

В. Г. МАРТИНЕНКО, Г. І. ЛЬВОВ

ЧИСЕЛЬНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ АНІЗОТРОПНИХ В'ЯЗКОПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОРТОГОНАЛЬНО АРМОВАНОВОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

Представлено методику отримання в'язкопружних властивостей ортогонально армованого композиційного матеріалу за відомими пружними властивостями скляних волокон та в'язкопружними властивостями епоксидного наповнювача. Метод складається у серії чисельних експериментів на одновісне розтягування та зсув представницького об'єму композиту з подальшим отриманням змінної у часі матриці жорсткості, безрозмірні компоненти якої можуть бути порівняні у часі. Проаналізований ступень анізотропії в'язкопружних властивостей композиту для різних відносних концентрацій волокон та отримані змінні у часі технічні константи матеріалу.

Ключові слова: в'язкопружність, ортотропія, ядро релаксації, метод скінченних елементів, представницький об'єм композиту.

Представлена методика получения вязкоупругих свойств ортогонально армированного композиционного материала по известным упругим свойствам стеклянных волокон и вязкоупругим свойствам эпоксидного наполнителя. Метод состоит в серии численных экспериментов на одноосное растяжение и сдвиг представительного объема композита с последующим получением параметров ядер релаксации композита. Проанализирована степень анизотропии вязкоупругих свойств композита для различных относительных концентраций волокон и получены переменные во времени технические константы материала.

Ключевые слова: вязкоупругость, ортотропия, ядро релаксации, метод конечных элементов, представительный объем композита.

The paper presents a technique for obtaining the viscoelastic properties of an orthogonally reinforced composite material considering an elastic properties of glass fibers and viscoelastic properties of epoxy matrix. The method consists in a series of experiments under the representative volume of composite that results in a time-dependent stiffness matrix which can be rearranged to a relaxation tensor of the composite material. Dimensionless comparison of the components of the stiffness matrix shows the different level of anisotropy of viscoelastic properties of composite for different concentration ratio of fibers. It increases with an increasing concentration ratio of fibers. The obtained results indicate that the standard way of an accounting of the viscoelasticity does not reflects them well enough for the orthogonally reinforced composite material.

Keywords: viscoelasticity, orthotropy, relaxation kernel, finite-element method, composite representative volume.

Вступ. Композиційні матеріали широко використовуються у різних елементах конструкцій – від комп'ютерних плат до обшивки космічних апаратів – завдяки набору властивостей, які вигідно відрізняють їх від металевих аналогів, а саме: високої діелектричної спроможності, корозійній стійкості, поєднанню низької середньої щільності з високими характеристиками міцності [1]. Серед композитів склопластик відіграє важливу роль. Прикладами його застосування служать елементи літаків, корпуси суден, лопатки вітряної турбіни, ремонтний бандаж магістрального трубопроводу, тощо [2].

Оцінка напружено-деформованого стану склопластику є доволі складною інженерною задачею враховуючи ортотропію його пружних та в'язкопружних властивостей [3]. Для цього застосовується два підходи – феноменологічний та структурний [4]. Перший полягає у розгляді деталі з композиту як однорідної. При цьому пружні й в'язкопружні властивості є усередненими й визначаються за допомогою проведення серії експериментів, що викликає недоліки цього методу – неможливість узагальнення його результатів на весь клас конструктивних елементів та, як результат, багато зусиль на експеримент при розрахунках нової конструкції. Другий підхід враховує неоднорідну структуру композиційного матеріалу й різницю в пружних і в'язкопружних властивостях його шарів. Разом з великими передбачуваними можливостями цього методу він також має недоліки, а

саме складність аналітичної або чисельної моделі, що описує механічну поведінку об'єкту з композиційного матеріалу і, як результат, неможливість його застосування до задач, що розглядають дуже складні конструкції або враховують багато ефектів. Ситуація ускладнюється необхідністю врахування в'язкопружних властивостей, що можуть бути ізотропними та анізотропними.

З цієї точки зору ефективним є підхід, що полягає у поєднанні двох вищезгаданих методів. Розглядається серія експериментів на одновісне розтягування та зсув представницького об'єму композиційного матеріалу, який складається з матеріалів волокна та матриці, а його вигляд та розміри залежать від характеру армування композиту [5]. Після цього може бути отримана матриця жорсткості матеріалу, з неї – матриця податливості та технічні пружні постійні. Такий підхід до отримання макроскопічних властивостей волокнистого композиційного матеріалу був використаний в багатьох роботах. Зокрема в роботі [6] описаний метод обчислення ефективних пружних характеристик композиційного матеріалу при різному процентному вмісті волокон. В статті [7] авторами представлена методика отримання гомогенних властивостей перехідної повзучості, засновуючись на аналогічних властивостях матриці та армуючих елементів. В [8] автори синтезували макроскопічні пружні властивості композиційного матеріалу, засновуючись на властивостях його складових на молекулярному рівні. В статті [9] пред-

ставлений мікроструктурний аналіз тривимірного зсуву композиту з волокнами з оксиду титану. В [10] досліджується ефективні характеристики та мікромеханічний відгук композитних волокон, що піддані зсуву.

Таким чином, описаний метод є популярним, перспективним та здатним бути застосованим до оцінки в'язкопружних властивостей композиту.

