

УДК 539.3:620.179

Мащенко В.А., Одеська державна академія технічного регулювання та якості
Квасніков В.П., Національний авіаційний університет, м. Київ

ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ТА МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПУАССОНА В'ЯЗКОПРУЖНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

В роботі проведено огляд основних методів (прямий і непрямий методи, метод скінченних елементів, ультразвуковий імерсійний метод) вимірювання комплексного коефіцієнта Пуассона в'язкопружних полімерних матеріалів. Особливу увагу сконцентровано на фізичних принципах поведінки об'єкта і системи вимірювань, реалізації процесу вимірювань для кожного методу, проаналізовано рівень його застосовності та інформативність. У розглянутих методах використовуються різні підходи до вимірювання первинних параметрів, що дає можливість проводити порівняльний аналіз отриманих значень дійсної та уявної частин комплексного коефіцієнта Пуассона та визначати їх достовірність. Проаналізовані джерела похибок при проведенні вимірювань кожним із методів, отриманні співвідношення для оцінки похибок, проведені розрахунки мінімальних та максимальних відносних похибок визначення дійсної та уявної частин комплексного коефіцієнта Пуассона та зроблений їх порівняльний аналіз. Вибір методу вимірювань, в значній мірі, залежить від частотного діапазону збудження деформацій, типу деформацій у зразку полімерного в'язкопружного матеріалу та орієнтовного значення коефіцієнта Пуассона матеріалу.

Ключові слова: прямий метод і непрямий методи, метод скінченних елементів, ультразвуковий імерсійний метод, поздовжня та поперечна деформації, похибка вимірювання.

Сучасний розвиток техніки тісно пов'язаний із широким застосуванням в'язкопружних матеріалів (різного типу каучуки, еластомери, тверді конструкційні полімери та полімерні піни) із необхідними механічними характеристиками. В'язкопружність передбачає наявність комплексних динамічних модулів пружності: модуля Юнга (E^*), модуля зсуву (μ^*) та модуля об'ємної деформації (k^*), а вимірювання величин E^* , μ^* , k^* пов'язані із динамічними навантаженнями зразків полімерних матеріалів. Дисипації енергії в таких випадках можуть бути визначені за зсувом фаз між напругою та деформацією і залежать від частоти та амплітуди напруги зовнішнього збурення, температури та попередньої деформації [1].

Крім динамічних модулів пружності, однією із основних характеристик матеріалів є коефіцієнт Пуассона (ν). Значення ν рідко декларуються виробником конструкційних полімерних матеріалів, тому проблема його прямого вимірювання або визначення на основі інших параметрів фактично є досить актуальною.

Аналіз останніх публікацій

Метод прямих вимірювань та методики визначення комплексного коефіцієнта Пуассона (ν^*) на основі динамічних модулів пружності як функції частоти представлені в роботах [2–5]. Для розглянутих методів у роботі [2] проведений порівнюється аналіз з точки зору точності вимірювань та частотного діапазону. Паралельно розглядається питання визначення коефіцієнта механічних втрат для комплексного коефіцієнта Пуассона як відношення уявної частини до дійсної частини величини ν^* [2, 3]. Оцінку похибок методу прямих вимірювань ν^* представлено в роботах [3, 4].

Стандарти [6–10] розроблені для визначення динамічних модулів пружності та [6, 9, 10] для визначення коефіцієнта Пуассона в'язкопружних матеріалів, які вважаються нестисливими або нелінійно поведуться при значних статичних деформаціях.

Методи запропоновані в роботах [11–12] подібні за принципом реалізації вимірювань та призначенні для визначення динамічного модуля Юнга. Крім цього дані методи можуть бути використанні для визначення динамічної жорсткості як параметра оцінки коефіцієнта Пуассона зразків в'язкопружних матеріалів.

Інформативними параметрами, які дозволяють визначати механічні характеристики в'язкопружного матеріалу та коефіцієнт Пуассона зокрема, є швидкості поширення ультразвукових (УЗ) коливань різного типу: поздовжніх (l) та поперечних (t). Імерсійні методи для визначення швидкостей поширення поздовжніх (ν_l) та поперечних (ν_t) УЗ-хвиль в матеріалах та технічні особливості експерименту розглянуті в роботах [13–18].

Мета роботи

Провести огляд фізичних принципів та експериментальних методів вимірювання коефіцієнта Пуассона в'язкопружних матеріалів. Розглянути фізико-технічні особливості поведінки об'єкта і системи вимірювань при реалізації основних методів, провести порівняльний аналіз основних їх характеристик та оцінити похибки вимірювань.

