

$\left(\pi\sqrt{\frac{8}{3}}; 2\pi\right)$  і додатну на проміжку  $\left(0; \pi\sqrt{\frac{8}{3}}\right)$ . Це означає, що саме при  $\alpha = \pi\sqrt{\frac{8}{3}}$  об'єм конуса буде найбільшим.

Математичну задачу було розв'язано, але вчителю трудового навчання не можна сказати: «Все просто, виріжте, будь ласка, з жерстяного круга сектор із центральним кутом  $\alpha = \pi\sqrt{\frac{8}{3}}$  радіанів!» Потрібно було знайти наближене значення цього кута в градусах. Оскільки  $\pi$  радіанів – це 180 градусів, а  $\sqrt{\frac{8}{3}} \approx 1,633$ , то шукана градусна міра кута  $\alpha$  дорівнює 294 градуси.

Зрозуміло, що учням, які будуть вимірювати кут і різати жерсть, простіше вказати центральний кут для сектора, який слід вилучити з круга. Градусна міра цього кута, очевидно, дорівнює 66 градусів. Саме це число я й озвучив вчителю трудового навчання по телефону. Як розповідав Анатолій Володимирович, він знав і того студента, і цей випадок, а те відро найбільшого об'єму й досі висить на пожежному щиті біля входу в школу.

## ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СИСТЕМИ ПОЛІХЛОРТРИФТОРЕТИЛЕН – ТЕРМОРОЗШИРЕНИЙ ГРАФІТ

**Шут М.І.,**

*академік Національної Академії  
Педагогічних Наук України, доктор  
педагогічних наук, професор*

**Січкач Т.Г.,**

*кандидат фізико-математичних наук, доцент*

**Рокицький М.О.**

*кандидат фізико-математичних наук, доцент  
Національний педагогічний університет  
імені М.П. Драгоманова*

**Анотація.** Ультразвуковим методом досліджувався вплив нанорозмірного карбонового наповнювача на фізико-механічні та релаксаційні властивості полімерного композиту на основі поліхлортрифторетилену. Нанорозмірний наповнювач отримували шляхом ультразвукової диспергації терморозширеного графіту. Розроблено і описано методику попереднього визначення порогу перколяції. Досліджена інверсія механічних властивостей композитів при переході через поріг перколяції. Показано, що при виготовленні композитів недоцільно використовувати концентрації, що значно

перевищують поріг перколяції, оскільки це приводить до коагуляції частинок наповнювача та розрихлення матриці.

**Ключові слова:** полімер, поліхлортрифторетилен, терморозширений графіт, модуль пружності, поглинання.

Підвищений інтерес до розробки і вивчення властивостей полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) зумовлений можливістю суттєвого поліпшення фізичних властивостей композицій по відношенню до вихідних компонентів. ПКМ можуть набувати унікальних властивостей, які визначаються властивостями як полімерної матриці, так і наповнювача.

Використання графітових матеріалів в якості наповнювачів є надзвичайно перспективним. ПКМ на основі графітомістких матеріалів викликають зацікавленість ще й тому, що вони мають властивості металів (високі електропровідність та теплопровідність) і, разом з тим, такі характеристики, як низька питома вага, корозійна стійкість, інертність по відношенню до багатьох агресивних середовищ тощо.

Особливе місце серед вуглецевих матеріалів займає терморозширений графіт (ТРГ), отриманий шляхом глибокої термохімічної обробки природного дисперсного графіту [1, 2], що супроводжується розділенням графітових шарів. Відсутність функціональних груп на поверхні графітових пластинок сприяє перегрупуванню матеріалу в кластери мікронного розміру. Наповнені ТРГ матеріали відрізняються високою анізотропією фізичних властивостей [3]. Вздовж графітових площин коефіцієнт теплопровідності досягає рівня теплопровідності міді, а в перпендикулярному напрямі може бути на два порядки менше.

Метою даної роботи було з'ясування впливу нанорозмірного наповнювача на властивості ПКМ та дослідження фізико-механічних властивостей системи поліхлортрифторетилен (ПХТФЕ) + терморозширений графіт.

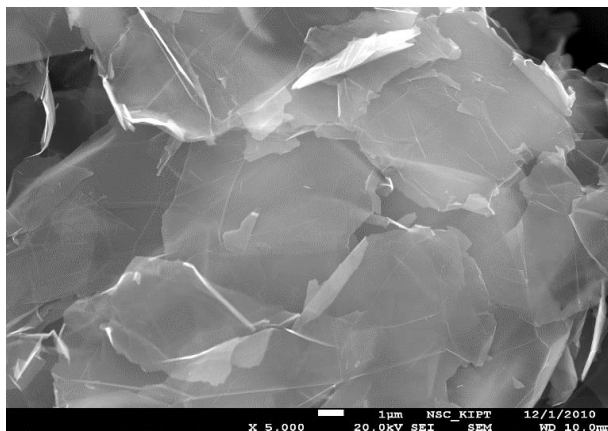


Рис.1. Електронно-мікроскопічне зображення дисперзованого ТРГ.

