemická struktura Kevlaru [38]

Kevlar se vyrábí kondenzací para-fenylenediaminu a tereftaloyl chloridu, jak ukazuje reakce na obr. č. 18. Při výrobě vlákna se postupuje metodou mokrého zvlákňování. Výsledné vlákno se rozpouští v N-metylpyrolidonu. Horká a viskózní kapalina prochází zvlákňovacím sítem za vzniku pevného vlákna, které se navíjí na bubny. [37, 39]



Obr. 18. Kondenzační reakce výroby Kevlaru [37]



Obr. 19. Rukavice vyrobené z Kevlaru [40]

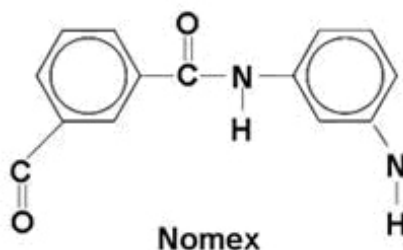
V praxi se můžeme setkat s několika druhy Kevlaru. Velmi často je používán Kevlar 49, který má největší pevnost v tahu ze všech typů Kevlaru. Používá se na zpevnění trupů a křídel letadel, raketoplánů, široce známé je i jeho použití na neprůstřelné vesty, helmy, ochranné a ohnivzdorné oděvy. Příklad použití je zobrazen na obr. č. 19. Tyto rukavice jsou až pětkrát odolnější vůči řezu než rukavice kožené. Také jsou velmi lehké a hodí se například pro práci s ostnatými rostlinami či všude tam, kde jsou ostré hrany. [40, 41] Krátká kevlarová vlákna se také používají jako výztuž termoplastů. [37]

Přes všechny pozitivní vlastnosti Kevlaru jsou zde i nevýhody použití tohoto materiálu. Jednou z nich je jeho nákladná výroba. Cenově náročné je především použití kyseliny sírové, která hraje esenciální roli při udržení ve vodě nerozpustného polymeru v roztoku během syntézy a zvlákňování polymeru. [37]

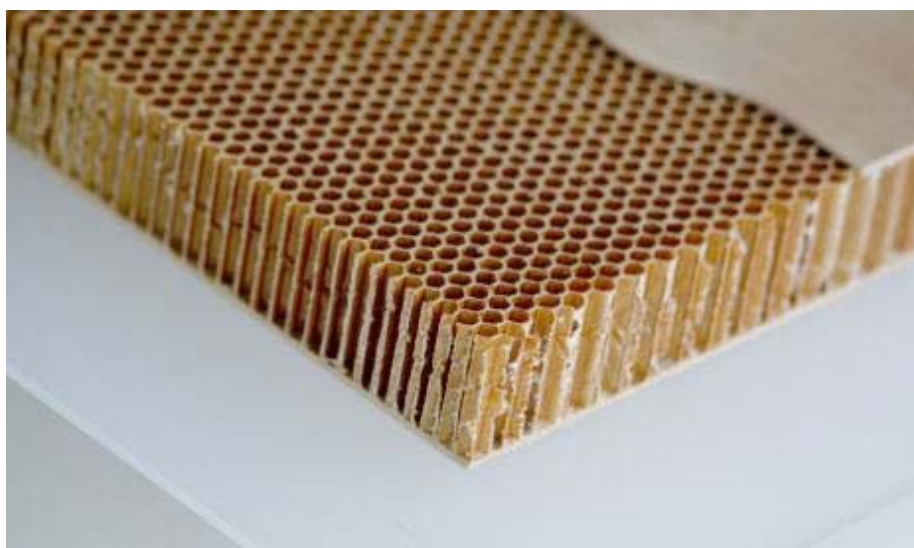
Je známa i další izomerní struktura aramidu, meta-aramid, který je známý pod obchodním názvem Nomex. Struktura meta-aramidu – viz obr. č. 20. Nomex má velmi dobrou tepelnou odolnost a odolnost proti oděru. Používá se pro oblečení, nářadí a zařízení, které musí vydržet intenzivní teplo. [42]

Na obr. č. 21 je zobrazen ultralehký panel z Nomexu, který je o celou polovinu lehčí, než srovnatelná deska z překližky. Zároveň toto uspořádání vyniká velkou tuhostí v ohybu. Tyto desky se například hojně používají, jako konstrukční materiál v námořním průmyslu. Určité problémy přináší, že materiál je dutý, což eliminuje možnost využívat šrouby. To lze vyřešit tím, že se některé šestiúhelníky vyplní pryskyřicí nebo se zde použije dřevěná vložka. [43]

Nomex má výrazně delší tepelnou trvanlivost ve srovnání s Kevlarem, a až třikrát větší tuhost než bavlna. Avšak na rozdíl od Kevlaru nemůže být zcela narovnan při procesu tvorby filamentů, a proto je méně pevný. [42, 43]



Obr. 20. Chemická struktura Nomexu [38]

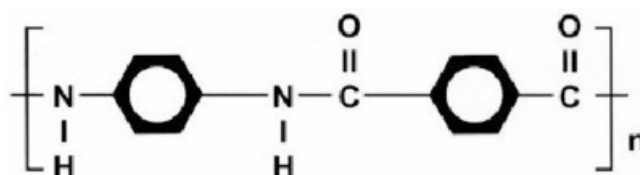


Obr. 21. Výrobek z Nomexu [43]

3.2.2.2.2. TWARON

Twaron je chemicky poly-parafenylen tereftalamid a jeho struktura je zachycena na obr. č. 22. [44]