Розгляду в'язкопружних властивостей композиційного матеріалу приділяється достатня увага. Наприклад, в роботі [11] автор проводить комплексне дослідження релаксації напружень в композиті, що складається з вугільних волокон та епоксидного наповнювача, включаючи експериментальне знаходження таких важливих показників в'язкопружних властивостей, як температури склування, коефіцієнтів рядів Проні, температурної зсувної функції, динамічний відгук зразків, тощо. В [12] пропонується аналітичний метод розв'язання задачі анізотропної в'язкопружності посиленних волокнами матеріалів. Робота [13] представляє результати експериментального дослідження ізотропних в'язкопружних властивостей композиційного

матеріалу. В [14] описаний чисельний метод розв'язання плоскої задачі анізотропної в'язкопружності волокнистого композиту з наведенням прикладів його застосування. В статті [15] представлена аналітична методика розв'язання динамічної задачі анізотропної в'язкопружності плоских композиційних пластин при розтягуючому навантаженні.

Незважаючи на важливість врахування анізотропних в'язкопружних властивостей волокнистого композиту, тема отримання їхніх чисельних значень є недостатньо освітленою. Дана робота описує метод отримання таких властивостей.

1 Методика дослідження. Розглядається склопластик із ортогональною схемою армування, представницький об'єм якого з відносними розмірами 1x1x2 разом із системою координат показані на рис. 1, а. Він ілюструє об'ємну модель, що підготована для побудови скінченно-елементної моделі, показаної на рис. 1, б.

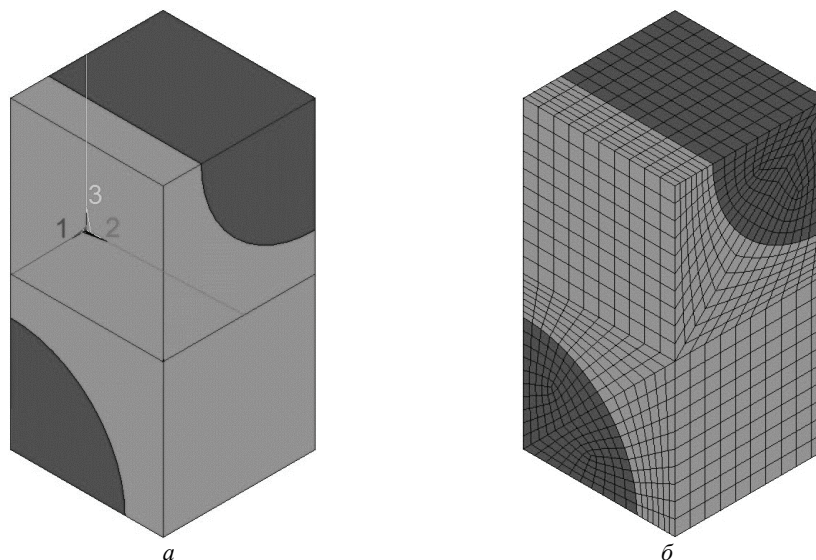


Рисунок 1 – Представницький об'єм ортогонально армованого композиту: а – геометрична модель; б – скінченно-елементна модель

Задача розв'язувалась в програмному комплексі скінченно-елементного аналізу ANSYS Mechanical Student Products 17.2. Була побудована впорядкована скінченно-елементна модель та перевірена її збіжність для різних геометричних параметрів волокна, що показало похибку менше 1% для всіх випадків.

Пружні властивості скляних волокон отримані з [16]. Їхній модуль пружності $E_f = 7.85 \cdot 10^{10}$ Па, а коефіцієнт Пуасона $\nu_f = 0.22$. Коефіцієнт Пуасона епоксидної смоли, що виступає матрицею склопластику, складає $\nu_m = 0.22$. Її в'язкопружні властивості описані в роботі [17] та представлені в таблиці 1 через множники E_s , модуль на нескінченності E_∞ та часи релаксації τ_s експоненціального ряду Проні з числом членів S , що описує залежне від часу t ядро релаксації матеріалу:

$$E(t) = E_\infty + \sum_{s=1}^S E_s \exp(-t/\tau_s). \quad (1)$$

Таблиця 1 – В'язкопружні властивості матриці склопластику

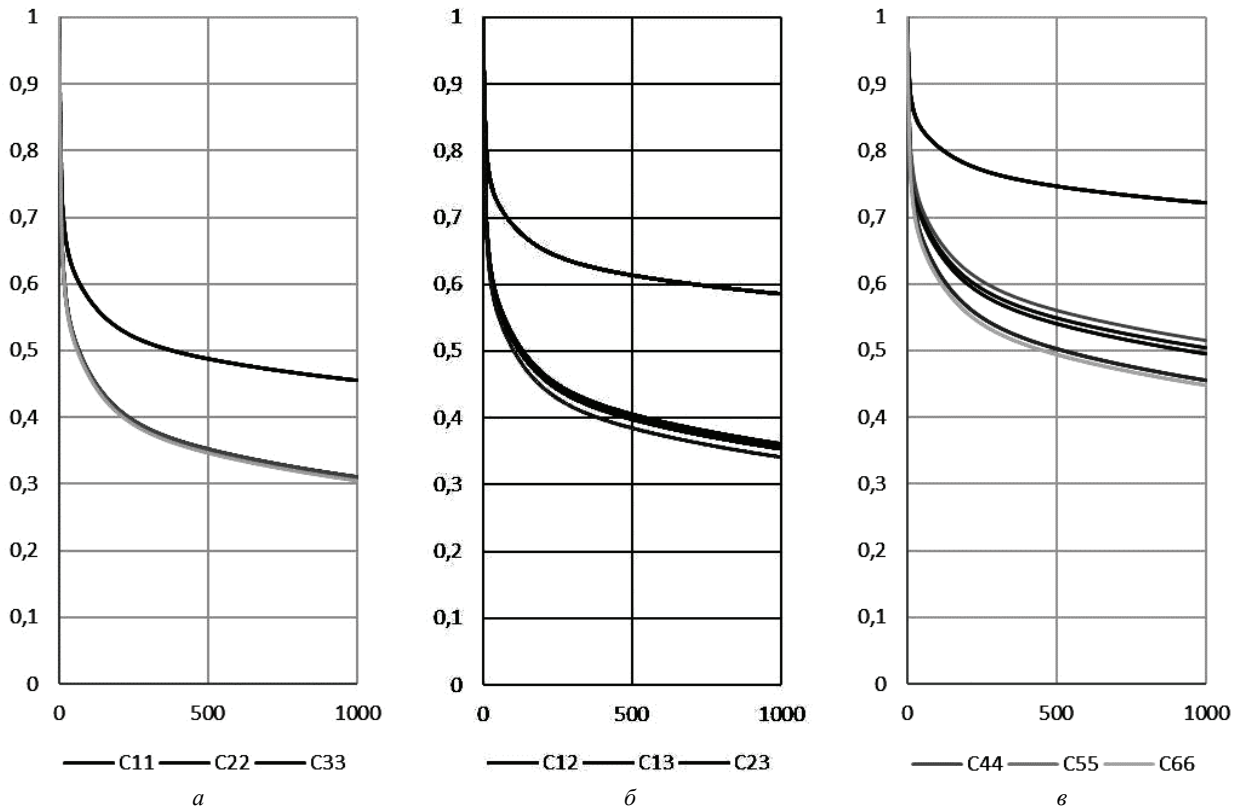
Номер параметру, s	Час релаксації, τ_s , с	Множник E_s , 10^6 Па
1	10^{-4}	200
2	10^{-3}	800
3	10^{-2}	1500
4	10^{-1}	1000
5	10^0	1100
6	10^1	2700
7	10^2	2900
8	10^3	2500
9	10^4	900
10	10^5	950
11	10^6	600
12	10^7	120
13	10^8	180
14	10^9	200
15	10^{10}	250
E_∞		700

Таблиця 4 – Миттєві коефіцієнти матриці жорсткості

r	$\eta(r)$	C_{11} , ГПа	C_{22} , ГПа	C_{33} , ГПа	C_{12} , ГПа	C_{13} , ГПа	C_{23} , ГПа	C_{44} , ГПа	C_{55} , ГПа	C_{66} , ГПа
0.5	0.393	35.3	35.3	31.9	15.4	15.7	15.7	8.0	7.8	7.8
0.75	0.589	47.8	47.8	41.3	17.1	17.5	17.5	11.4	10.8	10.8
0.95	0.746	65.1	65.1	57.5	20.2	20.3	20.3	18.6	16.8	16.8

Таблиця 5 – Технічні пружні постійні для початкового моменту часу

r	$\eta(r)$	E_1 , ГПа	E_2 , ГПа	E_3 , ГПа	G_{12} , ГПа	G_{13} , ГПа	G_{23} , ГПа	ν_{12} , [-]	ν_{13} , [-]	ν_{23} , [-]
0.5	0.393	25.5	25.5	22.2	8.0	7.8	7.8	0.278	0.355	0.355
0.75	0.589	38.1	38.1	31.9	11.4	10.8	10.8	0.241	0.321	0.321
0.95	0.746	55.1	55.1	47.9	18.6	16.8	16.8	0.225	0.273	0.273

Рисунок 2 – Графіки зміни у часі, [с] безрозмірних коефіцієнтів матриці жорсткості, [-]:
а – при $\eta = 0.393$; б – при $\eta = 0.589$; в – при $\eta = 0.746$

На рис. 3 показана релаксація модулів пружності в напрямку волокон (E_1) та перпендикулярно до них (E_3) для різних r , тобто різних об'ємних концентрацій волокон η . На рис. 4 приведені аналогічні результати для модулів зсуву G_{12} та G_{13} . Як видно з рисунків, модулі для фіксованої концентрації волокна релаксують неоднаково, тобто E_1/E_3 та G_{12}/G_{13} не є постійними за часом.

Аналогічна ситуація спостерігається і для коефіцієнтів Пуассона ν_{12} та ν_{13} , що показані на рис. 5, але тут коефіцієнт ν_{13} збільшується у часі, а ν_{12} – зменшується.

3 Обговорення та обробка результатів. Очевидно, що у тому випадку, якби в'язкопружні властивості композиту були пропорційними пружним, то графіки безрозмірних коефіцієнтів матриці жорсткості на рис. 2 повністю би співпадали. Оскільки це не виконується, можна зробити висновок про те, що традиційного опису в'язкопружної поведінки, що засновується саме на такому припущенні та застосовується при розв'язанні багатьох інженерних задач, у тому числі в програмних комплексах скінченно-елементного аналі-

зу, наприклад, ANSYS, в такому випадку недостатньо або він є приблизним.

