

СТРУКТУРНА СТИСЛИВІСТЬ МЕТАЛОНАНОДИСПЕРСНИХ ПОЛІМЕРНИХ СИСТЕМ

Б. Б. КОЛУПАЄВ^{1*}, Б. С. КОЛУПАЄВ², В. В. ЛЕВЧУК^{2**},
Ю. Р. МАКСИМЦЕВ², В. О. СІДЛЕЦЬКИЙ²

¹Інститут кібернетики Міжнародного економіко-гуманітарного
університету імені академіка Степана Дем'янчука
вул. С. Дем'янчука, 4, 33028, Рівне, Україна
*E-mail: boris_kolupaev@gmail.com

²Рівненський державний гуманітарний університет
вул. Платова, 31, 33000, Рівне, Україна
**E-mail: Levchuk_VV@ukr.net

Отримано 06.06.2015

Наведено результати досліджень структурної стисливості металонанодисперсних систем, отриманих на основі полівінілхлориду (ПВХ), в мегагерцовому діапазоні частот при $293 \leq T \leq 353$ К. Показано, що вона нерозривно пов'язана з об'ємною в'язкістю й залежить від типу і вмісту нанодисперсного металу як наповнювача матеріалу. На основі запропонованої моделі показано, що структурна частина об'ємної деформації змінюється з часом за законом релаксації. Проведено аналіз кількісних результатів щодо пружної і в'язкопружної деформації при зсуві, стиску-розтягу та об'ємному навантаженні композиту.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: структурна стисливість, ультразвук, в'язкість, в'язкопружність

Приведены результаты исследований структурной сжимаемости металлонанодисперсных систем, полученных на основе поливинилхлорида (ПВХ), в мегагерцовом диапазоне частот при $293 \leq T \leq 353$ К. Показано, что она неразрывно связана с объемной вязкостью и зависит от типа и содержания нанодисперсного металла как наполнителя материала. На основе предложенной модели показано, что структурная часть объемной деформации изменяется со временем по закону релаксации. Проведен анализ количественных результатов, касающихся упругой и вязкоупругой деформаций при сдвиге, сжатии-растяжении и объемном нагружении композита.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: структурная сжимаемость, ультразвук, вязкость, вязкоупругость

The paper deals with presenting the results of studying of structural compressibility of the metalnanodisperse systems obtained on the basis of Polyvinyl Chloride (PVC) in the Megahertz frequency range at $293 \leq T \leq 353$ K. It is shown that this value is inseparably related with the volume viscosity and depends on the type and content of the nanodisperse metal as a material filler. On the basis of the offered model, it is shown that the structural part of volume deformation changes over the time according to relaxation law. The quantitative results on elastic and viscoelastic deformations at shift, stretching-compression and volume loading of a composite are analyzed.

KEY WORDS: structural compressibility, ultrasound, viscosity, viscoelasticity

ВСТУП

В'язкопружні явища залежать від структурних змін у тілі й супроводжуються проявами внутрішнього тертя як властивістю матеріалу, що характеризує його здатність необоротно перетворювати підведену до нього енергію пружних коливань у теплову [1]. Підвищений інтерес до вивчення внутрішнього тертя викликаний в основному двома причинами [2]:

- 1) необхідністю врахування розсіювання енергії в конструктивних матеріалах при їх експлуатації в динамічних механічних полях;
- 2) потребою у створенні й використанні структурно-чутливого методу досліджен-

ня в'язкопружних явищ у конденсованих середовищах.

При цьому найбільш перспективним методом дослідження структурних змін вважається визначення величини коефіцієнта поглинання ультразвукових хвиль у матеріалі [3].

Полімерні композити, з одного боку, є типовими представниками структурно-неоднорідних матеріалів, а з другого – відіграють значну роль у реальних інженерних конструкціях. Окрім цього, існує проблема, пов'язана з пошуками нових технологій створення та переробки полімерів у відповідні виробу. Усе це вимагає дослідження процесів деформування гетерогенних полімерних систем (ГПС), особливо в області частот ($10^5 \dots 10^7$) Гц, коли згідно з теорією Дебая [4], починає реалізовуватись

