

Е. А. Лисенков¹
О. В. Стрюцький²

РЕЛАКСАЦІЙНІ ТА АКУСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛІМЕРНИХ НАНОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ПОЛІЕТИЛЕНОКСИДУ ТА НАНОЧАСТИНОК СРІБЛА

¹Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв;

²Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, Київ

Полімерні наноккомпозитні матеріали, які містять наночастинки срібла є перспективними, адже поєднують у собі властивості полімеру та неорганічної речовини. Такі матеріали мають широке практичне застосування, зокрема як антимікробні покриття та конструкційні матеріали. Переважна більшість наукових досліджень вивчає властивості матеріалів на основі полімерів та наночастинок срібла без пояснення процесів взаємодії між матрицею та наповнювачем. Однак, одними із найінформативніших є релаксаційні характеристики, вивчення яких дозволить встановити механізми впливу наночастинок та спрогнозувати кінцеві властивості матеріалу. Метою цієї роботи є створення нового матеріалу на основі поліетиленоксиду (ПЕО) та наночастинок срібла, а також дослідження його релаксаційних та акустичних характеристик. У роботі розроблено новий підхід до синтезу наночастинок срібла. Використовуючи цей підхід, синтезовано стабілізовані наночастинки срібла. Використовуючи метод діелектричної релаксаційної та акустичної спектроскопії, досліджено релаксаційні та акустичні характеристики полімерних наноккомпозитних матеріалів на основі ПЕО та синтезованих частинок срібла. У результаті встановлено, що стабілізовані наночастинки срібла істотно впливають на релаксаційні та акустичні характеристики наноккомпозитного матеріалу за відносно низьких концентрацій нанонаповнювача (1 %). Енергія активації та час релаксації макромолекул ПЕО, а також швидкість поширення ультразвуку та коефіцієнт затухання досліджуваних матеріалів екстремально залежали від вмісту наповнювача. Така залежність пояснюється агрегаційними процесами наночастинок у полімерній матриці. Показано, що 1 % наночастинок срібла у системі є оптимальним, та зроблено припущення, що за такого вмісту наповнювача функціональні характеристики будуть найприйнятнішими для застосування цього матеріалу.

Ключові слова: наночастинки срібла, полімерні наноккомпозити, час релаксації, енергія активації, швидкість звуку, коефіцієнт затухання.

Вступ

Технологічна і економічна ефективність нових конструкційних матеріалів та покриттів значною мірою залежить від того, чи відповідає їх застосування вимогам жорсткості або міцності цього елемента конструкції і забезпечує його довговічність за заданих умов навантаження. Проблема прогнозування властивостей структурних елементів, головною серед яких є надійність, є актуальною для виробів із полімерних матеріалів, оскільки вони відрізняються значною нестабільністю та погіршенням своїх механічних властивостей. Для поліпшення експлуатаційних характеристик конструкційних матеріалів та покриттів до полімерної матриці вводять нанорозмірний наповнювач. Створені таким чином полімерні наноккомпозитні матеріали поєднують оптимальні властивості полімерів та неорганічних частинок [1], [2]. Особливе місце серед металополімерних композитів займають матеріали з включенням наночастинок срібла (НЧС), які характеризуються поліпшеними механічними властивостями, а також проявляють високу антимікробну активність [3]. Показано, що властивості наносрібла відрізняються від властивостей макроматеріалу [4]. Для виготовлення матеріалів на основі полімеру та наночастинок срібла існують багато методів. Серед цих методів є плазмове нанесення, іонна імплантація, обробка розплаву, пошарового нанесення на волокно, лиття розчину та органо-неорганічне гібридне покриття тощо [5]. Ці методи мають як свої переваги, так і недоліки.

Тому підбір методу виготовлення є складною задачею і потребує подальшого вивчення.

Більшість експлуатаційних характеристик полімерних нанокompозитних матеріалів значно залежить від умов експлуатації (температури, прикладеного тиску, тривалості, дії зовнішнього електромагнітного випромінювання тощо). Існує багато публікацій, в яких описано дослідження вказаних характеристик, проте майже відсутні роботи, які б описували механізми впливу нанорозмірного наповнювача на структуру та внутрішні процеси, зокрема релаксаційні, які відбуваються у полімерній матриці. Однак вивчення саме релаксаційних процесів дасть змогу прогнозувати кінцеві властивості полімерних нанокompозитів у процесі їх експлуатації.