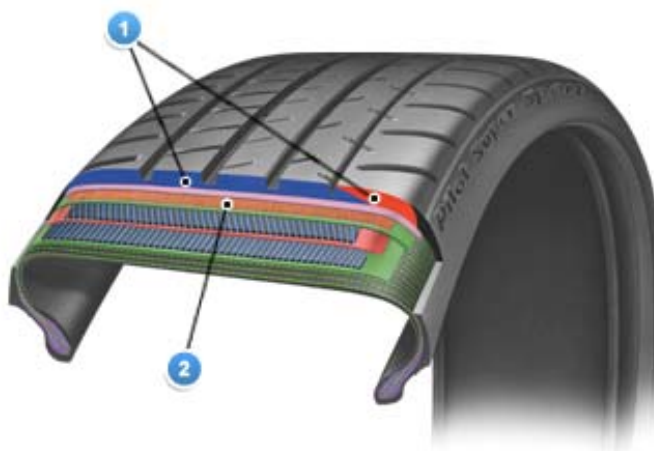
Speciální vlastnosti Twaronu se využívají díky jeho vysoké hodnotě modulu pružnosti, dobré teplotní stabilitě a zpracovatelnosti při vyšších teplotách, pevnosti a lehkosti. Tento materiál je pětikrát pevnější než ocel a svoji pevnost si zachovává i při velmi nízkých teplotách. [44]



Obr. 22. Chemická struktura Twaronu [44]

Twaron se využívá na startovací kabely, tepelně odolné výrobky, neprůstřelné vesty, šňůry nebo pneumatiky. Na obr. č. 23 je schéma pneumatiky obsahující tkaninu z Twaronu. Je zřejmé, že Twaron zajišťuje zpevnění pneumatiky a udržuje tak její optimální tvar. Dále také zajišťuje při vysokých rychlostech stabilitu a rovnoměrné opotřebení běhounu. [44, 45]

Při výrobě výrobků z Twaronu je nutná zvýšená opatrnost proti vniknutí nečistot, které by mohly způsobit významné snížení pevnosti materiálu. [44, 45]



Obr. 23. Pneumatika obsahující tkaninu z Twaronu [45]

3.2.3. POLYETHYLENOVÁ, POLYPROPYLENOVÁ VLÁKNA

3.2.3.1. DRUHY A APLIKACE

3.2.3.1.1. UHMW PE

UHMW PE, (ultra high molecular weight polyethylen – polyethylen s velmi vysokou molekulovou hmotností) je velice používaný materiál. Vyniká dobrou mechanickou odolností proti nárazu nebo proti praskání, kterou si zachovává i při nízkých teplotách. Jeho molekulová hmotnost se pohybuje mezi $3 \times 10^6 - 8 \times 10^6$ g mol⁻¹. [46]

Některé jeho vlastnosti jsou naprosto unikátní. UHMW PE je jedním z nejvíce oděruvzdorných plastů vůbec, což jej předurčuje k aplikacím v případech, kde je nutná odolnost proti opotřebení a nahrazuje tak v poslední době ocel. [46] Používá se jako výplň umělé jamky při transplantacích kyčelního kloubu. [47] Jiné aplikace UHMW PE zahrnují součásti strojů, namáhané třením, rybářské sítě a neprůstřelné vesty. [46, 48]

V praxi se též můžeme setkat s tzv. bateriovými separátory z UHMW PE, které prodlužují životnost baterií. [46, 49]

UHMW PE se vyrábí spojováním jednotlivých monomerních jednotek ethylenu. Průměrná velikost molekuly UHMW PE je 100 – 250 tisíc monomerů. [50]

3.2.3.1.2. DYNEEMA

Dyneema, je obchodní název pro polyethylen s extrémně dlouhým řetězcem s hodnotou molekulární hmotnosti mezi $2 \times 10^6 - 6 \times 10^6$ g mol⁻¹. U tak dlouhých řetězců dochází k efektnímu přenosu nákladu na nosný řetězec pomocí zesílení mezimolekulových interakcí. [50]

Dyneema má pevnost až 2,4 GPa, hustotu 0,97 kg/m³ a vyniká velkou houževnatostí. Používá se v automobilovém průmyslu, na neprůstřelné vesty, vybavení pro horolezce, rybářské šňůry a lana. [50]

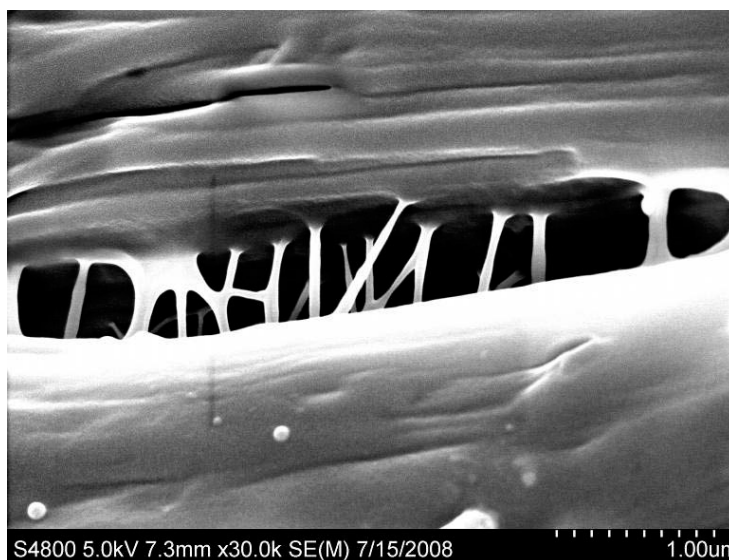
Oproti aramidům Dyneema neobsahuje dusík, a tak se při jejím hoření neuvolňují toxické plyny kyanovodík a oxid dusíku. Naopak nevýhodou je, že vlákna Dyneemy méně odolávají vyšším teplotám, a tak se nepoužívají v aplikacích nad 100 °C. [51]

3.2.3.1.3. INNEGRA S

Innega je vysokomodulové polypropylenové vlákno – high modulus polypropen fiber (HMPP), které je v současné době jedno z nejmodernějších vysokopevnostních vláken především díky nízké výrobní ceně a unikátním vlastnostem [52]

Výrobky z Innegry jsou velmi lehké a vyznačují se, podobně jako předchozí vysokopevnostní vlákna, vysokou tvrdostí a značnou tepelnou odolností – zmenšení objemu je pouze 0,8% při 100 °C, respektive 3% při 140°C. Innegra S se proto používá pro neprůstřelné vesty a helmy, pevná lana, lodě nebo součásti aut a letadel, díky čemuž tyto dopravní prostředky sníží spotřebu paliva. [53]