Для одержання терморозширеного графіту було проведено диспергування в спиртовому акустичному середовищі. Терморозширений графіт заливали етиловим спиртом і обробляли ультразвуком за допомогою ультразвукового диспергатора УЗДН-А протягом 10 хв. на частоті 22 кГц з перервою для охолодження суміші до кімнатної температури. Диспергований ТРГ висушували за температури  $T \sim 363$  К до повного видалення спирту. Результати електронної мікроскопії свідчать (рис. 1), що дисперговані частинки ТРГ мають форму пластин ( $d \sim 5 - 10$ ) нм змінної товщини, ефективний розмір яких не перевищує 25 – 40 нм.

Для одержання ПКМ з різним вмістом компонентів після диспергування у суміш терморозширеного графіту та етилового спирту додавали порошкоподібний полімер (ПХТФЕ).

З метою забезпечення аналізу зміни фізико-механічних властивостей були проведені ультразвукові дослідження системи на різних частотах (5, 7,5 та 10 МГц). Досліджувались фізико-механічні характеристики системи (дійсна складова модуля пружності  $E'$ , уявна складова модуля пружності, або модуль втрат  $E''$ , тангенс кута механічних втрат  $\text{tg}\delta$ , коефіцієнт поглинання ультразвуку  $a$  та стрибок поглинання ультразвуку при зміні частоти  $\Delta a$ ) [4, 5]. Вказані характеристики визначались методом суміщення можливостей ехо-імпульсного та імпульсного фазового методів, що забезпечує можливість вимірювання УЗ характеристик матеріалів із відносно високим поглинанням.

Експериментально визначена залежність питомої електропровідності нанокарбонових полімерних композитів системи ПХТФЕ – нанодисперсний графіт від вмісту нанодисперсного графіту ( $\sigma = f(\phi)$ ) на постійному струмі подана на рис. 2, а.

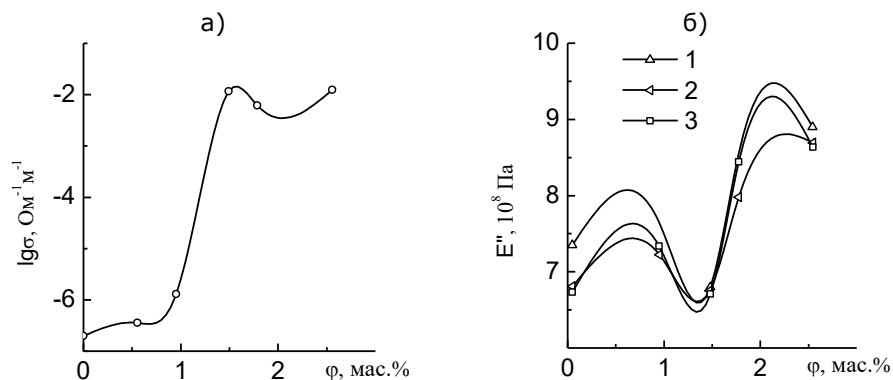


Рис. 2. Концентраційні залежності логарифму питомої електропровідності ( $\lg\sigma$ ) (а) та модуля пружності ( $E'$ ) (б) композитів системи ПХТФЕ - нанодисперсний графіт на частотах 1 - 5 МГц, 2 - 7,5 МГц та 3 - 10 МГц відповідно

Як відомо, вплив нанонаповнювачів суттєво відрізняється від впливу мікронаповнювачів тим, що дозволяє значно знизити поріг перколяції. Це певним чином змінює властивості нанонаповненої полімерної матриці при внесенні в неї нанокарбону, отриманого шляхом ультразвукової диспергації терморозширеного графіту.

Диспергація терморозширеного графіту приводить, з урахуванням особливостей кристалічної решітки, до утворення певної місткової системи, коли розміри містків вздовж неї складають порядку  $1 \div 5 \mu\text{m}$ , а впоперек  $2 \div 5 \mu\text{m}$ . З цим пов'язано особливість впливу такого роду наповнювача на полімерну матрицю та відповідну зміну фізико-механічних властивостей.