Виклад основного матеріалу

Коефіцієнт Пуассона дорівнює відношенню, із знаком мінус, відносної поперечної деформації до відносної поздовжньої деформації при одновісному прямому навантаженню зразка матеріалу. Якщо відносні деформації (ε_x , ε_y) можна описати наступними гармонійними функціями:

$$\varepsilon_x(t) = \hat{\varepsilon}_x e^{i\omega t}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_y(t) = \hat{\varepsilon}_y e^{i(\omega t - \delta_v)}, \quad (2)$$

тоді коефіцієнт Пуассона є комплексною величиною і визначається наступним чином [2]:

$$v^*(i\omega) = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{\hat{\varepsilon}_y}{\hat{\varepsilon}_x} (\cos \delta_v - i \sin \delta_v) = v'(\omega) - i v''(\omega), \quad (3)$$

де δ_v – кут зсуву фаз між напругою і деформацією; v' , v'' – дійсна і уявна частини комплексного коефіцієнта Пуассона; $\operatorname{tg} \delta_v(\omega) = \frac{v''(\omega)}{v'(\omega)}$; ω – циклічна частота; t – час.

Прямий метод визначення коефіцієнта Пуассона

Прямий метод визначення v^* базується на збудженні у циліндричному або призматичному зразку вібраційних коливань та вимірюваннях поперечної ε_y та поздовжньої ε_x відносних деформацій (рис. 1а). Частота збудження вібраційних коливань пов'язана із лінійним розміром зразка, який повинне бути менший за довжину акустичної хвилі, що поширюється у ньому. У такому випадку, зразок матеріалу можна моделювати у вигляді пружини, а межі частотного діапазону можуть перекривати практично увесь звуковий діапазон починаючи від частоти 100 Гц.

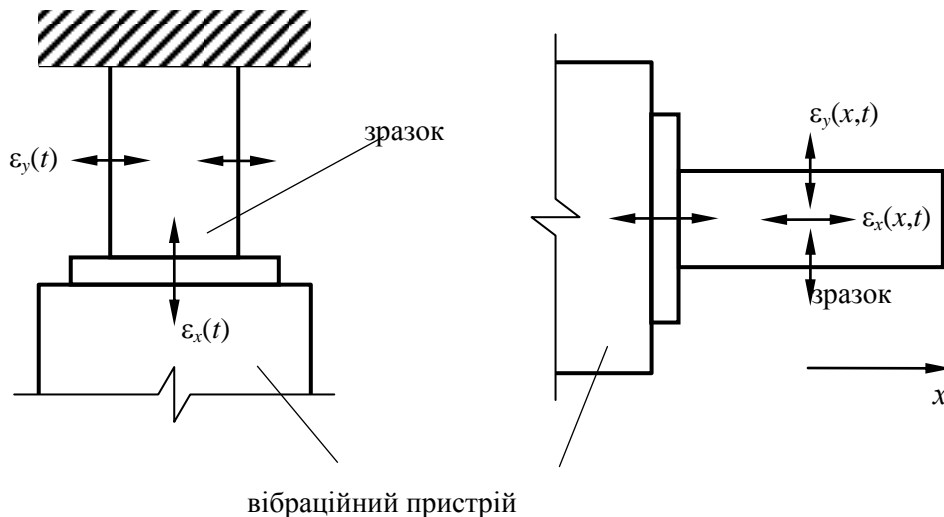
Дійсну і уявну частини комплексного v^* визначають за наступними співвідношеннями:

$$v'(\omega) = \frac{\hat{\varepsilon}_y(\omega)}{\hat{\varepsilon}_x(\omega)} \cos \delta_v(\omega) \approx \frac{\hat{\varepsilon}_y(\omega)}{\hat{\varepsilon}_x(\omega)}; \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \delta_v(\omega) \approx \delta_v(\omega); \quad (5)$$

$$v''(\omega) = v'(\omega) \operatorname{tg} \delta_v(\omega); \quad (6)$$

де $\delta_v \ll 1$.



а)

б)

Рис. 1. Пристрої для вимірювання комплексного коефіцієнта Пуассона прямим методом

Верхня межа частотного діапазону залежить від довжини зразка і може досягати 18 кГц для довго стрижня в якому збуджуються осьові вібрації (рис. 2б) [3].

Поздовжні та поперечні деформації у прямому методі вимірюють за допомогою тензодатчиків. Відносні похибки величини v' залежать від методу обробки сигналів та геометричних розмірів зразків. В роботах [3, 4] значення відносних похибок відповідно дорівнює 13 % та 2,6 %.