V praxi se velice často používá kompozitu složených z 50 % z uhlíkových a z 50 % vláken Innegry. Jak je patrné z obr. č. 24, vlákno Innegry bývá zpevněno sítí krátkých nanovláken, ovšem výrobce princip vzniku příčných vazeb neuvádí. [52]



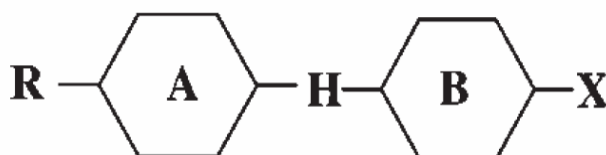
Obr. 24. Krátká nanovlákna zpevňující vlákno Innegry [52]

Kompozit Innegry S a Kevlaru se používá jako balistická ochrana proti střelám ve vojenských vozidlech. Innegra S je jediný typ polypropylenového (PP) vlákna, který má větší pevnost než beton, a poskytuje tak pro něj výbornou výztuž – lepší, než jiné modifikace PP. [54] Nevýhodou je obecně nižší pevnost než aramidová a UHMW PE vlákna. [52]

3.2.4. LCP (LIQUID CRYSTAL POLYMER)

3.2.4.1. VLASTNOSTI

Vlákna zhotovená z tohoto materiálu (polymer na bázi tekutých krystalů) se skládají z nejméně dvou typů aromatických polyesterů. Obecná chemická struktura monomeru LCP je zřejmá z obr. č. 25. Skupiny A a B reprezentují aromatické kruhy, které jsou vzájemně propojené vazbou se skupinou H. Písmeno R značí koncovou skupinu a X postranní skupinu monomeru LCP. Zajímavostí je, že některé LCP mají obdobnou strukturu jako biologická vlákna – např. šlachy. Vynikají tedy pevností v tahu. Z LCP vláken jsou vytvářeny materiály s obchodními názvy Ekonom, Vectran nebo Zenite. [55]



Obr. 25. Obecná struktura monomeru LCP [55]

3.2.4.2. DRUHY A APLIKACE

3.2.4.2.1. ZENITE

Mezi nejznámější LCP patří materiál zvaný Zenite, což je registrovaná značka firmy DuPont. Tento typ polymeru na bázi tekutých krystalů je snadno zpracovatelný a vyrábí se z něj i extrémně tenkostěnné výrobky. Pro komerční účely se využívá jeho vlastností skla, minerálu nebo jejich kombinace, což vede k zesílení materiálu Zenite. [56]

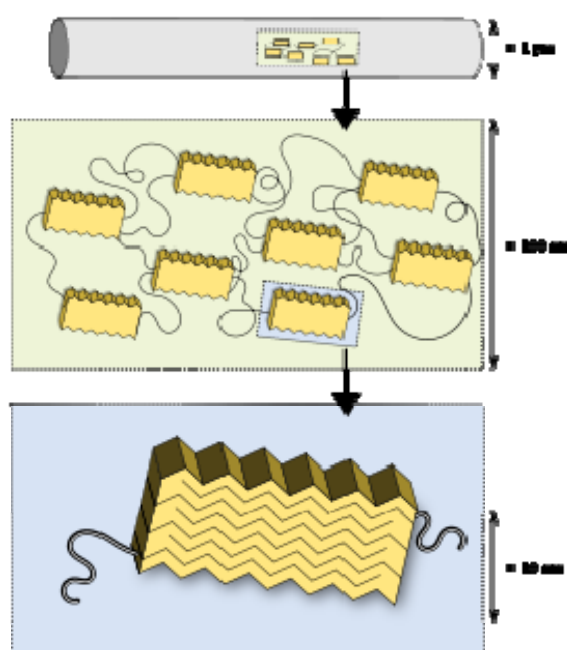
Zenite má nízký koeficient teplotní roztažnosti, nízké smrštění, elektroizolační schopnost a odolnost proti velmi vysokým teplotám. Díky této kombinaci vlastností se Zenite využívá v automobilovém, leteckém a elektrotechnickém průmyslu, na výrobu optických vláken a čidel, či jako součást domácích spotřebičů, u kterých je potřebná vysoká tepelná odolnost. [56]

3.2.5. BIOSTEEL

3.2.5.1. VLASTNOSTI

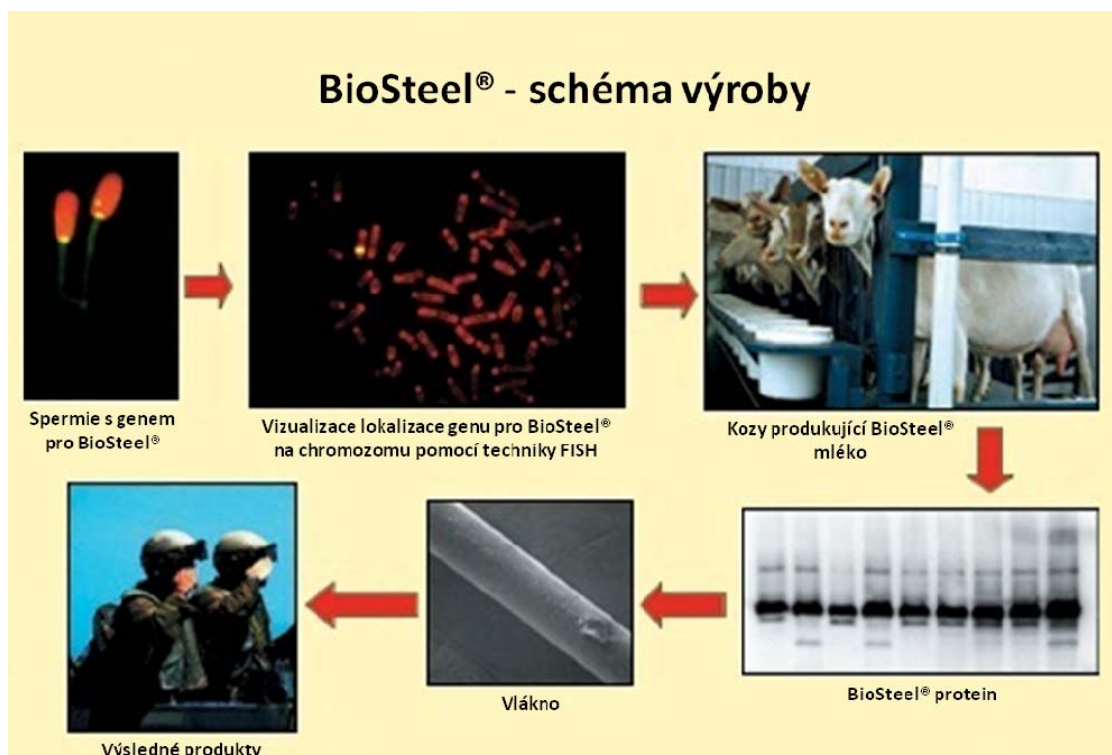
BioSteel je název pro materiál, který využívá bílkovinu pavoučího vlákna (viz obr. č. 28). Tato bílkovina je produkována transgenními kozami. Geneticky modifikované kozy mají do dědičné informace vložený gen pro tvorbu bílkoviny pavoučího vlákna, která je specificky syntetizována pouze v buňkách mléčné žlázy koz, a tím dochází k jejímu vylučování v kozím mléce. Z mléka se pak tato bílkovina vysráží okyselením. Poté je bílkovina sprádaná do vláken. Tato vlákna mají široké využití v různých vědeckých odvětvích. Schéma výroby Biosteelu je znázorněno na obr. č. 27. [57, 58]