Автори роботи [6] вивчали релаксаційні властивості композитного матеріалу на основі поліметилметакрилату та вуглецевих наповнювачів. Введення вуглецевих точок у полімерну матрицю забезпечує пластифікуючий ефект на структуру полімеру, що приводить до збільшення рухливості полімерних ланцюгів і, як наслідок, зміни релаксаційних параметрів. Розраховані енергії активації показують, що наночастинки вуглецевих наповнювачів погано взаємодіють з сегментами ланцюга макромолекул полімеру.

Вивчення релаксаційних процесів у системі на основі полівінілового спирту, наповненого наночастинками срібла та оксидом графену, дозволило спрогнозувати та пояснити кінцеві властивості нанокompозитних матеріалів [7]. Зафіксовано зростання діелектричної проникності та електропровідності зі зростанням вмісту наповнювача у системі.

Автори роботи [8] досліджували релаксаційні властивості композитного матеріалу на основі полівінілового спирту та частинок оксиду цинку. Показано, що діелектрична проникність зменшується з частотою, але демонструє дещо іншу поведінку, коли вона змінюється з температурою, це може бути пов'язано з в'язкою природою полімеру. Встановлено, що значення часу релаксації зменшуються з температурою.

Важливу інформацію про процеси, які виникають у полімерній матриці, можна отримати за допомогою звукових хвиль (акустична релаксація), вивчаючи їхній вплив на матеріал [9]. Так, у роботі [10] вивчали поширення ультразвуку у композитних системах на основі силікону та колоїдних частинок алюмінію. Автори встановили, що акустична фазова швидкість і акустичний імпеданс нанокompозитних плівок зростають за наявності в них оксиду алюмінію. Це дало ще один варіант адаптації акустичного опору нанокompозитної плівки для створення покриттів для високоякісних матеріалів, що використовуються у високочастотних медичних ультразвукових перетворювачах.

Отже, дослідження релаксаційних характеристик нанокompозитних матеріалів на основі поліетиленоксиду та наночастинок срібла є перспективним та буде інформативним для пояснення процесів, пов'язаних з впливом наночастинок на полімерну матрицю. Тому *мета роботи* — це створення нового матеріалу на основі поліетиленоксиду та наночастинок срібла, а також дослідження його релаксаційних та акустичних характеристик.

Експериментальна частина

Поліетиленоксид (ПЕО), $\text{HO}[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}]_n\text{H}$ ($n \approx 22$) молекулярної маси $M_w = 1000$, виробництва компанії Aldrich, вибраний полімерною матрицею. За $T = 298 \text{ K}$ ПЕО є твердою речовиною з густиною $\rho = 1070 \text{ кг/м}^3$. Температура плавлення $T_{\text{пл}} \approx 34...35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Циклічний ангідрид 2-сульфобензойної кислоти ("Aldrich" $\geq 95 \%$), N-метилімідазол ("Aldrich", 99 %), AgNO_3 (фарм.) і тринатрійцитрат ($\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\text{Na}_3$, фарм.) використовували без додаткової очистки; гіперрозгалужений аліфатичний олігоестерполіол Boltorn®H30 ("Perstorp" Sweden) MM 3500 (еквівалентна MM олігомеру за гідроксильними групами, визначена методом ацилювання, складає 117 г/екв) очищали шляхом переосадження з ацетону в етер з подальшою сушкою в вакуумі (1...3 мм. рт. ст.) за температури 25...30 $^\circ\text{C}$ протягом 6 год; диметилформамід (ДМФА) переганяли за залишкового тиску 1...3 мм. рт. ст., а етанол та діетиловий етер використовували без перегонки.