Окрім того, зміна у часі коефіцієнтів Пуассона також протирічить стандартним припущенням, що приймаються при розрахунках в'язкопружної поведінки конструкцій та елементів машин.

В пункті 2 був описаний метод отримання коефіцієнтів залежної від часу матриці жорсткості композиційного матеріалу. Але для застосування цієї інформації доцільно проводити її обробку в звичних для теорії в'язкопружності параметрах.

Традиційний підхід до опису в'язкопружних властивостей матеріалу в зворотній формі має наступний вигляд:

$$\sigma_{lm}(t) = \int_0^t \sum_n \sum_p R_{lmnp}(t-\xi) \frac{d\varepsilon_{np}(\xi)}{d\xi} d\xi, \quad (8)$$

де σ_{lm} – компоненти тензору напружень ($l, m = 1..3$); ε_{np} – компоненти тензору деформацій ($n, p = 1..3$); R_{lmnp} – тензор релаксації; ξ – час, що сплинув.

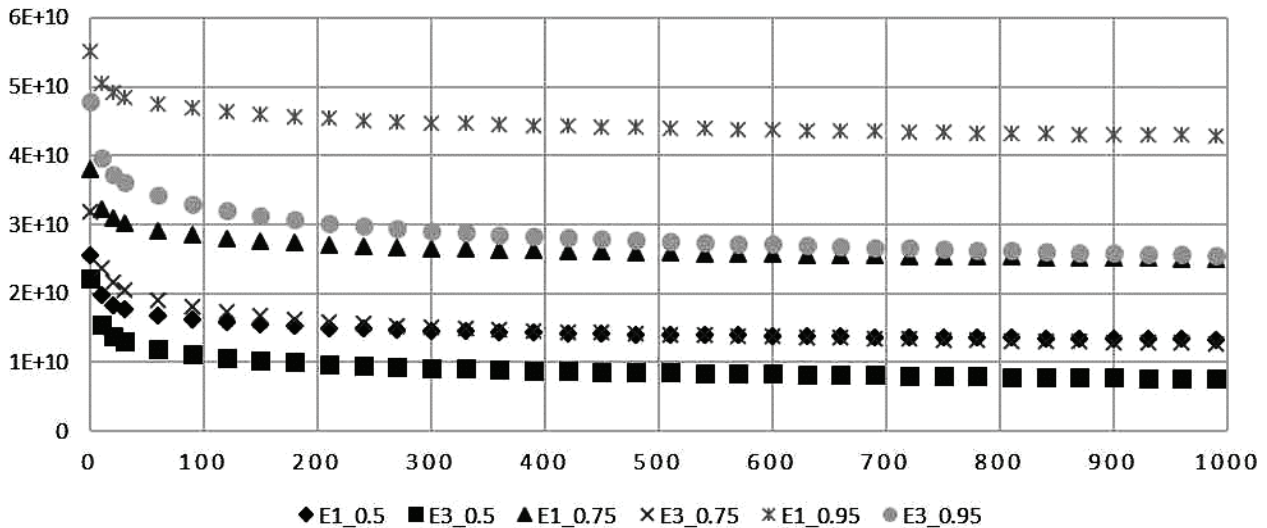


Рисунок 3 – Графіки зміни у часі, [с] модулів пружності, [Па] при $r = 0.5, 0.75, 0.95$

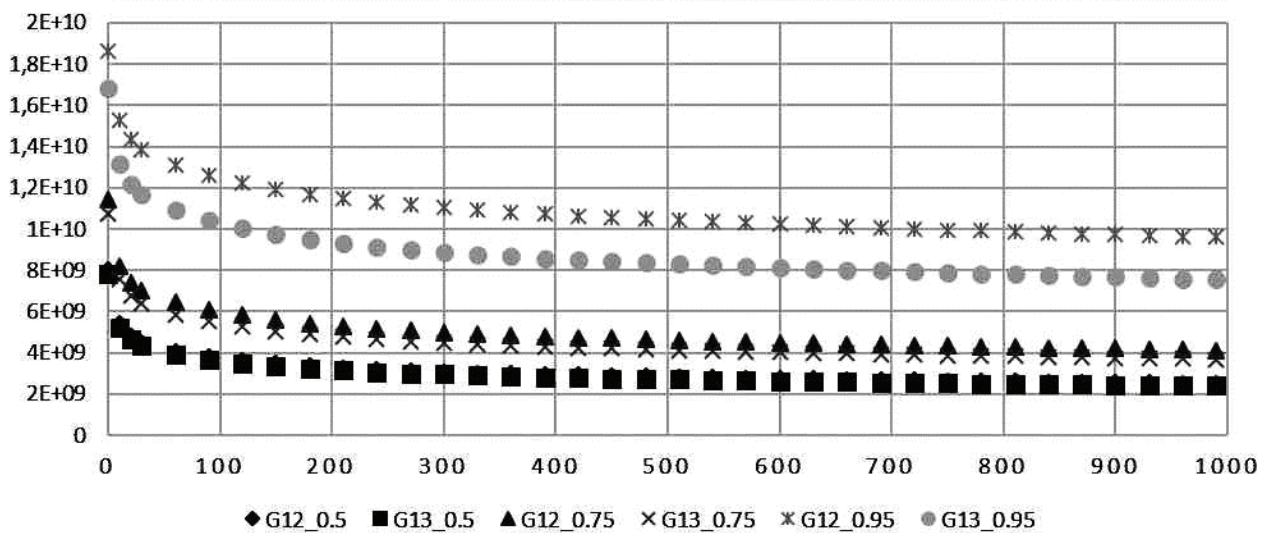


Рисунок 4 – Графіки зміни у часі, [с] модулів зсуву, [Па] при $r = 0.5, 0.75, 0.95$

