

МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 620.172.2

Мартиненко В.Г.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Львов Г.І.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ЧИСЕЛЬНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПРОЦЕДУРА ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА МІЦНОСТІ АРМОВАНОГО КОМПОЗИТА¹

У роботі описане чисельно-експериментальне дослідження ефективних пружних характеристик та миттєвої міцності полімерного армованого композиційного матеріалу із тканною структурою армування. Воно базується на проведенні експериментів на розтягування зразків, вирізаних із композитної пластини під різними кутами до напрямків армування, із подальшою аналітичною обробкою результатів. Для уточнення отримуваних експериментальних даних була побудована скінченно-елементна розрахункова модель композиційного зразка в захватах із орієнтацією волокон під різними кутами до докладеного навантаження. Такий комплексний підхід дав змогу отримати за кімнатної та підвищеної температур технічні константи композиційного матеріалу в площині, а також визначити параметри його міцності у навантаженні у різних напрямках. Наведене дослідження розширює відомі дані про фізико-механічні властивості полімерних армованих композиційних матеріалів та дає змогу оцінити особливості їхньої анізотропії, викликані спрямованою структурою армування композиту.

Ключові слова: анізотропія, композиційний матеріал, експериментальне дослідження, миттєва міцність, армування.

Постановка проблеми. Полімерні армовані композиційні матеріали (ПАКМ) використовуються в галузях автомобіле-, авіа- та космічного будівництва, у важкій промисловості та виробництві товарів загального споживання [1; 2].

Під час експлуатації композиційні елементи конструкцій та машин піддаються впливу підвищених температур та високих рівнів навантажень. Оскільки зазвичай вони є тонкостінними елементами, для підтримки їх працездатності важливо точно розрахувати їхню поведінку під впливом змінних температур та високих навантажень [3–5].

Таким чином, дослідження механічних властивостей композиційних матеріалів є актуальною на поточний момент задачею, оскільки моделювання механічної поведінки та визначення міцності композиційних елементів машин є вкрай важливим під час їх проектування.

Через наявність спрямованих армуючих волокон механічні властивості композиційних матеріалів є анізотропними. Внаслідок цього ефективні характеристики та міцність полімерних армованих композиційних матеріалів залежать від напрямку, що робить проблему їх визначення досить складною.

Наприклад, анізотропні пружні властивості та міцність ПАКМ різних типів детально досліджувалися в роботах [6–14]. Незважаючи на це, нині й досі бракує інформації щодо фізико-механічних властивостей композитів через велику кількість їхніх типів та форм.

Дослідження анізотропних властивостей ПАКМ є складною інженерною та науковою процедурою. Її розв'язання потребує виконання експериментів на розтягування композиційних зразків, вирізаних у різних напрямках, кількість яких залежить від ступеня анізотропії механічних властивостей та застосування складних аналітичних і чисельних моделей для коректної обробки експериментальних даних з метою адекватного відтворення таких властивостей. Саме такий комплексний підхід розглянутий у представленій роботі.

¹ Ця робота виконана за підтримки МОН України в рамках реалізації науково-дослідних робіт «Розробка методів математичного моделювання поведінки нових та композиційних матеріалів для оцінки ресурсу та прогнозування надійності елементів конструкцій» (№ ДР 0117U004969) та «Розробка математичних моделей та методів розв'язання нелінійних задач динаміки та міцності конструкцій із гомогенних та композиційних матеріалів» (№ ДР 0118U002045)»

1. Фізичні співвідношення плоского напруженого стану в композиті

Анізотропний пружний матеріал може бути відображений за допомогою тензорного співвідношення у покомпонентній формі:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl}, \quad (1)$$

де $i, j, k, l = 1, 2, 3$; σ_{ij} та ε_{ij} – компоненти тензорів напружень і деформацій другого рангу відповідно; S_{ijkl} – компоненти тензора податливості четвертого рангу.

Якщо врахувати, що схема армування композиту, який розглядається, призводить до ортотропії механічних властивостей, то це дає змогу знизити число значимих компонент симетричного тензора податливості з 36 до 9. Тоді у формі Фойгта рівняння (1) запишеться таким чином:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ S_{1122} & S_{2222} & S_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ S_{1133} & S_{2233} & S_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{2323} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{1212} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

З іншого боку, компоненти тензора податливості ортотропного матеріалу можуть бути виражені через технічні константи:

$$[S] = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{13}/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{21}/E_2 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{31}/E_3 & -\nu_{32}/E_3 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Шлях навантаження зразків дає змогу розглядати напружений стан у них плоским, що означає рівність нулю векторів напружень на поверхнях, паралельних до площини зразка, тобто

$$\sigma_{33}(t) = 0; \sigma_{23}(t) = 0; \sigma_{13}(t) = 0.$$

Тоді можуть використовуватись спрощені фізичні співвідношення:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & 0 \\ S_{1122} & S_{2222} & 0 \\ 0 & 0 & S_{1212} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}. \quad (4)$$

