

VLIV LEHČENÉ STRUKTURY NA ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ S ELEKTROVODIVÝMI PLNIVY

MICHAELA PELÍŠKOVÁ a PETR SÁHA

Centrum polymerních systémů, Fakulta technologická,
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, nám. T. G. Masaryka
5555, 760 01 Zlín
peliskova@ft.utb.cz

Došlo 17.10.11, přepracováno 3.1.12, přijato 19.3.12.

Klíčová slova: polymerní kompozit, lehčený polymerní materiál, násobná perkolační struktura, elektrické vlastnosti

Obsah

1. Úvod
2. Fázově separovaná perkolační struktura elektrovedivých polymerních kompozitů
3. Lehčené polymerní kompozity s elektrovedivými plnivými
 - 3.1. Struktura
 - 3.2. Elektrická vodivost
4. Diskuse a závěr

1. Úvod

Polymerní kompozity poskytují široké spektrum kombinací, jimiž lze vytvářet specifické materiály v závislosti na aktuálních trendech výzkumu a vývoje. Jsou to heterogenní materiály tvořené nejméně dvěma fázemi, obvykle rozdílného chemického složení, které se liší fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Polymerní fáze má funkci pojivové matrice. Sekundární fáze, obvykle nespojitá, tvořená částicemi různého charakteru, je nazývána plnivem.

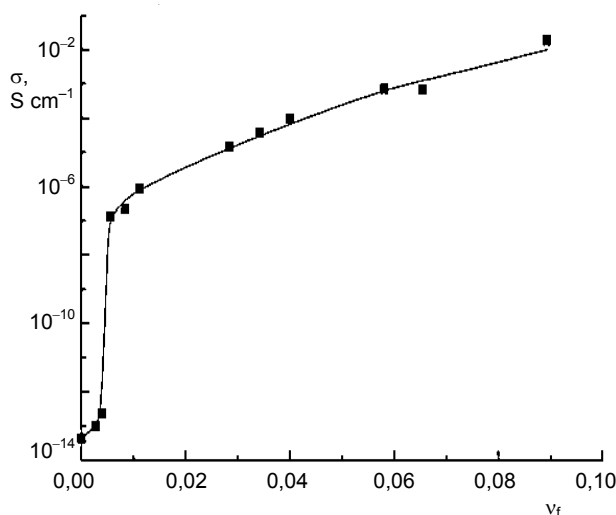
Z hlediska elektrické vodivosti spadá většina polymerních materiálů do kategorie nevedičů, klasifikovaných jako materiály, jejichž měrná elektrická vodivost (konduktivita) je menší než 10^{-12} S cm⁻¹ (cit.¹). Integrací elektrovedivého plniva do polymerní matrice za určitých podmínek vznikne elektrovedivý polymerní systém. Z elektrovedivých plniv se kromě kovových prášků nejčastěji používají plniva na bázi různých modifikací uhlíku, jako jsou částice grafitu a další přechodové formy alotropů uhlíku, uhlíkové saze, fullereny, uhlíkové nanotrubičky či grafenové nanodesičky^{2,3}. Možnou alternativou vodivých plniv jsou rovněž vodivé polymery (polyanilin, polypyrol)^{4,5}.

Elektrická vodivost polymerních kompozitů závisí na řadě faktorů jako např. na elektrických vlastnostech jednotlivých komponentů, koncentraci a vlastnostech plniva, vlastnostech mezifázového rozhraní nebo tepelných či mechanických vlastnostech matrice⁶. Mechanismus vodi-

vosti elektrovedivých polymerních kompozitů (EPK) je nejčastěji popisován perkolační teorií^{7,8}. Podle této teorie platí pro vodivost v blízkosti perkolačního prahu vztah:

$$\sigma(v) \propto (v - v_c)^t$$

kde v_c je kritický objemový zlomek plniva, t je kritický exponent, $\sigma(v)$ značí vodivost kompozitu a v je objemový zlomek plniva⁹⁻¹⁰. Tyto parametry lze určit fitováním (např. metodou nejmenších čtverců) z experimentálně stanovené závislosti vodivosti vzorků na jejich složení. Při velmi nízkých objemových koncentracích plniva není střední vzdálenost mezi částicemi plniva dostatečná k tomu, aby došlo k jejich elektrickému propojení a vytvoření elektrovedivé sítě. Konduktivita polymerního kompozitu je zejména dána vodivostí matrice. S rostoucím množstvím plniva se střední vzdálenost mezi částicemi plniva či jejich shluky a aglomeráty zmenšuje a k přenosu elektrického náboje může již docházet např. prostřednictvím přeskokového nebo tunelového mechanismu. Při kritické koncentraci plniva, zvané perkolační práh, je vzdálenost mezi částicemi a jejich shluky již dostatečná k tomu, aby došlo k jejich elektrovedivému propojení. Zde se závislost konduktivity kompozitu na množství plniva projevuje skokovým zvýšením o několik řádů. Následuje již pouze mírný růst měrné elektrické vodivosti směřující k hodnotě vodivosti plniva¹¹⁻¹³. Příklad experimentálně získané perkolační křivky (závislost konduktivity na objemovém zlomku plniva) pro kompozitní materiál silikonový kaučuk/uhlíkové saze je uveden na obr. 1 (cit.¹⁴).