умова “зондування” теплового руху їхніх структурних елементів. Враховуючи те, що в ГПС, створених на основі лінійних гнучколанцюгових полімерів, можуть існувати лише флуктуаційні структурні елементи зі скінченим часом життя τ_i , їхній тепловий рух допустимо звести до суперпозиції поздовжніх і поперечних коливань. Однак, оскільки аморфні полімери у склоподібному стані умовно відносять до “переохолодженого” розтопу, у фізиці високомолекулярних сполук до кінця ще не з’ясовано питання щодо природи спектру пружних коливань зсуву та його взаємозв’язку зі зворотньою величиною максвелівського спектру релаксації. Не розкрито й природу взаємодії компонент на межі розділу фаз полімер–метал, впливу температури і вмісту нанодисперсного металевого наповнювача на в’язкопружні явища в композиті. Також потребує перевірки теорія в’язкопружності аморфних тіл стосовно поширення та поглинання ультразвукових коливань у ГПС і з’ясування ролі структурних факторів у їхньому деформуванні.

З огляду на це, метою даної роботи було використовуючи динамічний режим деформації на циклічній частоті $0.4 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, дослідити залежність в’язкопружних явищ від структурних змін полівінілхлориду (ПВХ) під дією нанорозмірних частинок міді як наповнювача матеріалу та з’ясувати роль структурної стисливості у формуванні релаксаційних властивостей композиту з урахуванням в’язкості зсуву та об’ємної в’язкості.

1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Основою для отримання композитів у режимі температура–тиск ($T-p$) слугував ПВХ марки С-6359-М (молекулярна маса $1.4 \cdot 10^5$). В якості наповнювача використовували нанодисперсний порошок міді, синтез якого проводився у два етапи [5]. На першому з них в ультразвуковому полі хімічним методом здійснювали відновлення металу з солі з наступним промиванням колоїдної системи. Таким чином було отримано металевий осад з розмірами частинок з діаметрами, меншими за 100 нм. На другому етапі цю суспензію поміщали в реактор і пропускали через неї змінний електричний струм. Вибрана напруга певної частоти забезпечувала виникнення між електродами періодичних електричних розрядів, які викликали електроерозійне подрібнення й електрогідралічне руйнування агломератів дисперсного металу. Подальше перемішування суспензії проводили ультразвуковим полем, що забезпечувало однорідність системи і утворення наночастинок міді розміром (35 ± 1) нм. Об’ємний вміст наповнювача

у ПВХ варіювали в діапазоні $0 < \varphi \leq 0.5$ об.%. Застосований $T-p$ режим відповідав параметрам $T = 403 \text{ К}$ і $p = 10.0 \text{ МПа}$.

Дослідження швидкості поширення поздовжньої (v_l) й поперечної (v_t) ультразвукових хвиль, а також відповідних їм коефіцієнтів поглинання (α_l і α_t) проводили на ультразвуковій частоті за допомогою експериментальної установки [6]. З використанням вимірювальної диференціальної кювети імпульсним методом, сумісно з методом обертаючої пластини, за один експеримент було визначено величини v_l , v_t , α_l і α_t ПВХ-систем в області $298 \text{ К} \leq T \leq T_g + 10 \text{ К}$ (тут T_g – температура склування). Суть запропонованого методу полягає в тому, що в заповненій рідиною диференціальній кюветі при повороті зразка на відповідні кути α навколо осі, перпендикулярної напрямку поширення хвилі, у ньому збуджуються поздовжні коливання й коливання зсуву, яким відповідають певні швидкості поширення й коефіцієнти поглинання. При цьому передаючим середовищем (рідиною) слугувало силіконове масло марки ПФМС-4.

Величини v_l , v_t , α_l і α_t в ГПС розраховували згідно зі співвідношеннями

$$v_l = \frac{v_p d}{d \pm \Delta\tau v_p}, \quad (1)$$

$$v_t = \frac{v_p d}{\sqrt{d^2 + (\Delta\tau v_p)^2 - 2d\Delta\tau v_p \cos \alpha}}, \quad (2)$$

$$\alpha_{l,t} = \frac{1}{d} \ln \frac{A_0}{A_{l,t}}, \quad (3)$$

де d – товщина зразка; v_p – швидкість УЗ в рідині; $\delta\tau$ – час проходження ультразвукового сигналу; A_0 і $A_{l,t}$ – амплітуди об’ємних коливань, збуджених у рідині, а також поздовжніх і поперечних коливань композитного зразка.

