

КАРВАЦЬКИЙ А. Я., д.т.н., проф., с.н.с., МІКУЛЬОНОК І. О., д.т.н., проф., с.н.с.,
БОРЩИК С. О., ст. викл., КАРАУЛОВА В. О., магістрант

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АРМОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ПАКУВАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Запропоновано підхід до математичного моделювання ефективних механічних властивостей нових композиційних полімерних матеріалів залежно від характеристик компонентів у них, а також об'ємного вмісту армувального волокна природного походження в цих матеріалах. Використання тари та упаковки із запропонованих матеріалів підвищує їхню міцність (або зменшує матеріалоємність) та забезпечує прискорене природне розкладання використаної тари та упаковки.

Ключові слова: *наповнений полімерний матеріал, волокна природного походження, упаковка, механічні властивості, моделювання.*

© Карвацький А. Я., Мікульонок І. О., Борщик С.О., Караулова В. О., 2018

Постановка проблеми. Полімери є одними із найбільш поширених матеріалів, що використовуються в багатьох галузях промисловості й побуті. Ці матеріали також широко застосовуються в пакувальній індустрії (щорічно у світі пакування з полімерних матеріалів виготовляють на суму понад 200 млрд \$ [1]). Завдяки унікальним властивостям полімери й пластмаси часто вони стають найбільш привабливими для зберігання найрізноманітнішої продукції. Основними перевагами полімерних пакувальних матеріалів є технологічні, експлуатаційні та економічні [2–4]. Проте застосування полімерів має й певні недоліки, зокрема невисокі порівняно з металами міцність і жорсткість, а також достатньо тривалий час розкладання в природних умовах [5].

Одним з можливих шляхів більш широкого та цілеспрямованого застосування полімерів у пакувальній індустрії з мінімізацією зазначених недоліків може стати використання полімерів, армованих природними волокнами. Тому розробка складу нових матеріалів з прогнозованими механічними властивостями є актуальним завданням як для виготовлення тари та упаковки, так і іншої продукції.

Аналіз попередніх досліджень. Армований волоконний полімерний композиційний матеріал складається з полімерної матриці з розподіленими в ній волокнами. Натепер достатньо широко застосовують такі високоміцні волокна як арамідні (зокрема келар), скляні та вуглецеві. Такі волокна варто використовувати у складі високоміцних композиційних матеріалів тривалого застосування. Проте для матеріалів нетривалого застосування, передусім для виготовлення тари та упаковки, такі волокна малопридатні. Тому дослідники все частіше аналізують можливість застосування в композитах натуральних волокон, які характеризуються низькими вартістю й густиною, достатньою міцністю, безпекою для довкілля та поновлюваністю. При цьому найбільш поширеними у світовій практиці є передусім такі природні волокна як бамбук, кокос, абака, банан, джут, кенаф, сизаль, пальма, бавовна, льон, конопля [6–9].

Найбільш ґрунтовною з порушеного питання є праця [8], у якій здійснено прогноз впливу низки натуральних волокон залежно від їх об'ємної частки в композиті на властивості армованої вінілової ефірної смоли. Прогнозування виконано за допомогою аналітичних співвідношень [10] та моделювання за допомогою програмного забезпечення ANSYS Mechanical APDL [11]. При цьому визначено такі механічні властивості композитів як міцність на розрив, модуль пружності, жорсткість та ударна в'язкість, які однозначно показали перспективність використання полімерних композитів із застосуванням натуральних волокон.

Експериментальні дослідження величин механічних властивостей передбачають виготовлення дослідних зразків полімерних композитів, а також наявність відповідного експериментального обладнання, що обумовлює значні матеріальні витрати. Істотно заощадити матеріальні, людські ресурси і час можна, якщо для визначення механічних властивостей композитів, особливо на етапі їх розробки, скористатися аналітичними залежностями та числовим моделюванням.

Невирішеною частиною наукової проблеми створення полімерних композитів із застосуванням натуральних волокон рослинного походження є відсутність математичних моделей задач напружено-деформованого стану (НДС) під час випробування зразків армованих полімерів у наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ (характерними представниками яких є полімерні композити із застосуванням натуральних волокон), а також числової методики та програмного забезпечення (ПЗ) для розв'язання задач НДС на базі методу скінченних елементів (МСЕ) в наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ.