Непрямий метод визначення коефіцієнта Пуассона

Непрямі методи визначення величини v^* базуються на вимірюваннях двох будь яких комплексних модулів пружності зразків та використанні рівнянь теорії пружності. Для величини v^* співвідношення між парами модулів пружності (k^* , μ^* ; k^* , E^* ; E^* , μ^*) мають наступний вигляд [2, 5]:

$$v_{k,\mu}^* = \frac{3k^* - 2\mu^*}{6k^* + 2\mu^*}; \quad (7)$$

$$v_{k,E}^* = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E^*}{3k^*} \right); \quad (8)$$

$$v_{E,\mu}^* = \frac{E^*}{2\mu^*} - 1. \quad (9)$$

Відносні похибки визначення величини v^* за співвідношеннями (7)–(9) можна оцінити наступним чином:

$$\varepsilon_{v_{k,\mu}^*} = \frac{\Delta v_{k,\mu}^*}{v_{k,\mu}^*} = \frac{\Delta k^* + \Delta \mu^*}{3k^* - 2\mu^*} + \frac{\Delta k^* + \Delta \mu^*}{6k^* + 2\mu^*}; \quad (10)$$

$$\varepsilon_{v_{k,E}^*} = \frac{\Delta v_{k,E}^*}{v_{k,E}^*} = \frac{\Delta E^*}{E^*} + \frac{\Delta k^*}{k^*}; \quad (11)$$

$$\varepsilon_{v_{E,\mu}^*} = \frac{\Delta v_{E,\mu}^*}{v_{E,\mu}^*} = \frac{\Delta E^*}{E^*} + \frac{\Delta \mu^*}{\mu^*}. \quad (12)$$

При вимірюванні модулів пружності методом динамічної в'язкості у діапазоні частот від 10 Гц до 10 кГц відносна похибка ($\varepsilon_{E^*, \mu^*, k^*}$) не буде перевищувати 2,5–3 % [6, 8].

Визначення коефіцієнта Пуассона з використанням метода скінченних елементів

Використання методу скінченних елементів [9] передбачає, що модуль E^* досліджуваного матеріалу відомий і отриманий в результаті вимірювань згідно [6–8] або [10]. Практична реалізація методу полягає у побудові теоретичного графіка залежності безрозмірної жорсткості (R) від коефіцієнта Пуассона для зразка циліндричної форми і вибору значення v' , що відповідає динамічній експериментально динамічній жорсткості (\tilde{R}) визначеній прямим (рис. 2а) або непрямим (рис. 2б) методами [9].

Значення \tilde{R} для зразка, який знаходиться під осьовим навантаженням силою F , визначають наступним чином:

$$\tilde{R} = \frac{Fh}{sE\Delta h}, \quad (13)$$

де h – висота циліндра, s – площа основи циліндра, Δh – прогин зразка.

Безрозмірна жорсткість, що визначається співвідношенням (13), є функцією ω і може бути отримана безпосередньо вимірюванням динамічної жорсткості (S) як відношення сили до деформації:

$$S(\omega) = \frac{F(\omega)}{\Delta h(\omega)}. \quad (14)$$

Прямий метод вимірювань передбачає збудження у зразку випадкових вібраційних коливань. Дані при вимірюваннях $F(\omega)$ і $\Delta h(\omega)$ записують і обробляють за допомогою двоканального аналізатора швидкого перетворення Фур'є.

При використанні прямого методу вимірювань $\tilde{R}(\omega)$ розраховують за співвідношенням:

$$\tilde{R}(\omega) = \frac{S(\omega)h}{sE}. \quad (15)$$

У непрямому методі вимірювань зразок навантажують деякою масою та збудують у ньому вібраційні коливання, а динаміку деформацій визначають за амплітудами коливань поверхонь зразка на основі сигналів із акселерометрів (рис. 2б).

Рівняння руху для непрямого метода буде мати наступний вигляд [11]:

$$-\omega^2 M x_2^* e^{i\omega t} = \frac{sE^*}{h} (x_1 - x_2^*) e^{i\omega t}, \quad (16)$$

де M – маса навантаження на зразок, $x_{1,2}$ – амплітуди коливань поверхонь зразка.

Динамічну жорсткість в такому випадку можна визначити наступним чином:

$$S(\omega) = -M\omega^2 Z, \quad (17)$$

де Z – відношення амплітуд коливань.

Величину Z можна визначити за наступним співвідношенням [11, 12]:

$$Z = \frac{|x_2^*|}{|x_1^*|} = \frac{|A_0 k_2 e^{i(\omega t - \delta)}|}{|A_0 k_1 e^{i\omega t}|} = \frac{U_2 k_1}{U_1 k_2}, \quad (18)$$

де A_0 – амплітуда вібраційних коливань, U_i – сигнали із акселерометрів, k_i – чутливість акселерометрів, δ – зсув фаз.