Далі на основі відомих співвідношень визначались дійсні й уявні частини модулів пружності ГПС:

$$\mu' = \frac{\rho v_t^2 \left(1 - \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2}, \quad (4)$$

$$\mu'' = \frac{2 \frac{\alpha_t v_t}{\omega} \rho v_t^2}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2}, \quad (5)$$

$$E' = k' + \frac{4}{3} \mu' = \rho v_l^2 \frac{1 - \left(\frac{\alpha_l v_l}{\omega}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{\alpha_l v_l}{\omega}\right)^2\right]^2}, \quad (6)$$

$$E'' = k'' + \frac{4}{3}\mu'' = \rho v_l^2 \frac{2\alpha_l v_l}{\omega} \left[1 + \left(\frac{\alpha_l v_l}{\omega} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

Тут μ' , E' , k' – дійсні частини модуля зсуву, модуля Юнга й об'ємного модуля відповідно; μ'' , E'' , k'' – їхні уявні частини.

Похибка вимірювань для v_l і v_t становила 0.5 і 1 %, а для коефіцієнтів поглинання – 8 і 10 % відповідно. Густина зразків ρ визначали методом гідростатичного зважування [6]. При точності визначення маси зразка до $2 \cdot 10^{-7}$ кг похибка цього досліду не перевищує 0.2 %.

2. ТЕОРІЯ

Ступінь автономності структурних елементів макромолекули ПВХ залежить виключно від їх рухливості φ_i , яка є в цьому сенсі єдиним реальним фізичним критерієм. Усі структуроутворення, стереохімічні характеристики яких визначаються як рівні конфігураційного й конформаційного порядку, можуть проявляти себе як автономні структурні елементи. Ефект цього прояву залежить від співвідношення часу їхнього осілого життя τ_i з часом t , протягом якого зовнішні сили деформують композит. Розглянемо випадок малого збурення ГПС під дією ультразвукових коливань частоти ω при циклічній деформації [2]. Враховуючи, що структура полімерів – це взаємне розміщення в просторі, внутрішня будова і характер взаємодії (зв'язку) між структурними елементами, що утворюють макроскопічне тіло, виберемо в якості такого елемента макромолекули ланку, яка повторюється. Це дозволяє лінійну макромолекулу ПВХ виділити в особливу підсистему [7], і використовуючи терміни термодинаміки й статистики малих систем [8], трактувати полімерний стан як особливу форму конденсації речовини. Таким чином, з'являється можливість для з'ясування фізичних особливостей процесу в'язкопружної деформації ПВХ-систем застосувати елементи молекулярно-кінетичної теорії аморфних тіл, запропонованої в [9]. При цьому особливу увагу звернемо на дослідження внутрішнього тертя (в'язкості), яке характеризує дисипативні процеси і є однією з найбільш структурно чутливих характеристик матеріалу [6]. Слід зауважити, що у випадку полімерних систем не існує однозначного пояснення ні для механізму в'язкості, ні для типів її джерел [10]. Були здійснені лише часткові спроби дослідити залежність внутрішнього тертя

від частоти деформації та інших параметрів, таких як амплітуда деформації, температура, вміст інгредієнтів, дія зовнішніх силових і енергетичних полів [2].

Якщо розглядати ГПС як набір підсистем, починаючи з бокових груп ланок і закінчуючи великими мікроблоками або суперсітками, в які вони зв'язують систему в цілому, зазначимо, що наявність енергетичної та ентропійної взаємодії з активними центрами поверхні наповнювача робить при $T < T_g$ вузли сітки нерухожими. При цьому внутрішнє тертя, обумовлене коливаннями мікроблоків, може бути двох типів. Перший з них являє собою динамічне внутрішнє тертя за рахунок демпфіруючих сил, які протидіють руху структурних елементів макромолекул, а другий – внутрішнє тертя типу гістерезису, оскільки дисипація енергії пропорційна площі петлі на діаграмі напруження–деформація. Відповідно, встановлено, що прояви внутрішнього тертя супроводжуються змінами в'язкопружних модулів матеріалу [11].

У розглянутому випадку поширення ультразвукових хвиль у ПВХ-системах залежність між деформацією і напругою від часу визначається множителем $\exp(j\omega t)$, де $j = \sqrt{-1}$. Величини феноменологічних коефіцієнтів поглинання взаємопов'язані з в'язкістю зсуву η_t і об'ємною в'язкістю η_v співвідношеннями [12]:

$$\alpha_l = \frac{\omega^2}{2\rho v_l^3} \left[\left(\frac{4}{3}\eta_l + \eta_v \right) + \lambda \frac{c_p - c_v}{c_p c_v} \right], \quad (8)$$

$$\alpha_t = \frac{\omega^2}{2\rho v_t^3} \eta_l. \quad (9)$$

Зауважимо, що згідно з твердженнями [6] у випадку ГПС поглинанням енергії за рахунок теплопровідності λ поблизу частоти 10^6 Гц можна знехтувати.

