

Армовані полімерні матеріали для упаковки

А.Я. Карвацький, д.т.н., І.О. Мікульюнок, д.т.н., В.О. Караулова, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ

Полімери є одними із найпоширеніших матеріалів, що використовуються в пакувальній індустрії. Завдяки своїм унікальним властивостям у багатьох випадках вони стають якщо не незамінними, то найбільш доцільними для зберігання численних видів продукції різноманітного призначення. Основними перевагами полімерних пакувальних матеріалів є технічні, технологічні, економічні та естетичні [1–3]. Проте застосування полімерів для виготовлення тари та упаковки має і певні недоліки, передусім відносно низькі, порівняно з металами, міцнісні характеристики та тривалий час розкладання в природних умовах під дією чинників навколишнього середовища [4, 5].

Одним з можливих шляхів вирішення цієї подвійної проблеми може бути використання полімерних матеріалів, армованих природними волокнами, тому розробка складу нових матеріалів для виготовлення тари та упаковки з прогнозованими механічними властивостями є достатньо актуальним завданням.

Армований волокном полімерний композиційний матеріал складається з полімерної матриці та розподілених у ній певним чином волокон. До широко використовуваних високоміцних волокон можна віднести кевлар, скло та вуглець. Проте останнім часом завдяки беззаперечним перевагам дослідники все частіше звертають увагу на натуральні волокна, які характеризуються низькими вартістю й густиною, достатньою міцністю, низькою твердістю (відсутністю абразивності), безпекою для довкілля та поновлюваністю [6, 7].

До найбільш розповсюджених у світовій практиці природних волокон належать абака, бамбук, банан, кокос, бавовна, льон, конопля, джут, кенаф, сизаль, пальма та деякі інші [8, 9].

У праці [8] зроблено прогнозування впливу різних класів натуральних волокон за різного значення їх об'ємної частки (10, 20, 30 та 40%) на властивості армованої вінілової ефірної смоли. При цьому аналіз виконано за допомогою аналітичних співвідношень [10] і моделювання за допомогою програмного продукту ANSYS Mechanical APDL [11]. Також визначено такі механічні властивості композитів, як міцність на розрив, модуль пружності, жорсткість та ударна в'язкість, а отримані значення порівняно зі значеннями для чистої полімерної матриці.

Зазвичай механічні властивості полімерів досліджуються експериментально згідно з ASTM D638 [12]. Під час цих одновісних випробувань визначаються, окрім технічних (модуля пружності E і коефіцієнта Пуассона ν), такі важливі механічні властивості як σ_{ult} – міцність на розрив (Па); U_T – жорсткість (Дж/м³) та G_c – ударна в'язкість (Дж/м²).

Міцність на розрив матеріалу зразка визначається за даними експерименту

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A},$$

де F_{ult} – розривне зусилля, Н; A – площа поперечного перерізу стандартного зразка в робочій зоні, м².

Жорсткість матеріалу зразка визначається за формулою

$$U_T = \sigma_1 \varepsilon_1,$$

де $\sigma_1 = \sigma_{ult}$ – напруження під час одновісного випробування, Па; ε_1 – деформація під час одновісного випробування.

Ударна в'язкість матеріалу зразка визначається за формулою

$$G_c = \frac{U_T V}{A},$$

де V – об'єм робочої зони зразка, м³. Для проведення експериментальних досліджень необхідно мати як дослідні зразки полімерних композитів, так і відповідне експериментальне обладнання, що обумовлює певні матеріальні витрати. Пев-

ною мірою цього можна уникнути, якщо для визначення механічних властивостей композитів, особливо на етапі їх розробки, скористатися аналітичними співвідношеннями та числовим моделюванням.

У праці [8] механічні властивості для полімерного композиту, армованого безперервно односпрямованими волокнами, спочатку визначалися за аналітичними залежностями. При цьому теоретичні дослідження показали, що включення більш високої частки фракції клітковини в матрицю із вініловим ефіром приводить до поліпшення механічних властивостей





Таблиця 1.
Механічні властивості полімерів

| Полімер | ρ , кг/м ³ | $[\sigma_{TS}]$, МПа | E , ГПа | ν |
|---------|----------------------------|-----------------------|------------|----------|
| ПЕВТ | 910–930 | 8–13 | 0,118–0,35 | 0,4–0,5 |
| ПЕНТ | 940–970 | 10–19 | 0,61–1,6 | 0,15–0,2 |
| ПП | 915 | 25–40 | 1,7 | 0,42 |
| ПС | 1060 | 40–50 | 3,2 | 0,35 |

