

532.528:534.21:541.64

ВПЛИВ КАВІТАЦІЇ В КОЛОЇДНОМУ РОЗЧИНІ НА ПОВЕРХНЕВІ ЯВИЩА У ГНУЧКОЛАНЦЮГОВИХ ПОЛІМЕРАХ

Б. Б. КОЛУПАЄВ^{1*}, Є. В. ЛЕБЕДЕВ¹, В. В. КЛЕПКО¹,
В. В. КРІВЦОВ², Є. О. ГАВРИЛЮК², Б. С. КОЛУПАЄВ²

¹Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України
Харківське шосе, 48, 02160, Київ, Україна
*E-mail: boris_kolupaev@gmail.com

²Рівненський державний гуманітарний університет
вул. Остафова, 31, 33000, Рівне, Україна

Отримано 22.12.2014

Наведено результати досліджень впливу кавітаційного розриву води й водних розчинів нанодисперсного графіту на поверхневі дефекти матеріалу на основі АБС-пластику і ПВХ. Встановлено роль вологовмісту, трибоелектризації, акустичних межових шарів, енергообміну, транспорту зарядів, зміни величини внутрішньої енергії та деформаційних процесів у “заліковуванні” поверхневих дефектів системи. Відзначено вплив структуроутворень на формування в’язкопружних властивостей матеріалу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: колоїдний розчин, поверхневі дефекти, кавітація, трибоелектризація, ультразвук

Представлены результаты исследований влияния кавитационного разрыва воды и водных растворов нанодисперсного графита на поверхностные дефекты материала на основе АБС-пластика и ПВХ. Установлена роль влагосодержания, трибоэлектризации, акустических пограничных слоев, энергообмена, транспорта зарядов, изменения величины внутренней энергии и деформационных процессов в “залечивании” поверхностных дефектов системы. Отмечено влияние структурообразования на формирование вязкоупругих свойств материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: коллоидный раствор, поверхностные дефекты, кавитация, трибоэлектризация, ультразвук

The paper deals with studying the effect of cavitation rupture of a water and aqueous solutions of a nanodispersed graphite on surface defects of materials obtained from Acrylonitrile Butadiene Styrene and Polyvinyl Chloride plastics. The function of moisture content, triboelectrification, ultrasonic boundary layer, power interchange, transport charge, internal energy change and deformation processes in surface defects recovery is revealed. The influence of structure formation on viscoelastic properties of material is mentioned.

KEY WORDS: colloid, surface defects, cavitation, triboelectrification, ultrasound

ВСТУП

Серед багатотоннажних полімерів найбільш значний науково-прикладний інтерес становить ПВХ, на основі якого виготовляють понад 4500 видів матеріалів і виробів [1]. Широко використовують також АБС-пластик, виробництво якого постійно зростає [2]. Як при збереженні, так і в процесі експлуатації ПВХ- та АБС-системи зазнають впливу зовнішніх полів, що призводить до утворення різномірних поверхневих дефектів. Кінетику й енергетику подальшого руйнування полімерних матеріалів, отриманих на основі гнучколанцюгових полімерів (насамперед, ПВХ і АБС), ще не з’ясовано до кінця. Особливо це стосується циклічного навантаження матеріалу, коли необхідно враховувати баланс між кількістю енергії, яка підводиться до тіла, та її частиною, що розсіюється у результаті в’язкопружних процесів. Встановлено, що

динамічна рівновага визначається не лише умовами навантаження і дією оточуючого середовища, але й структурою матеріалу [3]. Результатом такого багатofакторного впливу на поведінку тіла стає утворення мікро- та макродефектів, активних тріщин, їхнє зростання. При цьому домінуючу роль відіграє поверхня матеріалу, структурні елементи якої перебувають у специфічних умовах [3]. У залежності від просторово-часових умов експлуатації, дефекти можуть відігравати роль ланцюгового процесу початку старіння й руйнування матеріалу. Відповідно, одне з завдань фізики полімерів полягає у розв’язанні проблеми старіння та “заліковування” дефектів як джерел зародження руйнівних процесів у композиті.

Виходячи з цього, метою даної роботи є дослідження впливу кавітації як результату розриву рідини по певній поверхні на в’язкопружні властивості матеріалів, отриманих на основі гнучколан-

цюгових полімерів, і вивчення явища “заліковування” їхніх поверхневих дефектів.

1. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

У якості об'єктів дослідження було обрано:

- полівінілхлорид (ПВХ) суспензійної полімеризації марки KSR-67 (KARVINIL SR-67) виробництва ТОВ Карпатнафтохім (м. Калущ, Україна), який виготовляється за технологією фірми Vinnolit (Німеччина),
- АБС-пластик виробництва Chi Mei Corporation (Тайвань).

Зразки отримували в T - p режимі при $T = (393 \dots 403)$ К і $p = (8 \dots 10)$ МПа.

Колоїдний розчин графіту-наповнювача готували електрохімічним способом, який включав у себе електроліз на графітових електродах при постійному та накладанні змінного струму з наступною обробкою агрегатів ультразвуком. За допомогою методів рентгеноструктурного аналізу, виконаних згідно зі стандартами JCPDS PDF-2, та КР-спектроскопії показано, що у колоїдному розчині присутній графіт з переважним розміром наночастинок (80 ± 2) нм [4].

Експериментальна установка для дослідження впливу кавітаційних процесів у воді й колоїдному розчині графіту на поверхневі дефекти ПВХ і АБС-пластика (рис. 1) складалася з резервуара 1, частково заповненого досліджуваною рідиною 2, в яку занурювалось джерело ультразвуку 3. Над ним розташовувався жорстко закріплений досліджуваний зразок у вигляді полімерної плівки 4, який має форму диска, пластини або стрижня. Внаслідок ультразвукового опромінення на частоті 14 кГц при потужності 10 Вт/м^2 виникала кавітація, у зоні якої перебував досліджуваний зразок. На його поверхні нанесені у взаємно перпендикулярних напрямках макродефекти у вигляді надрізів. Площа й об'єм дефектів поверхні разом з наявністю мікрочастинок графіту в дефектних областях контролювалися методами фото- і відеозйомкою за допомогою комплексу візуалізації зображень і мікроскопів, призначених для вимірювання геометричних і механічних параметрів мікрооб'єктів.

Для дослідження в'язкопружних властивостей полімерних матеріалів на звукових частотах використовували метод вимушених резонансних коливань консольно-закріпленого стрижня [5].

Експериментальну установку було оснащено безконтактними сенсорами і комп'ютеризовано з

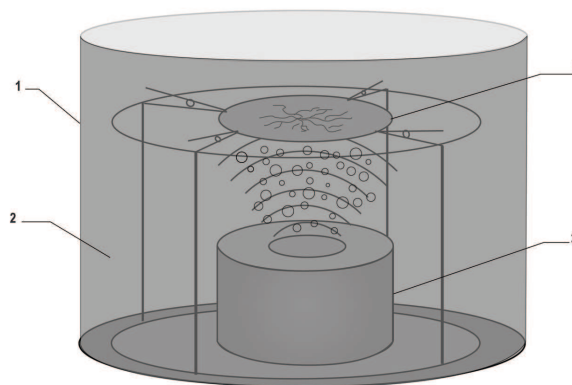


Рис. 1. Схема установки для дослідження впливу кавітації на поверхневі дефекти в полімерах:

1 – резервуар; 2 – робоча рідина (дистильована вода або колоїдний розчин графіту); 3 – джерело ультразвукового поля; 4 – досліджуване тіло

використанням програмного забезпечення для ПК з ОС Windows. Похибка вимірювань величини модуля Юнга E не перевищувала 1.5 %. Густина зразків визначали методом гідростатичного зважування [5] з точністю 0.2 %. Для дослідження змін структурно чутливих характеристик матеріалу використовували методи ІЧ-спектроскопії (апарат Specord 75 IR, Carl Zeiss, Німеччина з АЦП для ПК). Похибка відтворення хвильових чисел була у межах $\pm 1 \text{ см}^{-1}$.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Проведені дослідження кінетики поглинання рідини (дистильованої води та колоїдного розчину графіту) ПВХ та АБС показали, що після трьох діб їх перебування в гідросередовищі кількість поглинутої води становила 1.6 мас.%. При подальшому збільшенні часу t перебування полімерів у розчині настає друга стадія водопоглинання, яка супроводжується зростанням вологовмісту в матеріалі до 3.0 мас. % при t у межах від 3 до 12 діб. Кінетику водопоглинання досліджували на зразках у формі диска діаметром $3.5 \cdot 10^{-2}$ м і товщиною $2 \cdot 10^{-3}$ м, з яких вирізали стрижні для визначення величини E . Вагу зразків у процесі водопоглинання вимірювали з точністю до 10^{-6} кг при $T = (293 \pm 2)$ К. Для визначення коефіцієнта дифузії D води використовували співвідношення, за допомогою яких описують кінетику сорбції рідини тонкою пластиною. Вони є розв'язком диференціальних рівнянь дифузії Фіка [5] при граничних умовах:

$$\frac{M_\tau}{M_\infty} = \frac{2}{h} \left(\frac{D\tau}{\pi} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

$$\frac{M_\tau}{M_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D\tau}{4h^2}\right),$$

де M_τ – кількість поглинутої води за час $t=\tau$; M_∞ – рівноважна кількість поглинутої води; h – половина товщини зразка. Знаючи величину кута нахилу кривої $M_\tau = f(\sqrt{\tau})$, згідно з рівнянням (1) визначали величину D , ефективне значення якої лежить в діапазоні $(1.4 \dots 1.6) \cdot 10^{-13}$ м²/с. Відповідно, можна стверджувати, що на першій стадії вологовмісту (0.4...1.6) мас. % величину вологопоглинання ПВХ та АБС-пластика обумовлено сорбційними властивостями полімерів.

Експерименти, виконані на ненапружених зразках, показали, що при 1.6 мас. % вмісту рідини в полімері значення величини модуля Юнга залишається сталим (рис. 2).

Це вказує на завершення першої стадії сорбції вологи матеріалом, в результаті чого утворюються містки з молекул води. В подальшому на поверхні зразків були створені макродефекти у вигляді поздовжніх та поперечних надрізів (рис. 3). Як і в попередньому випадку, зразки витримували у воді і/або колоїдному розчині та визначали величину модуля Юнга.

Наведені на рис. 2 результати вказують на подальше зменшення величини E в порівнянні з попередніми значеннями. Це обумовлено збільшенням до 2.9 мас. % вмісту поглинутої вологи за рахунок проведеної пластичної деформації, якої зазнає матеріал поблизу макродефекту, зростанням площі адсорбуючої поверхні та кількості дефектів на одиницю площі поверхневого шару.

Під час дії на систему ультразвукового поля процес взаємодії полімеру з водою та водним розчином нанодисперсного графіту, крім розглянутої природи взаємодії, має свою специфіку. Розглянемо детальніше відповідні особливості.

1. Після кавітаційних процесів у випадку ПВХ, який перебував у воді, має місце інтенсивне зменшення величини модуля Юнга, вказуючи, що в режимі динамічного навантаження матеріал прагне до подальшого руйнування. Це обумовлено зростанням рухливості елементів структури макромолекул за рахунок прогресуючої пластифікуючої дії рідини та розвитку дефектності матеріалу. У випадку АБС-пластику в даній області вмісту води домінує процес антипластифікації, що призводить до часткової ліквідації дефектності матеріалу. Однак, як кінцевий результат – в даній

області вологовмісту домінує процес зменшення величини модуля Юнга (рис. 2).

2. При дії ультразвукового поля на полімерне тіло, яке перебуває в рідкому діелектрику (дистильована вода) і/або провідному колоїдному розчині, за рахунок деформації виникає поверхневий електричний заряд (т.з. трибоелектризація [6]). Відповідно до трибоелектричного ряду Фарадея, у випадку дистильованої води та гнучколанцюгового полімеру кількість дифундованих іонів та електронів незначна [7]. Для колоїдного розчину графіту ця величина зростає, оскільки $\varepsilon \rightarrow \infty$ при збільшенні вмісту нанодисперсного інгредієнта. Накопичення поверхневого заряду обумовлює створення подвійного електричного шару як джерела електростатичного поля напруженості \vec{E}_n . Враховуючи, що діелектрична проникність полімеру ε_1 , а води (чи колоїдного розчину) ε_2 і $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ в напрямі нормалі до поверхні зразка від ε_2 до ε_1 , на одиничний поверхневий заряд буде діяти сила [6], як наслідок існування \vec{E}_n , величиною:

$$E_n = \frac{2P}{\varepsilon_0 h^2} (\pi N \delta)^{1/2}, \quad (2)$$

де P – електричний момент однієї молекули; h – товщина подвійного шару, як відстань між пластинами плоского конденсатора. Приймаючи, що $P = 10^{-28}$ Кл·м; $h = 10^{-6}$ м; $N = 10^{28}$ м⁻³ – середнє число елементів структури в одиниці об'єму; $\delta = 4 \cdot 10^{-10}$ м – відстань між сусідніми молекулами, отримаємо $E_n = 3 \cdot 10^4$ В/м. У випадку дистильованої води цим ефектом можна знехтувати, однак при наявності колоїдного розчину концентрація іонів на поверхні матеріалу зростає, як і величина сили, яка прагне зменшити площу поверхні розподілу фаз полімер – рідина.

3. Джерело ультразвуку, перебуваючи у воді/чи колоїдному розчині, крім звукового поля, якому відповідає певний рух кожного елемента середовища, створює в ньому циркуляційні потоки [8]. Особливо це явище проявляється при коливанні зразка у вигляді пластини [9], в результаті чого ультразвукове поле викликає тангенціальний рух рідини вздовж межі поділу рідина – тверде тіло. При цьому виникають акустичні межові шари як джерело напружень, що обумовлює додаткове переміщення рідини в приповерхневому шарі. За допомогою цього явища вдалось пояснити процес звукового очищення поверхні [10], зміну

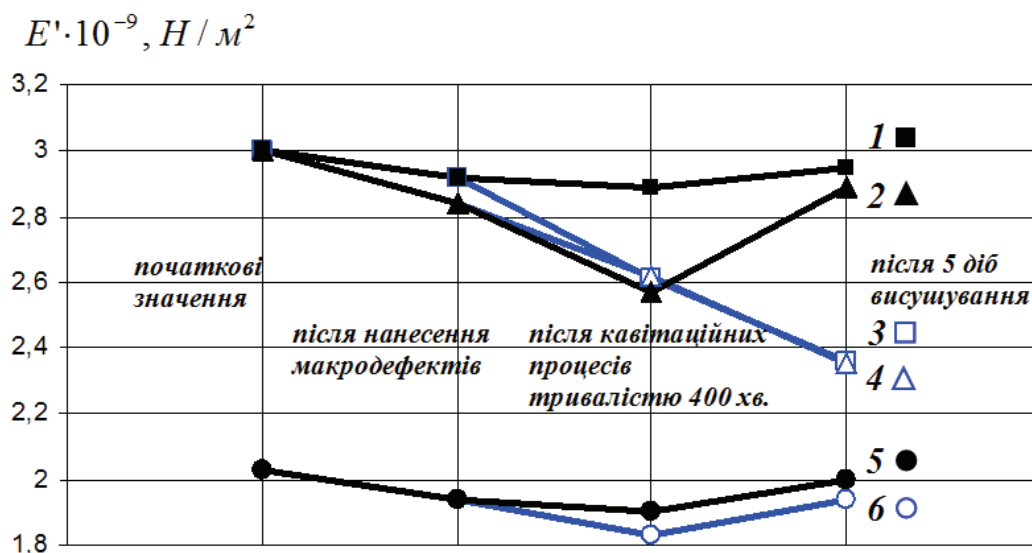


Рис. 2. Зміна величини динамічного модуля пружності E' зразків ПВХ та АБС-пластику з нанесенням макродефектів і дією на них ультразвукової кавітації:

- 1 – ПВХ з поздовжніми макродефектами в колоїдному розчині графіту;
- 2 – ПВХ з поперечними макродефектами в колоїдному розчині графіту;
- 3 – ПВХ з поздовжніми макродефектами у дистильованій воді;
- 4 – ПВХ з поперечними макродефектами у дистильованій воді;
- 5 – АБС-пластик з поперечними макродефектами в колоїдному розчині графіту;
- 6 – АБС-пластик з поперечними макродефектами у дистильованій воді