Obr. 1. Perkolační křivka: závislost konduktivity, σ (v jednotkách Ohm⁻¹ cm⁻¹ = S cm⁻¹), na objemovém zlomku plniva, v_f , pro kompozit silikonový kaučuk/uhlíkové saze¹⁴

2. Fázově separovaná perkolační struktura elektrovedivých polymerních kompozitů

Jeden ze současných cílů výzkumu EPK se zabývá snižováním kritické oblasti vodivosti kompozitů směrem k nižším koncentracím plniva, nebo možnostmi dalšího zvýšení elektrické vodivosti materiálu při dané koncentraci elektrovedivého plniva. Důvodem je kromě hledání nových možností rozvoje EPK také dosažení lepších zpracovatelských podmínek, případně nižších výrobních nákladů.

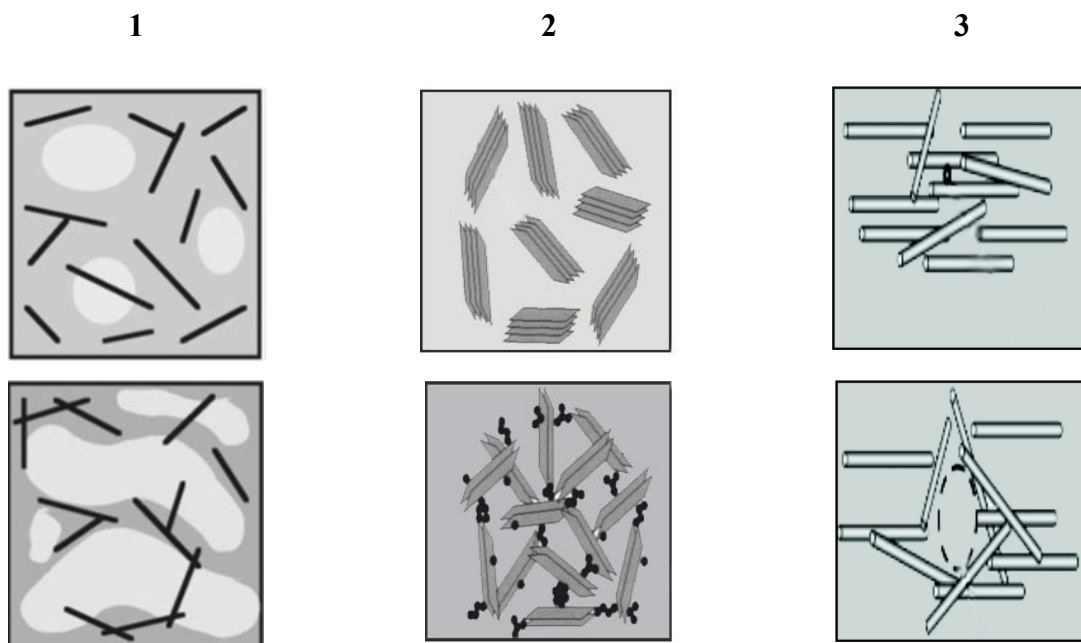
Tyto vývojové strategie jsou založeny na vytváření násobné perkolační struktury (NPS) v elektrovedivých polymerních kompozitech. Teorie násobné perkolace byla poprvé popsána Levonem a spol. pro systém vodivé polymerní směsi, ve které bylo nízkého perkolačního prahu dosaženo na základě fázové separace vodivé a nevodivé polymerní složky¹⁵. Popisovaný typ heterogenní směsi polymerů je v literatuře běžně označován jako nemísitelná směs¹⁶.