Метою статті є дослідження ефективних механічних властивостей нових композиційних матеріалів з полімерною матрицею та розподілених у ній армувальних волокон натуральних волокон рослинного походження залежно від матеріалів компонентів матеріалів та об'ємного вмісту в них наповнювача.

Виклад основного матеріалу

Математичне моделювання напружено-деформованого стану армованих полімерів

Постановка задачі для ізотропного середовища

Система стаціонарних диференціальних рівнянь задачі напружено-деформованого стану під час випробування армованого полімеру з ізотропними властивостями містить рівняння руху й рівноваги, геометричне рівняння – тензор малих деформацій та фізичне рівняння – узагальнений закон Гука [12]:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}} + \rho \mathbf{b} = 0; \\ \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2}(\mathbf{u}\nabla + \nabla\mathbf{u}); \\ \hat{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{E_{\text{comp}}}{1 + \nu_{\text{comp}}} \left(\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} + \frac{\nu_{\text{comp}}}{1 - 2\nu_{\text{comp}}} \hat{\mathbf{I}} \text{tr}(\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}) \right), \end{cases} \quad (2.1)$$

де ∇ – оператор Гамільтона, м^{-1} ; (\cdot) – оператор скалярного добутку тензорів; $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ – симетричний тензор напруження другого рангу, Па; ρ – густина, $\text{кг}/\text{м}^3$; \mathbf{b} – вектор масових сил, наприклад, гравітаційних, $\text{Н}/\text{кг}$; $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ – симетричний тензор другого рангу пружних деформацій; \mathbf{u} – вектор переміщень, м; E_{comp} – модуль пружності композитного полімеру з ізотропними властивостями, Па; ν_{comp} – коефіцієнт Пуассона композитного полімеру з ізотропними властивостями; $\hat{\mathbf{I}}$ – одиничний тензор другого рангу; $\text{tr}(\cdot)$ – оператор сліду тензора.

Граничні умови для (2.1):

– переміщення або защемлення (має бути задано хоча б в одній точці на поверхні тіла)

$$\mathbf{u}|_{S_u} = 0, \quad (2.2)$$

де S_u – площа поверхні (або точка поверхні), на якій задано переміщення, м^2 ;

– вектор зовнішньої сили

$$(\hat{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \mathbf{n})|_{S_F} = \mathbf{F}, \quad (2.3)$$

де \mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі до поверхні тіла; \mathbf{F} – вектор зовнішньої сили, Н; S_F – площа поверхні, до якої прикладено силове навантаження, м^2 ;

– зовнішній тиск

$$(\hat{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}|_{S_p} = p \quad \text{або} \quad (\sigma_{ij} n_j) n_i|_{S_p} = p, \quad (2.4)$$

де p – зовнішній тиск, який задано на поверхні S_p , Па.

Постановка задачі для ортотропного середовища

Система стаціонарних диференціальних рівнянь задачі напружено-деформованого стану під час випробування армованого полімеру з анізотропними (зокрема ортотропними) властивостями містить рівняння руху й рівноваги, геометричне рівняння – тензор малих деформацій та фізичне рівняння – закон Гука:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}} + \rho \mathbf{b} = 0; \\ \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2}(\mathbf{u}\nabla + \nabla\mathbf{u}); \\ \hat{\boldsymbol{\sigma}} = \hat{\mathbf{C}} : \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}, \end{cases} \quad (2.5)$$

де $\hat{\mathbf{C}}$ – тензор четвертого рангу пружних констант армованого полімеру з ортотропними властивостями, Па; (\cdot) – оператор подвійного скалярного добутку тензорів.

Граничні умови для (2.5) у свою чергу включають умови (2.2)–(2.4).

У загальному випадку закон Гука для анізотропних (ортотропних) матеріалів, який встановлює зв'язок між тензором напруження другого рангу σ_{ij} і тензором деформацій другого рангу ε_{kl} у тензорній формі запису, має вигляд [13]

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (2.6)$$

де C_{ijkl} , $i, j, k, l = 1, 2, 3$ – декартовий тензор четвертого рангу пружних властивостей матеріалу, Па.