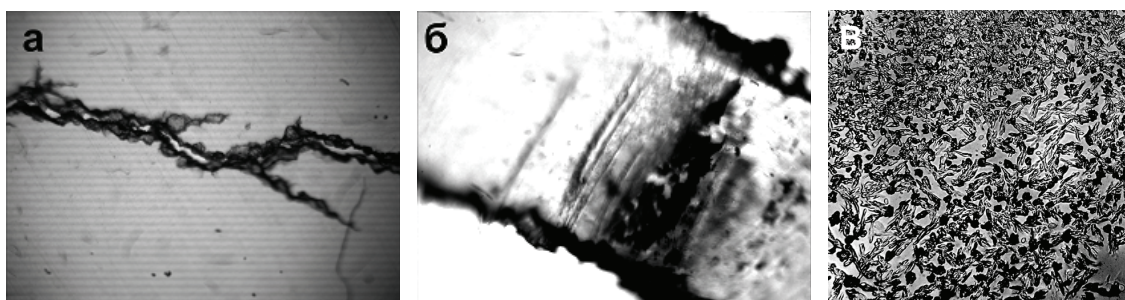


Рис. 3. Мікрофотографії досліджуваних зразків:
а – зона надрізу; б – зразок ПВХ (загальний вигляд);
в – дефект, який "заліковано" нанодисперсним графітом

швидкості протікання хімічних реакцій [11], теплообміну [12]. Однак не існує завершеної теорії, а відповідно і достатньої кількості експериментів, стосовно участі ультразвукових коливань у транспортуванні носіїв заряду шляхом їх захоплення в пастках, як динамічних структурах. Якщо припустити, що розподіл пасток за енергією в полімерах описується залежністю [13]:

$$N(E) = A \exp(-E/kT), \quad (3)$$

де $N(E)$ – концентрація пасток на одиничний інтервал енергії; E – "глибина" пастки; A , T –

сталі, то конформації макромолекул гнучко-ланцюгових полімерів створюють набір потенціальних ям, які і слугують пастками. При цьому домішки, якими виступають молекули води, розчиненого кисню, активні центри поверхні нанодисперсного графіту, атоми бокових груп, дефекти локального порядку, поверхня зразка, зменшують глибину іонних та електронних пасток, як і дію зовнішнього поля. Враховуючи твердження, розглянуті в п. 1, 2, можна припустити, що разом з водою в дефектні області полімеру дифундують частинки нанодисперсного графіту. При цьому

вважаємо, що величина їхнього коефіцієнта тертя збільшується з концентрацією за лінійним законом:

$$f = f_0(1 + kC). \quad (4)$$

Відповідно до законів Бікі–Дебая [8] та Ейнштейна [12], $f_0 = 6\pi R\mu\psi(\phi)$; $D = D_0(1 + hC)$, а тому:

$$D = kT \frac{1 + h(C)}{6\pi a\eta_0} \exp\left(\frac{W(C)}{kT}\right), \quad (5)$$

де $\eta = \eta_0 \exp(W(C)/(kT))$; $-\lambda F/2f \leq D_0 \leq kT/f_0$; $D_0 = kT/(6\pi\eta a)$; $h(C)$ – малий параметр; η – в'язкість; a – лінійний розмір наночастинок.

Відповідно, швидкість зміни концентрації нанодисперсних частинок графіту в дефектних областях матеріалу в напрямку вісі x можна представити як:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (6)$$

Стосовно активації дифузійних процесів (співвідношення (5), (6)) слід зазначити, що величина D нелінійно залежить від концентрації інгредієнтів. Наявність E_n (співвідношення (2)) вплине на рухливість сегмента полімеру, як джерела системи диполів, який у випадку ПВХ при $T = 303$ К налічує $\sim 10^2$ атомів [12], будучи зв'язаним з активними центрами поверхні графіта, дифундує в новий квазірівноважний стан в області макродефекту. Розрахунки величини D , виконані згідно із співвідношенням (5), показали, що при $T = 303$ К і $a = 80 \cdot 10^{-9}$ м, $W(C) \sim 4 \cdot 10^{-20}$ Дж вона становить $3.4 \cdot 10^{-13}$ м²/с. Це дозволяє також реалізувати дрейфову складову перенесення нанодисперсного графіту в макродефектні області матеріалу. На наявність в них нанодисперсного графіту вказують результати оптичних досліджень матеріалу (рис. 3), які фіксують помутніння зразків, а також дані ГЧ-спектроскопії (рис. 4). Зокрема, ГЧ-спектри дозволяють висунути припущення про надмолекулярну структуру ПВХ [1]. Для характеристики її зміни використали відношення інтенсивності оптичної смуги поглинання 1428 см⁻¹, яка згідно результатів досліджень [15] відповідає за структурні впорядкування ПВХ, до оптичної густини смуги внутрішнього стандарту – 2920 см⁻¹.