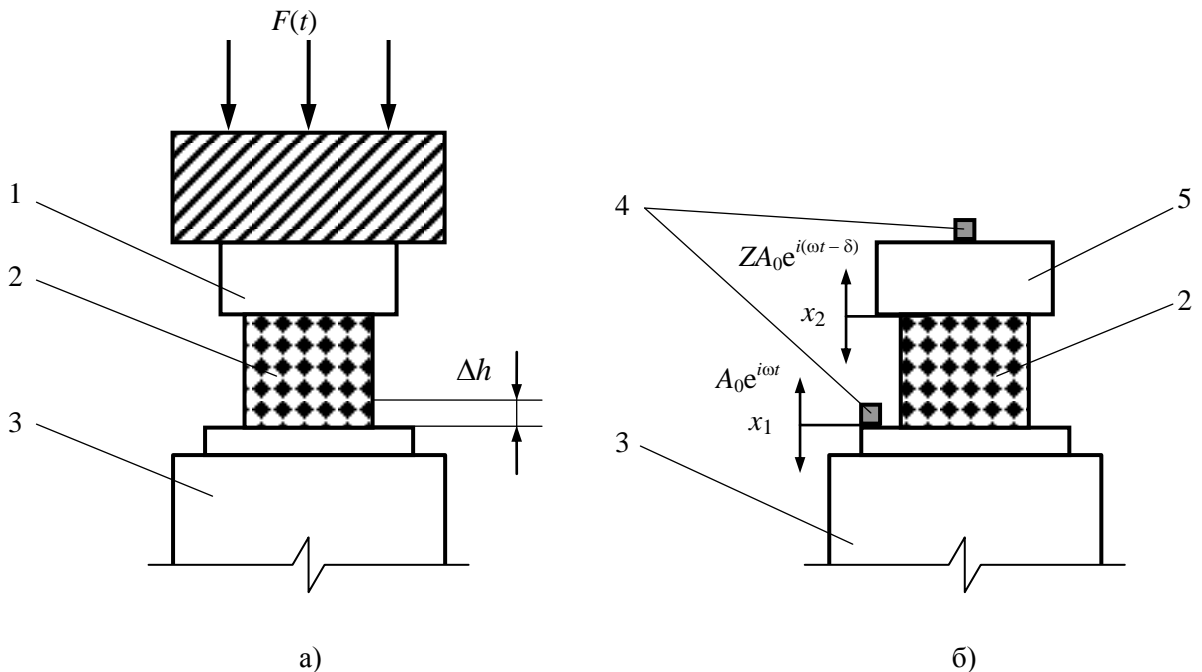


Рис. 2. Пристрої для прямого (а) і непрямого (б) методів вимірювання динамічної жорсткості:

1 – датчик сили, 2 – зразок, 3 – джерело вібраційних коливань, 4 – акселерометри, 5 – маса M , що навантажує зразок.

Величини U_i і δ визначають експериментально і вимірюють, відповідно, за допомогою цифрового вольтметра та частотоміра [11].

Відносну похибку визначення безрозмірної динамічної жорсткості ($\varepsilon_{\tilde{R}}$) для методу скінченних елементів при прямих і непрямих вимірюваннях можна оцінити відповідно за наступними співвідношеннями:

$$\varepsilon_{\tilde{R}} = \frac{\Delta\tilde{R}}{\tilde{R}} = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta s}{s} + \varepsilon_E; \quad (19)$$

$$\varepsilon_{\tilde{R}} = \frac{\Delta\tilde{R}}{\tilde{R}} = \frac{\Delta M}{M} + 2 \frac{\Delta\omega}{\omega} + \frac{\Delta Z}{Z} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta s}{s} + \varepsilon_E, \quad (20)$$

де $\Delta\tilde{R}$ – абсолютна похибка визначення безрозмірної динамічної жорсткості; ΔS – абсолютна похибка при визначенні динамічної жорсткості; Δh – абсолютна похибка при вимірюванні

висоти циліндричного зразка; Δs – абсолютна похибка при визначенні площі зразка; ΔM – абсолютна похибка при вимірюванні маси; $\Delta \omega$ – абсолютна похибка при визначенні частоти вібраційних коливань; ΔZ – абсолютна похибка визначення відношення сигналів акселерометрів.

Ультразвуковий імерсійний метод.