Із врахуванням симетрії тензорів σ_{ij} і ε_{kl} та переходу на векторне (одноіндексне) представлення тензорів $\sigma_i, i = \overline{1,6}$, $\varepsilon_j, j = \overline{1,6}$ закон Гука (2.6) набуває вигляду [12]

$$\sigma_i = D_{ij} \varepsilon_j, \quad ij = \overline{1,6}, \quad (2.7)$$

де D_{ij} – декартовий тензор другого рангу пружних властивостей матеріалу, який можна записати у матричному вигляді $[D]$, Па.

Зазвичай для спрощення форми запису D_{ij} в явному вигляді замість $[D]$ використовують обернену матрицю $[D]^{-1}$, яка називається матрицею піддатливості матеріалу і для ортотропного матеріалу має вигляд [10, 14]

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{12})}{E_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{23})}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{13})}{E_3} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Використовуючи (2.8) для визначення матриці жорсткості $[D]$ нескладно скористатися процедурою обернення матриці вигляду

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{12})}{E_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{23})}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{13})}{E_3} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.9)$$

Алгоритми розв'язання задач

Ізотропне наближення

Алгоритм розв'язання задачі для композиту з ізотропними властивостями може бути таким [15]:

1. Визначаємо ефективні механічні властивості композиту (полімер, армований волокном) за такими формулами [8, 10, 14]:

– границя міцності композиту

$$[\sigma_{TS}]_{\text{comp}} = [\sigma_{TS}]_f V_f + [\sigma_{TS}]_m V_m ; \quad (2.10)$$

– модуль пружності композиту

$$E_{\text{comp}} = E_f V_f + E_m V_m ; \quad (2.11)$$

– коефіцієнт Пуассона

$$\nu_{\text{comp}} = \nu_f V_f + \nu_m V_m ; \quad (2.12)$$

– ударна жорсткість композиту

$$U_T = [\sigma_{TS}]_{\text{comp}} \varepsilon_{\text{comp}}^T ; \quad (2.13)$$

– ударна в'язкість композиту

$$G_{IS} = \frac{U_T V}{A} , \quad (2.14)$$

де $[\sigma_{TS}]_{\text{comp}}$ – границя міцності композиту, Па; $[\sigma_{TS}]_f$, $[\sigma_{TS}]_m$ – границя міцності волокна і матриці (полімеру), відповідно, Па; V_f , V_m – об'ємні частки волокна і матриці, відповідно; $\varepsilon_{\text{comp}}^T = \frac{[\sigma_{TS}]_{\text{comp}}}{E_{\text{comp}}}$ – гранично допустима деформація композиту; A – площа поперечного перерізу робочої зони

експериментального зразка композиту (див. рисунок 1.6), m^2 ; V – об'єм робочої зони експериментального зразка композиту, m^3 .

2. Визначаємо силове навантаження F (Н) для розтягу зразка з композиційного матеріалу з використанням формул:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \text{ звідки визначаємо } F = [\sigma_{TS}]_{\text{comp}} A, \quad (2.15)$$

де $\sigma = [\sigma_{TS}]_{\text{comp}}$ за формулою (2.10), Па; A – площа поперечного перерізу робочої зони експериментального зразка композиту (див. рисунок 1.6), m^2 .

3. Виконуємо розрахунки НДС зразка композиту з властивостями (2.10)–(2.12) і навантаженням (2.15). Знаходимо поля еквівалентного напруження σ_{eqM} і деформації ε_{eqM} за Мізесом:

$$\sigma_{\text{eqM}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)}; \quad (2.16)$$

$$\varepsilon_{\text{eqM}} = \frac{1}{\sqrt{2}(1 + \nu_{\text{comp}})} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{13}^2 + \varepsilon_{23}^2)}. \quad (2.17)$$

4. За даними розрахунків НДС для випадку одновісного силового навантаження експериментального зразка полімерного композиту визначаємо його ефективні механічні властивості за формулами, які використовуються під час експериментальних досліджень:

– модуль пружності композиту

$$E_{\text{comp}}^p = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}};$$

– коефіцієнт Пуассона

$$\nu_{\text{comp}}^p = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}};$$

– ударна жорсткість композиту

$$U_T^p = \sigma_{11} \varepsilon_{11} \text{ або } U_T^p = \sigma_{\text{eqM}} \varepsilon_{\text{eqM}};$$

– ударна в'язкість композиту

$$G_{TS}^p = \frac{U_T^p V}{A},$$

де σ_{11} , ε_{11} , ε_{22} – визначаються за результатами розрахунків НДС у перерізі по середині робочої зони зразка композиту.