Násobná perkolace je tedy dosažena ve fázově separovaných EPK, v nichž každá z fází vytváří v objemu materiálu propojenou strukturu^{15,17}. Způsoby, jimiž je možné NPS získat, lze zhruba rozdělit do tří skupin (obr. 2). Do první z nich patří zmiňované nemísitelné směsi, v nichž jedna polymerní složka je buď vodivá, nebo obsahuje vodivé plnivo. Tato fáze musí vytvořit propojenou strukturu uvnitř matričního polymeru. Elektrovedivé plnivo může zůstat dispergováno v rozptýlené fázi, nebo migrovat

k fázovému rozhraní^{18–20}. Druhou možností, jak dosáhnout NPS, je použití více plniv lišících se převážně tvarem. Dvě či více plniv se zde synergicky podílí na přenosu elektrického náboje. Hovoří se také o „překlenovací“ nebo „přemostňující“ NPS (bridged multiple percolation), kdy dochází k „přemostění“ plniva většinou kulovitěho tvaru plnivem s vyšším aspektním poměrem^{20–24}. Třetí způsob, kterým lze za určitých podmínek dosáhnout násobné perkolace, je vytvoření spojitě či přetržité struktury pórů v objemu kompozitu jeho lehčením. Vznikne materiál se složitou vícefázovou strukturou, kdy polymer i plnivo musejí vytvořit vlastní perkolační strukturu v pórovité struktuře kompozitu a současně zajistit elektrovedivé propojení mezi částicemi plniva^{28–38}.

3. Lehčené polymerní kompozity s elektrovedivými plnivy

Obecně je za lehčený považován materiál obsahující dutinky (póry) nejrůznějších velikostí a tvarů, jež snižují hustotu původní, nelehčené hmoty. Lehčené polymerní hmoty se vyrábějí různými metodami. Nejčastěji používaným způsobem je tzv. napěňování. Napěňování probíhá ve třech stádiích: vznik pórů, jejich růst a ustálení. Ke vzniku pórů dochází mechanicky, vypařováním nízkovroucích kapalin, pomocí inertních plynů, nebo rozkladem nadouvaldel. Podle vlastností a charakteru pórů rozlišujeme měkké



Obr. 2. Schematické znázornění možných forem násobných perkolačních struktur v elektrovedivých polymerních kompozitech: (1) nemísitelná směs / uhlíková vlákna, (2) vícedruhové plnivo / grafitové destičky a uhlíkové saze, (3) lehčení / rostoucí pór a uhlíková vlákna

lehčené hmoty mechové a houbové, nebo tuhé lehčené hmoty pěnové a pórovité. Vlastnosti lehčených polymerních hmot závisí na řadě parametrů, mezi které patří materiálové složení polymerní fáze a struktura lehčeného polymeru charakterizovaná velikostí, typem a distribucí pórů. Co se týká mechanických vlastností, největší pevnosti je obecně dosahováno u lehčených polymerů s uzavřenou pórovitou strukturou a stejnou velikostí buněk^{25,26}.

K výrobě moderních multifunkčních lehčených materiálů, vynikajících vysokou pevností, je možné použít funkčních mikro rozměrových plniv, nebo v současnosti již úspěšně aplikovaných plniv nanorozměrových. Již malá množství těchto částic rovnoměrně dispergovaných v polymerní matici podporují vznik pórů během procesu lehčení²⁵. Přítomnost nanoplňiv může vést ve srovnání s neplněnými materiály k větší isotropii lehčené hmoty, ke vzniku pórů menších rozměrů a jejich větší hustotě^{27,28}. Nanočástice jsou rovněž schopné vyztužit polymer na mikroskopické úrovni, což v makroměřítku způsobí celkové mechanické vyztužení lehčené hmoty^{29,30}.

Plniva lze rovněž použít k zavedení „další“ užité vlastnosti do lehčené hmoty, např. elektrické vodivosti. V průběhu lehčení je do kompozitního systému polymerní matrice/elektrovodivé plnivo zavedena třetí, plynná fáze (pór vyplněný po čase většinou vzduchem). Tato skutečnost ovlivní výslednou hustotu kompozitu a rovněž vznikne nové fázové rozhraní s charakteristickými vlastnostmi. Je získána spojité či přetržitá struktura pórů v objemu kompozitu a polymer i plnivo musejí v materiálu vytvořit propojenou strukturu. V průběhu procesu lehčení může rovněž za určitých podmínek dojít k redistribuci a reorientaci plniva vlivem růstu pórů.