Метод базується на проходженні поздовжніх та поперечних УЗ-хвиль через зразок в'язкопружного полімерного матеріалу, що занурений у імерсійну рідину [13]. Визначення швидкостей v_l та v_t проводять на основі порівняння результатів прямих вимірювань часів поширення зондуючого імпульсу через імерсійну рідину при відсутності та наявності зразка полімерного матеріалу між випромінювачем і приймачем УЗ-хвиль. Крім того, при визначенні v_t використовується метод обертової пластини, який дозволяє визначити критичний кут, при якому поздовжня хвиля, при падінні із рідини на поверхню зразка, трансформується у поверхневу, а у зразку поширюється тільки поперечна хвиля [14].

Коефіцієнт Пуассона при відомих значеннях v_l та v_t визначається наступним чином [14, 15]:

$$v' = \frac{2 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2\right)}. \quad (21)$$

Із врахуванням коефіцієнтів поглинання поздовжніх (α_l) та поперечних хвиль (α_t) у зразку полімерного матеріалу та співвідношення (9), уявну частину комплексного v^* можна визначити наступним чином:

$$v'' = \frac{v_l^3 \alpha_l (\omega^2 + \alpha_t^2 v_t^2)^2}{2 v_t^3 \alpha_t (\omega^2 + \alpha_l^2 v_l^2)^2} - 1. \quad (22)$$

Відносні похибки визначення дійсної ($\varepsilon_{v'}$) та уявної ($\varepsilon_{v''}$) частин комплексного коефіцієнта Пуассона оцінимо за наступними співвідношеннями:

$$\varepsilon_{v'} = \frac{\Delta v'}{v'} = \frac{\sqrt{\Delta v_l^2 \left(\frac{\partial v'}{\partial v_l}\right)^2 + \Delta v_t^2 \left(\frac{\partial v'}{\partial v_t}\right)^2}}{v'}; \quad (23)$$

$$\varepsilon_{v''} = \frac{\Delta v''}{v''} = \frac{\sqrt{\Delta v_l^2 \left(\frac{\partial v''}{\partial v_l}\right)^2 + \Delta v_t^2 \left(\frac{\partial v''}{\partial v_t}\right)^2 + \Delta \alpha_l^2 \left(\frac{\partial v''}{\partial \alpha_l}\right)^2 + \Delta \alpha_t^2 \left(\frac{\partial v''}{\partial \alpha_t}\right)^2 + \Delta \omega^2 \left(\frac{\partial v''}{\partial \omega}\right)^2}}{v''}, \quad (24)$$

де $\Delta v'$ – абсолютна похибка визначення дійсної частини комплексного v^* ; $\Delta v''$ – абсолютна похибка визначення уявної частини комплексного v^* ; Δv_l – абсолютна похибка вимірювання поздовжньої хвилі у зразку, Δv_t – абсолютна похибка вимірювання поперечної хвилі у зразку; $\Delta \alpha_l$ – абсолютна похибка вимірювання коефіцієнту затухання поздовжньої хвилі у зразку; $\Delta \alpha_t$ – абсолютна похибка вимірювання коефіцієнту затухання поперечної хвилі у зразку; $\Delta \omega$ – абсолютна похибка частоти УЗ-хвилі; $\frac{\partial v'}{\partial v_l}, \frac{\partial v'}{\partial v_t}, \frac{\partial v''}{\partial v_l}, \frac{\partial v''}{\partial v_t}, \frac{\partial v''}{\partial \alpha_l}, \frac{\partial v''}{\partial \alpha_t}, \frac{\partial v''}{\partial \omega}$ – відповідні частинні похідні від дійсної та уявної частин комплексного коефіцієнта Пуассона.

Із врахуванням (21) та частинних похідних $\frac{\partial v'}{\partial v_l}, \frac{\partial v'}{\partial v_t}$ співвідношення (23) запишемо у наступному вигляді:

$$\varepsilon_{v'} = \sqrt{\varepsilon_{v_l}^2 + \varepsilon_{v_t}^2} f(\zeta), \quad (25)$$

де $f(\xi)$ – функція коефіцієнта Пуассона, $f(\xi) = \left| \frac{2\xi^2}{(2\xi^2 - 1)(\xi^2 - 1)} \right|$, причому $\xi^2 = \frac{2\nu' - 1}{2\nu' - 2}$; $\varepsilon_{\nu'}$ – відносна похибка визначення швидкості поширення поздовжньої хвилі у зразку; ε_{ν_i} – відносна похибка визначення швидкості поширення поперечної хвилі у зразку.

Графік залежності $\varepsilon_{\nu'}$ від величини ν' представлено на рис. 3.