5. Будуємо графіки $[\sigma_{TS}]_{\text{comp}}$, E_{comp} , ν_{comp} , U_T і G_{TS} за різних значень V_f , розрахованими за аналітичними співвідношеннями (2.10)–(2.14) та виконуємо зіставлення з відповідними механічними властивостями композиту ($E_{\text{comp}}^p, \nu_{\text{comp}}^p, U_T^p, G_{TS}^p$), що отримані з використанням розрахунків НДС для випадку одновісного силового навантаження експериментального зразка.

Ортотропне наближення

Припустимо, що армувальні волокна в композитному полімері спрямовані вздовж осі OX . Кожен із компонентів полімерного композита – полімер і волокно проявляють властивості ізотропного пружного матеріалу.

Тоді алгоритм розв'язання задачі під час випробування армованого полімеру може бути таким:

1. Визначаємо ефективні механічні властивості композиту (полімер армований волокном) в ортотропному наближенні за такими формулами [10, 14]:

компоненти вектора границі міцності композиту

$$\begin{cases} [\sigma_{TS}]_d = [\sigma_{TS}]_f V_f + [\sigma_{TS}]_m V_m; \\ \frac{1}{[\sigma_{TS}]_2} = \frac{V_f}{[\sigma_{TS}]_f} + \frac{V_m}{[\sigma_{TS}]_m} \rightarrow [\sigma_{TS}]_2 = [\sigma_{TS}]_3 = \frac{[\sigma_{TS}]_f [\sigma_{TS}]_m}{[\sigma_{TS}]_f V_m + [\sigma_{TS}]_m V_f}; \end{cases} \quad (2.18)$$

– компоненти вектора модуля пружності композиту

$$\begin{cases} E_1 = E_f V_f + E_m V_m; \\ \frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \rightarrow E_2 = E_3 = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f}; \end{cases} \quad (2.19)$$

– компоненти тензора коефіцієнтів Пуассона композиту

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{12} = v_{13} = v_f V_f + v_m V_m; \\ \frac{v_{12}}{E_1} = \frac{v_{21}}{E_2} \rightarrow v_{21} = v_{31} = \frac{E_2 v_{12}}{E_1}; \\ \frac{1}{v_{23}} = \frac{V_f}{v_f} + \frac{V_m}{v_m} \rightarrow v_{23} = v_{32} = \frac{v_f v_m}{v_f V_m + v_m V_f}, \end{array} \right. \quad (2.20)$$

– ударна жорсткість композиту в напрямку осі OX (1)

$$U_T = [\sigma_{TS}]_f \varepsilon_1^T; \quad (2.21)$$

– ударна в'язкість композиту в напрямку осі OX (1)

$$G_{IS} = \frac{U_T V}{A}, \quad (2.22)$$

де $[\sigma_{TS}]_i, i=1,2,3$ – компоненти вектора границі міцності ортотропного композиту, Па; $[\sigma_{TS}]_f, [\sigma_{TS}]_m$ – границя міцності волокна і матриці (полімеру), відповідно, Па; $E_i, i=1,2,3$ – компоненти вектора модуля пружності ортотропного композиту, Па; E_f, E_m – модуль пружності волокна і матриці, відповідно, Па; V_f, V_m – об'ємні частки волокна і матриці, відповідно; $\varepsilon_1^T = \frac{[\sigma_{TS}]_f}{E_1}$ – гранично допустима деформація композиту; A – площа поперечного перерізу робочої зони експериментального зразка композиту (див. рисунок 1.6), м²; V – об'єм робочої зони експериментального зразка композиту, м³.

2. Визначаємо силове навантаження F (Н) для розтягу в напрямку осі OX зразка композиційного матеріалу з використанням формул:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \text{ звідки } F = [\sigma_{TS}]_f A, \quad (2.23)$$

де $\sigma = [\sigma_{TS}]_f$ за формулою (2.18), Па; A – площа поперечного перерізу зразка композиту в зоні максимального напруження, м².