Na obr. č. 26 je znázorněna vnitřní struktura vysokopevnostního pavoučího vlákna. [32] Právě tato struktura je původcem jeho unikátních vlastností: vysoké pevnosti a pružnosti.

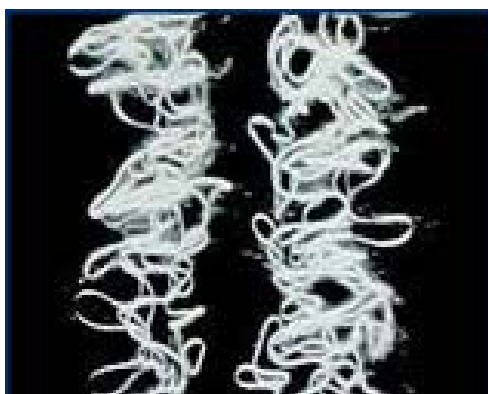


Obr. 26. Vnitřní struktura vlákna BioSteelu [32]

Důležitou vlastností BioSteelu je jeho biologická odbouratelnost. Tím, že se materiál rozkládá působením půdních bakterií a vody, může nahradit jiné materiály, a být tak šetrný k životnímu prostředí. [58] Další biodegradabilní materiály jsou zmíněny v kapitole 3.3 Biodegradabilní polymerní vlákna.



Obr. 27. Výroba Biosteelu [59]



Obr. 28. Pavoučí vlákno [60]

3.2.5.2. APLIKACE

BioSteel má podobné vlastnosti jako kevlar, ale je téměř třikrát pevnější. Proto se plánuje jeho využití pro odolnější neprůstřelné vesty, helmy anebo na výrobu lan, zachytávajících letadla při přistání na letadlových lodích. [57]

V neposlední řadě se očekává využití tohoto materiálu v medicíně. Nejenže je BioSteel velmi dobře snášen lidským organismem, ale ukázalo se, že se za několik měsíců úplně vstřebá, což je důvod, proč se také používá na výrobu chirurgických nití. [57]

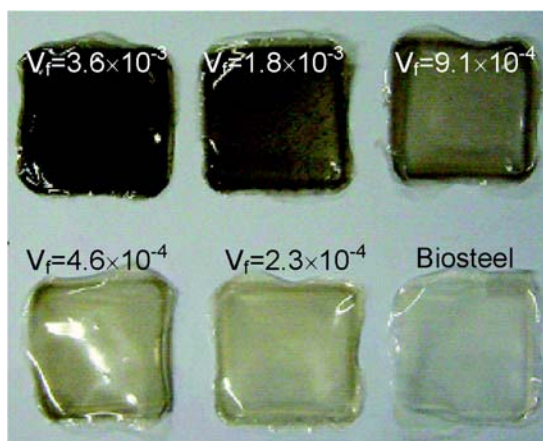
Kompozit pavoučí vlákno / Al, Ti, Zn

Při zkoumání modifikací pavoučího vlákna bylo zjištěno, že je výhodné do struktury proteinu zakomponovat atomy hliníku, titanu a zinku, což vede ke zvýšení pevnosti výsledného materiálu. Bylo také prokázáno, že atomy kovů nejsou jen na povrchu vláken, ale zakomponují se do vnitřní struktury proteinu, což má mnohem větší vliv na pevnost, než když jsou vlákna těmito kovy pouze potaženy. Důvodem pro vyšší pevnost materiálu je nahrazení vodíkových vazeb mezi vlákny silnějšími vazbami kov – protein. [61]

Jak uvádí F. Vollrath z Oxfordské univerzity, pavoučí vlákno je v tomto zkoumání modelovým příkladem. V poslední době je velká pozornost věnována výzkumu a komerčnímu využití spojení atomů kovů s vlákny, která pocházejí od bource morušového. [61]

Kompozit BioSteel / nanotrubičky

Další modifikací pavoučího vlákna je kompozit s nanotrubičkami. Tyto krácená nanovlákna jsou přibližně 1 μ m dlouhá. Při výrobě je potřeba, aby jak Biosteel, tak nanotrubičky byly rozpustné v totožném rozpouštědle. V tomto případě bylo použito 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-propanolu. Toto vylepšení přináší ještě pevnější pavoučí vlákno. Přenos tlaku na hmotu je převeden z polymerní matrice na nanotrubičky. Obr. č. 29 demonstruje objemový podíl nanotrubiček v kompozitní fólii Biosteelu v rozmezí od 0 – 3,6 $\cdot 10^{-3}$. Studie také prokázala, že přidavek nanotrubiček do polymeru mírně snižuje tažnost výsledného kompozitu. [62]



Obr. 29. Objemový podíl nanotrubiček v kompozitní fólii Biosteelu od 0 – 3,6 $\cdot 10^{-3}$ [62]