Слід зазначити, що в класичній теорії пружності аморфних тіл не враховується наявність двох типів в'язкості, однак їхні прояви характеризують існування структурної стисливості матеріалу, виявити яку досить складно [2]. Тому для таких ГПС доцільно ввести поняття об'ємної “в'язкопружності” [9]. Це дає можливість повну величину деформації зсуву S , обумовлену дією ультразвукового поля напругою P , представити як суму “чистої” пружної деформації $S_0 = P/G_\infty$ та “в'язкопружної” деформації, яка змінюється з часом:

$$S' = \frac{1}{G'} P \left(1 - e^{-t/\tau_2'} \right) \quad (10)$$

за тим же законом, що й структурна частина об'ємної деформації [9]. При цьому ефективний час

релаксації

$$\tau_2' = \tau_2 \left(1 + \frac{K}{G}\right) = \eta_v \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{G}\right) \quad (11)$$

співмірний з часом осілого життя τ_2 структурного елемента в складі надмолекулярної структури. Слід також враховувати релаксацію τ_1 , яка характеризує час осілого життя елемента структури в коливному або трансляційному режимі, який являє собою перший рівень структурної організації системи. Відповідно, сумарний час життя $\tau_i = \tau_1 + \tau_2$ виражається формулою Больцмана – Арреніуса (при $T < T_g$):

$$\tau_i = B_i e^{U_i/kT}, \quad (12)$$

де U_i – енергія i -го релаксаційного процесу [6]. Такий підхід до аналізу в'язкопружного стану ГПС при дослідженні деформації зсуву згідно зі співвідношеннями (10) – (12) дозволяє визначити відношення “миттєвої” чисто пружної деформації S_0 до в'язкопружної складової S' як

$$\frac{S_0}{S'} = \frac{G'}{G_\infty} \left(1 - e^{-t/\tau_2'}\right)^{-1}. \quad (13)$$

Тут $S_i = \Delta V/V_0$ ($i=0, 1, \dots$) – відносна зміна об'єму; $\Delta V \ll V_0$. Отже, ПВХ-система поводить себе при $T < T_g$ як тверде тіло з модулем зсуву $G_\infty = G + K$, а при $T > T_g$ – з модулем $G_0 = K$. Відповідний релаксаційний модуль становить [9]

$$G_p = G_i \left(1 + \frac{K}{G}\right). \quad (14)$$

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Температурні залежності експериментальних значень коефіцієнтів поглинання й відповідних модулів ПВХ-систем наведені на рис. 1 і 2). Для порівняння тут представлені також результати для вихідного ПВХ. Лінійна екстраполяція числових величин для ненаповненого ПВХ вказує на релаксаційну природу процесів деформації ПВХ-систем під дією ультразвукового поля. Характерно, що для композитів, на відміну від чистого ПВХ, не спостерігається монотонного зростання величин α_l , α_t з явно вираженими β - і α -переходами. Крім цього, при збільшенні вмісту φ нанодисперсної міді в ПВХ в діапазоні ($0.05 \leq \varphi \leq 5.0$) об.% спостерігається зниження досліджуваних характеристик матеріалу. Особливо інтенсивно це проявляється при деформації зсуву. Водночас, зміна величини поглинання супроводжується концентраційною зміною дійсних і уявних частин модулів пружності.

Задля кількісної диференціації ефекту наповнення ПВХ за кількісну міру внеску наповнювача у величину модулів вибрано відношення $(M_0 - M_i)/M_0 = \Delta M/M_0$, де M_0 – відповідний модуль вихідного ПВХ; M_i – один з трьох модулів $E'(E'')$, $G'(G'')$, $K'(K'')$ композиту в стані i ($i=T=\text{const}$). Аналогічно характеристику дисипації енергії визначено як $\alpha_i - \alpha_0 = \Delta\alpha$, де α_i і α_0 – коефіцієнти поглинання для зразка в стані i для вихідного й наповненого зразків. На рис. 3 представлені кількісні дані про внесок нанодисперсної міді у величину модулів і коефіцієнтів поглинання в ГПС. Для розглянутих ПВХ-систем зміна вмісту наповнювача не в однаковій мірі впливає на в'язкопружні характеристики матеріалу з підвищенням температури. Це вказує на різну активність наповнювача в залежності від його вмісту в системі, яка перебуває в ізотермічних умовах. Найбільшу його активність при деформації зсуву зафіксовано в діапазоні вмісту міді $0.05 \leq \varphi \leq 2.0$ об.%.

