

С.М. Махно

ВПЛИВ БЕЗКОНТАКТНОГО ДИСПЕРГУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТІВ З ПОЛІХЛОРТРИФТОРЕТИЛЕНОМ

*Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка Національної академії наук України
вул. Генерала Наумова, 17, Київ, 03164, Україна, E-mail: stmax@ukr.net*

Досліджено залежності дійсної ϵ' та уявної ϵ'' складових комплексних діелектричної проникності та електропровідності системи поліхлортрифторетилен–вуглецеві нанотрубки (ВНТ) при вмісті ВНТ від 0.0025 до 0.05 об'ємних часток до і після обробки ВНТ методом безконтактного подрібнення матеріалів. Показано, що для композитів, які містять ВНТ і оброблені методом безконтактного подрібнення матеріалів, значення ϵ' та ϵ'' на надвисоких частотах вищі у 1.5 рази в порівнянні з композитами з вихідними ВНТ, а поріг перколяції на низьких частотах знижується більш ніж в 3 рази.

Ключові слова: *вуглецеві нанотрубки, поліхлортрифторетилен, діелектрична проникність, поріг перколяції, електропровідність*

ВСТУП

Використання полімерних композиційних матеріалів є перспективним в різних галузях промисловості, авіаційній та космічній техніці, для опорних конструкцій тощо. Електропровідні наповнювачі збільшують коло використання завдяки широкому спектру їх електричних і електромагнітних властивостей [1]. В останні роки інтенсивно розвиваються напрями, пов'язані зі створенням та використанням вуглецевих нанотрубок (ВНТ). Унікальні електричні та механічні властивості ВНТ дозволяють застосовувати їх як альтернативні наповнювачі, замість звичайних, в композитах завдяки високій електропровідності при низьких концентраціях, а також підвищеним механічним властивостям [2–5]. Широко застосовують ВНТ для виготовлення композитів для екранування від електромагнітного випромінювання, захисту від радіоперешкод та електростатичного розсіювання зарядів. Особливої уваги заслуговують роботи по розробці сенсорів температури, тиску, вологості тощо. Сенсори на основі полімерних композитів і ВНТ стабільні тільки при достатньому подрібненні агломератів ВНТ. Для диспергування ВНТ в промисловості та в лабораторних умовах

використовують кульові, планетарні вібраційні, струмінні млини, дезінтегратори тощо. Для одержання стабільних суспензій використовують велику кількість методів хімічного модифікування поверхні ВНТ [1, 6, 7]. А диспергування ВНТ в сухому вигляді можна проводити методами безконтактного подрібнення матеріалів за допомогою струменів повітря різної конфігурації [8].

Метою роботи є дослідження концентраційних залежностей електропровідності системи поліхлортрифторетилен–ВНТ та виявлення впливу на електрофізичні властивості композитів процесу диспергування ВНТ методом безконтактного подрібнення матеріалів (БПМ).

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Для виготовлення композитів використано кристалоаморфний полімер поліхлортрифторетилен (ПХТФЕ) Ф-3М марки А та багатошарові вуглецеві нанотрубки. Блочні та плівкові зразки для досліджень систем ПХТФЕ–ВНТ одержували пресуванням за температури 495 К та тиску 2 МПа.

Багатошарові ВНТ отримано методом хімічного осадження із газової фази (CVD) згідно з ТУ У–03291669–009: 2009 на

каталізаторі $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--MoO}_3\text{--Al}_2\text{O}_3$ [9]. Джерелом вуглецю слугував пропілен. Очищення від мінеральних складових здійснювали розчином біфториду амонію, підкисленим соляною кислотою [9]. Після очищення масовий вміст золи становив біля 1 %.

Для диспергування ВНТ використано метод безконтактного подрібнення матеріалів (БПМ), детально описаний в патенті [8]. Установка складається з циліндричної робочої камери з резонаторами та додатково оснащеної двома послідовними циклонами для відокремлення ВНТ від повітря. Диспергування ВНТ проводили при тиску повітря на вході в робочу камеру 200 кПа.