Таблиця 2.
Механічні властивості волокна природного походження [8]

| Волокно | ρ , кг/м ³ | $[\sigma_{TS}]$, МПа | E , ГПа | ν |
|-----------|----------------------------|-----------------------|-----------|-------|
| Кокосове | 1250–1500 | 106–270 | 3–6 | 0,3 |
| Бавовняне | 1500–1600 | 287–597 | 5,5–12,6 | 0,33 |
| Бананове | 1300–1350 | 529–914 | 7,7–32 | 0,3 |
| Конопляне | 1400–1500 | 580–1110 | 3–90 | 0,221 |
| Льняне | 1400–1500 | 343–1035 | 27–80 | 0,21 |

композиту порівняно з чистим матеріалом. Включення волокон абаки, коноплі та банана за різних навантажень у поліефірні полімери значно підвищує міцність на стискання відповідних композитів. Якщо використовувати аналітичні залежності, то 40% (за об.) частка волокна абаки в смолі сприяє підвищенню міцності під час розтягу до 436 МПа (що на 497% більше, ніж для чистої матриці). За результатами симуляції ANSYS для цієї ж композиції значення міцності на розрив становить 468 МПа (що на 541% більше, ніж для чистої матриці). Додавання 40% (за об.) бананового волокна в матрицю вінілового ефіру показує максимальну жорсткість 1208,19 Дж/м³ та ударну в'язкість 60,41 Дж/м² з використанням аналітичних залежностей та симуляції ANSYS, яка демонструє максимальну жорсткість 1270,39 Дж/м³ та ударну в'язкість 63,52 Дж/м².

У результаті аналізу сучасного стану питання розробки та дослідження механічних властивостей полімерних матеріалів, армованих природними волокнами, встановлено, що полімерні композиційні матеріали, армовані волокнами різної природи, відносяться до класу ортотропних матеріалів.

Також встановлено, що для армування волокнами підходять такі полімери, як поліетилен високого (ПЕВТ) та низького (ПЕНТ) тиску, поліпропілен (ПП), полістирол (ПС) тощо, а як армувальні волокна можна взяти волокна кокосу, бавовни, банану, коноплі й льону.

Механічні властивості зазначених полімерів і волокон рослин наведено в табл. 1 і 2.

З використанням обраних полімерів, волокон та аналітичних співвідношень для ортотропного наближення авторами були визначені ефективні механічні властивості відповідних композиційних матеріалів. На підставі механічних властивостей цих композитів, що включають компоненти вектора границі міцності і модуля пружності та компоненти тензора коефіцієнтів Пуассона та відповідних аналітичних залежностей, було визначено такі фізичні властивості композитів, як жорсткість і ударна в'язкість для напрямку максимального значення границі міцності (OX). Результати цих розрахунків наведено на рис. 1 і 2.

Ефективні ортотропні механічні властивості композиційних матеріалів також були визначені за допомогою числового аналізу напружено-деформованої системи (НДС) зразків композитів згідно зі стандартом ASTM D638 з використанням розроблених авторами алгоритму та програмного

забезпечення [13]. Аналіз отриманих результатів показав задовільну збіжність з даними, отриманими за допомогою аналітичних співвідношень (похибка числових розрахунків не перевищує 3%).

Проведені дослідження показали, що:

- найвищі значення механічних властивостей спостерігаються в разі використання волокна банану, льону та коноплі, зокрема модуль пружності в напрямку волокон становить понад 8 ГПа, а границя міцності – більше ніж 290 МПа, що перевищує міцність сталі Ст 3 (230 МПа);
- жорсткість та ударна в'язкість найвищі в разі застосування армувального волокна з бавовни і банана та становлять понад 8,9 МДж/м² і 0,5 МДж/м², відповідно.

Відомо, що найбільш суттєвим припущенням (гіпотезою) під час дослідження механічних властивостей композитів є те, що деформації у напрямку волокна односпрямованого волокно-армованого композитного матеріалу однакові як у волокнах, так і в матриці [6]. Але на практиці таке



Рис. 1. Залежність ударної жорсткості (U_v , МДж/м³) полімерних композиційних матеріалів від типу матриці і волокна з об'ємною часткою 40%

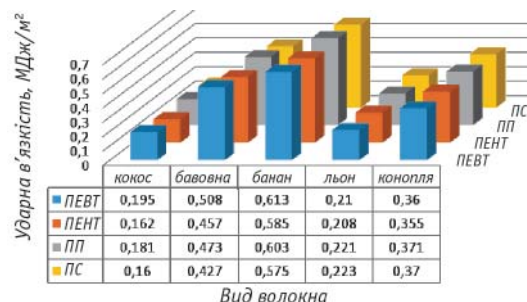


Рис. 2. Залежність ударної в'язкості (G_v , МДж/м²) полімерних композиційних матеріалів від типу матриці і волокна з об'ємною часткою 40%



Рис. 3.
Твердотільна модель пляшки з полімерного матеріалу

припущення або взагалі не виконуються, або виконуються частково. Тому доцільно виконати відповідні числові оцінки роботоздатності висунутої гіпотези, тобто визначити, коли можна користуватися аналітичними залежностями для обчислення ефективних механічних властивостей композитів в ортотропному наближенні.