Синтез аніонної протонної олігомерної іонної рідини гіперрозгалуженої будови ГР- $([\text{SO}_3][\text{HMim}^+])_{32}$ здійснювали в дві стадії у відповідності з раніше розробленою авторами методикою [11]. На першій стадії проводили вичерпне ацилювання олігоестерполіолу (містить 32 кінцеві первинні гідроксильні груп) циклічним ангідридом 2-сульфобензойної кислоти в ДМФА за 80...90 $^\circ\text{C}$ з подальшим частковим видаленням розчинника за зниженого тиску, висаджуванням продукту реакції в етер та сушкою вакуумі. На другій стадії отриманий продукт реакції нейтралізували N-метилімідазолом в етанолі за кімнатної температури з подальшим частковим випарюванням

розчинника, висаджуванням отриманої сполуки в етер, очисткою переосадженням зі спирту в етер та сушкою в вакуумі.

Синтез наночастинок Ag(0) (НЧС) здійснювали відновленням іонів Ag(I) в складі AgNO₃ тринатрійцитратом в присутності розробленого нами іонвмісного олігомеру гіперрозгалуженої будови ГР-([SO₃][HMim⁺])₃₂ як стабілізатора їхньої поверхні. До 0,941 г (0,002202 екв) ГР-([SO₃][HMim⁺])₃₂ в 22 мл води добавляли 0,125 г (0,000734 екв) AgNO₃ в 8 мл води, перемішували суміш 10 хв за кімнатної температури, добавляли 0,731 г (0,002833 екв) C₆H₅O₇Na₃ в 30 мл води та перемішували ще 10 хв. Далі температуру розчину піднімали до 100 °С та кип'ятили зі зворотним холодильником 1 год. При цьому колір розчину змінювався від жовтого до коричневого. Розчин фільтрували, воду випарювали за 70...75 °С, отриманий у вигляді коричневого осаду продукт вакуумували за залишкового тиску 1...3 мм. рт. ст. і температури 75...80 °С, промивали етанолом та сушили в вакуумі (1...3 мм. рт. ст.) за 75...80 °С. Вихід продукту 0,868 г (85,2 %). Отриманий продукт є коричневим порошком, розчинним у воді та нерозчинним в органічних розчинниках.

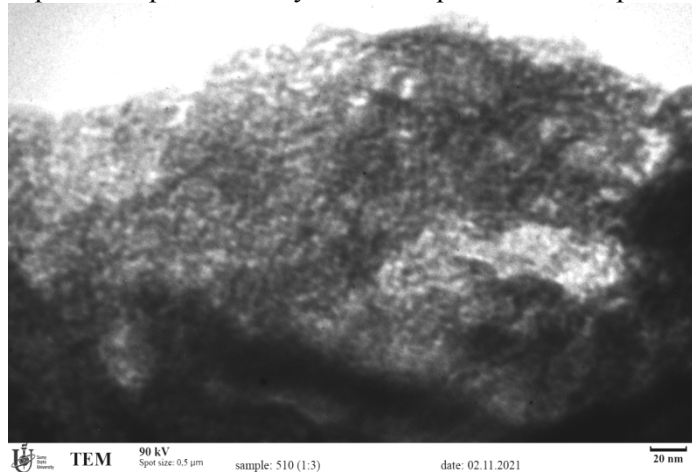


Рис. 1. Фотографія наночастинок срібла у порошкоподібному стані

На рис. 1 показана мікрофотографія для синтезованих НЧС. На фотографії спостерігаються розподібна структура, що складається з нанорозмірних частинок. Видно, що частинки мають структуру типу ядро-оболонка, де наночастинка срібла є ядром, а органічний стабілізатор — оболонкою. Аналіз мікрофотографій показав, що середній розмір отриманих наночастинок становить 8...10 нм.

Нанокompозити готували методом ультразвукового змішування у розплаві за допомогою ультразвукового диспергатора УЗД-А650. Час диспергування становив 5 хв, потужність — 150 Вт.

Релаксаційні характеристики досліджували методом діелектричної релаксаційної спектроскопії, реалізованої на базі вимірювача іммітансу Е7-20. При цьому вимірювали дійсну (Z') та уявну (Z'') частини імпедансу у частотному інтервалі від 10 Гц до 1 МГц. Товщина зразків становила 100 мкм. Моделювання спектрів проводили з використанням програмного забезпечення Origin 9.0.

Акустичні характеристики (швидкість поширення і коефіцієнт згасання ультразвуку) визначали ехо-імпульсним методом за допомогою вимірювача УС-12ИМ. Частота ультразвуку становила 5 МГц.