Дійсну (ϵ') та уявну (ϵ'') складові комплексної діелектричної проникності $\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon''$ вимірювали на частотах 8–12 ГГц за допомогою надвисокочастотного (НВЧ)

інтерферометра [10], а температурні залежності електропровідності на низьких частотах досліджували двоконтактним методом за допомогою вимірювача іммітансу E7-14.

Частотні залежності складових комплексної діелектричної проникності та питомої електропровідності (σ) композитів системи ПХТФЕ–ВНТ та ВНТ визначали з спектрів імпедансу $Z^* = Z' + iZ''$ в діапазоні частот 10^{-1} – 10^6 Гц, одержаних на імпедансному спектрометрі Solartron SI 1260.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Вимірювання електрофізичних властивостей композитів ПХТФЕ–ВНТ проводили за кімнатних температур при вмісті ВНТ від 0.0025 до 0.05 об'ємних часток.

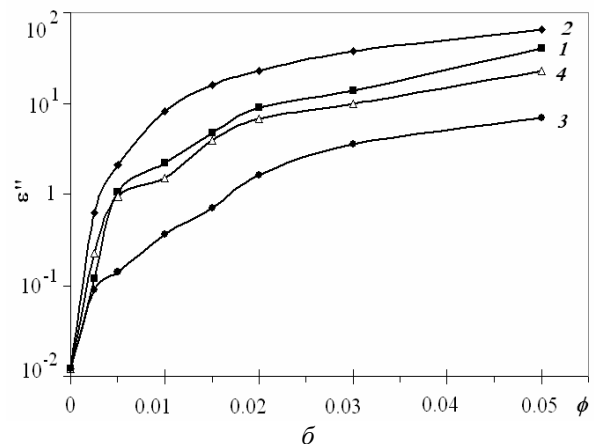
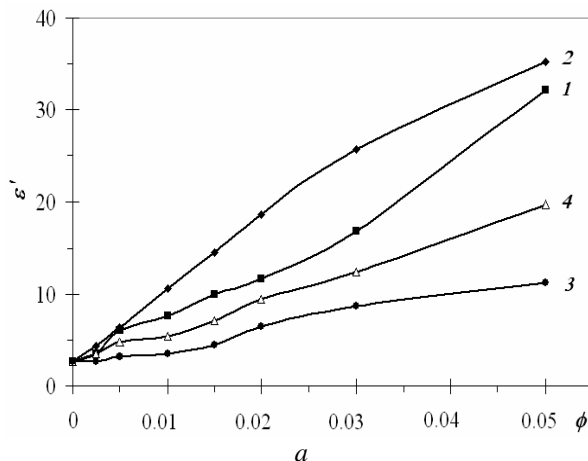


Рис. 1. Залежності дійсної (а) та уявної (б) складової комплексної діелектричної проникності в системі ПХТФЕ–ВНТ від вмісту ВНТ: 1–вихідні ВНТ, 2– вихідні ВНТ дисперговані БПМ, 3 – очищені від каталізатора ВНТ, 4 – очищені від каталізатора ВНТ, дисперговані БПМ

Аналіз електрофізичних властивостей композитів показав, що введення в полімер ВНТ диспергованих за допомогою БПМ, дозволяє значно підвищити значення складових комплексної діелектричної проникності на надвисоких та електропровідність – на низьких частотах. З рис. 1 видно, що значення ϵ' плавно зростають з підвищенням вмісту ВНТ, а ϵ'' змінюється стрибком в околі вмісту до 0.02 об'ємних часток ВНТ. Зауважимо, що найвищі значення ϵ' та ϵ'' у досліджених системах (рис. 1) набувають композити, до складу яких входять неочищені ВНТ після диспергування методом БПМ. Деяко нижчі значення мають