За допомогою проведення експериментів можуть бути отримані лише поздовжні переміщення та деформації. Тоді перший експеримент з розтягування зразків, вирізаних у першому напрямку армування, може дати компоненту тензора податливості $(S_{1111})_{0^\circ}$ у системі координат (СК), що співпадає із цим напрямком, другий експеримент з розтягування зразків, вирізаних у другому напрямку армування, дає компоненту $(S_{2222})_{0^\circ}$ у тій же СК, а третій експеримент дає змогу знайти компоненту $(S_{1111})_{45^\circ}$ у СК, повернутій на кут 45° до першого напрямку армування:

$$\begin{cases} (S_{1111})_{0^\circ} = (\varepsilon_{11})_{0^\circ} / P_1; \\ (S_{2222})_{0^\circ} = (\varepsilon_{22})_{0^\circ} / P_2; \\ (S_{1111})_{45^\circ} = (\varepsilon_{11})_{45^\circ} / P_3. \end{cases}, \quad (5)$$

де P_1, P_2, P_3 – це постійні розподілені навантаження, що докладаються до робочих частин зразків для першого, другого та третього типів експериментів відповідно; $(\varepsilon_{11})_{0^\circ}, (\varepsilon_{22})_{0^\circ}, (\varepsilon_{11})_{45^\circ}$ – деформації, виміряні для першого, другого та третього типів експериментів відповідно.

Інші компоненти тензора податливості не можуть бути знайдені без вимірювання додаткової інформації. Водночас відповідно до правил трансформації компонентів тензорів за повороту СК компонента $(S_{1111})_{45^\circ}$ може бути знайдена через компоненти в початковій СК [15]:

$$(S_{1111})_{45^\circ} = (S_{1111})_{0^\circ} \cos^4 \theta + (S_{2222})_{0^\circ} \sin^4 \theta + 2(S_{1122})_{0^\circ} + (S_{1212})_{0^\circ} \sin^2 \theta \cos^2 \theta, \quad (6)$$

де $\theta = 45^\circ$ – це кут повороту СК.

Після перебудови співвідношення (6) сума невідомих компонент може бути виражена таким чином:

$$2(S_{1122})_{0^\circ} + (S_{1212})_{0^\circ} = 4(S_{1111})_{45^\circ} - (S_{1111})_{0^\circ} - (S_{2222})_{0^\circ}. \quad (7)$$

Якщо порівняти (3) із (7), технічні константи мають вигляд:

$$\begin{cases} (E_1(t))_{0^\circ} = 1 / (S_{1111}(t))_{0^\circ}; \\ (E_2(t))_{0^\circ} = 1 / (S_{2222}(t))_{0^\circ}; \\ (E_1(t))_{45^\circ} = 1 / (S_{1111}(t))_{45^\circ}; \\ \frac{1}{(G_{12}(t))_{0^\circ}} - \frac{2(\nu_{12}(t))_{0^\circ}}{(E_1(t))_{0^\circ}} = \frac{4}{(E_1(t))_{45^\circ}} - \frac{1}{(E_1(t))_{0^\circ}} - \frac{1}{(E_2(t))_{0^\circ}}. \end{cases} \quad (8)$$

Четверте рівняння в системі містить у собі дві невідомі – $(G_{12})_{0^\circ}$ та $(\nu_{12})_{0^\circ}$, тому ця система не може бути розв’язана без використання додаткової інформації.

Проте в низці робіт [16–18] було встановлено, що значення коефіцієнта Пуассона в площині композита майже не відрізняються один від одного для різних зразків склопластику та у середньому їх можна прийняти на рівні 0.111.

Тоді у разі відомого значення коефіцієнта Пуассона $(\nu_{12})_{0^\circ}$ з четвертого рівняння в системі (8) може бути знайдено невідоме значення модуля зсуву $(G_{12})_{0^\circ}$ таким чином:

$$\frac{1}{(G_{12}(t))_{0^\circ}} = \frac{4}{(E_1(t))_{45^\circ}} - \frac{1 - 2(\nu_{12}(0))_{0^\circ}}{(E_1(t))_{0^\circ}} - \frac{1}{(E_2(t))_{0^\circ}}. \quad (9)$$

Таким чином може бути виконана обробка експериментальних даних для отримання повної інформації про ефективні властивості композиту в площині.