Для виконання цих досліджень авторами було розглянуто два граничних випадки: абсолютний контакт між волокном і матрицею, а також повна відсутність контактної взаємодії між волокном і матрицею (тобто відсутня адгезія між фазами композиту, що спричиняє відносно проковзування матриці й волокна).

Для проведення відповідного дослідження було створено найпростішу модель композитного полімеру, яка складається з одного волокна циліндричної форми, оточеного полімерною матрицею. При цьому механічні властивості матриці та волокна відповідають не ефективним, а дійсним значенням цих матеріалів в ізотропному наближенні.

Реалізація умов абсолютного контакту та його відсутності відбувається в процесі побудови числової моделі.

Подальша побудова числової моделі виконана з використанням програмних продуктів ANSYS Mechanical APDL [11] за допомогою розробки відповідного макросу, написаного на мові програмування APDL. За граничні умови брали такі: з одного торця композиту задавалося закріплення, а з протилежного — тиск з від'ємним знаком (тобто до волокна і матриці прикладено однакове силоне навантаження).

Аналіз отриманих даних показав, що:

- у разі наявності достатньої адгезії між фазами полімерного композиту контакт між ними наближається до абсолютного; при цьому похибка застосування аналітичних співвідношень для визначення ефективних механічних властивостей композиту не перевищує 2,1%, що є цілком достатнім для виконання інженерних розрахунків на міцність;
- у разі відсутності достатньої адгезії між фазами полімерного композиту силова взаємодія між ними наближається до нуля; при цьому похибка застосування аналітичних співвідношень для визначення ефективних механічних властивостей композиту перевищує 90% для модуля пружності, що свідчить про неможливість застосування адитивних співвідношень для визначення механічних властивостей композитів у разі недостатньої адгезії між його фазами (полімером і волокном).

Для виконання числового аналізу міцності виробів з армованого полімеру було вибрано тару у вигляді пляшки, навантаженої внутрішнім надлишковим тиском (при цьому пляшки із ПЕТФ випробовують під надлишковим тиском до 20 бар, а скляні — до 70 бар).

На першому етапі побудови числової моделі тари була розроблена твердо-

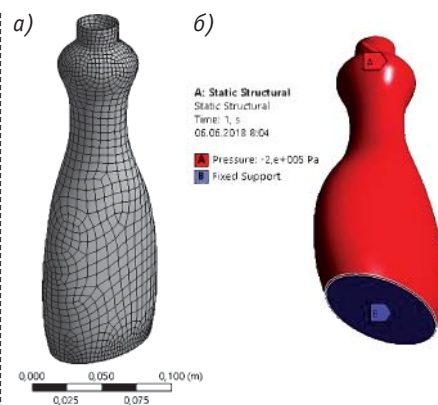


Рис. 4. Дискретизація числової моделі пляшки (а) та схема силового навантаження (б): кількість вузлів – 2342; кількість елементів – 2341; надлишковий тиск 2 бар; товщина стінки пляшки 3 мм

тільна модель пляшки для зберігання мийних засобів з використанням CAD-системи SolidWorks [14, 15] (рис. 3).

Для побудови числової моделі НДС пляшки використано програмний продукт ANSYS Workbench і тип аналізу – static structural analysis [16]. Побудова числової моделі НДС пляшки включала такі етапи в проєкті static structural:

- Engineering Data – підготовка механічних властивостей матеріалу;
- Geometry – імпорт твердотільної моделі пляшки (рис. 5) в програму Design Modeler. Перетворення твердотільної моделі пляшки в модель, що містить тільки по-