композити з неочищеними від каталізатора ВНТ. Найнижчі показники мають очищені не-дисперговані ВНТ. Підвищення значень ϵ' , ϵ'' та σ після обробки ВНТ методом БПМ відбувається внаслідок подрібнення клубків та агрегатів. Це можна пояснити тим, що після всмоктування ВНТ потоком стисненого повітря, завдяки утворенню смерчу в камері БПМ, відбувається розтягування ВНТ. Оскільки в зазначеній камері існують області високого та низького тиску, то утворюється градієнт тиску, що дає можливість більш інтенсивно збільшити клубки в розмірі і їх руйнувати. При подальшому змішуванні ВНТ

після БПМ з порошками полімера, частинки якого (розмір частинок ПХТФЕ ~400 нм) проникають в клубки ВНТ з більшою

ймовірністю, що допомагає в подальшому руйнувати клубки ВНТ.

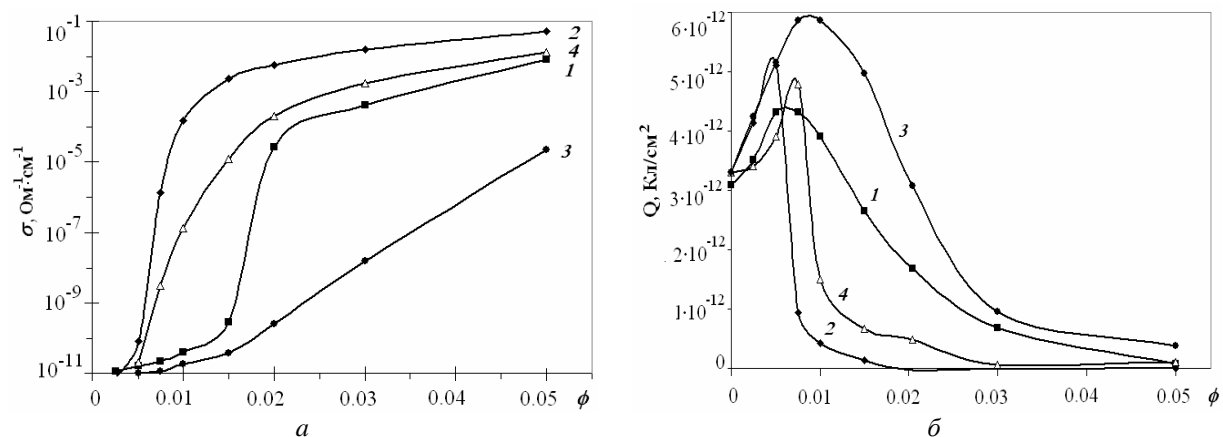


Рис. 2. Залежності електропровідності (а) та питомого поверхневого заряду (б) в системі ПХТФЕ–ВНТ від вмісту ВНТ: 1–вихідні ВНТ, 2– ВНТ, дисперговані БПМ, 3–очищені від каталізатора ВНТ, 4– очищені від каталізатора ВНТ, дисперговані БПМ

При використанні БПМ завдяки розтягуванню і подрібненню клубків вдається досягти більш рівномірного розподілення ВНТ в полімері. Це підтверджується порівнянням значень електропровідності від вмісту ВНТ для розглянутих систем (рис. 2 а). Також знижується значення порогу перколяції системи ПХТФЕ–ВНТ після обробки ВНТ за допомогою БПМ.

Проведений аналіз одержаних результатів (рис. 2 а), з позиції теорії перколяції згідно рівняння:

$$\sigma = \sigma_i (\phi - \phi_c)^t, \quad (1)$$

де σ_i – електропровідність наповнювача; ϕ – об’ємний вміст; ϕ_c – значення вмісту, що відповідає порогу перколяції; t – критичний індекс. Це дало можливість визначити значення порогу перколяції і критичні індекси. Слід зазначити, що питома густина вихідних ВНТ співпадає з густиною ПХТФЕ з точністю до 3 %, що дає підстави для використання співвідношення $\phi \approx C/100$ %, тобто об’ємний вміст дорівнює масовому. Розраховані згідно рівняння (1) пороги перколяції, а також σ_i ВНТ та критичні індекси для розглянутих систем наведено в таблиці 1. Найнижчі значення порогу перколяції спостерігаються для системи, що вміщує вихідні ВНТ, оброблені методом БПМ, та становить $\phi_c = 0.0049$.