To, jak lehčení ovlivní elektrickou vodivost polymerního kompozitu, závisí na mnoha faktorech. Patří sem podmínky a způsob zpracování, způsob lehčení kompozitu (např. typ a vlastnosti použitého nadouvadla), kinetika růstu pórů v souvislosti s procesem tuhnutí materiálu, množství, velikost a tvar elektrovodivého plniva, viskozita a nadmolekulární struktura polymerní matrice a samozřejmě také tvar i velikost pórů a výsledná hustota a typ lehčené hmoty. Tato práce se omezuje na lehčené hmoty, které mají uzavřené, vzájemně nepropojené póry (pěnové nebo mechové materiály).

3.1. Struktura

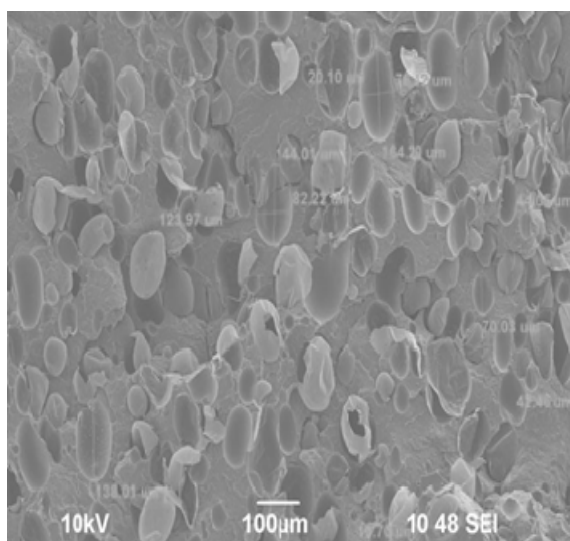
Antunes a spol.²⁸ zkoumali fyzikální vlastnosti lisovaného tuhého pěnového kompozitu tvořeného semikrystalickou polypropylenovou (PP) maticí plněnou uhlíkovými nanovláčky. Použití nanoplňiv i zde podpořilo izotropii pórovité struktury. Pro stejný expanzní poměr se s rostoucím procentuálním zastoupením uhlíkových nanovláček v lehčeném kompozitu zmenšovala velikost pórů a současně zvyšovala jejich hustota. Pro kompozit obsahující 5 hm.% uhlíkových nanovláček byla průměrná velikost póru větší než 500 μm . Se zvýšením obsahu plniva na 10 hm.% klesla na 430 μm . Nakonec pro 20 hm.% uhlíko-

vých nanovláček došlo k jejímu poklesu až na poloviční hodnotu 250 μm . Hustota pórů naopak vzrostla z $2,19 \cdot 10^6$ pórů/ cm^3 pro kompozit s 5 hm.% plniva na $4,94 \cdot 10^6$ pro kompozit s 10 hm.% a $1,16 \cdot 10^7$ pro kompozit s 20 hm.% plniva. Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM) struktury kompozitů PP/uhlíková nanovláčka ukázala přednostní rozptyl a orientaci uhlíkových nanovláček podél stěn pórů pěny.

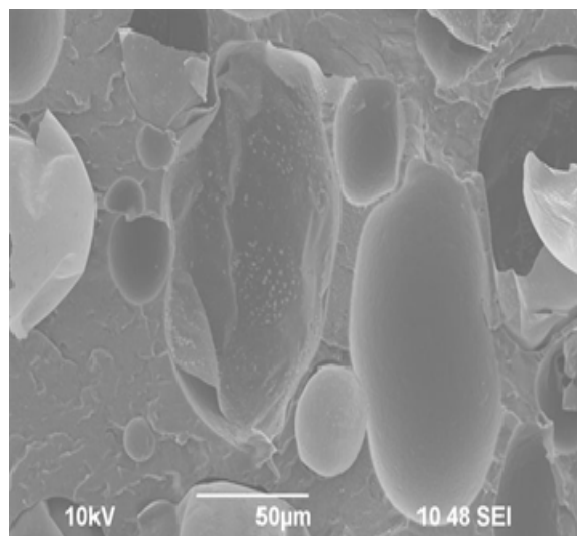
Thompson a spol.^{31–33} se zabývali vlastnostmi vstřikovaného pěnového kompozitu, který je tvořen maticí z amorfního cyklického olefinového kopolymeru (COC; ethylen a norbornen) a plněn uhlíkovými sazemi, uhlíkovými vlákny nebo kombinací obojího. Struktura pórů této tuhé pěny byla celkově ovlivněna způsobem zpracování. Důsledkem je vyšší hustota pórů a jejich menší velikost ve středu výrobku oproti výrazně prodlouženým a větším pórům o nižší hustotě při okrajích řezu vstřikovaného profilu. V této práci byla použita mikro rozměrová plniva. Bylo pozorováno, že vliv množství plniva na velikost pórů a jejich hustotu nemají zcela stejnou tendenci jako v předešlé práci²⁸. Částice plniva během lehčení výrazně neovlivňovaly tvorbu pórů. Použití 3 obj.% uhlíkových sazí vedlo k mírnému snížení velikosti pórů, ovšem hustota pórů rovněž mírně klesla z $2,3 \cdot 10^6$ pórů/ cm^3 na $1 \cdot 10^6$ pórů/ cm^3 . V případě 10 obj.% uhlíkových vláken bylo pozorováno větší snížení velikosti pórů, avšak hustota pórů v tomto případě vzrostla na $5 \cdot 10^6$ pórů/ cm^3 . V kompozitech, kde byla použita kombinace obou plniv, došlo k nejvýraznějšímu snížení velikosti pórů, ke zvýšení uniformity jejich tvarů, ale pouze k mírnému vzrůstu jejich hustoty na cca. $2,6 \cdot 10^6$ pórů/ cm^3 . V případě kompozitů plněných uhlíkovými sazemi byl procesem lehčení podpořen rozptyl plniva, což příznivě ovlivnilo elektrickou vodivost. U kompozitů plněných pouze uhlíkovými vlákny nebyl pozorován rozdíl v rozptylu či reorientaci vláken mezi kompaktní a lehčenou formou. U varianty plnění kombinací obou plniv byl naopak objeven příznivý vliv na reorientaci uhlíkových vláken vlivem lehčení za spolupůsobení redistribučního procesu uhlíkových sazí. Byla zde rovněž zjištěna nižší destrukce vláken během zpracovatelského procesu^{31–33}.