3.3. BIODEGRADABILNÍ POLYMERNÍ VLÁKNA

3.3.1. VLASTNOSTI

Některé materiály jsou schopny podléhat vlivům prostředí chemických látek v organismu. Takové schopnosti říkáme biodegradabilita materiálu. [65]

Biodegradabilní polymerní vlákna v současné době nacházejí uplatnění především v tkáňovém inženýrství, např. jako podpůrná lešení pro růst živých buněk. [65] Jejich aplikaci lze také očekávat v oblasti transportu léčiv v organismu jako jako cytostatika, antibiotika nebo hormony. [67]

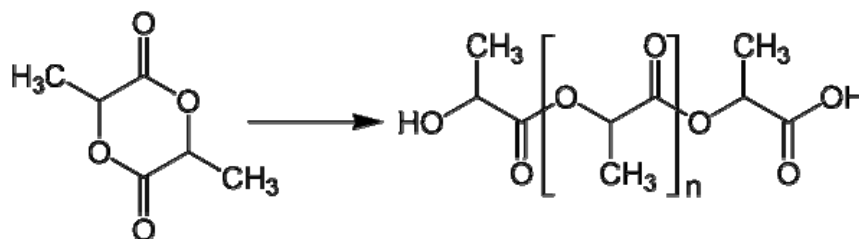
3.3.2. DRUHY A APLIKACE

Již za 2. světové války bylo pozorováno, že řada letců, zraněná plastovými úlomky z krytu pilotní kabiny (tehdy vyráběné z PMMA – polymethylmetakrylátu), netrpí chronickou odmítavou reakcí imunitního systému vůči těmto úlomkům. Tento poznatek vedl k použití PMMA na náhrady kostí a očních rohovek. [63]

PLA lešení (scaffold)

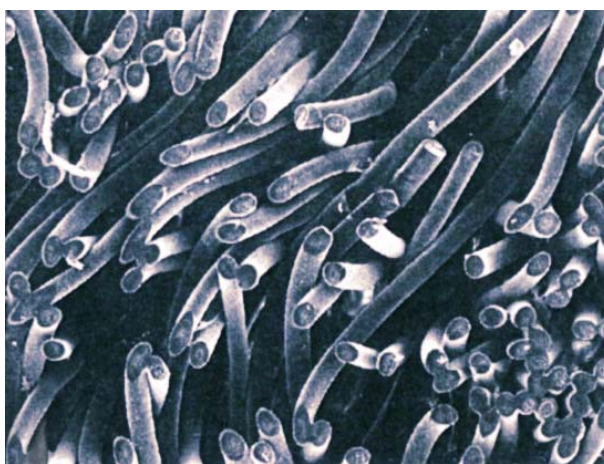
Zásadní oblast v použití biodegradabilních vláken je tkáňové inženýrství. V současné době je popisována kombinace polymerní 3D podpůrné matrice (v literatuře se používá termín scaffold = lešení) a živých buněk od pacienta, které zajišťují biologickou funkci náhrady, či postiženého místa. [63]

Takovéto materiály musí být snadno zpracovatelné, musí mít mechanické vlastnosti, které odpovídají dané aplikaci, musí být dlouhodobě stabilní, netoxické, a také dobře snášenlivé. Někdy je žádoucí, aby se materiál ve tkáni zcela vstřebal. V současné době je například zkoumán biodegradabilní materiál na bázi polylaktidu (polylactic acid – PLA), který se rozpadá na kyselinu mléčnou, se kterou si organismus umí přirozeně poradit. Syntézu polylaktidu ukazuje obr. č. 30. [63]



Obr. 30. Katalytická a termolytická polymerizace otevřením laktidového kruhu [64]

Jedna z možností jak umožnit buňkám růst na polymerní matrici je použití kopolymeru na bázi PLA a polyethylenoxidu. Tato kombinace poskytuje povrch s minimální nespecifickou adsorpcí proteinů z krve a současně dovoluje umístit peptidové sekvence pro interakce s buňkami. Na obr. č. 31 je průřez 3D matricí na bázi vláken PLA. [63]



Obr. 31. Průřez 3D matricí na bázi vláken PLA [63]

V další části článku se autorka zabývá v praxi používaných cévních štěpů a náhrad z materiálu zvaného Darcon, což je polyethyltereftalár (PET), který je zpracováván ve formě vláken, z nichž jsou posléze upleteny trubice, které se používají při rekonstrukci cév s větším průměrem. Cévní náhrady jsou zevnitř potaženy kolagenem nebo albuminem a. Tyto látky snižují riziko vzniku trombu na stěnách. [63]

4. BUDOUCNOST POLYMERNÍCH VLÁKEN

Budoucnost polymerních vláken závisí především na eliminaci nevýhod jejich použití (zejména finanční nákladnost výroby) a optimalizaci výrobních procesů pro dosažení co nejlepších vlastností daného typu vlákna. Aby výsledný produkt splnil náročné požadavky zákazníků a poptávku na trhu, je kritické skloubit parametry týkající se využití obnovitelných zdrojů, vyřešení problému s odpadem, transport, cena, zdravotní rizika, biologická odbouratelnost a další. [70]

Například nanovlákna jsou široce používaným materiálem již v současné době. Do budoucna se však počítá s rozšířením jeho uplatnění v mnoha dalších odvětvích. Očekávaným trendem je nárůst využití produktů z nanovláken v letecké výrobě. [31] Také u BioSteelu se očekává jeho vzrůstající využití v budoucnosti. Na rozdíl od některých jiných polymerních vláken je totiž BioSteel velice šetrný k životnímu prostředí. V poslední době je také hojně diskutováno uplatnění BioSteelu v medicíně či v kosmickém inženýrství. [57, 58]

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vypracovat přehled v současnosti nejvíce používaných polymerních vláken a zaměřit se na jejich vlastnosti a praktické využití.

Pro své specifické vlastnosti jsou polymerní vlákna a kompozitní polymerní vlákna často používána na výrobu vysoce namáhaných produktů. Mezi, v současné době nejpoužívanější a nejkvalitnější materiály, vyrobené z polymerních vláken, patří polymerní nanovlákna – např. zmiňované nanovláknenné membrány, které mají velký potenciál pro odsolování geotermální vody, nebo vlákna s obchodními názvy Kevlar, Twaron, Dyneema, Innegra S, Zenite, které nacházejí mnohá uplatnění ve speciálních vysokopevnostních aplikacích.