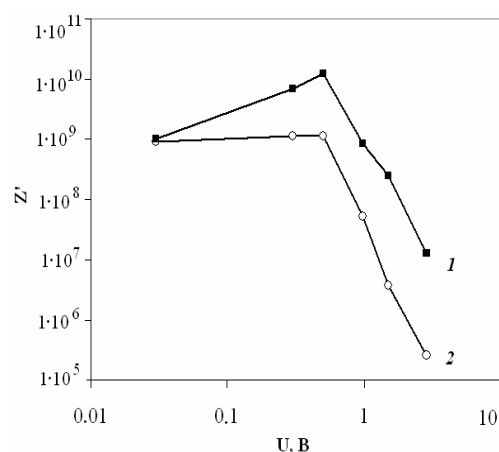


Рис. 3. Залежності дійсної складової імпедансу ВНТ при насипній густині від амплітуди прикладеної напруги: 1 – ВНТ дисперговані БПМ, 2– вихідні ВНТ

Слід зазначити, що поріг перколяції зменшується для розглянутих полімерних систем у наступному порядку: очищені від каталізатора ВНТ, вихідні ВНТ, очищені дисперговані ВНТ, неочищені дисперговані ВНТ. На рис. 2 а крива 4 розміщується вище кривої 1, а на рис. 1 – навпаки. Зміна порядку розташування кривих ϵ'' на НВЧ та провідності на НЧ пов’язано з утворенням більшої міжфазної питомої поверхні між полімером та ВНТ (неочищених), отже відбувається більш ефективна взаємодія електромагнітного випромінювання з композитами.

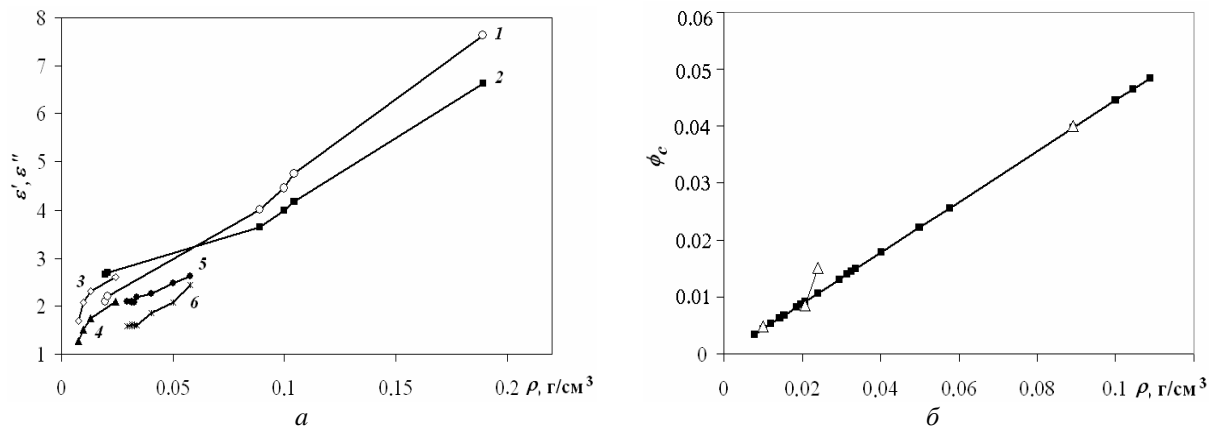


Рис. 4. Залежності дійсної ϵ' (2, 3, 5), уявної ϵ'' (1, 4, 6) (а) складових комплексної діелектричної проникності на частоті 9 ГГц та порогу перколяції (б) від насипної густини ВНТ: 1, 2, 5, 6 – очищені ВНТ; 3, 4 – неочищені ВНТ