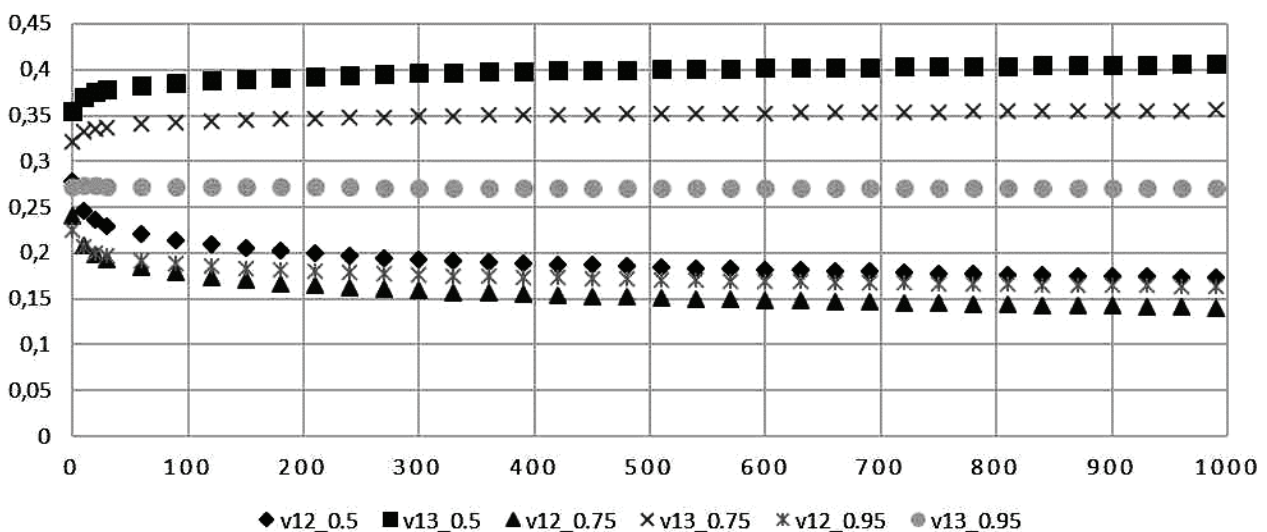


Рисунок 5 – Графіки зміни у часі, [с] коефіцієнтів Пуассона, [-] при $r = 0.5, 0.75, 0.95$

Інша форма запису співвідношення (7) – через тензор миттєвих постійних пружності з компонентами R_{lmnp} та безрозмірний тензор функцій швидкості релаксації з компонентами Γ_{lmnp} , що зазвичай апроксимуються рядами Проні [4]:

$$\sigma_{lm}(t) = \sum_n \sum_p R_{lmnp} [\varepsilon_{np}(t) - \int_0^t \Gamma_{lmnp}(t-\xi) \varepsilon_{np}(\xi) d\xi]. \quad (9)$$

Приводячи вигляд (9) до нотації Фойгта маємо:

$$\sigma_i(t) = \sum_j C_{ij}(0) [\varepsilon_j(t) - \int_0^t \Gamma_{ij}(t-\xi) \varepsilon_j(\xi) d\xi]. \quad (10)$$

Порівняємо (10) із формою запису, в якій отримувались компоненти залежної від часу матриці жорсткості в пункті 2. Для цього перепишемо (2):

$$\sigma_i(t) = \sum_j C_{ij}(0) [\varepsilon_j - (1 - \{C_{ij}(t)\}) \varepsilon_j]. \quad (11)$$

Порівнюючи (10) та (11) для постійних за часом деформацій маємо:

$$\int_0^t \Gamma_{ij}(t-\xi) d\xi = 1 - \{C_{ij}(t)\}. \quad (12)$$

Після апроксимації відносних компонент матриці швидкості релаксації рядами Проні, інтегрування та

підстановки табличних значень коефіцієнтів $\{C_{ij}\}$ отримаємо систему рівнянь відносно невідомих множників $(\alpha_{ij})_s$ та часів релаксації $(\tau_{ij})_s$ рядів Проні, до якої можна застосувати метод найменших квадратів:

$$\sum_{s=1}^S (\alpha_{ij})_s (\tau_{ik})_s [1 - \exp(-t_z / (\tau_{ij})_s)] = 1 - \{C_{ij}(t_z)\}, \quad (13)$$

де $z = 1 \dots Z$, Z – число точок за часом, $Z > S$.