2. Підготовка зразків для проведення експерименту

Процедура розробленого методу експериментального дослідження анізотропних механічних

властивостей композиційного матеріалу та структура експериментальної установки описана в роботах [19–20].

Композиційний матеріал, що розглядається, є поєднанням епоксидної смоли з довгими скляними спрямованими волокнами [21, 22]. Схема ортогонального плетіння матеріалу забезпечує високі міцнісні властивості тонких оболонок, виготовлених з цього матеріалу, що піддаються силам розтягування або згину, зберігаючи його легку вагу (приблизно чверть порівняно із аналогічним значенням для сталі). Водночас цей композиційний матеріал не настільки міцний, як вуглепластик, через слабші механічні властивості скловолокна, але значно дешевший завдяки низькій ціні виробництва порівняно з вуглецевими волокнами.

Узагальнені механічні властивості епоксидної смоли та скляних волокон представлені у роботах [23; 24] та [25; 26] відповідно.

На рисунку 1 показана схема вирізання експериментальних зразків. Таким чином, кожен ряд зразків був нарізаний у власному напрямку з однієї великої пластини склопластику.

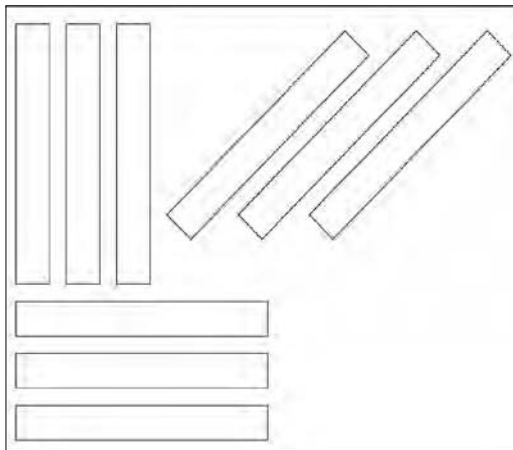


Рис. 1. Схема вирізання композиційних зразків

Підготовка зразків проводилась відповідно до стандарту Американського товариства випробувань матеріалів (American Society for Testing and Materials – ASTM) D618 [27]. Процедура A

вибрана як адекватна підготовка для поточних цілей тестування.

Геометрія зразків була розроблена відповідно до стандарту ASTM D638 [28]. На рисунку 2 зображено фотографію зразків товщиною 2 мм.

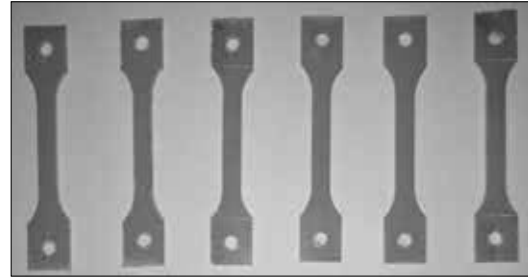


Рис. 2. Експериментальні зразки

У зразках містяться отвори діаметром 4 мм на кінцях, щоб забезпечити їх збірку в експериментальній машині. Після монтажу кінці зразків були затягнуті тримачами, щоб уникнути концентрації напружень навколо отворів і забезпечити повну фіксацію кінців зразка.

У зразках містяться отвори діаметром 4 мм на кінцях, щоб забезпечити їх збірку в експериментальній машині. Після монтажу кінці зразків були затягнуті тримачами, щоб уникнути концентрації напружень навколо отворів і забезпечити повну фіксацію кінців зразка.

3. Процедура проведення експериментального дослідження

Процедура та деталі набору експериментів були заплановані відповідно до стандартів ASTM [28; 29].

Зразки вирізані з однієї композиційної пластини товщиною 2 мм у напрямках 0° , 45° та 90° , що показано на рисунку 1. Зразки навантажуються у напрямку їх довшої сторони. Залежно від напрямку вирізання це призведе до одного з трьох станів, показаних на рис. 3.

Такі схеми навантаження дали змогу отримувати плоскі механічні властивості композиційного матеріалу. Визначення механічних властивостей у третьому напрямку (перпендикулярно до площини