Вказані залежності демонструють достатньо високу чутливість зміни фізико-механічних властивостей від масової концентрації диспергованого терморозширеного графіту. На концентраційних залежностях дійсної складової модуля пружності композитів системи ПХТФЕ – нанодисперсний графіт (рис. 2. б) спостерігається певна інверсія після досягнення порогу перколяції ( $\approx 0,95$  мас. %).

Таку ж інверсію має залежність модуля втрат  $E''$  (рис. 3. а) Однак, оскільки зміни дійсної складової значно менші, ніж зміни уявної складової, це приводить до появи мінімуму  $\text{tg}\delta$  в околі порогу перколяції (рис. 3. б). Зазначимо, що значення  $\text{tg}\delta$  до порогу перколяції та після нього значно більші ніж при його досягненні.

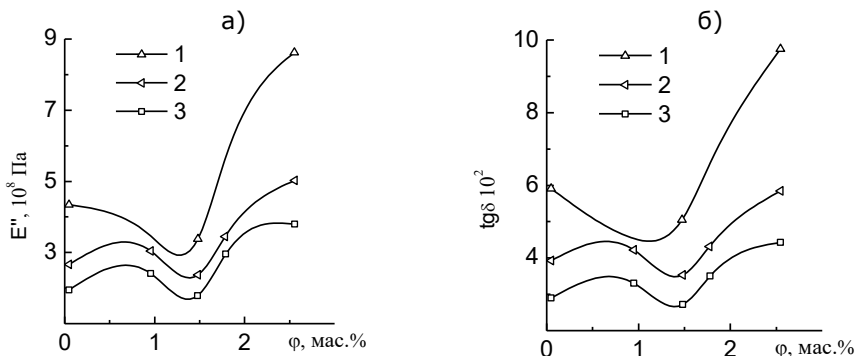


Рис. 3. Концентраційні залежності модуля втрат ( $E''$ ) (а) та тангенса кута механічних втрат ( $\text{tg}\delta$ ) (б) композитів системи ПХТФЕ - нанодисперсний графіт на частотах 1 - 5 МГц, 2 - 7,5 МГц та 3 - 10 МГц відповідно

Це знаходить своє підтвердження і в значенні коефіцієнта поглинання ультразвуку  $\alpha$ . Відмітимо, що на всіх частотах (5, 7,5 та 10 МГц) концентраційні залежності практично ідентичні за характером.

Результати проведених досліджень показують, що для системи поліхлортрифторетилен – нанодисперсний графіт характерним є відносно низький поріг перколяції ( $\approx 0,95$  мас. %). В залежності від концентрації нанокарбону структура полімерної матриці та системи в цілому характеризується змінами розмірів неоднорідності, що пов'язано з

переходом від неоднорідностей у вигляді кристалітів, ріст яких зумовлюється впливом нанонаповнювача при низьких концентраціях, через поріг перколяції, до неоднорідностей, пов'язаних з коагуляцією наночастинок при концентраціях, що перевищують поріг перколяції. Крім того ультразвукові дослідження фізико-механічних та релаксаційних властивостей композитів системи ПХТФЕ – нанодисперсний графіт показали, що при створенні нанокомпозитів недоцільно використовувати концентрації, що значно перевищують поріг перколяції, оскільки це приводить до коагуляції частинок наповнювача та розрихлення матриці, що негативно впливає на комплекс їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

#### **Інформаційні джерела:**

1. Харьков Є.І., Лисов В.І., Мацуй Л.Ю., Вовченко Л.Л., Цуруль М.Ф., Морозовська Н.О. Пристрій для одержання терморозширеного графіту. Патент на винахід N 33777A, бюл.1, 2001.
2. Vovchenko L., Matzui L., Zakharenko M., Babich M., Brusilovetz A. Thermoexfoliated graphite as support for production of metal-graphite nanocomposites // Journ. of Chem. and Phys. of Solids. – 2004. – V. 65, № 2-3. – P. 171 - 175.
3. Bonnissel M., Luo L., Tondeur D. Compacted exfoliated natural graphite as heat conduction medium. Carbon., 2001, V. 39. – P. 2151 - 2161.
4. Шут М.І., Левандовський В.В., Січкара Т.Г., Янчевський Л.К. Загальна фізика. Спеціальний фізичний практикум К.: НПУ імені М.П. Драгоманова, 2017. – 190 с.
5. Т.Г. Сичкарь, Н.И. Шут, М.А. Рокицкий, А.Н. Шут. Тепло- и электрофизические свойства нанокомпозитов на основе полихлортрифторэтилена. В сборнике научных трудов «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2021, с. 214 – 225.