Окрім того, можливо апроксимувати технічні пружні постійні, представлені на рис. 3-5 аналогічно виразу, представленому в рівності (1):

$$\begin{cases} E_{1,2,3}(t) = (E_\infty)_{1,2,3} + \sum_{s=1}^S (E_s)_{1,2,3} \exp(-t/\tau_s) \\ G_{12,13,23}(t) = (G_\infty)_{12,13,23} + \sum_{s=1}^S (G_s)_{12,13,23} \exp(-t/\tau_s) \\ \nu_{12,13,23}(t) = (\nu_\infty)_{12,13,23} + \sum_{s=1}^S (\nu_s)_{12,13,23} \exp(-t/\tau_s) \end{cases} \quad (14)$$

Часи релаксації та число членів апроксимації зберігаються аналогічним до наведених в табл. 1.

В табл. 6 наведені результати для коефіцієнтів апроксимації технічних пружних постійних рядами Проні для концентрації волокон в композиті $\eta = 0.746$.

Таблиця 6 – Коефіцієнти апроксимації технічних пружних постійних рядами Проні для концентрації $\eta = 0.746$

s	τ_{s}, c	$(E_s)_{1}, Pa$	$(E_s)_{3}, Pa$	$(G_s)_{12}, Pa$	$(G_s)_{13}, Pa$	$(\nu_s)_{12}, [-]$	$(\nu_s)_{13}, [-]$
1	10^{-4}	3.56E+08	6.24E+08	2.56E+08	2.79E+08	1.20E-03	0.00E+00
2	10^{-3}	3.56E+08	6.24E+08	2.56E+08	2.79E+08	1.20E-03	0.00E+00
3	10^{-2}	3.56E+08	6.24E+08	2.56E+08	2.79E+08	1.20E-03	0.00E+00
4	10^{-1}	3.56E+08	6.24E+08	2.56E+08	2.79E+08	1.20E-03	0.00E+00
5	10^0	3.59E+08	6.26E+08	2.57E+08	2.80E+08	1.21E-03	0.00E+00
6	10^1	3.88E+09	7.01E+09	2.81E+09	3.11E+09	1.64E-02	0.00E+00
7	10^2	3.58E+09	6.75E+09	2.74E+09	2.75E+09	1.91E-02	1.10E-03
8	10^3	4.56E+09	8.68E+09	3.49E+09	3.19E+09	3.10E-02	2.27E-03
9	10^4	2.14E-07	0.00E+00	1.22E-06	2.49E-06	0.00E+00	0.00E+00
10	10^5	4.81E+09	2.87E+09	1.07E+09	7.90E+08	1.96E-02	3.54E-02
11	10^6	5.97E+09	3.22E+09	1.20E+09	9.21E+08	2.19E-02	3.91E-02
12	10^7	6.09E+09	3.25E+09	1.21E+09	9.34E+08	2.21E-02	3.95E-02
13	10^8	6.10E+09	3.26E+09	1.21E+09	9.35E+08	2.22E-02	3.95E-02
14	10^9	6.11E+09	3.26E+09	1.21E+09	9.36E+08	2.22E-02	3.95E-02
15	10^{10}	6.11E+09	3.26E+09	1.21E+09	9.36E+08	2.22E-02	3.95E-02
$E_\infty, G_\infty, \nu_\infty$		6.07E+09	3.26E+09	1.21E+09	9.37E+08	2.21E-02	3.75E-02

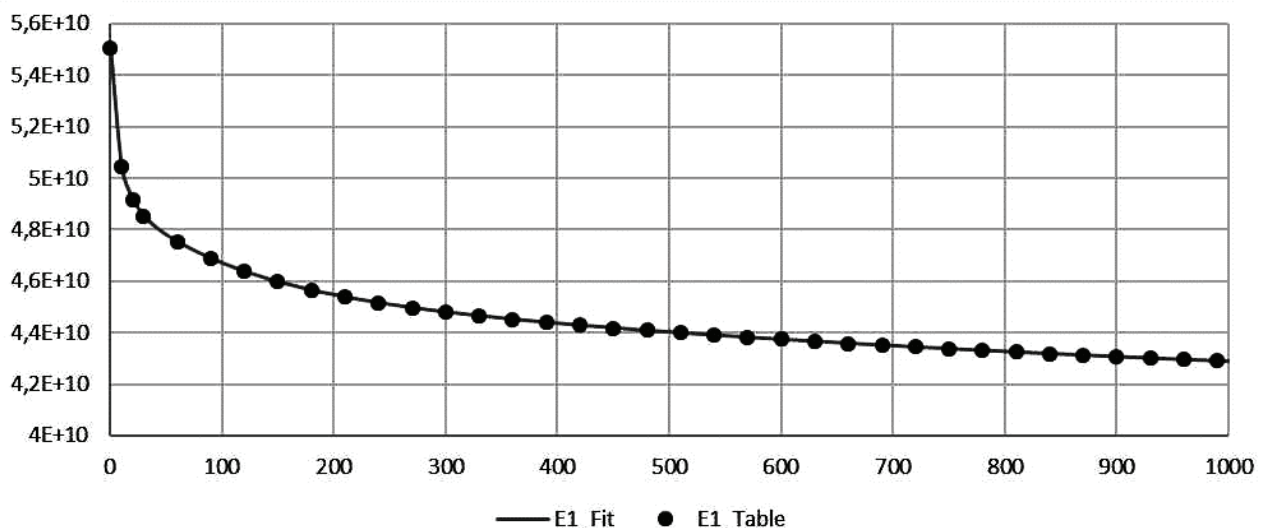


Рисунок 6 – Порівняння у часі, [с] табличних даних для $E_1(t)$ при $\eta = 0.746$ з кривою апроксимації

Аналогічні дані для інших концентрацій волокон можуть бути отримані у той же спосіб.