Результати дослідження

Діелектрична релаксаційна спектроскопія є одним з ефективних методів вивчення релаксаційних характеристик різних матеріалів, зокрема полімерних нанокompозитів. Із результатів частотних залежностей уявної частини електричного модуля та тангенсу кута діелектричних втрат для полімерних нанокompозитних матеріалів можна судити про механізми руху макромолекул. Ці механізми значною мірою залежать від складу, структури та морфології полімерних нанокompозитів.

Однією з величин, яка дає вичерпну інформацію про поведінку релаксаційних характеристик матеріалу є електричний модуль. Використання електричного модуля дає деякі переваги в інтерпретації процесів об'ємної релаксації, оскільки варіації у великих значеннях діелектричної проникності та провідності на низьких частотах зведені до мінімуму. Використовуючи експериментально визначені величини дійсної та уявної частини імпедансу можна розрахувати дійсну та уявну частини електричного модуля

$$M' = Z' \omega C_0; \quad (1)$$

$$M'' = Z'' \omega C_0, \quad (2)$$

де C_0 — ємність конденсатора «заповненого» вакуумом; ω — циклічна частота.

Формалізм електричних модулів дає змогу уникнути маскування релаксації провідності і отримати додаткову інформацію про релаксаційні процеси в досліджуваних нанокompозитних системах. Спектри уявної частини комплексного електричного модуля для нанокompозитів на основі ПЕО та НЧС показані на рис. 2.

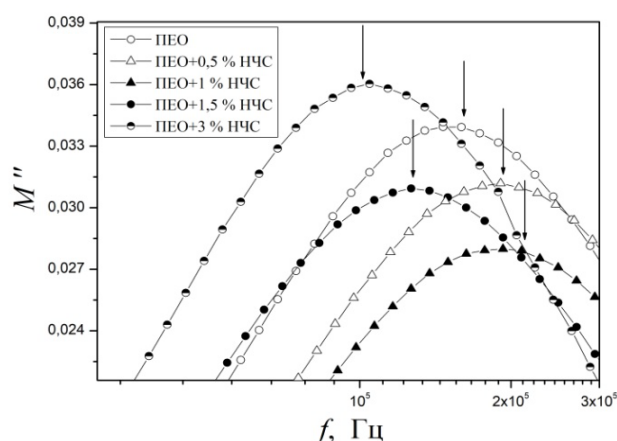


Рис. 2. Залежність уявної частини електричного модуля від частоти для наноккомпозитів на основі ПЕО, наповненого НЧС. Стрілками показані максимуми, які відповідають f_{\max}

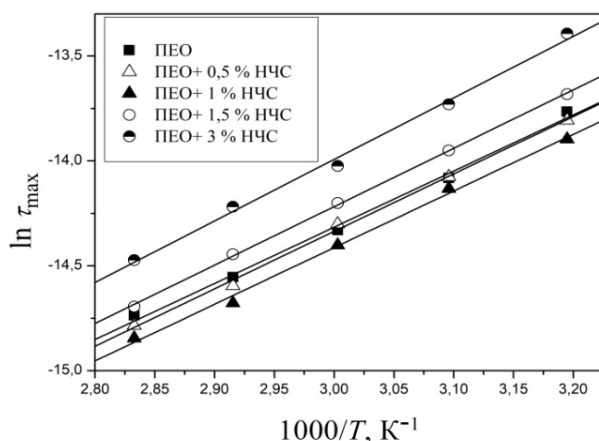


Рис. 3. Температурні залежності τ_{\max} для наноккомпозитів на основі ПЕО та НЧС

Аналіз поданих на рис. 2 залежностей показує, що з введенням наповнювача, в області концентрацій до 1% НЧС, спостерігається зсув областей релаксації у бік вищих частот, що пов'язано з підвищенням сегментальної рухливості у композитних системах. За 1% вмісту наповнювача спостерігається максимум сегментальної рухливості. Зі зростанням вмісту нанонаповнювача (більше 1%) спостерігається зсув областей релаксації у бік менших частот, що свідчить про зниження сегментальної рухливості макромолекул поліетиленоксиду.