Další perspektivní oblastí v oblasti výzkumu polymerních vláken je optimalizace procesů při výrobě nanovláken, zejména jednoho z nejpoužívanějších, procesu elektrostatického zvlákňování. Modifikace postupů metod elektrostatického zvlákňování v budoucnosti přinese vysokopevnostní výrobky či efektivnější použití membrán v systémech úpravy vody nebo filtraci vzduchu. [18]

Zvláštní pozornost je dnes také věnována materiálu s názvem BioSteel, který vyniká jednak svými mechanickými vlastnostmi, ale také svou šetrností k životnímu prostředí a možností budoucího využití v medicíně. V lékařství jsou již dnes využívány některé biodegradovatelné materiály, které se používají jako náhrady tkání, obvazy na rány a podpůrné systémy pro růst buněk.

Z uvedeného přehledu v současnosti nejvyužívanějších polymerních vláken je patrné, že tyto materiály hrají důležitou roli v našem každodenním životě. I přes nesmírný pokrok ve výrobě a modifikaci polymerních vláken v posledních letech je však zřejmé že další vlna intenzivního výzkumu je nezbytná pro eliminaci některých nežádoucích vlastností dnešních materiálů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SPERLING, L. H. Introduction to Physical Polymer Science. 4th. edition, Wiley-Interscience, 2006
- [2] Vybrané kapitoly z textil. vláken – Syntetická vlákna [cit. 2011-08-10] [online] Dostupné z www: http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/synteticka_vlakna.pdf
- [3] RAVVE, A.: Principles of Polymer Chemistry. 2nd edition, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000
- [4] Vlastnost vláken – molekulová a nemolekulová struktura polymerů, strukturní modely [cit. 2011-08-11] [online] Dostupné z www: <http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/VlastnostiVlaken-prednaska1.pdf>
- [5] Textilní vlákna – vlastnosti vláken [cit. 2011-08-10] [online] Dostupné z www: http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20061005/4-vlastnosti_vlaken.pdf
- [6] SODOMKA, L., Vlákna, délkové a plošné textilie. [cit. 2011-05-28] [online] Dostupné z www: <http://lubomirsodomka.sweb.cz/lectures8.html>
- [7] KASKA, Stanislav. *Měření modulu pružnosti* [cit. 2011-08-02] [online], r. v. 2005. 6 s. Protokol z fyzikálního praktika. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Dostupné z www: <http://mvt.ic.cz/jedna/zfm-mt/zfm-mt-05.pdf>.
- [8] KUDLÁČEK, L.; BLAŽEK, J.; LAURUSKÝ, V. *Technologie chemických vláken*. Praha : SNTL, 1986. 416 s.
- [9] Chemické výpočty – hustota. [cit. 2011-08-06] [online] Dostupné z www: <http://chemicke-vypocty.cz/Hustota.html>
- [10] Vlastnosti vláken – tepelné vlastnosti vláken [2011-08-11] [online] Dostupné z www: <http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/VlastnostiVlaken-prednaska3.pdf>

- [11] Výroba chemických vláken. [cit. 2011-08-07] [online] Dostupné z [www: http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20061005/5-vyroba_chemicky_vlaken_1.pdf](http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20061005/5-vyroba_chemicky_vlaken_1.pdf)
- [12] Textilní vlákna – učební text [2011-08-11] [online] Dostupné z [www: https://is.muni.cz/auth/of/1431/C5985/jaro2009/Textilni_vlakna-ucebni_text.pdf](https://is.muni.cz/auth/of/1431/C5985/jaro2009/Textilni_vlakna-ucebni_text.pdf)
- [13] MIKLAS, Z.; VAVÁČEK, M. *Polyesterová vlákna*. Praha : SNTL, 1966. 123 s.
- [14] RUTLEDGE, G. C.; LI, Y.; FRIDRIKH, S.; WARNER, S. B., KALAYCI, V. E.; PATRA, P. Electrostatic spinning and properties of ultrafine fibers.
- [15] RŮŽIČKOVÁ, Jana. *Elektrostatické zvlákňování nanovláken*. 2. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 55-031-06.
- [16] Nanovlákná v prostorové akustice II. [cit. 2012-05-10] [online] Dostupné z [www: http://www.imaterialy.cz/Materialy/Nanovlakna-vnbspprostorove-akustice-II.html](http://www.imaterialy.cz/Materialy/Nanovlakna-vnbspprostorove-akustice-II.html)
- [17] Nanofibrous materials for tissue engineering. [cit. 2012-05-19] [online] Dostupné z [www: http://www.centropede.com/UKSB2006/ePoster/background.html](http://www.centropede.com/UKSB2006/ePoster/background.html)
- [18] RAMAKRISHNA S., TEO W. E., TENG L., SINGH G., BERHATE R. S., RAJAN J., PLIZSKA D., KAUR S., (2009) Electrospinning – What Is New? *Nanofibers For The 3rd Millenium – Nano For Life* (March 11th and 12th, 2009): 9-13
- [19] Kaleidoskop – věda a technika. Využití nanospideru. [cit. 2012-05-07] [online] Dostupné z [www: http://www.radio.cz/cz/rubrika/kaleidoskop/nas-host-dnes-uz-omoznostech-vyuziti-nanospideru-jen-nespekulujeme-rika-profesor-oldrich-jirsak](http://www.radio.cz/cz/rubrika/kaleidoskop/nas-host-dnes-uz-omoznostech-vyuziti-nanospideru-jen-nespekulujeme-rika-profesor-oldrich-jirsak)
- [20] JIRSÁK, O.; RŮŽIČKOVÁ, J.; LUKÁŠ, D. Production of properties of polymeric nanofibres, In: NANO 03