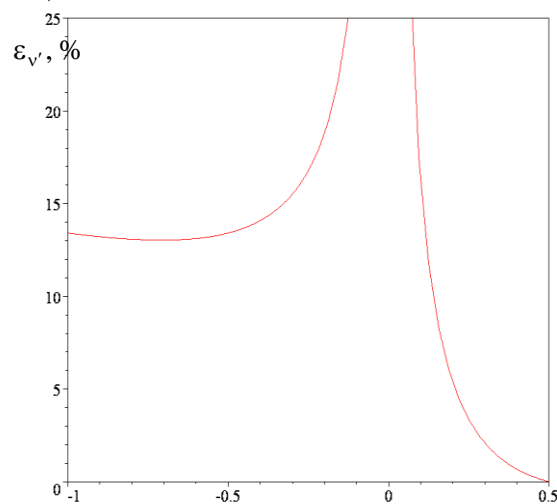


Рис. 3. Графік залежності відносної похибки $\varepsilon_{\nu'}$ від величини ν'

Порівняльний аналіз характеристик методів вимірювання

Основні характеристики розглянутих методів вимірювань коефіцієнта Пуассона представлені в табл. 1.

Величина ν' основних твердих конструкційних полімерних знаходиться в діапазоні 0,3–0,5. Для пористих полімерних матеріалів значення $\nu' \cong 0$, а для полімерних ауксетиків лежить в межах від -1 до 0 . Прямий метод розроблений для вимірювань величини $\nu' \geq 0$, але із врахуванням конструктивних особливостей та технічних можливостей приладових систем може бути використаний для пористих полімерних матеріалів та полімерних ауксетиків.

Для непрямого методу динамічні модулі пружності повинні бути визначенні за допомогою стандартного методу динамічної жорсткості або резонансних методів. Конструкції експериментальних комірок для методу динамічної жорсткості розроблялися для визначення комплексних модулів з додатнім значенням ν' . Резонансні методи теоретично можуть бути використані при вимірюваннях у всьому діапазоні можливих значень ν' .

У методі скінченних елементів для визначення S прямим методом проводять вимірювання прогину Δh зразка під дією динамічного навантаження, що можливе для полімерних матеріалів із $\nu' \geq 0,45$. Відповідно, для зразків матеріалів із $\nu' = 0,3-0,45$, пористих полімерних матеріалів та полімерних ауксетиків метод є малоефективним. Для твердих конструкційних полімерів деформація і прогин зразка під дією зовнішньої сили будуть досить малі або взагалі відсутні, а для пористих полімерних матеріалів та полімерних ауксетиків, деформація зразка буде відбуватися і без збудження зовнішніх вібрацій.

Імерсійний УЗ-метод використовують при вимірюваннях для визначення дійсної частини комплексного ν^* від -1 до $0,5$. При $\nu' = 0,5$ для абсолютно не стисливого матеріалу повністю відсутні зсувні деформації, а швидкість ν_i рівна нулю. Метод також має обмеження для пористих матеріалів по верхній межі частотного діапазону збудження ультразвуку. Якщо розмір пор більший за довжину УЗ-хвилі, то у зразку спостерігається велике поглинання ультразвуку або взагалі його проходження.

Аналіз значень меж частотних діапазонів (табл. 1), при яких проводяться вимірювання, показує, що реалізація жодного із методів неможлива в діапазоні 18–200 кГц. Частотні діапазони прямого і непрямого методів та методу скінченних елементів не перекриваються із частотою УЗ-хвиль. В такому випадку при деформаціях задіяні різні елементи структурної організації полімерних матеріалів, що впливає на релаксаційні процеси під час динамічного навантаження і на вимірювання первинних параметрів.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики методів вимірювання

Характеристика метода	Прямий	Непрямий	Скінченних елементів	Ультразвуковий імерсійний
Діапазон значень коефіцієнта Пуассона	$\nu' \geq 0$	$0 \leq \nu' < 0,5$	$\nu' \geq 0,45$	$-1 \leq \nu' < 0,5$
Діапазон частот, КГц	0,1–18	0,01–10	0,1–10	200–50000
Тип деформації	динамічна поздовжня та поперечна	поздовжня, поперечна, всебічний стиск	динамічна поздовжня та поперечна	пружні деформації під дією УЗ-хвиль
Попереднє навантаження	ні	так	так / ні	ні
Джерела похибок	методи обробки сигналів, геометричні розміри зразків	помилки у виготовленні зразка, невірний вибір геометрії зразка	помилки у виготовленні зразка, невірний вибір геометрії зразка, великий зсув фаз між каналами вимірювання сили і деформації, невірне калібрування датчиків	різниця між швидкостями поширення поздовжніх та поперечних хвиль у зразку та швидкістю ультразвуку у імерсійній рідині
Відносна похибка $\varepsilon_{\nu'}$, %	2,6; 13	5–6	$\geq 2,6$ $\geq 2,7-3,7$	0,3–15,5
Відносна похибка $\varepsilon_{\nu''}$, %		5–6		≤ 10

Оцінки відносних похибок для непрямого методу за співвідношеннями (7)–(9) показують, що їх величини лежать у діапазоні значень 5–6 %, при цьому мінімальне (максимальне) значення може зменшуватися (збільшуватися) на 0,25 % при вимірюваннях та визначенні модулів k^* , μ^* .