3. Виконуємо розрахунки НДС зразка композиту з властивостями (2.18)–(2.20) і навантаженням (2.23).

Знаходимо поля еквівалентного напруження σ_{eqM} і деформації ε_{eqM} за Мізесом:

$$\sigma_{eqM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)}; \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_{eqM} = \frac{1}{\sqrt{2}(1+\bar{\nu})} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{13}^2 + \varepsilon_{23}^2)}, \quad (2.25)$$

де $\frac{1}{\bar{\nu}} = \frac{1}{v_{12}} + \frac{1}{v_{21}}$ – ефективний коефіцієнт Пуассона.

4. За даними розрахунків НДС для випадку одновісного силового навантаження експериментального зразка полімерного композиту визначаємо його ефективні механічні властивості в напрямку осі OX за формулами, які використовуються під час експериментальних досліджень:

$$E_1^p = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} \text{ – модуль пружності композиту в напрямку осі 1;}$$

$$v_{12}^p = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}}, \quad v_{13}^p = -\frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{11}} \text{ – коефіцієнти Пуассона;}$$

$$U_T^p = \sigma_{11} \varepsilon_{11} \text{ або } U_T^p = \sigma_{eqM} \varepsilon_{eqM} \text{ – ударна жорсткість композиту;}$$

$$G_{IS}^p = \frac{U_T^p V}{A} \text{ – ударна в'язкість композиту,}$$

де $\sigma_{11}, \varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$ – визначаються за результатами розрахунків НДС у перерізі по середині робочої зони зразка композиту.

5. Будуємо графіки $[\sigma_{TS}]_i, i=\overline{1,3}, E_i, i=\overline{1,3}, v_{i,j}, i, j=\overline{1,3}, i \neq j, U_T$ і G_{IS} за різних значень V_f , розрахованими за аналітичними співвідношеннями (2.18)–(2.22) та виконуємо зіставлення з відповідними механічними властивостями композиту для напрямку осі 1 ($E_1^p, v_{12}^p, v_{13}^p, U_T^p, G_{IS}^p$), що отримані з використанням розрахунків НДС для випадку одновісного силового навантаження експериментального зразка.

Для визначення решти ефективних механічних властивостей ортотропного композиту необхідно виконати розрахунки НДС зразка орієнтованого за напрямком осі 2 з силовим навантаженням $F = [\sigma_{TS}]_2 A$, за результатами яких отримати відповідні значення $(E_2^p, E_3^p, \nu_{21}^p, \nu_{23}^p, \nu_{31}^p, U_T^p, G_{TS}^p)$.

На базі методу скінченних елементів авторами було розроблено числову методику розв'язання задач НДС у наближеннях ізотропного та ортотропного середовищ. Також було розроблено відповідне програмне забезпечення та виконано його верифікацію (досліджено точність і збіжність числових розв'язків).

Авторами було визначено ефективні ортотропні механічні властивості композитних полімерів (поліетилену високого й низького тиску, поліпропілену й полістиролу), армованих природними волокнами (кокос, бавовна, банан, конопля і льон). При цьому встановлено, що найвищі значення механічних властивостей полімерних композитів мають в разі використання волокна банану, льону та коноплі, зокрема, модуль пружності за напрямком волокна перевищує 8 ГПа, а границя міцності становить понад 290 МПа, що близько до границі міцності сталі Ст3пс ДСТУ 2651:2005/ГОСТ 380–2005 (330 МПа).

Також було показано, що в разі наявності достатньої адгезії між фазами полімерного композиту, контакт між ними наближається до абсолютного (похибка застосування аналітичних співвідношень для визначення ефективних механічних властивостей композиту в цьому разі не перевищує 2,1 %, що є достатнім для виконання інженерних розрахунків на міцність).

Як приклад застосування на практиці результатів досліджень було розроблено числову модель НДС полімерної пляшки для випробування під надлишковим тиском. Встановлено, що в разі використання пропонованих полімерних композитів запас міцності виготовлених з них пляшок перевищує 15, що дає змогу зменшити товщину стінки пляшки з 3 мм до 1 мм (при цьому запас міцності перевищатиме 6).