Використовуючи вираз для обчислення часу релаксації, який відповідає максимуму на рис. 2 $\tau_{\max} = 1/(2\pi f_{\max})$, а також значення f_{\max} із залежностей $M''(f)$, розраховані спектри часів релаксації для наноккомпозитів з різним вмістом наповнювачів. Температурні залежності часів релаксації у напівлогарифмічних координатах показані на рис. 3.

Як впливає з рис. 3, залежності $\tau_{\max}(1/T)$ прямолінійні, що дає змогу описати їх за допомогою рівняння Арреніуса для часів релаксації [12]

$$\tau_{\max} = \tau_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (3)$$

де E_a — енергія активації; k — стала Больцмана, τ_0 — час релаксації, коли $T \rightarrow \infty$.

Результати розрахунку параметрів рівняння (3) з урахуванням експериментальних даних подано в таблиці. Аналіз отриманих результатів показує, що енергія активації екстремально залежить від складу систем.

Розраховані релаксаційні характеристики наноккомпозитів на основі ПЕО та НЧС

Назва зразка	$\tau_0 \cdot 10^{-10}$, с	E_a , 10^{-19} Дж	E_a , еВ
ПЕО	1,9	0,35	0,21
ПЕО + 0,5 % НЧС	1,5	0,38	0,24
ПЕО + 1 % НЧС	1,2	0,40	0,25
ПЕО + 1,5 % НЧС	1,6	0,37	0,23
ПЕО + 3 % НЧС	1,8	0,36	0,22

Зі збільшенням вмісту наповнювача спостерігається спочатку зменшення часу релаксації, що є свідченням зростання молекулярної рухливості. У разі 1% вмісту нанонаповнювача у системі спостерігається мінімальний час релаксації та відповідно максимальна енергія активації. Після досягнення критичної концентрації (1%) НЧС у системі час релаксації зростає, а енергія активації знижується. Порівнюючи значення E_a та τ_{\max} для ненаповненого ПЕО та наноккомпозитних систем на його основі, можна зробити висновок, що з введенням нанонаповнювача, час релаксації поліетерних макромолекул знижується, а енергія активації зростає. Цей факт пояснюється «розрихленням» системи з введенням НЧС, що приводить до більшої рухливості макромолекул.

Для вивчення впливу НЧС на акустичні характеристики наноккомпозитів на основі ПЕО вивчали особливості проходження ультразвуку через досліджувані зразки. Результати досліджень подані на рис. 4, з якого випливає, що швидкість поширення ультразвуку (v) зростає зі збільшенням вмісту наповнювача, проявляючи екстремальну поведінку. При цьому швидкість ультразвуку зростає від 1510 м/с для ненаповненого ПЕО до майже 1690 м/с для матеріалу, який містить 1% НЧС.

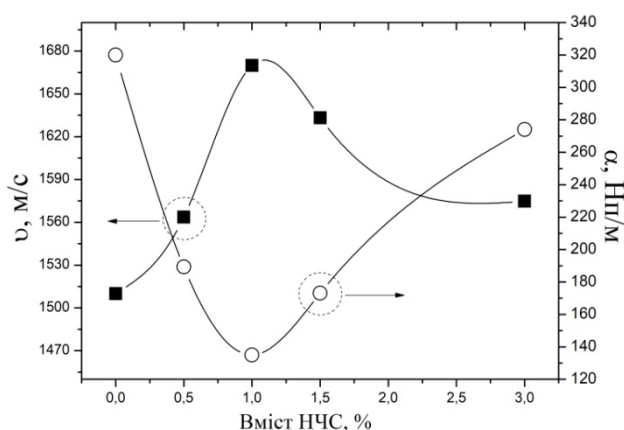


Рис. 4. Залежність швидкості поширення ультразвуку та коефіцієнта затухання від вмісту НЧС для нанокompозитів на основі ПЕО

Аналогічне зростання величини v у концентраційному діапазоні до 1% зафіксоване авторами роботи [13] для системи на основі поліетиленоксиду та вуглецевих нанотрубок. Після досягнення максимуму, величина v спадає (див. рис. 4).