Для методу скінченних елементів мінімальна відносна похибка оцінена за співвідношенням (19), без внеску $\frac{\Delta S}{S}$, рівна 2,6 %. Оцінки величини $\varepsilon_{\nu'}$ за співвідношенням

(20), без внеску $\frac{\Delta Z}{Z}$, дають значення в межах 2,7–3,7 %, при цьому вважали, що $\frac{\Delta M}{M} \leq 0,1$ %;

$$\frac{\Delta h}{h} \leq 0,1 \text{ \%}; \quad \frac{\Delta s}{s} \leq 0,02 \text{ \%}; \quad \frac{\Delta \omega}{\omega} = 0,01-0,5 \text{ \%}.$$

Для імерсійного УЗ-методу в діапазоні значень $0,3 \leq \nu' < 0,45$ відносна похибка оцінена за співвідношенням (25) рівна 0,3–2,1 %. Для коефіцієнта Пуассона полімерних ауксетиків прийнятною похибкою можна вважати величину $\varepsilon_{\nu'} = 15,5$ %, що відповідає $\nu' = -0,3$. Із зменшенням величини ν' до -1 відносна похибка не буде перевищувати вказане значення $\varepsilon_{\nu'}$. Для ν'' оцінка відносної похибки за співвідношенням (24) показує, що $\varepsilon_{\nu''}$ не перевищує 10 %,

при цьому відносні похибки відповідних величин рівні: $\frac{\Delta v_t}{v_t} = 1\%$; $\frac{\Delta v_t}{v_t} = 0,5\%$; $\frac{\Delta \alpha_t}{\alpha_t} = 0,4\%$;

$$\frac{\Delta \alpha_t}{\alpha_t} = 1,7\%; \frac{\Delta \omega}{\omega} = 2,5\% \text{ [14].}$$

Висновки

1. Методи для визначення комплексного коефіцієнта Пуассона в'язкопружних полімерних матеріалів базуються на різних фізичних принципах збудження динамічних деформацій у зразках та вимірюванні первинних параметрів.

2. Вибір метода вимірювань, в значній мірі, залежить від частотного діапазону зовнішнього збурення, типу деформацій у зразку полімерного в'язкопружного матеріалу та орієнтовного значення коефіцієнта Пуассона матеріалу для якого проводяться вимірювання.

3. Розглянуті методи відрізняються основними джерелами похибок, що дає можливість при отриманні експериментальних результатів різними методами значень дійсної і уявної частин комплексного коефіцієнта Пуассона встановити їх достовірність.