Висновки. Головним результатом проведених досліджень є вирішення актуальної науково-технічної задачі з дослідження ефективних механічних властивостей нових полімерних композитів залежно від матеріалів матриці та армувального волокна природного походження, а також його об'ємної частки в композиті, що забезпечує заощадження матеріальних ресурсів та зменшення техногенного впливу на довкілля.

У результаті проведення досліджень:

- обґрунтовано застосування моделі ортотропного середовища для дослідження напружено-деформованого стану зразків армованих полімерних матеріалів;
- розроблено алгоритм визначення ефективних значень механічних характеристик армованих полімерів за допомогою розв'язання задач НДС для композитів з ортотропними властивостями;
- виконано верифікацію числової моделі НДС зразка композитного матеріалу під час випробування за стандартом ASTM D638 за даними числових експериментів, отриманих за допомогою програмного забезпечення ANSYS Mechanical APDL. При цьому різниця між результатами розрахунків не перевищує 3,8 %;
- проведено теоретичні дослідження залежності ефективних значень основних механічних властивостей (модуля пружності, коефіцієнта Пуассона, границі міцності, жорсткості та ударної в'язкості) перспективних композиційних матеріалів, що піддаються деструкції в природних умовах, залежно від матеріалів матриці й волокна, а також його об'ємної частки в композиті;
- на базі МСЕ розроблено числову методику та ПЗ у середовищі Mathcad для розв'язання задач НДС для випадків ізотропного та ортотропного середовищ.

Перспективи подальших досліджень. У подальшому планується виконати відповідні дослідження для полімерів та натуральних волокон більш широкого класу. Це дасть змогу надати рекомендації щодо застосування полімерних композиційних матеріалів на основі компонентів, максимально притаманних вітчизняним умовам, що істотно знизить їхню собівартість.

Список використаної літератури

1. *Кривошей В. Н.* Упаковка в украинских реалиях. Львов : Украинская академия печати, 2017. 288 с.
2. *Полимерная тара и упаковка* / под ред. С. В. Генеля. Москва : Химия, 1980. 272 с.
3. *Фізико-хімічні властивості пакувальних матеріалів* / В. С. Костюк, А. І. Соколенко, К. В. Васильківський та ін. / за ред. А. І. Соколенка. Київ : Кондор-Видавництво, 2013. 402 с.
4. *Микульнюк И. О.* Классификация термопластических композиционных материалов и их наполнителей // Пластические массы. 2012. № 9. С. 29–38.
5. *Микульнюк И. О.* Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 324 с.
6. *Groover M. P.* Fundamental of Modern Manufacturing. New York : John Wiley & Sons, Hoboken, 2010. 200 p.
7. *Chung D. D. L.* Composite Materials: Science and Applications. London : Springer-Verlag London Limited, 2010. 349 p.
8. *Theoretical Prediction on the Mechanical Behavior of Natural Fiber Reinforced Vinyl Ester Composites* / S. Ramakrishnan, K. Krishnamurthy, M. M. Prasath et al. // Applied Science and Advanced Materials International. 2015. Vol. 1, N 3. P. 85–92.
9. *Наполнители для полимерных композиционных материалов* : справ. пособие / под ред. Г. С. Каца, Дж. В. Милевски. Москва : Химия, 1981. 736 с.
10. *Thompson M., Thompson J.* ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis. 1st ed. Oxford : Butterworth-Heinemann. 2017. 462 p.
11. *ASTM D638.* Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. URL: <https://www.astm.org/Standards/D638.htm> (last access: 04.12.2017).

12. *Карвацький А. Я.* Механіка суцільних середовищ. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. 292 с.
13. *Сахаров О. С., Карвацький А. Я.* Механіка суцільних середовищ в інженерних розрахунках. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 233 с.
14. *Jones R. M.* Mechanics of composite materials: 2nd ed. Philadelphia : Taylor & Francis, 1999. 519 p.
15. Числова модель напружено-деформованого стану для дослідження міцності армованих полімерів / В. О. Караулова, А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонок // VI Всеукр. наук.-практ. конф. «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки» (14–15.12.2017). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С. 59–61.

Надійшла до редакції 10.05.2018