При застосуванні методу найменших квадратів використовувався математичний апарат пакету Microsoft Office Excel. Для постійних часів релаксації потребує розв'язання система лінійних алгебраїчних рівнянь відносно множників при експонентах

На рис. 6 наведений порівняльний графік отриманої кривої та точок, за якими проводилась побудова кривої для модуля пружності $E_1(t)$.

Як витікає з графіку, проведена апроксимація експоненціальними рядами Проні з постійними часами релаксації дає нехтовно малу похибку, яка зберігається такою й для інших модулів пружності, модулів зсуву та коефіцієнтів Пуассона.

Таким чином, наведена методика дозволяє знайти аналітичний вигляд параметрів ортотропної в'язкопружності ортогонально армованого склопластику.

Висновки. Описана чисельна методика отримання анізотропних в'язкопружних властивостей склопластику, що представляє собою ортогонально армований композиційний матеріал, за наявними ізотропними пружними властивостями скляних волокон та ізотропними в'язкопружними властивостями епоксидної матриці. Отримана залежна від часу матриця жорсткості композиту, а також технічні константи матеріалу, що релаксують у часі. Розроблено спосіб знаходження аналітичного вигляду безрозмірного тензору швидкостей релаксації композиту, а також коефіцієнтів апроксимації технічних констант рядами Проні. Проаналізовано ступінь анізотропії в'язкопружних властивостей та зроблено висновок щодо відсутності пропорції між ними та аналогічними пружними властивостями композиту. Наведена методика може бути поширена на інші схеми армування композиту. Таким чином, кількість натурних експериментів з визначення в'язкопружних властивостей може бути звужена з багатьох наборів експериментів на одновісне розтягання композиційних зразків до одного набору з розтягання зразків з матриці завдяки можливості застосування до отриманих даних чисельних експериментів, аналогічних представленим у роботі.

Список літератури:

1. Нарисаева И. И. Прочность полимерных материалов / И. И. Нарисаева. – М.: Химия, 1987. – 400 с.
2. Батаев А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение / А. А. Батаев, В. А. Батаев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.
3. Уорд М. Механические свойства твердых полимеров / И. Уорд. – М.: Химия, 1975. – 357 с.
4. Адамов А. А. Методы прикладной вязкоупругости / А. А. Адамов, В. П. Матвеенко, Н. А. Труфанов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 411 с.
5. Schmauderand S. Micromechanics and nanosimulation of metals and composites / S. Schmauderand, L. Mishnaevsky. – Germany: Springer, 2009. – 420 p.
6. Darya zadeh S. Numerical procedure of determining the effective mechanical characteristics of an aligned fiber composite / S. Darya zadeh, G. I. Lvov // Strength of materials. – New York, USA: Springer. – 2015. – Vol. 47, No. 4. – P. 636-643.
7. Altenbach H. Structural elastic and creep models of a

UD composite in longitudinal shear / H. Altenbach, V. A. Fedorov // Mechanics of composite materials. – 2007. – Vol. 43, No. 4. – P. 289-298.

8. Odegard G. M. Comparison of two models of SWCN polymer composites / G. M. Odegard, R. B. Pipes, P. Hubert // Composites Science and Technology. – 2004. – Vol. 64, No. 7-8. – P. 1011-1020.

9. Nguyen D. D. Bending analysis of three-phase polymer composite plates reinforced by glass fibers and titanium oxide particles / D. D. Nguyen, K. Minh // Computational Materials. – 2010. – Vol. 49, No. 4. – P. 194-198.

10. Andrianov I. V. Effective properties and micromechanical response of filamentary composite wires under longitudinal shear / I. V. Andrianov, V. V. Danishevskii, A. Guillet [et al] // European Journal of Mechanics. – 2005. – Vol. 24. – P. 195-206.

11. Das R. Stress relaxation behavior of carbon fiber-epoxy composite during and after cure / R. Das. – Bangladesh University of Engineering and Technology, 2008. – 82 p.

12. Nedjar B. An anisotropic viscoelastic fibre-matrix model at finite strains. Continuum formulation and computational aspects / B. Nedjar // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. – 2007. – Vol. 196. – P. 1745-1756.

13. Kohl J. G. Determining the viscoelastic behavior of polyester fiberglass composite by continuous micro-indentation and friction properties / J. G. Kohl, N. Bierwisch, T. T. Ngo [et al] // Wear. – 2016. – Vol. 350-351 – P. 63-67.

14. Staub S. Multi-scale simulation of viscoelastic fiber-reinforced composites / S. Staub, H. Andra, M. Kabel [et al] // Technische mechanik. – 2012. – Vol. 32, No. 1 – P. 70-83.

15. Assie A. E. Behavior of a viscoelastic composite plates under transient load / A. E. Assie, M. A. Eltahir, F. F. Mahmoud // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2011. – Vol. 25, No. 5. – P. 1129-1140.

16. AZO Materials. E-Glass-Fibre properties / AZO Materials. – Режим доступу: <http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=764>. Дата звертання: 19 вересня 2016 року.