Визначено поверхневу густину зарядів плівок системи ПХТФЕ–ВНТ (рис. 2 б) безконтактним індукційним методом (коливання електричного струму в емнісному зазорі) [11]. Зміна значень поверхневого заряду корелює з характером зміни електропровідності від концентрації ВНТ в системі, що пов'язано зі зміщенням порогу перколяції. Чим нижче значення порогу перколяції, тим при більш низьких концентраціях відбувається скачок значень в бік зменшення заряду від максимальних (максимальних значень заряду системи набувають при концентраціях наповнювача, дещо нижчих за значення порогу

перколяції в системі ВНТ-полімер) до значень, які на декілька порядків величини менші. Наявність зарядів на поверхні композитів після порогу перколяції можна пояснити наявністю непровідних ділянок на поверхні полімерної плівки, де накопичується заряд. При високому наповненні полімера електропровідною складовою значення поверхневого заряду буде прямувати до нуля. Отже зменшення питомого заряду після досягнення максимального значення в системі при зростанні концентрації ВНТ характеризує утворення неперервного перколяційного кластера.

Таблиця. Пороги перколяції та критичні індекси для систем ПХТФЕ–ВНТ

Тип ВНТ	ϕ_c	t	$\sigma_b, (\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$
вихідні	0.0175	3.53	$1.5 \cdot 10^3$
вихідні після БПМ	0.0049	2.54	$1.6 \cdot 10^2$
очищені	0.0395	3.61	$1.5 \cdot 10^3$
очищені після БПМ	0.0085	3.55	$9.5 \cdot 10^2$

Для визначення електрофізичних властивостей ВНТ до і після обробки в БПМ застосовано методику вимірювання їх імпедансу між електродами при насипній густині. Аналіз результатів дослідження показав, що зменшення насипної густини ВНТ призводить до зростання дійсної складової імпедансу Z' (рис. 3). Зміна імпедансу ВНТ від амплітуди прикладеного змінного електричного поля має нелінійний характер. Так, при напруженості поля 1В/см на залежності імпедансу від амплітуди змінного поля спостерігається різке зменшення значень Z' . Це

може бути наслідком наявності потенціального бар'єру при контакті ВНТ між собою та електродами. Після досягнення вказаної напруженості поля в місцях контактів ВНТ відбувається тунелювання електронів від однієї ВНТ до іншої та до електродів.

Наявність контактного потенціального бар'єру і високих значень питомого електроопору дає можливість визначати значення ϵ' та ϵ'' комплексної діелектричної проникності ВНТ при насипній густині, застосовуючи метод вимірювання діелектричних сталей в хвильоводі на НВЧ для

порівняння властивостей різних типів ВНТ. Наявність потенціального бар'єру між ВНТ не дає можливості повністю закортити електропровідний хвильовод (повного відбиття електромагнітного випромінювання) при питомій потужності електромагнітного поля 5 мВт.

На частоті 9 ГГц визначено значення діелектричних сталих диспергованих та недиспергованих ВНТ. При значеннях питомої густини вище 20 мг/см^3 зростання ϵ' та ϵ'' відбувається лінійно зі збільшенням насипної густини. При значеннях питомої густини до 20 мг/см^3 спостерігається нелінійний характер зміни ϵ' та ϵ'' (рис. 4 а).