Studium dielektrických vlastností chemicky lehčeného EPDM (ethylen – propylen – dien – monomer) plněného elektrovodivými uhlíkovými sazemi také prokázalo růst hustoty pórů v lehčené hmotě s rostoucím množstvím plniva. Pokles velikosti pórů byl ovšem pozorován spíše v souvislosti s rostoucím množstvím nadouvadla^{34–36}.

Rovněž při výzkumu vytlačované třívrstvé integrální pěny tvořené polyethylenovou maticí plněnou uhlíkovými sazemi ve formě koncentrátu v polyethylen (50 hm.%) byl pozorován s rostoucím množstvím nadouvadla snižující se rozměr pórů. Vliv množství plniva nebyl zjišťován. Na SEM snímcích (obr. 3 a 4) je patrná jemná, pravidelná struktura pórů, tvořená oválnými buňkami s širokou distribucí velikostí. U kompozitu se 2 hm.% nadouvadla se velikost buňky pohybuje okolo průměrné hodnoty 119,2 μm a u materiálu s 3 hm.% nadouvadla je to 79,9 μm .



Obr. 3. SEM snímek povrchu lomu kompozitu z vysokohustotního polyetylénu (HDPE) plněného uhlíkovými sazemi ve formě koncentráту v PE (50 hm.%), lehčeného 2 hm.% nadouvadla. Přibližní snímku 100 μm. (Financováno z projektu e.č. FR-T11/232 v programu TIP MPO, RNDr. Ladislav Pospišil, CSc.)



Obr. 4. SEM snímek povrchu lomu kompozitu z vysokohustotního polyetylénu (HDPE) plněného uhlíkovými sazemi ve formě koncentráту v PE (50 hm.%), lehčeného 2 hm.% nadouvadla. Přibližní snímku 50 μm. (Financováno z projektu e.č. FR-T11/232 v programu TIP MPO, RNDr. Ladislav Pospišil, CSc.)

3.2. Elektrická vodivost

V práci³⁰ zabývající se elektrickou vodivostí kompozitu PP/uhlíková nanovlákná vyrobeného lisováním bylo zjištěno, že u pěnové formy materiálu se perkolační práh objevuje při nižší koncentraci plniva. U kompaktní varianty kompozitu byl nalezen perkolační práh při 6 obj.% plniva, zatímco u lehčené formy již při 5 obj.%. Konduktivita kompozitu s koncentrací těsně nad prahem perkolace se pohybovala kolem 10^{-7} S cm⁻¹. Při dalším zvyšování množství plniva rostla vodivost již jen do 10^{-6} S cm⁻¹. Mechanismus vodivosti nad prahem perkolace odpovídal tunelovému mechanismu. Autoři předpokládají, že roztrhání agregátů plniva vlivem lehčení současně s působením vyloučeného objemu vlivem růstu pórů, který posunul vlákna k sobě, způsobilo snížení kritické vzdálenosti pro přenos elektrického náboje. Perkolační práh byl proto dosažen při nižší koncentraci plniva, než u kompaktní formy. Elektrická vodivost kompaktní formy kompozitu odpovídala systému s náhodně distribuovanými kulovitými částicemi, což bylo ve shodě s přítomností agregátů plniva. Naopak lepší rozptyl a distribuce uhlíkových nanovláken s nižším zastoupením agregátů v lehčené formě materiálu způsobily, že elektrická vodivost byla lépe predikovatelná a odpovídala spíše systému s náhodně rozptýlenými vlákny. Práce se také zabývá vlivem způsobu lehčení na výslednou elektrickou vodivost kompozitu PP/uhlíková nanovlákná. Při fyzikálním způsobu lehčení bylo dosaženo vyšší konduktivity a fyzikální lehčení rovněž podpořilo strukturální izotropii materiálu, tedy i izotropii elektrické vodivosti²⁸.