Список літератури

1. Ferry J. D. Viscoelastic properties of polymers / J. D. Ferry // John Wiley & Sons, INC., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1980. – 672 p.
2. Pritz T. Measurement methods of complex Poisson's ratio of viscoelastic materials / T. Pritz // Applied Acoustics. – 2000. – V. 60. – P. 279–292.
3. Mead D. J. Measurement of the dynamic moduli and Poisson's ratio of a transversely isotropic fibre-reinforced plastic / D. J. Mead, R. J. Joannides // Composites. – 1991. – V. 22. – N. 15. – P. 1529.
4. Giovagnoni M. On the direct measurement of the dynamic Poisson's ratio / M. Giovagnoni // Mechanics of Materials. – 1994. – V. 17. – P. 33–46.
5. Kulik V. M. Physical principles of methods for measuring viscoelastic properties / V. M. Kulik, A. V. Boiko // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2018, – V. 59. – No. 5. – P. 874–885.
6. ISO 18437-1:2012 Mechanical vibration and shock – Characterization of the dynamic mechanical properties of viscoelastic materials – Part 1: Principles and guidelines.
7. ISO 18437-2:2012 Mechanical vibration and shock – Characterization of the dynamic mechanical properties of viscoelastic materials – Part 2: Resonance method.
8. ISO 18437-4:2012 Mechanical vibration and shock – Part 4: Dynamic stiffness method.
9. ISO 18437-5:2012 Mechanical vibration and shock – Characterization of the dynamic mechanical properties of viscoelastic materials – Part 5: Poisson ratio based on comparison between measurements and finite element analysis.
10. ASTM E1875-13 Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by sonic resonance.
11. Koblar D. Evaluation of the frequency-dependent Young's modulus and damping factor of rubber from experiment and their implementation in a finite-element analysis / D. Koblar, M. Boltežar // Experimental Techniques. – 2016. – V. 40. – P. 235–244.
12. Measurement method of complex viscoelastic material properties / A. V. Boiko, V. M. Kulik, B. M. Seoudi, H. H. Chun, I. Lee // International Journal of Solids and Structures. – 2010. – V. 47. – P. 374–382.
13. Физическая акустика / Под. ред. У. Мезона. Том. 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Часть А. – М.: Мир, 1966. – 592 с.
14. Мащенко В. А. Визначення модулів пружності конструкційних та гетерогенних матеріалів ультразвуковим методом / В. А. Мащенко // Міжвузівський збірник „Наукові нотатки”. – 2019. – Вип. 65. – С. 165–169.
15. Ginzel E. Determining Approximate Acoustic Properties of Materials / E. Ginzel, B. Turnbull // e-Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – N. 12. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ndt.net/article/ndtnet/2016/17_Ginzel.pdf.
16. Franko E. E. Measurement of Elastic Properties of Materials by the Ultrasonic Through-Transmission Technique / E. E. Franko, J. M. Meza, F. Buiocchi // Dyna. – 2011. – N. 168. – P. 59–64.

17. A study of PC-based ultrasonic goniometer system of surface properties and characterization of materials / S. Sani, M. H. Md. Saad, N. Jamaludin, M. P. Ismail and other // Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018 – V. 298. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/298/1/.../pdf>.

18. Characterization of material damage by ultrasonic immersion test / A. Castellano, P. Foti, A. Fraddosio, U. Galietti and other // Procedia Engineering. – 2015. – N. 109. – P. 395–402.

Машенко В.А., Одесская государственная академия технического регулирования и качества
Квасников В.П., Национальный авиационный университет, г. Киев

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ВЯЗКОУПРУГИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В работе проведен обзор основных методов (прямой и непрямой методы, метод конечных элементов, ультразвуковой иммерсионный метод) измерения комплексного коэффициента Пуассона вязкоупругих полимерных материалов. Особое внимание сконцентрировано на физических принципах поведения объекта и системы измерений, реализации процесса измерений для каждого метода, проанализировано уровень его применимости и информативности. В рассмотренных методах используются различные подходы к измерению первичных параметров, что дает возможность проводить сравнительный анализ полученных значений действительной и мнимой частей коэффициента Пуассона и определять их достоверность. Проанализированы источники погрешностей при проведении измерений каждым из методов, получены соотношения для оценки погрешностей, проведены расчеты минимальных и максимальных относительных погрешностей определения действительной и мнимой частей комплексного коэффициента Пуассона и сделан их сравнительный анализ. Выбор метода измерений, в значительной мере, зависит от частотного диапазона возбуждения деформаций, типа деформаций в образце полимерного вязкоупругого материала и ориентировочного значения коэффициента Пуассона материалу.

Ключевые слова: прямой метод и непрямой методы, метод конечных элементов, ультразвуковой иммерсионный метод, продольная и поперечная деформации, погрешность измерения.

Mashchenko V., Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality
Kvasnikov V., National Aviation University, Kyiv

PHYSICAL PRINCIPLES AND METHODS OF MEASURING THE POISSON'S RATIO VISCOELASTIC POLYMERIC MATERIALS

The article reviews the main methods (direct and indirect methods, finite element method, ultrasonic immersion method) of measuring the complex Poisson's ratio of viscoelastic polymeric materials. Particular attention is paid to the physical principles of behavior of the object and the system of measurements, the implementation of the measurement process for each method, analyzed the level of its applicability and informativeness. The considered methods use different approaches to the measurement of primary parameters, which makes it possible to conduct a comparative analysis of the obtained values of the real and imaginary parts of the Poisson's ratio and determine their reliability. The sources of errors in measurements by each of the methods are analyzed, the ratios for estimation errors, the minimum and maximum relative errors of determining the real and imaginary parts of the complex Poisson's ratio are calculated and their comparative analysis is made. The choice of measurement method largely depends on the frequency range of excitation of the deformations, the type of deformations in the sample of the polymeric viscoelastic material and the approximate value of the Poisson's ratio of the material for which the measurements are performed.

Keywords: direct method and indirect methods, finite element method, ultrasonic immersion method, longitudinal and transverse deformations, measurement error.