З рис. 4, де показано залежність коефіцієнта затухання ультразвуку (α) від вмісту наночастинок срібла, випливає, що така концентраційна залежність також проявляє екстремальну поведінку. В зоні концентрацій від 0 до 1% відбувається різке зниження коефіцієнта затухання з 320 Нп/м до 135 Нп/м. Таке падіння пов'язане з утворенням «нескінченного» кластера із наночастинок срібла. В процесі формування цього кластера утворюються шляхи передачі фононів. При цьому різко знижується

дисипація енергії ультразвукових хвиль. Після досягнення максимуму, коефіцієнт затухання проявляє тенденцію до зростання, що очевидно корелює зі зниженням величини v . Ці процеси пояснюються агрегацією частинок наповнювача.

Розподіл частинок наповнювача значно впливає на релаксаційні та акустичні характеристики досліджуваних матеріалів. За відносно невеликої кількості наповнювача (менше 1%) НЧС розподіляються рівномірно, що приводить до значного їхнього впливу на релаксаційні (E_a та τ_{max}) та акустичні характеристики (v та α). Процес агрегації частинок НЧС нівелює вплив їхньої нанорозмірності через утворення частинок значно більшого розміру. Тому тенденція зміни досліджуваних характеристик у концентраційному діапазоні від 1 до 3% є оберненою до попередньої. Отже, 1% НЧС у системі є оптимальним, тому можна спрогнозувати, що за такого вмісту наповнювача функціональні характеристики будуть найприйнятнішими для застосування цього матеріалу.

Висновки

У роботі запропоновано новий підхід до синтезу стабілізованих наночастинок срібла та досліджено релаксаційні та акустичні характеристики полімерних нанокompозитних матеріалів на основі поліетиленоксиду. Отримані наночастинок є об'єктами типу «ядро–оболонка», всередині частинки знаходиться ядро зі срібла, вкрите оболонкою із гіперрозгалуженої іонної рідини. Встановлено, що стабілізовані наночастинок срібла суттєво впливають на релаксаційні та акустичні характеристики полімерної матриці за відносно низьких концентрацій нанонаповнювача (близько 1%). При цьому релаксаційні характеристики полімерної матриці (енергія активації та час релаксації) та акустичні (швидкість звуку та коефіцієнт затухання) проявляють екстремальну поведінку зі збільшенням вмісту наповнювача у системі. Визначено, що найбільший вплив на характеристики досліджуваних систем спостерігається за 1% концентрації наночастинок срібла. Встановлено, що вирішальний вплив на релаксаційні та акустичні характеристики нанокompозитних систем на основі ПЕО мають процеси агрегації наповнювача, які нівелюють нанорозмірність частинок срібла.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] J. Wan, B. Fan, and S. H. Thang, "Sonochemical preparation of polymer–metal nanocomposites with catalytic and plasmonic properties," *Nanoscale Adv.*, vol. 3, pp. 3306–3315, 2021.
- [2] D. Giliopoulos, A. Zamboulis, D. Giannakoudakis, D. Bikiaris, and K. Triantafyllidis, "Polymer/Metal Organic Framework (MOF) Nanocomposites for Biomedical Applications," *Molecules*, vol. 25, no. 1, pp. 185, 2020.
- [3] T. Bruna, F. Maldonado-Bravo, P. Jara, and N. Caro, "Silver Nanoparticles and Their Antibacterial Applications," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 22, pp. 7202, 2021.
- [4] D. Olmos, and J. González-Benito, "Polymeric Materials with Antibacterial Activity: A Review," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 4, pp. 613, 2021.
- [5] M. Jokar, K. Loeschner, and A. M. Nafchi, "Modeling of Silver Migration from Polyethylene Nanocomposite Package Response Surface Methodology," *International Journal of Food Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 96–102, 2016.
- [6] I. Bouknaitir et al., "Thermal properties and electric modulus approach to the analysis of dielectric relaxation of nanocomposites based on carbon dots," *Polymer Composites*, pp. 1–8, 2019.

[7] G. Sahu, M. Das, M. Yadav, B. P. Sahoo, and J. Tripathy, "Dielectric Relaxation Behavior of Silver Nanoparticles and Graphene Oxide Embedded Poly(vinyl alcohol) Nanocomposite Film: An Effect of Ionic Liquid and Temperature," *Polymers*, vol. 12, pp. 374, 2020.