Při studiu vlastností vstříkovaného kompozitu,

v němž je matrice tvořena amorfním cyklickým olefinovým kopolymerem (COC) plněným uhlíkovými sazemi, uhlíkovými vlákny nebo kombinací obojího, bylo pro elektrickou vodivost zjištěno následující: Měrná elektrická vodivost materiálu v různých směrech byla ovlivněna anizotropní strukturou způsobenou profilem smykových napětí typických pro způsob zpracování vstříkáváním. Pro vstříkované produkty je typický špatný přenos elektronů svrchní vrstvou výrobku³⁸. Výzkum vedl k závěru, že proces lehčení zvýšil konduktivitu kompozitů plněných uhlíkovými sazemi a to v obou směrech elektrického pole na sebe kolmých. Jak bylo uvedeno, projevil se zde pozitivní vliv lehčení na rovnoměrnější rozptyl částic uhlíkových sazů. Tento redistribuční efekt ovšem nebyl pozorován u kompozitů plněných pouze uhlíkovými vlákny. Konduktivita kompozitů s uhlíkovými vlákny byla v obou směrech elektrického pole snížena. Autoři předpokládají, že uhlíková vlákna nejsou během lehčení vlivem růstu pórů přemisťována, zůstávají fixována ve viskózní polymerní matici a vzniklé póry naopak zvyšují kritickou vzdálenost mezi částicemi plniva potřebnou k přenosu elektrického náboje. U kompozitů, ve kterých byla použita kombinace obou plniv, docházelo k synergickému působení obou druhů plniv a proces lehčení rovněž vedl k mírnému zvýšení konduktivity a její izotropie. V rámci tohoto výzkumu byl sledován i vliv množství nadouvadla na výslednou elektrickou vodivost kompozitu a bylo zjištěno, že vodivost zkoumaných kompozitů vzrostla s množstvím použitého nadouvadla^{31–33}.

V pracích^{34–36} věnovaných především studiu dielektrických vlastností chemicky lehčeného EPDM plněného

uhlíkovými sazemi byl nalezen práh perkolace stejnosměrné elektrické vodivosti při obsahu okolo 40 % uhlíkových sazí. Rastrovací elektronová mikroskopie ukázala přítomnost aglomerátů plniva a vytvoření elektrovodivé struktury^{34–36}.

Fletcher a spol.³⁷ studovali lisovaný lehčený nanokompozit tvořený reaktoplastickým fluoropolymerem (FKM) plněným uhlíkovými nanotrubičkami. Perkolačního prahu u lehčené varianty kompozitu bylo dosaženo při 2 hm.% plniva, což bylo výše než u kompaktní formy materiálu. Ovšem k ustálení hodnot konduktivity došlo při stejné koncentraci plniva 8 hm.%. Lehčená varianta produktu splňovala podmínky pro aplikaci v oblasti elektrostatické disipace (ESD)³⁷. Na stejném pracovišti byl rovněž z pohledu elektrických a dielektrických vlastností studován lehčený polymer PS (polystyren)/uhlíková nanovláknina. Byl získán lehčený materiál s jednotnou distribucí oválných pórů a rovnoměrným rozptylem uhlíkových nanovláken. Perkolační práh byl nalezen při koncentraci 5 hm.% uhlíkových nanovláken a to pro kompaktní i lehčenou variantu materiálu, kdy bylo dosaženo konduktivity cca. 10^{-6} S cm⁻¹. Lehčením materiálu tedy nedošlo k přerušení elektrovodivé sítě mezi nanovlákniny objevené při SEM analýze. Rovněž dielektrická měření potvrdila dostatečnou elektrickou vodivost kompozitů s koncentrací plniva nad perkolačním prahem (10^{-4} S cm⁻¹) v měřeném frekvenčním rozsahu. Stanovení účinnosti elektromagnetického stínění (SE) potvrdilo aplikovatelnost materiálu v tomto oboru³⁸.