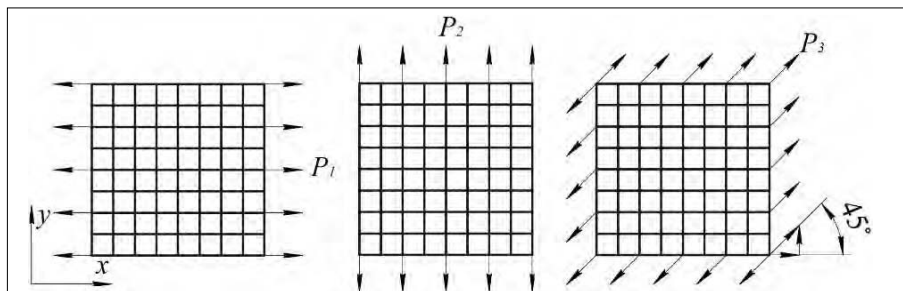


Рис. 3. Схема навантаження зразків



Рис. 4. Експериментальна машина: а) загальний вигляд; б) вигляд захватів

пластини) вимагає випробувань на розтягування або стискання в цих напрямках, які важко реалізувати. Проте у моделюванні механічної поведінки тонких композиційних пластин та оболонок, що піддаються силам розтягування та згинання, існує потреба лише у плоских властивостях.

На рисунку 4 показано повний вигляд експериментальної установки. Зразок І фіксується в захватах (тримачах) ІІ, тоді як автоматичний нагрівальний елемент ІІІ розташований навколо нього. Відносне переміщення захватів вимірюється двома датчиками ІV, а постійність температури контролюється датчиком V. Нагрівач забезпечує плавне підвищення температури до 100°C, підтримуючи її в межах не більше $\pm 2^\circ\text{C}$.

Правильність закріплення зразків та коректність навантаження засвідчується їхнім розривом у місцях робочої частини, як це показано на рис. 5 а та 5 б для зразків, вирізаних під 0° та 45° до першого напрямку армування відповідно. Навантаження зразків до розриву дало змогу побудувати діаграми розтягування композиту у різних напрямках.

4. Чисельне моделювання експериментів

Точне скінченно-елементне моделювання процедури проведення експерименту було необхідне для оцінки внеску деформацій зразків у захватах та поза їхніми робочими частинами в загальний рівень переміщень, що в процесі дослідження вимірюється на захватах, для встановлення переміщень робочої частини зразків. Оскільки напружено-деформований стан на кінцевих частинах зразків не є одновісним, то це має знизити точність вимірювань.

Розрахунки були проведені в ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 17.2 [30], модуль Workbench. Механічні властивості

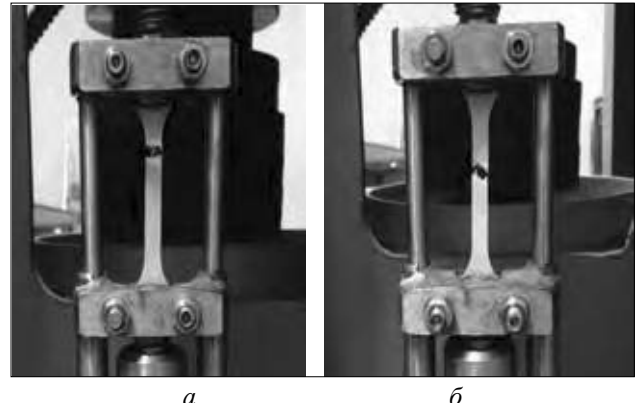


Рис. 5. Розрив зразків: а) зразок, вирізаний під кутом 0° до орієнтації волокон; б) зразок, вирізаний під кутом 45° до орієнтації волокон

ПАКМ та конструкційної сталі були використані з бібліотеки матеріалів програмного комплексу.

На рис. 6 показана впорядкована скінченно-елементна модель композиційного зразка, зафіксованого в сталевих захватах, в якій використані три умови координатної симетрії. Похибка скінченно-елементної дискретизації є меншою за 0.5%. Поздовжнє переміщення 0.01 мм було прикладене до бокових поверхонь захвату.

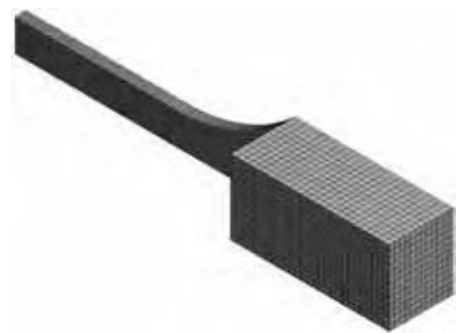


Рис. 6. Симетрична скінченно-елементна модель зразка в захватах

Було виконано два типи розрахунків: 1) для моделі зразка із волокнами, спрямованими під кутами 0° та 90° до напрямку навантаження; 2) для моделі зразка із волокнами, спрямованими під кутом 45° до напрямку навантаження. На рис. 7 а та рис. 7 б показані контурні графіки поздовжніх переміщень для двох описаних випадків.