[8] S. More, R. Dhokne, and S. Moharil, "Dielectric relaxation and electric modulus of polyvinyl alcohol-Zinc oxide composite films," *Mater. Res. Express*, vol. 4, pp. 055302, 2017.

[9] V. Shilov, V. Sperkach, Y. Sperkach, and A. Strybulevych, "Acoustic Relaxation of Liquid Poly(tetramethylene oxide) with Hydroxyl and Acyl Terminal Groups," *Polymer Journal*, vol. 34, no. 8, pp. 565-574, 2002.

[10] R. Zhang, W. Cao, Q. Zhou, J. H. Cha, K. K. Shung, and Y. Huang, "Acoustic Properties of Alumina Colloidal/Polymer Nano-Composite Film on Silicon," in *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 54, no. 3, pp. 467-469, 2007.

[11] V. V. Shevchenko et al., "Protic and aprotic anionic oligomeric ionic liquids," *Polymer*, vol. 55, no. 16, pp. 3349-3359, 2014.

[12] Y. Shangguan, F. Chen, E. Jia, Y. Lin, J. Hu, and Q. Zheng, "New Insight into Time-Temperature Correlation for Polymer Relaxations Ranging from Secondary Relaxation to Terminal Flow: Application of a Universal and Developed WLF Equation," *Polymers*, vol. 9, pp. 567, 2017.

[13] V. V. Klepko, B. B. Kolupaev, E. A. Lysenkov, and M. O. Voloshyn, "Viscoelastic properties of filled polyethylene glycol in the megahertz frequency band," *Materials Science*, vol. 47, no. 1, pp. 14-20, 2011.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.08.2022

Лисенков Едуард Анатолійович — д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувач лабораторії нанокompatитних матеріалів, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем, e-mail: ealysenkov@ukr.net ;

Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв;

Стрюцький Олександр Васильович — канд. хім. наук, старший науковий співробітник відділу хімії олігомерів і сітчастих полімерів.

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, Київ

E. A. Lysenkov¹
O. V. Striutskyi²

Relaxation and Acoustic Characteristics of Polymer Nanocomposites Based on Polyethylene Oxide and Silver Nanoparticles

¹Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv;

²Institute of Macromolecular Chemistry NAS of Ukraine, Kyiv

Polymeric nanocomposite materials containing silver nanoparticles are promising because they combine the properties of a polymer and an inorganic substance. Such materials have wide practical applications, in particular as antimicrobial coatings and structural materials. The vast majority of works study the properties of materials based on polymers and silver nanoparticles without explaining the processes of interaction between the matrix and the filler. However, one of the most informative is the relaxation characteristics, the study of which will allow us to establish the mechanisms of impact of nanoparticles and predict the final properties of the material. The purpose of this work was to create a new material based on polyethylene oxide (PEO) and silver nanoparticles, as well as to study its relaxation characteristics. The paper developed a new approach to the synthesis of silver nanoparticles. Using this approach, stabilized silver nanoparticles were synthesized. Using the method of dielectric relaxation and acoustic spectroscopy, the relaxation and acoustic characteristics of polymer nanocomposite materials based on PEO and synthesized silver particles were investigated. As a result, it was established that stabilized silver nanoparticles significantly affect the relaxation and acoustic characteristics of the nanocomposite material at relatively low concentrations of the nanofiller (1%). The activation energy and relaxation time of PEO macromolecules, as well as the speed of ultrasound and the damping coefficient of the studied materials were extremely dependent on the content of the filler. This dependence is explained by aggregation processes of nanoparticles in the polymer matrix. It is shown that 1% of silver nanoparticles in the system is optimal, and it is assumed that with this filler content, the functional characteristics will be the most acceptable for the use of such a material.

Keywords: silver nanoparticles, polymer nanocomposites, relaxation time, activation energy, speed of sound, damping coefficient.

Lysenkov Eduard A. — Dr. Sc. (Phys-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Nanocomposite Materials, e-mail: ealysenkov@ukr.net ;

Striutskyi Oleksandr V. — Cand. Sc. (Chem.), Senior Researcher of the Department of Chemistry of Oligomers and Network Polymers