- [21] Nanospider technology. [cit. 2012-05-07] [online] Dostupné z www:
http://www.ft.tul.cz/depart/knt/web/index.php?option=com_content&task=view&id=44&Itemid=44
- [22] Nanofiber production. [cit. 2012-05-07] [online] Dostupné z www:
<http://www.schaefer-tec.com/en/germany/products/nanofiber-production/elmarco.html>
- [23] PETRÁŠ, D.; KIMMER, D.; SOUKUP, K.; KLUSOŇ, P. Bezpečná nanovlákná. *Chemické listy* 2009, 103, s. 1009–1016.
- [24] LUBASOVÁ, D.; MARTINOVÁ, L. Mechanismus tvorby porézních nanovláken z kaprolaktonu připravených elektrostatickým zvláknováním. *Technická univerzita v Liberci, Katedra netkaných textilií, 2009*
- [25] JAAFAR, S.; SARBATLY, R. Geothermal Water Desalination by using Nanofiber Membrane. *International Conference on Chemical, Environmental and Biological Sciences. Penang, Malaysia, 2012.*
- [26] METAXA, Z. S.; KONSTA-GDOUTOS, M. S. Mechanical Properties and Nanostructure of Cement-Based Materials Reinforced with Carbon Nanofibers and Polyvinyl Alcohol (PVA) Microfibers.
- [27] SELVAKUMAR, N.; AZHAGURAJAN, A. Flame-retardant fabric systems based on electrospun polyamide/boric acid nanocomposite fibers. *Journal of applied polymer science*. 4/2012. DOI: 10.1002/app.36640.
- [28] Nanotrubičky novým zázračným hnojivem? [cit. 2012-05-10] [online] Dostupné z www:
http://www.osel.cz/index.php?obsah=6&akce=showall&clanek=4693&id_c=106465
- [29] WADSWORTH, Larry C. Carbon fibers. *Materials Science & Engineering* . 2004, s. 554. [cit. 2012-05-05] [online] Dostupné z www:
<http://www.engr.utk.edu/mse/Textiles/CARBON%20FIBERS.htm>

- [31] Carbon Fiber. In What is carbon fiber? [online]. St. Louis : Zoltek Corporation, 2010 [cit. 2010-11-30]. Dostupné z www: <http://www.zoltek.com/carbonfiber/>
- [32] Vlákna pro kompozity [cit. 2011-03-27] [online] Dostupné z www: <http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [33] MEZGHANI, Khaled; FAROOQUI, Mohammed. Influence of Carbon Nanotube (CNT) on the mechanical properties of LLDPE / CNT nanocomposite fibers. *Materials Letters*. 2011.
- [34] FENGYU, L.; ZHAO, Y. Core-Shell Nanofibers: Nano Channel and Capsule by Coaxial Electrospinning. ISSN 978-953-7619-86-2. DOI: 10.5772/8166
- [35] HUANG, J. Y.; CHEN, S.; WANG, Z. Q. Superplastic carbon nanotubes. *Nature*. 2006, 439, s. 281.
- [36] GOTTFRIED; EHRENSTEIN, W. *Polymerní kompozitní materiály*, Praha: Scientia, 2006
- [37] Specifikace materiálu: Kevlar. [cit. 2011-04-18] [online] Dostupné z www: http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_kevlar.aspx
- [38] Overall, racing firesuit. [cit. 2012-04-24] [online] Dostupné z www: http://fl-dictionary.110mb.com/racing_firesuit.html
- [39] Explain that stuff – Kevlar. [cit. 2011-08-11]. [online] Dostupné z www: <http://www.explainthatstuff.com/kevlar.html>
- [40] Kevlar gloves. [cit. 2012-04-24] [online] Dostupné z www: <http://www.anniesmagicgarden.com/product.php?productid=18049>
- [41] Kevlar. [cit. 2011-03-27] [online] Dostupné z www: http://www2.dupont.com/Czech_Republic_Country_Site/cs_CZ/Products_and_Services/Products/kevlar.html

- [42] Nomex. [cit. 2011-03-26] [online] Dostupné z www: http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_nomex.aspx
- [43] Architype source. [cit. 2012-04-24] [online] Dostupné z www: <http://www.architypesource.com/materials/562-nomex>
- [44] Twaron. [cit. 2011-04-18] [online] Dostupné z www: http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_twaron.aspx
- [45] Ultra-high performance sport. [cit. 2012-04-24] [online] Dostupné z www: <http://michelinman.com/tire-selector/category/ultra-high-performance-sport/pilot-super-sport/tire-details>
- [46] WANG, L. C.; HARVEY, M. K. Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMW-PE) and its application in microporous separators for lead/acid batteries. *Journal of Power Sources*. 1998, 73, s. 74-77.
- [47] JANÍČEK, P. aj. *Ortopedie*. Brno: Masarykova univerzita, 2001. 124 s.
- [48] UltraHigh Molecular Weight Polyethylene. [cit. 2011-05-11] [online] Dostupné z www: <http://www.ticona.com/products/uhmw-pe>
- [49] Anorganická nanovlákná pro baterie, palivové i solární články [cit. 2011-08-11] [online] Dostupné z www: <http://scienceworld.cz/aktuality/anorganicka-nanovlakna-pro-baterie-palivove-i-solarni-clanky-6225>
- [50] Dyneema. [cit. 2011-04-19] [online] Dostupné z www: http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_dyneema.aspx
- [51] PTÁČEK, M., bakalářská práce. *Balistická ochrana pracovníka Průmyslu komerční bezpečnosti*, UTB, FT, vedoucí B. P. Z. Maliník, 2007