Обчислені переміщення та коректувальні коефіцієнти зібрані та представлені в таблиці 1. Поле переміщень дало змогу знайти коректувальні коефіцієнти для кожного випадку спрямування волокон та врахувати їх в обробці результатів експериментів: $\kappa = u_g / u_{wp}$.

Таблиця 1

Коректувальні коефіцієнти

Орієнтація волокон під кутом до напрямку навантаження	Переміщення на кінці робочої частини, u_{wp} [м]	Переміщення захвата, u_g [м]	Коректувальний коефіцієнт, k [-]
0° та 90°	$0.615 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	1.625
45°	$0.632 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	1.582

Таблиця 2

Технічні константи композита

T , [°C]	$(E_1(0))_{0^\circ}$, [Па]	$(E_2(0))_{0^\circ}$, [Па]	$(E_1(0))_{45^\circ}$, [Па]	$(\nu_{12}(0))_{0^\circ}$, [-]	$(G_{12}(0))_{0^\circ}$, [Па]
20	$2.225 \cdot 10^{10}$	$2.693 \cdot 10^{10}$	$1.239 \cdot 10^{10}$	0.111	$0.407 \cdot 10^{10}$
100	$0.928 \cdot 10^{10}$	$1.099 \cdot 10^{10}$	$0.228 \cdot 10^{10}$	0.107	$0.064 \cdot 10^{10}$

Таблиця 3

Характерні напруження

Орієнтація волокон під кутом до напрямку навантаження	Умовна границя текучості, [МПа]	Напруження тимчасового опору розриву, [МПа]
0°	80	135
90°	90	160
45°	65	90

5. Результати дослідження та обговорення

Аналіз діаграм розтягування, представлених на рис. 8 а–в, дав змогу визначити пружну та пластичну площадки деформацій. Для кінцевого навантаження близько до напруження тимчасового опору розриву процес деформування мав яскраво виражений внесок від явища повзучості.

Точки на графіках показують усереднені значення, визначені на основі виміру в трьох експериментах. Отримані для пружних ділянок діаграм модулі Юнга в кожному напрямку показані кутами нахилу суцільних ліній на графіках.

У таблиці 2 представлені значення вимірних модулів Юнга, оцінених з літератури коефіцієнтів Пуассона та знайдених модулів зсуву для кімнатної температури та температури 100°C.

Як видно на рис. 8, модуль Юнга в першому напрямку волокон (напрямку основи) менший за модуль Юнга в другому напрямку волокон (напрямку утоку) як для кімнатної температури, так і для температури 100°C. Це означає, що в композиційному матеріалі в другому напрямку міститься волокон більше за їхню кількість у першому напрямку. Описана різниця між модулями

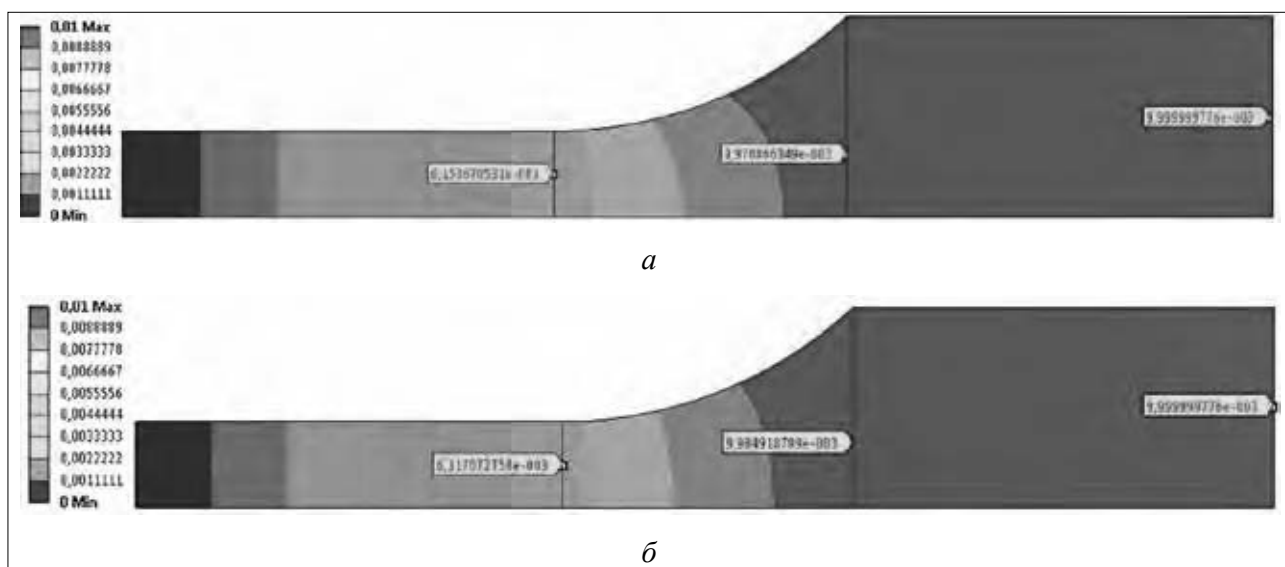


Рис. 7. Контурні графіки поздовжніх переміщень: а) для зразка із волокнами під кутами 0° та 90° до напрямку навантаження; б) для зразка із волокнами під кутом 45° до напрямку навантаження