Зростання величини відношення D_{1428}/D_{2920} для ПВХ, який протягом 400 хвилин витримували в колоїдному розчині графіту в умовах кавітації (рис. 4), вказує на наявність структурних впорядкувань полімеру за рахунок енергетичної взаємодії на межі поділу фаз ПВХ – графіт. Менші значення величини даного відношення у випадку ПВХ, який не перебував у кавітаційній області, вказують на домінування ентропійного фактору взаємодії, що обумовлює розпушування структури та полегшення реалізації релаксаційних процесів у полімері (рис. 2).

4. Відповідно до гіпотези Я. І. Френкеля [14], з кавітацією розриву пов'язане виникнення електричних явищ і відповідних хімічних реакцій в середовищі. Однак завершеної теорії електричних взаємодій, обумовлених кавітацією, як і інших баллоелектричних процесів, ще не існує через ускладнення, пов'язані з орієнтацією полярних молекул розчинника (води) в поверхневих шарах, а також адсорбцією іонів. Встановлено лише, що електричне поле, яке існує в кавітаційній області, характеризується напруженістю \bar{E}_2 [14]:

$$E_2 = \frac{4e}{\varepsilon_0 r} \sqrt{\pi N \delta}. \quad (7)$$

Прийнявши, що заряд і число іонів в одиниці об'єму становлять e і $N = 10^{24}$ м⁻³ відповідно; $\delta = 4 \cdot 10^{-10}$ м, як середня відстань між молекулами; $r = 10^{-6}$ м – радіус порожнини, отримаємо, що $E_2 = 1.2 \cdot 10^7$ В/м. Цієї величини достатньо для пробою газу з тиском близько $2 \cdot 10^3$ Па [6]. Оскільки в колоїдному розчині графіту концентрація носіїв заряду значна, електричний розряд у кавітаційній області може призвести до нелінійних ефектів за рахунок виникнення хвиль напруги в оточуючому середовищі. Враховуючи, що акустичний опір матеріалу більший, ніж рідини, хвиля напруги стиску, яка поширюється від джерела кавітації, буде сприяти проникненню нанодисперсного графіту в дефектну область та його закріплення. При коротких імпульсах тиску (час електричного розряду $\tau = 1/\nu$) сама дефектна область не встигає поширитись у тонкому зразку через нетривалість навантаження (рис. 3).

5. У зразку завдяки участі елементів структури в деформації під дією ультразвукового поля відбувається розсіювання енергії за 1 с в оди-

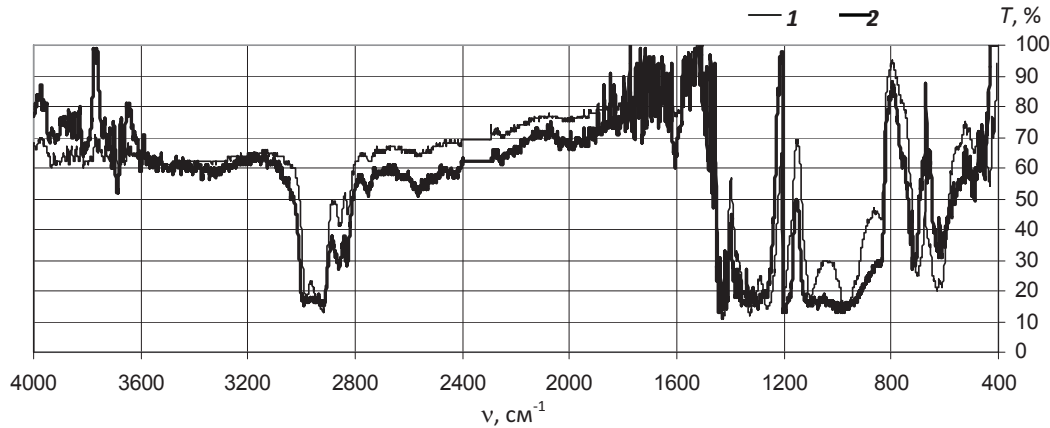


Рис. 4. ІЧ-спектр ПВХ до і після витримки у колоїдному розчині графіту під час кавітаційних процесів:
1 – до витримки у колоїдному розчині; 2 – після 400 хвилин витримки у колоїдному розчині