- [52] Innegra S. High performance fiber. [cit. 2011-04-21] [online] Dostupné z www: http://www.innegrity.com/mydocuments/innegra_s_high_performance_fiber_presentation_2010.pdf
- [53] Innegra S Product Information Sheet [cit. 2011-08-06] [online] Dostupné z www: <http://www.innegrity.com/innegra-s.php>
- [54] Innegra S. [cit. 2011-05-11] [online] Dostupné z www: <http://www.innegrity.com/applications.php>
- [55] WANG, X.; ZHOU, Q. *Liquid Crystalline Polymers*. World Publishing, 2004. 388 s.
- [56] Zenite LCP Liquid Crystal Polymer [cit. 2011-08-07] [online] Dostupné z www: http://www2.dupont.com/Plastics/en_US/Products/Zenite/Zenite.html
- [57] PETR, J., Transgenní zvířata. [cit. 2011-05-12] [online] Dostupné z www: www.osel.cz/soubory/kabinet/463/cd-petr3.pdf
- [58] NETRAVALI, Anil N.; CHABBA, Shitij. Composites get greener. *Materials today : Review feature*. 2003, 4, s. 22-29.
- [59] Biosteel protein expression. [cit. 2011-08-07] [online] Dostupné z www: <http://docinthemachine.com/wordpress/wp-content/uploads/2006/10/biosteel-all.jpg>
- [60] All about silk. [cit. 2011-05-25] [online] Dostupné z www: <http://www.spiderroom.info/allaboutsilk.html#>
- [61] Metal toughens up spider silk. [cit. 2011-08-05] [online] Dostupné z www: <http://www.rsc.org/chemistryworld/News/2009/April/23040903.asp>
- [62] BLOND, David; MCCARTHY, Denis N.; BLAU, Werner J. Toughening of Artificial Silk by Incorporation of Carbon Nanotubes. *Biomacromolecules*. 2007, 8, s. 3973-3976.

[63] TŘESOHLAVÁ, Eliška. *Makromolekuly pro bioaplikace a lékařství: Polymerní biomateriály pro regenerativní medicínu*. Ústav makromolekulární chemie Akademie věd ČR, 2011. ISBN 978-80-85009-65-1.

[64] PLA synthesis. [cit. 2012-04-11] [online] Dostupné z www: <http://www.bio-plus.cn/en/html/hangyehishi/PLAzhishi/2010/1102/39.html>

[65] PARKÁN, M. *Syntetické polymery pro využití v biomedicíálních aplikacích – využití při léčbě chronických ran*. Zlín, 2011. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.

[66] JIRSÁK, O.; LUKÁŠ, D.; SANETERNÍK, F.; MARTINOVÁ, L.; CHALOUPEK, J.; RŮŽIČKOVÁ, J.; KOŠŤÁKOVÁ, E.; HRŮZA, J.: *Výroba a vlastnosti nanovláken*. Liberec. Technical university of Liberec.

[67] ŠVORČÍK, V. [cit. 2012-05-20] [online] Dostupné z www: <http://www.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>

[68] PETŘÍK, S., MALÝ, M. Production of nozzle-less electrospinning nanofiber technology. [cit. 2012-05-20] [online] Dostupné z www: <http://www.elmarco.cz/upload/soubory/dokumenty/66-1-1-mrs-fall-boston-09.pdf>

[69] HUANG, Z.; ZHANG, Y. Z.; KOTAKI, M.; RAMARAKRISHNA, S.: A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites, *Composites science and technology*, vol. 63, Issue 15, 11 / 2003, str. 2223-2253.

[70] SHARMA, V. P.; AGARWAL, V.; UMAR, S; SINGH, A. K. *Polymer Composites Sustainability: Environmental Perspective, Future Trends and Minimization of Health Risk*. Lucknow, India, 2011. Indian Institute of Toxicology Research.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

C-vlákno	uhlíkové vlákno
CNT	carbon nanotubes (uhlíkové nanotrubičky)
HMPP	high modulus polypropen (vysoko-modulový polypropylen)
LCP	liquid crystal polymer
LLDPE	linear low-density polyethylene (lineární nízkohustotní polyethylen)
PAN	polyakrylonitril
PET	polyethylen tereftalát
PLA	polylactic acid
PMMA	polymethylmetakrylát
PP	polypropylen
PVDF	polyvinylidenfluorid
UHMWPE	ultra-high molecular weight polyethylene (polyethylen s velmi vysokou molekulovou hmotností)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Rozdělení monomerů podle počtu funkčních vazeb.....	12
Obr. 2. Přehled tvarů polymerních molekul.....	12
Obr. 3. Molekulové hm. stejného polymeru, pocházejícího ze zdrojů A a B.....	17
Obr. 4. Schéma tavného zvlákňování.....	20
Obr. 5. Schéma suchého zvlákňování.....	21
Obr. 6. Schéma procesu mokrého zvlákňování.....	22
Obr. 7. Schéma elektrostatického zvlákňování.....	23
Obr. 8. Vlákná tvořená metodou nanospider.....	24
Obr. 9. PAN nanovlákná.....	25
Obr. 10. Schéma principu fungování membrány filtrující vodu	28
Obr. 11. Snímek zvukově pohltivého materiálu z nanovláknenné vrstvy nanosené na vláknennou netkanou textilií.....	29
Obr. 12. Lomová plocha betonového kompozitu vyztuženého PVA nanovláknem	30
Obr. 13. Porovnání tloušťky lidského vlasu a uhlíkového vlákna.....	31
Obr. 14. Fotografie dutého uhlíkového vlákna	32
Obr. 15. Fotografie distribuce uhlíkových nanotrubiček v LLDPE/CNT vláknech.....	33
Obr. 16. Schéma výroby uhlíkových vláken z PAN.....	34
Obr. 17. Chemická struktura Kevlaru.....	35
Obr. 18. Kondenzační reakce výroby Kevlaru	36
Obr. 19. Rukavice vyrobené z Kevlaru.....	36
Obr. 20 Chemická struktura Nomexu.....	37
Obr. 21. Výrobek z Nomexu.....	37
Obr. 22. Chemická struktura Twaronu.....	38
Obr. 23. Pneumatika obsahující tkaninu z Twaronu.....	38
Obr. 24. Krátká nanovlákná zpevňující vlákno Innegry.....	40
Obr. 25. Obecná struktura monomeru LCP.....	41
Obr. 26. Vnitřní struktura vlákna BioSteelu.....	42
Obr. 27. Výroba BioSteelu.....	43
Obr. 28. Pavoučí vlákno.....	43
Obr. 29. Objemový podíl nanotrubiček v kompozitní fólii Biosteelu.....	44
Obr. 30. Katalytická a termolytická polymerizace otevřením laktidového kruhu	46
Obr. 31. Průřez 3D maticí na bázi vláken PLA.....	46

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Energie typů vazeb v polymerních vláknech [$eV = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$].....	13
Tab. 2. Systémy zvlákňování za sucha a za mokra.....	21