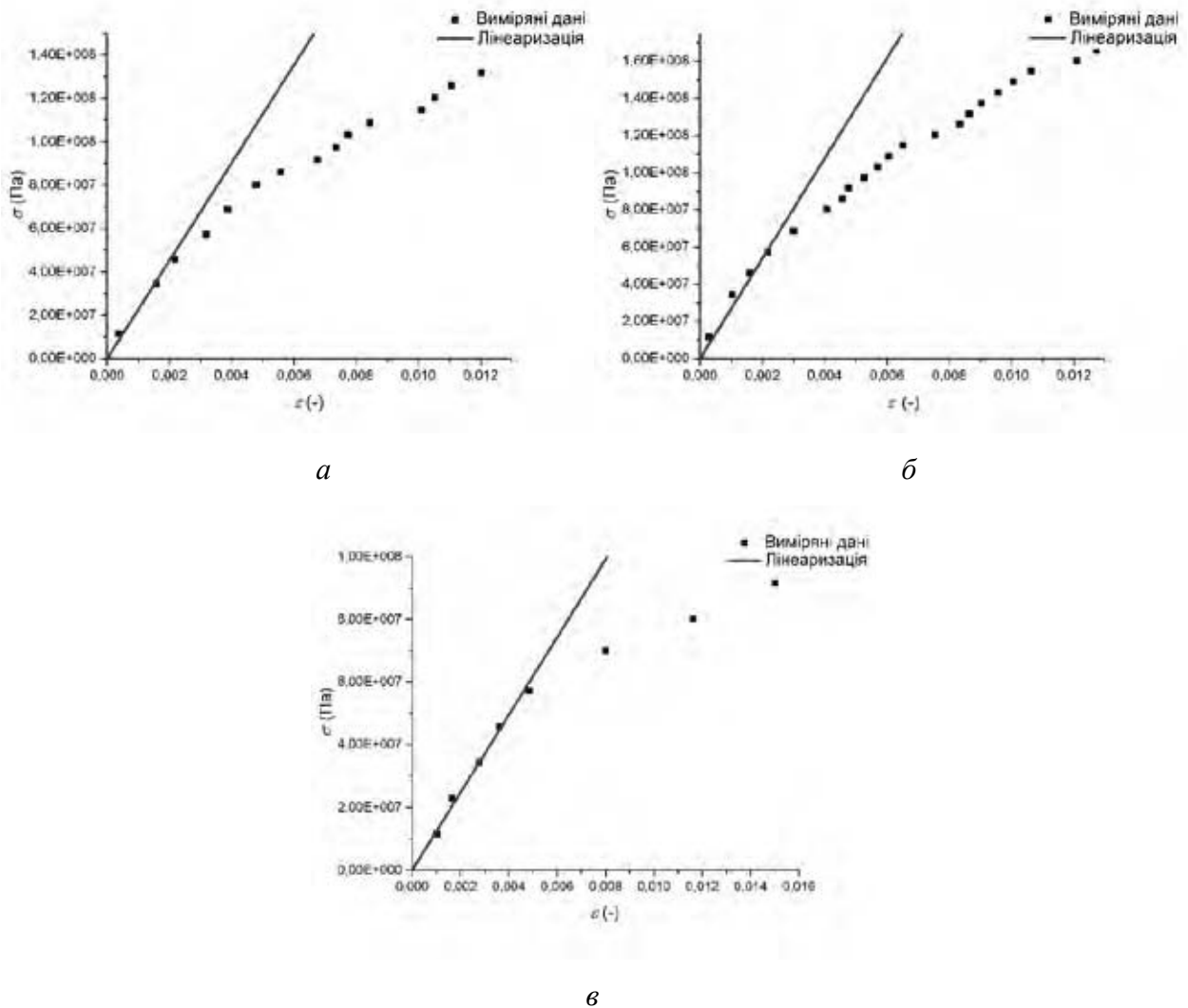


Рис. 8. Діаграми розтягування для кімнатної температури (залежність напружень, [Па] від деформацій, [-]): *а)* для зразків, вирізаних під кутом 0° ; *б)* для зразків, вирізаних під кутом 90° ; *в)* для зразків, вирізаних під кутом 45°

Юнга може також означати нерівність кількості шарів композита в двох напрямках або незбалансованість шарів [31].