На рис. 4 представлені температурні й концентраційні залежності об'ємної та в'язкості зсуву ПВХ-систем, визначені згідно зі співвідношеннями (8), (9). Характерно, що мінімальні значення притаманні в'язкості зсуву при ізотермічних умовах дослідження композиту. У випадку об'ємної деформації спостерігається немонотонна зміна її величини при аналогічних умовах вивчення матеріалу. В цілому співвідношення між η_l і η_v змінюються в діапазоні (2...4). Це вказує на існування в ГПС при її перебуванні в ультразвуковому полі конкуруючих процесів, які визначаються енергетичною та ентропійною складовими взаємодії на межі поділу фаз нанодисперсний метал – полімер. Порівнюючи характер змін концентраційної й температурної залежностей модулів пружності та коефіцієнтів поглинання можна стверджувати, що в'язкість системи більш повно характеризує деформаційні процеси в композиті. Слід зазначити, що зміни величини модулів в'язкопружності включають в себе механізм оборотної та необоротної текучості, яку важко зафіксувати експериментально через значну в'язкість композиту. Це питання потребує системного експериментального дослідження, оскільки при $\eta_i \rightarrow \infty$ ($i=v, t$) час релаксації τ_2 характеризує релаксаційний характер оборотної деформації, а залежність його від температури має вигляд

$$\tau_2 \sim e^{-U/kT} \quad (15)$$

лише для $T \gg T_g$. При цьому екстраполяція залежності $\ln \tau_2$ від $1/T$ в бік $T \rightarrow \infty$ у випадку вихідного ПВХ дає значення $\tau \cong 3.4 \cdot 10^{-12}$ с, підтверджуючи, що величина енергії активації U лінійно

залежить від T завдяки зростанню вільного об'єму матеріалу [6]. В області високих температур відбувається злиття релаксацийних процесів, обумовлених обміном енергією між рухомими елементами структури.

Оскільки структурне стиснення аморфних – тіл властивість, взаємопов'язана з їхньою об'ємною в'язкістю, то на основі рівняння (15) оцінимо співвідношення між пружною та в'язкопружною деформацією ПВХ-систем. Результати проведених розрахунків у випадку ПВХ засвідчують, що при $T < T_g$ в області склоподібного стану під дією ультразвукової хвилі повна деформація зсуву містить дев'ять частин "чисто" пружної на одну частину в'язкопружної деформації. При цьому в'язкопружна деформація зникає за законом

$$S'_\tau \sim e^{-t/\tau'_2}, \quad (16)$$

де $\tau_2 = \mu_v/K \cong 4 \cdot 10^{-6}$ с, а величина τ'_2 , визначена зі співвідношення (11), становить $1.2 \cdot 10^{-5}$ с. Використовуючи умову (15), одержуємо вираз для визначення зворотнього ефективного часу релаксації спаду в'язкопружної деформації:

$$\tau_{S_i} = \tau'_2 e^{U/kT} e^{-t/\tau'_2}. \quad (17)$$

Проведені розрахунки показали, що у випадку об'ємної деформації за домінуючої участю енергії міжмолекулярної взаємодії елементів структури в'язкопружна деформація зменшується за $2.6 \cdot 10^{-2}$ с. Визначення часу релаксації пружної складової деформації (співвідношення (12) і (17)) показує, що при $B_i \cong 10^{-12}$ с, $\tau_i = 2 \cdot 10^{-8}$ с маємо $\tau_{S_0} \cong 0$, тобто, при знятті тиску "чисто" пружна деформація елементів структури ПВХ миттєво зникає.

Характерно, що з підвищенням температури величина S_0/S' (див. формулу (13)) зменшується, вказуючи на зростання в'язкопружної складової деформаційного процесу. Введення у композит нанодисперсного наповнювача теж нелінійно змінює величину S' . Так, при $\varphi = 0.10$ об.% Cu в'язкопружна складова деформації зсуву зменшилася втричі у порівнянні з вихідним ПВХ при $T = 298$ К. Це проявляється у нелінійній зміні величини в'язкопружних модулів ПВХ-систем (див. рис. 1–4).