Оскільки показано, що за допомогою БПМ відбуваються процеси розтягування і подрібнення клубків ВНТ, а механізм цього процесу пов'язаний з наявністю градієнтів тисків в робочій камері БПМ, для перевірки існування вказаного механізму проведено експерименти з використанням вакуумування. Для цього відкачували деякий об'єм до тиску 10 кПа і через патрубок ВНТ всмоктувались в замкнутий об'єм (скляна колба). Після вирівнювання тиску з навколишнім середовищем ВНТ виймалися з колби і проводилось визначення насипної густини та діелектричних сталих. Залежність ϵ' і ϵ'' від насипної густини має лінійний характер (рис. 4 а). Порівняння двох типів ВНТ, очищених та неочищених від каталізатора, вказує на те, що ефективність збільшення розмірів клубків ВНТ спостерігається для очищених ВНТ і досягає 5-кратного зменшення насипної густини при використанні БПМ і до 3-кратного зменшення – при використанні вакуумування. На рис. 4 а можна виділити три ділянки зміни ϵ' і ϵ'' від насипної густини. Найнижчі значення ρ , ϵ' та ϵ'' спостерігаються для ВНТ неочищених диспергованих БПМ (криві 3, 4). Останні точки на цих кривих відповідають вихідним ВНТ. Криві 5, 6 відносяться до вакуумованих очищених ВНТ. Для них значення ϵ' і ϵ'' лежать нижче, ніж для диспергованих БПМ очищених ВНТ. Це обумовлено тим, що при осіданні ВНТ в кількох циклонах, при обробці в БПМ, відбувається одночасно сепарація ВНТ (розділення ВНТ по фракціям згідно з густиною клубків). У випадку використання вакуумування, всі ВНТ всмоктуються в один об'єм і не розділяються.

Залежність порогу перколяції від насипної густини ВНТ має лінійний характер (рис. 4 б). Вона пов'язана з лінійною залежністю насипної густини від об'ємного вмісту ВНТ. Як відомо, об'ємний вміст однієї компоненти в іншій описується рівнянням:

$$\varphi_v = v_1/(v_1+v_2) = m_1/\rho_1 / (m_1/\rho_1 + m_2/\rho_2), \quad (2)$$

де v_1 , v_2 – об'єми наповнювача та зв'язуючої основи, m_1 , ρ_1 , m_2 , ρ_2 – маси та густини наповнювача та зв'язуючої основи. У випадку, коли електропровідний наповнювач заповнює одиницю об'єму а іншою фазою такого композиту є повітря, об'ємний вміст φ_v буде дорівнювати порогу перколяції φ_c :

$$\varphi_c = m_{1н}/\rho_1 / (m_{1н}/\rho_1 + m_2/\rho_2), \quad (3)$$

де $m_{1н}$ – насипна маса електропровідної компоненти, і для одиниці об'єму буде дорівнювати насипній густині.

Для одиниці об'єму можна записати співвідношення

$$m_2/\rho_2 = 1 - m_{1н}/\rho_1. \quad (4)$$

Підставивши (4) в (3), маємо:

$$\varphi_c = m_{1н}/\rho_1. \quad (5)$$

Тобто, поріг перколяції залежить не від зв'язуючої основи, а тільки від насипної густини диспергової провідної фази та густини цієї речовини. Співвідношення (5) виконується в певних межах, оскільки відомо, що для сферичних частинок в полімері теоретично розрахований поріг перколяції становить приблизно 0.16–0.17 об'ємних часток, а у випадку кристалічних полімерів наповнювач може витіснятися в міжкристалічну область і таким чином відбувається зниження значень порогу перколяції. Слід зауважити, що існує міжфазна взаємодія складових, яка може суттєво вплинути на провідність поверхневих шарів, а отже і на поріг перколяції. На рис. 4 б трикутниками позначені значення порогів перколяції, що визначені з перколяційного рівняння по експериментальним даним і наведені в таблиці. Незначна розбіжність розрахованих згідно рівняння (5) та експериментально отриманих значень порогів перколяції для системи ПХТФЕ–ВНТ дає підстави для використання рівняння (5) для інших полімерних наповнених систем з дисперсними наповнювачами для прогнозування значення порогу перколяції шляхом

визначення насипної густини провідної компоненти.

ВИСНОВКИ

Проведено дослідження електрофізичних властивостей системи ПХТФЕ–ВНТ з різним ступенем диспергування ВНТ. Показано, що значення дійсної та уявної складових комплексної діелектричної проникності на НВЧ композитів з ВНТ після обробки методом БПМ перевищують вихідні у 1.5 рази, а поріг

перколяції на низьких частотах знижується більш ніж в 3 рази.