У таблиці 3 наведені умовні границі текучості та напруження тимчасового опору розриву для зразків, вирізаних під різними кутами до напрямків армування, визначені за кімнатної температури.

Висновки. Проведене дослідження миттєвих фізико-механічних властивостей та міцності полімерного армованого композиційного матеріалу продемонструвало їхню ортотропію та чутли-

вість до збільшення навколишньої температури. Аналітичні співвідношення плоского напруженого стану ортотропного матеріалу дали змогу провести адекватну обробку результатів експериментів. Скінченно-елементний аналіз процесу навантаження експериментального зразка в захватах уточнив результати визначення технічних констант композиту. Визначені характеристики міцності склопластику в різних напрямках дають змогу застосовувати їх у практиці науково-дослідних та проектно-конструкторських робіт.

Список літератури:

1. Справочник по композиционным материалам: Любин Дж. (ред.). Москва: Машиностроение, 1988. Т. 1, 448 с.
2. Композиционные материалы. Справочник: Карпинос Д.М. (ред). Київ: Наукова думка, 1985. 588 с.
3. Кравчук А.С., Майборода В.П., Уржумцев Ю.С. Механика полимерных и композиционных материалов. Москва: Наука, 1985. 304 с.

4. Капитонов А.М., Редькин В.Е. Физико-механические свойства композиционных материалов. Упругие свойства. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 532 с.
5. Побердья Б.Е. Механика композиционных материалов. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 336 с.
6. Zak G., Haberer M., Park C.B., Benhabib B. Mechanical properties of short-fibre layered composites: prediction and experiment. *Rapid. Prototyp. J.* 2000. Vol. 6. P. 107–118. DOI: <https://doi.org/10.1108/13552540010323583>
7. Sun Z., Garboczi E.J., Shah S.P. Modeling the elastic properties of concrete composites: Experiment, differential effective medium theory, and numerical simulation. *Cem. Concr. Compos.* 2007. Vol. 29. P. 22–38.
8. Gang P., Jiacheng F., Yuandong L., Danyong W., Zhucai W. Analysis and discussion on impact shear experiment technique of composite laminate. *Proc. 2011 Int. Conf. Electron. Optoelectron.* 2011. P. 350–353. (DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEOE.2011.6013378>)
9. Durai Prabhakaran R.T., Andersen T.L., Bech J.I., Lilholt H. Investigation of mechanical properties of unidirectional steel fiber/polyester composites: Experiments and micromechanical predictions. *H. Polym Compos.* 2016. Vol. 37. P. 627–644. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.23220>
10. Saleh M.N., Lubineau G., Potluri P., Withers P.J., Soutis C. Micro-mechanics based damage mechanics for 3D orthogonal woven composites: Experiment and numerical modelling. *Compos. Struct.* 2016. Vol. 156. P. 115–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.021>
11. Lv L., Huang Y., Cui J., Qian Y., Ye F., Zhao Y. Bending properties of three-dimensional honeycomb sandwich structure composites: experiment and finite element method simulation. *Text. Res. J.* 2017. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1177/0040517517703602>
12. Movaghghar A., Lvov G.I. An energy model for fatigue life prediction of composite materials using continuum damage mechanics. *Appl. Mech. Mater.* 2011. Vol. 110–116. P. 1353–1360. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.1353>
13. Altenbach H., Fedorov V.A. Structural elastic and creep models of a UD composite in longitudinal shear. *Mech. Compos. Mater.* 2007. Vol. 43. P. 289–298. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11029-007-0028-9>
14. Andrianov I.V., Danishevs'kyi V.V., Guillet A., Pareige P. Effective properties and micro-mechanical response of filamentary composite wires under longitudinal shear. *Eur. J. Mech. – A/Solids.* 2005. Vol. 24. P. 195–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2005.01.006>
15. Reddy J.N. *Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis.* CRC Press, 2004. 831 p.
16. Warren G. *Fiberglass-reinforced polyester laminate for use in protective structures.* Springfield: National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, 1975. 27 p.
17. Ghilaim K.H. Woven factor for the mechanical properties of woven composite materials. *Journal of Engineering.* 2010. Vol. 16, No. 4. P. 6012–6027.
18. Budhoo Y. Temperature effect on Poisson's ratio of woven composites. *Mechanics of Time-Dependent Materials.* 2011. Vol. 3. P. 163–169. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0213-8_25
19. Мартыненко В.Г., Ульянов Ю.Н. Усовершенствование экспериментальной установки и процедура исследования анизотропных вязкоупругих свойств композиционного материала при повышенных температурах. *Проблемы машиностроения.* 2018. Т. 21, № 2. С. 3–11.
20. Мартыненко В.Г. Експериментальне дослідження анизотропних в'язкопружних властивостей композиційного матеріалу. Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: тези доповідей XIX міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 19–22 червня 2018 р. Київ: НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 30.
21. Sathishkumar T.P., Satheeshkumar S., Naveen J. Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. *J. Reinf. Plast. Compos.* 2014. Vol. 33, Is. 13. P. 1258–1275. DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>
22. Stickel J.M., Nagarajan M. Glass fiber-reinforced composites: from formulation to application. *Int. J. Appl. Glas. Sci.* 2012. Vol. 3. P. 122–136. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2041-1294.2012.00090.x>
23. Yamini S., Young R.J. The mechanical properties of epoxy resins. *J. Mater. Sci.* 1980. Vol. 15. P. 1823–1831. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00550603>
24. Jordan J.L., Foley J.R., Siviour C.R. Mechanical properties of Epon 826/DEA epoxy. *Mech. Time-Dependent Mater.* 2008. Vol. 12. P. 249–272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11043-008-9061-x>
25. Ou Y., Zhu D., Zhang H., Huang L., Yao Y., Li G., Bazin M. Mechanical characterization of the tensile properties of glass fiber and its reinforced polymer (GFRP) composite under varying strain rates and temperatures. *Polymers.* 2016. Vol. 8. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym8050196>
26. Dogan A., Atas C. Variation of the mechanical properties of E-glass/epoxy composites subjected to hygrothermal aging. *J. Compos. Mater.* 2016. Vol. 50. P. 637–646. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998315580451>
27. ASTM D618-13. Standard practice for conditioning plastics for testing. American Society for Testing and Materials, 2013. 4 p. DOI: <https://doi.org/10.1520/D0618>
28. ASTM D638-14. Standard test method for tensile properties of plastics. American Society for Testing and Materials, 2014. 17 p. DOI: <https://doi.org/10.1520/D0638-14>