ниці об'єму [8]:

$$W = \int_0^{\gamma} \frac{E''\gamma}{\omega} d\gamma = \frac{\omega E''\gamma_0^2}{2}, \quad (8)$$

що призводить до підвищення його температури на величину:

$$\Delta T_1 = \frac{\omega E''\gamma_0^2 t}{2C\rho}, \quad (9)$$

де $\gamma = \gamma_0 \sin \omega t$; C , ρ – теплоємність та густина зразка відповідно. Розрахунок показав, що при $\nu = 14$ кГц; $E'' = 4.3 \cdot 10^8$ Н/м²; $C = 1.1 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К); $\rho = 1.4 \cdot 10^3$ кг/м³ і $\gamma_0 = 10^{-5}$ м величина ΔT_1 за час $t = 40$ хв зростає на 1.6 К/м. В кінцевому результаті це викличе зміну рухливості елементів структури, що може призвести до руйнування матеріалу.

6. Необхідно також врахувати утворення теплових флуктуацій, які виникають у зразку як результат обміну енергією між “гарячими” та “холодними” ділянками тіла, при поширенні в ньому ультразвукових коливань. При цьому локальна зміна густини $\Delta\rho$ має вигляд [15]:

$$\Delta\rho = \left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)_T \Delta p + \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_p \Delta T. \quad (10)$$

Перша (механічна) складова співвідношення (10) поширюється у формі біжучих хвиль або коливається з частотою ν , а друга (теплова) частина не коливається, ставши джерелом температурного поля. Таким чином, коли ультразвукова хвиля поширюється в полімері, то

між двома фононними групами виникає періодична різниця температур ΔT_2 як характеристика зміни теплової енергії, яка разом з ΔT_1 (співвідношення (9)) бере участь у формуванні властивостей матеріалу.

Врахування факторів, розглянутих в пп. 1-6, які характеризують вплив зовнішніх полів та нанодисперсного графіту на рухливість структурних елементів, як єдиного реального параметру, що реалізується через комплекс властивостей матеріалу, дозволяє використати закон Ньютона для визначення хвилі напруги в гнучколанцюговому полімері як в'язкопружному тілі [8]:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0. \quad (11)$$

Тут $\eta = \eta_1 + \eta_2$ – деформація, яка складається з двох частин: η_1 – пружної деформації та η_2 – деформації, яка обумовлена рухом елементів структури під дією змінної прикладеної напруги. Відповідно [10]:

$$\eta_1 = \frac{\sigma}{E}, \quad (12)$$

$$\eta_2 = \frac{Lb}{l} \int_0^l \xi(y) dy, \quad (13)$$

де σ – напруга; L – загальна довжина елементів структури на одиницю об'єму, які беруть участь у русі; $\xi(y)$ – середнє зміщення елемента від його положення рівноваги; y – координата вздовж лінії закріплення сегмента довжиною l активними центрами нанодисперсного графіту в кубі єдиного розміру. Таким чином, співвідношення (11)

набуває виду:

$$\frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} - \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial t^2} = \frac{L\rho b}{l} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int_0^l \xi(y) dy. \quad (14)$$

Враховуючи, що $\eta_1 = 10^{-4}$; $E' = 2 \cdot 10^9$ Н/м², величині $\sigma = 2 \cdot 10^4$ Н/м² відповідає $\eta_2 = 2 \cdot 10^{-5}$. У випадку ПВХ з молекулярною масою $1.4 \cdot 10^5$ це забезпечує, в першу чергу, рухливість атомів Н та атомних груп С-Н при $T = 303$ К. Отже, наявність дії на поверхню ПВХ, АБС-пластика температурного, електричного поля, ентропійного, дифузійного факторів, як наслідок кавітаційних процесів у воді та водному розчині нанодисперсного графіта, призводить до зміни рухливості (жорсткості) елементів структури, а відповідно, і в'язкопружного модуля матеріалу.