Виявлено розтягування та руйнування клубків і агломератів ВНТ при диспергуванні ВНТ методом БПМ та суттєве зменшення їх насипної густини, що дало можливість суттєво знизити поріг перколяції полімерних композитів. Встановлено, що при введенні в полімер ВНТ значення порогу перколяції систем прямо пропорційні насипній густині ВНТ і не залежать від питомої густини полімеру.

Влияние бесконтактного диспергирования углеродных нанотрубок на электрофизические свойства композитов с полихлортрифторэтиленом

С.Н. Махно

*Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко Национальной академии наук Украины
ул. Генерала Наумова, 17, Киев, 03164, Украина, stmax@ukr.net*

Исследовано зависимости действительной ϵ' и мнимой ϵ'' составляющих комплексной диэлектрической проницаемости систем полихлортрифторэтилен–углеродные нанотрубки (УНТ) при содержании УНТ от 0.0025 до 0.05 объемных долей до и после обработки методом бесконтактного измельчения материалов. Показано, что для композитов, которые содержат УНТ, обработанные методом бесконтактного измельчения материалов, значения ϵ' и ϵ'' на сверхвысоких частотах выше в 1.5 раза в сравнении с композитами с исходными УНТ, а порог перколяции на низких частотах снижается более чем в 3 раза.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, полихлортрифторэтилен, диэлектрическая проницаемость, порог перколяции, электропроводность

Influence of noncontact dispergation of carbon nanotubes on the electrophysical properties of composites containing polychlorotrifluoroethylene

S.M. Makhno

*Chuiiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine
17 General Naumov Str., Kyiv, 03164, Ukraine, stmax@ukr.net*

The dependence of the real ϵ' and imaginary ϵ'' constituents of complex dielectric permittivity of polychlorotrifluoroethylene–carbon nanotubes (CNT) systems in the content range 0.0025–0.05 (volume fraction) before and after noncontact dispergation treatment have been investigated. It has been shown that the values ϵ' and ϵ'' are 1.5 times higher in the region of ultra-high frequencies for the composites containing CNT treated by noncontact dispergation in comparison with non-treated materials whereas the percolation threshold is 3 times lower in the region of low frequencies.

Keywords: carbon nanotubes, polychlorotrifluoroethylene, dielectric permittivity, percolation threshold, conductivity

ЛІТЕРАТУРА

1. Бадашшина Э.Р., Гафурова М.П., Эстрин Я.И. Модифицирование углеродных нанотрубок и синтез полимерных композитов с их участием // *Успехи химии*. – 2010. – Вып. 11, № 79. – С. 1027–1064.
2. Богатырева Г.П., Ильницкая Г.Д. Физико-химические свойства углеродных нанотрубок // *Физика и техника высоких давлений*. – 2013. – Т. 23, № 2. – С. 34–39.
3. Базалій Г.А., Ильницкая Г.Д., Олейник Н.А., Тимошенко В.В. Исследование адсорбционной активности функционализированных нанопорошков углеродных материалов // *Прогресивні технології і системи машинобудування*. – 2013. – Вип. 1–2. – С. 42–48.
4. Ковальчук О.В., Беженар Ю.В., Вовк В.Е., Ксендзенко А.И. Вплив вуглецевих нанотрубок на діелектричні властивості нематичного рідкого кристала 6СНВТ // *Наукоємні технології*. – 2009. – № 3–4. – С.91–95.
5. Абдрахимов Р.Р., Сапожников С.Б., Синицин В.В. Исследование реологии суспензий для эффективного диспергирования многостенных углеродных нанотрубок в эпоксидной смоле // *Вестник УрГУ*. – 2012. – № 34, Вып. 7. Сер. Мат., Мех., Физ. – С. 68–74.
6. Ковальская Е. А., Картель Н.Т., Приходько Г.П., Семенов Ю.И. Физико-химические методы очистки углеродных нанотрубок // *Хімія, фізика та технологія поверхні*. – 2012. – Т. 3, № 1. – С. 20–44.
7. Bulavin L.A., Savenko V.S., Lebovka N.I. et al. Small-angle neutron scattering of multiwalled carbon nanotubes in aqueous suspensions in presence of laponite platelets or cetyltrimethylammonium bromide // *Ядерна фізика та енергетика*. – 2013. – Т. 14, № 4. – С. 372–376.
8. Пат. Российской Федерации RU2100082, Способ измельчения материалов в потоке энергоносителя и устройство вихревого помола / Шостак В. В., Кулаков М. П. – Дата начала действия патента:1996.05.14.
9. Ковальська С.О., Семенов Ю.И., Картель М.Т., Приходько Г.П. Синтез каталізаторів росту вуглецевих нанотрубок та тестування їхньої ефективності // *Хімія, фізика та технологія поверхні*. – 2012. –