17. Guojun H. A theoretical and numerical study of crack propagation along a bimaterial interface with applications to IC packaging / H. Guojun. – Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, 2006. – 195 p.

References (transliterated):

1. Narisaeva I. I. Prochnost' polimernyh materialov [Strength of polymer materials]. Moscow, Himija Publ., 1987. 400 p.
2. Bataev A. A., Bataev V. A. Kompozitsionnyye materialy: stroyeniye, polucheniye, primeneniye [Composite materials: structure, obtaining, application]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2002. 384 p.
3. Word M. Mekhanicheskiye svoystva tvordykh polimerov [Mechanical properties of solid polymers]. Moscow, Himija Publ., 1975. 357 p.
4. Adamov A. A., Matveenko V. P., Trufanov N. A. Metody prikladnoy vjzskouprugosti. [Methods of applied viscoelasticity]. Ekaterinburg: UrO RAN Publ., 2003. 411 p.
5. Schmauderand S., Mishnaevsky L. Micromechanics and nanosimulation of metals and composites. Germany: Springer, 2009. 420 p.
6. Darya zadeh S., Lvov G. I. Numerical procedure of determining the effective mechanical characteristics of an aligned fiber composite. Strength of materials. 2015, vol. 47, no. 4, pp. 636-643.
7. Altenbach H., Fedorov V. A. Structural elastic and creep models of a UD composite in longitudinal shear. Mechanics of composite materials. 2007, vol. 43, no. 4, pp. 289-298.
8. Odegard G. M., Pipes R. B., Hubert P. Comparison of two models of SWCN polymer composites. Composites Science

and Technology. 2004, vol. 64, no. 7-8, pp. 1011-1020.

9. Nguyen D. D., Minh K. Bending analysis of three-phase polymer composite plates reinforced by glass fibers and titanium oxide particles. Computational Materials. 2010, vol. 49, no.4, pp. 194-198.

10. Andrianov I. V., Danishevskii I. V., Guillet A., et al Effective properties and micromechanical response of filamentary composite wires under longitudinal shear. European Journal of Mechanics. 2005, vol. 24, pp. 195-206.

11. Das R. Stress relaxation behavior of carbon fiber-epoxy composite during and after cure. Bangladesh University of Engineering and Technology, 2008, 82 p.

12. Nedjar B. An anisotropic viscoelastic fibre-matrix model at finite strains. Continuum formulation and computational aspects. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 2007, vol. 196, pp. 1745-1756.

13. Kohl J. G., Bierwisch N., Ngo T. T., et al Determining the viscoelastic behavior of polyester fiberglass composite by

continuous micro-indentation and friction properties. Wear. 2016, vol. 350-351, pp. 63-67.

14. Staub S., Andra H., Kabel M., et al Multi-scale simulation of viscoelastic fiber-reinforced composites. Technische mechanik. 2012, vol. 32, no. 1, pp. 70-83.

15. Assie A. E., Eltaher M. A., Mahmoud F. F. Behavior of a viscoelastic composite plates under transient load. Journal of Mechanical Science and Technology. 2011, vol. 25, no. 5. pp. 1129-1140.

16. AZO Materials. E-Glass-Fibre properties. Access mode: <http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=764>. Access date: September, 19th 2016.

17. Guojun H. A theoretical and numerical study of crack propagation along a bimaterial interface with applications to IC packaging. Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, 2006, 195 p.

Надійшла (received) 20.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Чисельна методика визначення анізотропних в'язкопружних властивостей ортогонально армованого композиційного матеріалу / В. Г. Мартиненко, Г. І. Львов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 46 (1218). – С. 44–51. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2078-9130.

Численная методика определения анизотропных вязкоупругих свойств ортогонально армированного композиционного материала / В. Г. Мартыненко, Г. И. Львов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 46 (1218). – С. 44–51. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2078-9130.

The numerical technique for prediction of anisotropic viscoelastic properties of orthogonally fiber reinforced composite material / V. G. Martynenko, G. I. Lvov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 46 (1218). – P. 44–51. – Bibliogr.: 17. – ISSN 2078-9130.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мартиненко Володимир Геннадійович – магістр комп'ютерної механіки, аспірант кафедри Динаміки і міцності машин, НТУ «ХПІ», тел.: (099) 624-72-45, e-mail: martynenko.volodymyr@gmail.com.

Мартыненко Владимир Геннадьевич – магістр комп'ютерної механіки, аспірант кафедри Динаміки і прочності машин, НТУ «ХПІ», тел.: (099) 624-72-45, e-mail: martynenko.volodymyr@gmail.com.

Martynenko Volodymyr Gennadiyovych – Master of Computational Mechanics, Postgraduate of the Dynamic and Strength of Machines Department, NTU "KhPI", tel.: (099) 624-72-45, e-mail: martynenko.volodymyr@gmail.com.

Львов Геннадій Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Динаміки та міцності машин, НТУ «ХПІ», тел.: (057) 70-76-34, e-mail: lvovdpm@ukr.net.

Львов Геннадий Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры Динамики и прочности машин, НТУ «ХПІ», тел.: (057) 70-76-34, e-mail: lvovdpm@ukr.net.

Lvov Gennadii Ivanovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Dynamic and Strength of Machines Department, tel.: (057) 70-76-34, e-mail: lvovdpm@ukr.net.