ВИСНОВКИ

Результати вивчення впливу води на акустичні властивості ПВХ та АБС-пластика вказують на те, що її вміст в області (0.4...1.6) мас. % при $T = 293$ К як при наявності, так і відсутності кавітаційних процесів не викликає “заліковування” штучно створених макродефектів на поверхні матеріалу. Це проявляється у зменшенні величини модуля Юнга полімерів. У випадку колоїдного розчину при відсутності режиму кавітації штучно створені поверхневі макродефекти матеріалу також викликають зменшення величини модуля Юнга тіла. За наявності в розчині кавітаційних процесів спостерігається зростання величини модуля, що засвідчує припинення подальшого руйнування матеріалу в області динамічного навантаження та водонасичення. З'ясовано, що процес “заліковування” дефектів матеріалу графітом з колоїдного розчину, який перебуває в ультразвуковому полі, обумовлений зміною рухливості елементів структури макромолекул, викликаної ефектом трибоелектризації, наявністю подвійного електричного шару на межі поділу фаз. Вони виступають джерелом пондеромоторної сили. Крім цього, участь у транспортуванні нанодисперсного графіту в зону макродефекту бере дифузійна та дрейфова складова його руху. В режимі кавітації за рахунок нелінійних ефектів цей процес інтенсифікується зростаючою величиною гідродинамічного тиску та виділенням тепла. Комплексну дію розглянутих факторів описано за допомогою хвильового рівняння напруги в системі і показано, що зменшення рухливості елементів структури обумовлено енергетичними та ентропійними факторами. Це викликає зростання величини модуля

Юнга матеріалу в 1.3 рази (відносно вихідного полімеру). Отримані результати можуть слугувати основою для подальших досліджень поведінки інших систем при кавітації в колоїдних розчинах як один із способів не лише руйнування тіла [16], але і “заліковування” поверхневих дефектів полімерних матеріалів.

1. *Зайков Г. Е., Зайков В. Г.* 222 Национальный конгресс Американского химического общества. Международный симпозиум по поливинилхлориду (химия и применение) // Пласт. массы.– 2001.– № 8.– С. 47–48.
2. *АБС-пластики.*– Энциклопедия полимеров: том 3: М.: Сов. Энцикл., 1972.– 98 с.
3. *Хохлов А. Р.* О некоторых перспективных направлениях современной науки о полимерах // Высокомолек. соед., Сер. А.– 1990.– **32**, № 9.– С. 1795–1810.
4. *Pumera M.* Electrochemistry of graphene, graphene oxide and other graphenoid // Electrochem. Commun.– 2013.– **36**.– P. 14–18.
5. *Колупаев Б. С.* Релаксационные и термические свойства наполненных полимеров / Под. ред. С. Я. Френкеля.– Львов: Вища школа, 1980.– 204 с.
6. *Губкин А. Н.* Физика диэлектриков.– М.: Высшая школа, 1971.– 268 с.
7. *Смирнов Б. М.* Скейлинг в атомной и молекулярной физике // УФН.– 2001.– **171**, № 12.– С. 1292–1315.
8. *Мэзон У.* Физическая акустика. Том 2, часть Б. Свойства полимеров и нелинейная акустика.– М.: Мир, 1969.– 420 с.
9. *Гринченко В. Т., Вовк І. В., Мацигура В. Т.* Основы акустики.– К.: Наук. думка, 2007.– 640 с.
10. *Ланда П. С.* Нелинейные колебания и волны.– М.: Наука, 1997.– 472 с.
11. *Nakada O.* Theory of viscoelasticity of amorphous polymers // J. Phys. Soc. Jap.– 1985.– **23**.– P. 1804–1821.
12. *Новиченок Л. Н., Шульман З. П.* Теплофизические свойства полимеров.– Минск: Наука и техника, 1971.– 232 с.
13. *Kolupaev B. B., Klepko V. V., Lebedev E. V.* Mechanisms of heat transfer on polyvinylchloride and poly(vinyl butyral) // J. Eng. Phys. Thermophys.– 2012.– **85**, № 2.– P. 446–454.
14. *Френкель Я. И.* На заре новой физики.– Л.: Наука, 1970.– 384 с.
15. *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(vinyl chloride) // Polym. Sci., Ser. A.– 2015.– **57**, № 2.– P. 139–146.
16. *Богачев И. Н.* Кавитационное разрушение и кавитационноустойкие сплавы.– М.: Наука, 1972.– 280 с.