Výzkum vytlačované třívrstvé integrální pěny tvořené HDPE (vysokohustotní polyetylen) maticí plněnou uhlíkovými sazemi ve formě koncentrátu v PE (50 hm.%), sledoval vliv množství nadouvadla (fyzikální nadouvadlo) na elektrickou vodivost lehčeného materiálu. Při 1 hm.% nadouvadla byl vzorek nevodivý, při zvýšení na 2 hm.% nadouvadla hodnota elektrické vodivosti vzrostla a nejvyšší hodnoty $7,7 \cdot 10^{-5}$ S cm⁻¹ bylo dosaženo při 3 hm.%. Materiál se ukázal být aplikovatelným v oblasti elektrostatické disipace.

4. Diskuse a závěr

Zavedení plniva (zde elektrovodivého) do lehčené polymerní hmoty může ovlivnit její strukturu (velikost a hustotu pórů), a naopak lehčení polymerního kompozitu s elektrovodivými plnivými může za určitých podmínek podpořit redistribuci a reorientaci plniva v materiálu. Působení těchto faktorů následně ovlivní výslednou hustotu kompozitu a jeho mechanické a elektrické vlastnosti. Ovlivnitelnost těchto vlastností množstvím a typem plniva a rovněž stupněm a způsobem lehčení kompozitu nabízí možnost přizpůsobit tyto materiály požadované aplikaci.

Lehčení EPK tedy elektrické vlastnosti buď neovlivní (nezhorší), nebo může směřovat k nižšímu perkolačnímu prahu či vyšší konduktivitě nad prahem perkolace. V každém případě dojde k vytvoření elektrovodivého materiálu s nižší hustotou, což rozšiřuje aplikační možnosti EPK

a může přinést i úsporu nákladů. Z jiného úhlu pohledu zavedení elektrovodivých plniv do lehčené polymerní hmoty přináší oproti materiálu neplněnému vyztužující efekt a také novou užžitnou vlastnost, elektrickou vodivost.

Jako velmi vhodná se pro další výzkum i praktické použití jeví elektrovodivá nanoplňniva. Jejich použitím lze za daných podmínek pozitivně ovlivnit jak strukturu lehčeného EPK, tak jeho elektrické a mechanické vlastnosti. Z dosavadních výzkumů rovněž vyplývá, že ve srovnání s chemickým způsobem je vliv fyzikálního způsobu lehčení na elektrické vlastnosti EPK účinnější, lépe predikovatelný a kontrolovatelný.

Tento příspěvek vznikl za podpory Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace, jenž je spolufinancován Evropským fondem regionálního rozvoje (ERDF) a státním rozpočtem ČR, v rámci projektu Centrum polymerních systémů (reg. číslo: CZ.1.05/2.1.00/03.0111).

LITERATURA

1. Meisner B., Zilvar V.: *Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. SNTL, Praha 1987.
2. Slobodian P., Říha P., Lengálová A., Sába P.: *J. Mater. Sci.* **46**, 3186 (2011).
3. Valenkov A. M., Gofman I. V., Nosov K. S., Shapovalov V. M., Yudin V. E.: *Russ. J. Appl. Chem.* **84**, 735 (2011).
4. Humpolíček P., Kašpárková V., Sába P., Stejskal J.: *Synthetic Met.* **162**, 722 (2012).
5. Pelíšková M., Vilčáková J., Omastová M., Sába P., Li C. Z., Quadrat O.: *Smart Mater. Struct.* **14**, 949 (2005).
6. Strümpfer R., Glatz-Reichenbach J.: *J. Electroceram.* **3**, 329 (1999).
7. Roldughin V. I., Vysotskii V. V.: *Prog. Org. Coat.* **34**, 81 (2000).
8. Sahimi M.: *Applications of Percolation Theory*. Taylor & Francis, London 1994.
9. Kirkpatrick S.: *Rew. Mod. Phys.* **45**, 574 (1973).
10. Prokeš J., Křivka I.: *Polym. Int.* **43**, 117 (1997).
11. Pelíšková M., Vilčáková J., Moučka R., Sába P., Stejskal J., Quadrat O.: *J. Mater. Sci.* **42**, 4942 (2007).
12. Vilčáková J., Sába P., Křesálek V., Quadrat O.: *Synthetic Met.* **113**, 83 (2000).
13. Mc Queen D. H., Jager, K. M., Pelíšková, M.: *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37**, 2160 (2004).
14. Ryvkina N., Tchmutin I., Vilčáková J., Pelíšková M., Sába P.: *Synthetic Met.* **148**, 141 (2005).
15. Levon K., Margolina A., Patashinsky, A. Z.: *Macromolecules* **26**, 4061 (1993).
16. Zdražilová N., Hausnerová B., Kitano T., Sába P.: *Polym. Polym. Compos.* **12**, 433 (2004).
17. Sumita M., Sakata K., Hayakawa Y., Asai S., Miyasaka K., Tanemura M.: *Coll. Polym. Sci.* **270**, 134 (1992).
18. Price A.D., Kao V. C., Zhang J. X., Naguib H. E.: *Synthetic Met.* **160**, 1832 (2010).