REFERENCES

1. Badamshina E. R., Gafurova M. P., Estrin Ya. I. Modification of carbon nanotubes and synthesis of polymeric composites involving the nanotubes. *Russ. Chem. Rev.* 2010. **11**(79): 1027.
2. Bogatyreva G.P., Ilitskaya G.D. Physical and Chemical Properties of carbon nantubes. *High Pressure Physics and Techniques*. 2013. **23**(2): 34 [in Russian].
3. Bazaly G.A., Ilitskaya G.D., Oleynik N.A. The investigation of adsorption activity of functionalized powders of carbon materials. *Progressive Technologies and Engineering Systems*. 2013. **1–2**: 42 [in Ukrainian].
4. Koval'chuk A.V., Bezhenar Yu.V., Vovk V.E., Ksendzenko A.I. Dielectric studies of dispersions of carbon nanotubes in liquid crystals 6CBHT. *Science-Based Technologies*. 2009. **3–4**: 91 [in Ukrainian].
5. Abdrahimov R.R., Sapozhnikov S.B., Sinicyn N.V. Research rheology of suspensions for effective dispersion of multi-walled carbon nanotubes in an epoxy resin. *Bulletin of the South Ural State University. Ser Math., Mech., Physics*. 2012. **34**(7): 68 [in Russian].
6. Koval'ska E.O., Kartel M.T., Prikhod'ko G.P., Sementsov Yu.I. Physical and chemicals of parification methods for carbon nanotubes (review). *Chem. Phys. Technol. Surf.* 2012. **3**(1): 20 [in Russian].
7. Bulavin L.A., Savenko V.S., Lebovka N.I., Kuklin A.I., Soloviov D.V., Ivankov O.I. Small-angle neutron scattering of multiwalled carbon nanotubes in aqueous suspensions in presence of laponite platelets or cetyltrimethylammonium bromide. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2013. **14**(4): 372.
8. Patent Russian Federation RU2100082. Shostak V.V., Kulakov M.P. Method of Grinding Material and Energy flows in a vortex grinding unit. 1996.05.14.
9. Koval'ska E.O., Sementsov Yu.I., Kartel M.T., Prikhod'ko G.P. Synthesis of catalysts for growth of carbon nanotubes and testing their effectiveness. *Chem. Phys. Technol. Surf.* 2012. **3**(3): 335 [in Ukrainian].

- Т. 3, № 3. – С. 335–340.
10. Ганюк Л.М., Ігнатков В.Д., Махно С.М., Сорока П.М. Дослідження діелектричних властивостей волокнистого матеріалу // Укр. фіз. журн. – 1995. – Т. 40, № 6. – С. 627–629.
11. Луцкейкин Г.А. Методы исследования электрических свойств полимеров Москва: Химия, 1988. – 157 с.
10. Ganiuk L.N., Ignatkov V.D., Makhno S.N., Soroka P.N. Study of dielectric properties of the fibrous material. *Ukr. Phys. J.* 1995. **40**(6): 627.
11. Lusheykin G.A. *Methods for studying the electrical properties of polymers.* (Moscow: Khimiya, 1988).

Надійшла 15.09.2014, прийнята 19.06.2015