29. ASTM D3039/D3039M-17. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. American Society for Testing and Materials, 2017. 13 p. DOI: https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-17

30. ANSYS® Free Student Product Downloads. URL: <https://www.ansys.com/academic/free-student-products> (дата звернення: 20.11.2018).

31. Agarwal B.D., Broutman L.J., Chandrashekhara K. Analysis and performance of fiber composites. Wiley, 2006. 562 p.

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОЦЕДУРА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРОЧНОСТИ АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИТА

В статье описано численно-экспериментальное исследование эффективных упругих характеристик и мгновенной прочности полимерного армированного композиционного материала с тканевой структурой армирования. Оно базируется на проведении экспериментов на растяжение образцов, вырезанных из композитной пластины, под разными углами с направлениями армирования и последующей аналитической обработкой результатов. Для уточнения полученных экспериментальных данных была построена конечно-элементная расчетная модель композиционного образца в захватах с ориентацией волокон под разными углами к приложенной нагрузке. Такой комплексный подход позволил получить при комнатной и повышенной температурах технические константы композиционного материала в плоскости, а также определить параметры его прочности при нагрузке в разных направлениях. Приведенное исследование расширяет известные данные о физико-механических свойствах полимерных армированных композиционных материалов и позволяет оценить особенности их анизотропии, вызванные направленной структурой армирования композита.

Ключевые слова: анизотропия, композиционный материал, экспериментальное исследование, мгновенная прочность, армирование.

A NUMERICAL-EXPERIMENTAL PROCEDURE FOR DETERMINING THE EFFECTIVE CHARACTERISTICS AND STRENGTH OF REINFORCED COMPOSITE

The paper presents a numerical-experimental study of effective elastic characteristics and instantaneous strength of polymer reinforced composite material with fabric reinforcement structure. It is based on a series of experiments on stretching of samples, cut from a composite plate at different angles to reinforcement directions, and further analytical processing of the results. In order to clarify the received experimental data, a finite-element computational model of the composite sample in grips with fiber orientation at different angles to the applied load was constructed. Such a comprehensive approach allowed to obtain in-plane technical constants of composite material at room and elevated temperatures, as well as to determine parameters of its strength when loading in different directions. The above study expands the known data on physical and mechanical properties of polymer reinforced composite materials and enables evaluating the features of their anisotropy caused by a directed reinforcement structure of the composite.

Key words: anisotropy, composite material, experimental study, instant strength, reinforcement.