19. Pelíšková M., Kazantseva N., Hausnerová B., Prokeš J., Sába P.: *The Polymer Processing Society 24th Annual Meeting : PPS – 24, Salerno, Italy, June 15–19, 2008*, Proceedings (Titomanlio G., ed.), str. 5.
20. Thongruang W., Spontak R. J., Balik M. C.: *Polymer* 43, 3717 (2002).
21. Thongruang W., Balik M. C., Spontak R. J.: *J. Polym. Sci. Pol. Phys.* 40, 1013 (2002).
22. Thongruang W., Spontak R. J., Balik M. C.: *Polymer* 43, 2279 (2002).
23. Dweiri R., Sahari J.: *Compos. Sci. Technol.* 68, 1679 (2008).
24. Geblinger N., Thiruvengadathan R., Regev O.: *Compos. Sci. Technol.* 67, 895 (2007).
25. Ducháček V.: *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vydavatelství VŠCHT Praha, Praha 2006.
26. Almanza O., Rodríguez-Pérez M. A., De Saja J. A.: *Polymer* 42, 7117 (2001).
27. Lee L. J., Zeng C. C., Cao X., Han X. M., Shen J., Xu G. J.: *Compos. Sci. Technol.* 65, 2344 (2005).
28. Antunes M., Mudarra M., Velasco J. I.: *Carbon* 49, 708 (2011).
29. Verdejo R., Staempfli R., Alvarez-Lainez M., Mourad S., Rodríguez-Perez M. A., Bruhwiler P. A., Shaffer M.: *Compos. Sci. Technol.* 69, 1564 (2009).
30. Cao X., Lee L. J., Widya T., Macosko C.: *Polymer* 46, 775 (2005).
31. Thompson M. R., Motlagh G. H., Oxby K. J., Hrymak A. N.: *J. Appl. Polym. Sci.* 115, 646 (2010).
32. Motlagh G. H., Hrymak A. N., Thompson M. R.: *Polym. Eng. Sci.* 48, 687 (2008).
33. Motlagh G. H., Hrymak A. N., Thompson M. R.: *J. Polym. Sci. Pol. Phys.* 45, 1808 (2007).
34. Mahapatra S. P., Sridhar V., Tripathy D. K.: *J. Appl. Polym. Sci.* 106, 192 (2007).
35. Mahapatra S. P., Sridhar V., Chaudhary R. N. P., Tripathy D. K.: *Polym. Composite* 29, 1125 (2008).
36. Mahapatra S. P., Sridhar V., Tripathy D. K.: *Polym. Composite* 29, 465 (2008).
37. Fletcher A., Gupta M. C., Dudley K. L., Vedeler E.: *Compos. Sci. Technol.* 70, 953 (2010).
38. Yang B. Y., Gupta M. C., Dudley K. L., Lawrence R. W.: *Adv. Mater.* 17, 1999 (2005).

M. Pelíšková and P. Sába (*Centre of Polymer Systems, Faculty of Technology, Tomas Bata University, Zlín*): **The Effect of Expanded Structure on Electric Properties of Polymer Composites with Electroconductive Fillers**

The review deals with the possibility to affect electrical properties of polymer composites by creation of heterogeneous segregated structures. It mainly focuses on the effect of foaming on structure and electrical properties of polymer composites with electroconductive fillers, and their mutual interconnections. It was demonstrated that the formation of porous structure may have a positive impact on the resulting electrical properties, especially on the percolation threshold. In addition, compared to unfilled foamed composites, filling the polymer matrix with electroconductive fillers is associated with the reinforcing effect and the new utility value, electrical conductivity. The possibility to influence conductivity and other physical parameters by the amount and type of filler together with the level and method of composite foaming provides unique opportunity to design materials with the physical parameters adapted to desired application.