ВИСНОВКИ

Результати досліджень в'язкопружних властивостей композитів, отриманих на основі лінійного гнучколанцюгового полівінілхлориду, наповненого нанодисперсним порошком міді, синтезованим

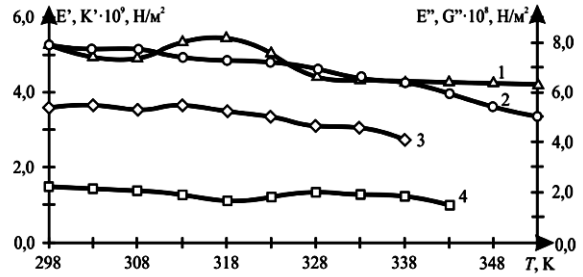


Рис. 1. Температурні залежності фізичних модулів пружності ПВХ-систем:

1 – ПВХ, 2 – ПВХ+0.3 об.%Cu, 3 – ПВХ+5.0 об.%Cu, 4 – ПВХ+0.05 об.%Cu

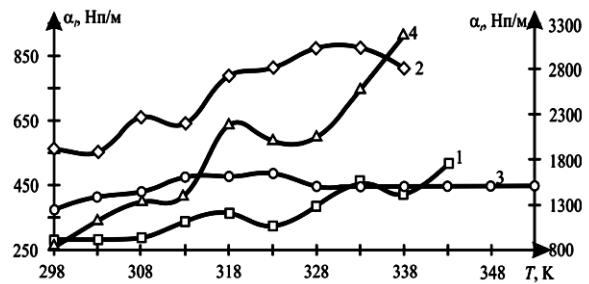


Рис. 2. Температурні залежності коефіцієнтів поглинання енергії для ПВХ-систем:

1 – ПВХ+3.0 об.%Cu, 2 – ПВХ+5.0 об.%Cu, 3 – ПВХ, 4 – ПВХ+2.0 об.%Cu

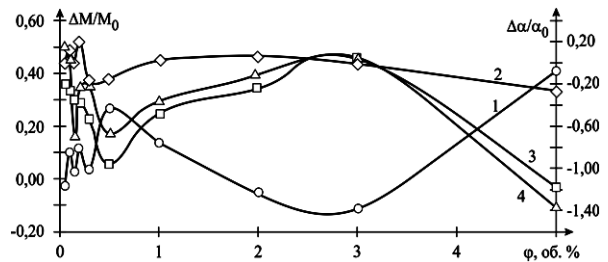


Рис. 3. Концентраційна відносна зміна модулів пружності та коефіцієнтів поглинання ПВХ-систем:

1 – G'' ($T = 313$ К), 2 – K' ($T = 323$ К), 3 – α_l ($T = 308$ К), 4 – α_t ($T = 328$ К)

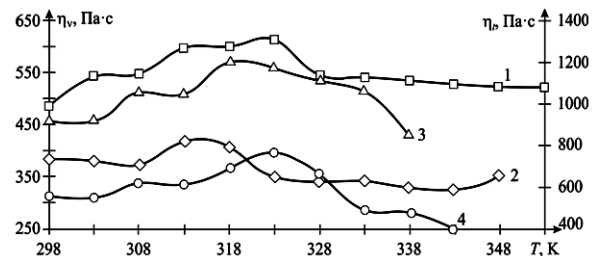


Рис. 4. Температурні залежності в'язкості ПВХ-систем при різному вмісті наповнювача:

1 – η_v для ПВХ, 2 – η_v для ПВХ+0.1 об.%Cu, 3 – η для ПВХ+5.0 об.%Cu, 4 – η для ПВХ+0.3 об.%Cu

електрохімічним методом, вказують на необхідність урахування характеру зміни взаємодії елементів структури полімеру як під дією інгредієнтів, так і зовнішнього динамічного механічного поля. Показано, що елементи структури ПВХ-систем досягають квазірівноважного стану за час релаксації, величина якого залежить від енергії активації U_i процесу. Її числове значення – $(5.2 \dots 6.3) \cdot 10^{-20}$ Дж – практично співпадає з енергією міжмолекулярної взаємодії $U_i \approx 4 \cdot 10^{-20}$ Дж [12].

Встановлено, що при вмісті нанодисперсної міді в ПВХ в діапазоні φ від 0 до 5 об.% за рахунок енергетичної та ентропійної взаємодії між компонентами на межі поділу фаз нанодисперсний наповнювач – полімер порушується квазірівноважний стан розміщення структурних елементів, який характеризується часом їх осілого життя τ_i . Показано, що між часом релаксації та в'язкістю системи існує кількісний взаємозв'язок. Проведені розрахунки величини в'язкості зсуву η_t і об'ємної в'язкості η_v показують, що співвідношення між ними змінюється в діапазоні (2...4) в залежності від вмісту наповнювача і температури досліджуваної системи. Проявляючись у зміні дійсної та уявної частин модулів Юнга, зсуву і об'ємної деформації, а також відповідних коефіцієнтів поглинання енергії ультразвукової хвилі, в'язкість систем найбільш повно характеризує деформаційні процеси в композиті. Оскільки класична теорія пружності аморфних тіл не враховує наявності η_t та η_v , то через введення поняття об'ємної "в'язкопружності" охарактеризовано повну деформацію ПВХ-систем під дією ультразвукового поля як суму "чисто" пружної і в'язкопружної складових. Показано, що час релаксації елементів структури системи, які приймають участь у відповідних видах деформації, визначається сумарним часом осілого життя структурних елементів. Останній змінюється в діапазоні від $3.4 \cdot 10^{-12}$ до $1.2 \cdot 10^{-5}$ с в залежності від вмісту нанодисперсної міді й температури зразка. У випадку об'ємної деформації за домінуючої участі міжмолекулярної взаємодії елементів структури час релаксації становить $2.6 \cdot 10^{-2}$ с, а пружна деформація матеріалу релаксує практично миттєво.

Отримані результати можуть слугувати основою для подальшого дослідження поведінки в

ультразвуковому полі гетерогенних полімерних систем, структурна стисливість яких нерозривно пов'язана з об'ємною в'язкістю та в'язкістю зсуву. Це відкриває можливість напрямлено регулювати дисипацію енергії в композиті й створювати матеріали з прогнозованою величиною енергетичних втрат, варіюючи вміст нанодисперсного металу в аморфній полімерній матриці, яка має флуктуаційну структуру.

1. Nakada O. Theory of viscoelasticity of amorphous polymers // J. Phys. Soc. Jap.– 1985.– **23**.– P. 1804–1821.
2. Мэзон У. Физическая акустика. Том 2, часть Б. Свойства полимеров и нелинейная акустика.– М.: Мир, 1969.– 420 с.
3. Грінченко В. Т., Вовк І. В., Маципура В. Т. Основи акустики.– К.: Наук. думка, 2007.– 640 с.
4. Николіс Г., Пригожин І. Самоорганизация в неравновесных системах.– М.: Мир, 1979.– 212 с.
5. Максимцев Ю. Р., Левчук В. В., Сідлецький В. О., Колупаєв Б. С. Спосіб отримання нанодисперсних металів як наповнювачів полімерних систем. Патент на корисну модель / (№ 80987 UA, B22F 9/16. Опубл. 10.06.2013, Бюл. No. 11.
6. Колупаєв Б. С. Релаксационные и термические свойства наполненных полимеров / Под ред. С. Я. Френкеля.– Львов: Вища школа, 1980.– 204 с.
7. Френкель С. Я., Цыгельный И. М., Колупаєв Б. С. Молекулярная кибернетика.– Львов: Свит, 1990.– 166 с.
8. Hill T. Thermodynamics of small systems.– New York: McGraw-Hill, 1967.– 319 p.
9. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей.– Л.: Наука, 1975.– 592 с.
10. Хохлов А. Р. О некоторых перспективных направлениях современной науки о полимерах // Высокомолек. соед., Сер. А.– 1990.– **32**, № 9.– С. 1795–1810.
11. Kolupaev B. B. Contribution of anharmonic vibrations of structural elements to the formation of thermophysical properties of linear polymers // J. Eng. Phys. Thermophys.– 2011.– , № 6.– P. 1421–1428.
12. Kolupaev B. B., Klepko V. V., Lebedev E. V., Levchuk V. V., Maksimtsev Yu. R. Contribution of thermal fluctuations to thermophysical properties of modified poly(vinylchloride) // Polym. Sci., Ser. A.– 2015.– **57**, № 2.– P. 139–146.