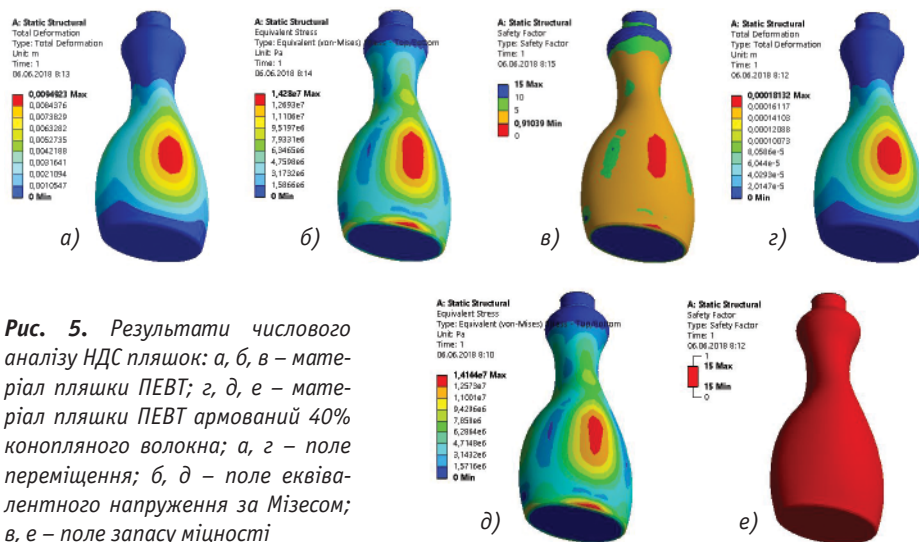


Рис. 5. Результати числового аналізу НДС пляшок: а, б, в – матеріал пляшки ПЕТФ; г, д, е – матеріал пляшки ПЕТФ армований 40% конопляного волокна; а, г – поле переміщення; б, д – поле еквівалентного напруження за Мізесом; в, е – поле запасу міцності



верхні з віртуальною товщиною стінки, яку можна змінювати (це потрібно для того, щоб під час скінченно-елементного аналізу використовувати поверхневі (Shell) елементи, що значно спрощує процедуру дискретизації складної геометричної моделі, підвищує точність розрахунків та зменшує вимоги до обчислювальних ресурсів);

- Model – вибір матеріалу пляшки, виконання дискретизації моделі (рис. 4, а), задання граничних умов – умови закріплення й надлишкового тиску (рис. 4, б), вибір полів переміщення, еквівалентних значень деформації і напруження та запасу міцності й виконання безпосередньо розрахунків.

Для порівняння результатів розрахунків на міцність пляшки розрахунки НДС пляшки виконувалися для двох типів матеріалів: ПЕВТ; ПЕВТ, армований 40% конопляного волокна.

Розрахунки НДС виконувалися для товщини пляшки 1,5 мм. Порівняння результатів числового аналізу НДС пляшок наведено на рис. 5.

Аналіз результатів розрахунків показує, що в разі використання армованого природним волокном полімеру для виготовлення пляшок запас міцності зростає більше ніж до 15, що дає змогу зменшити товщину стінки пляшки втричі (при цьому запас міцності становитиме більше 6).

Висновки

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

Показано, що на етапі розробки полімерних композиційних матеріалів для визначення механічних властивостей доцільно скористатися аналітичними співвідношеннями та числовим моделюванням.

Література

1. Полимерная тара и упаковка / под ред. С. В. Генеля. Москва: Химия. – 272 с.
2. 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.
3. *Микуленок І. О.* Классификация термопластических композиционных материалов и их наполнителей // Пластические массы. 2012. – № 9. – С. 29–38.
4. Основные направления в области создания биоразлагаемых термопластов / С.П. Рыбкина, В.А. Пахаренко, Т.С. Шостак, В.В. Пахаренко // Пластические массы. 2008. – № 10. – С. 47–54.
5. *Мікульонюк І. О.* Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. Київ: КПП 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. N 1 (3). – P. 85–92.
9. Наполнители для полимерных композиционных материалов: справ. пособие / Дж. Милевски, Г. Кац, Т. Х. Ферригно и др.; под ред. Г. С. Каца, Д. В. Милевски. Москва: Химия, 1981. 736 с.
10. *Jones R. M.* Mechanics of composite materials: 2nd ed. Philadelphia : Taylor & Francis, 1999. – 519 p.
11. *Thompson M., Thompson J.* ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis. 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 2017. – 462 p.
12. *ASTM D638.* ASTM D638. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. URL: <https://www.astm.org/Standards/D638.htm> (last access: 04.12.2017).
13. *Карвацький А. Я.* Метод скінченних елементів у задачах механіки су-

цільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів. Київ: НТУУ «КПІ», ВПІ ВПК «Політехніка», 2015. – 392 с.

14. *Проходько В. П.* SolidWorks. Практическое руководство. Москва: ООО Бином-Пресс, 2004. – 448 с.

15. *SolidWorks.* Расширенное моделирование деталей. Dassault Systemes SolidWorks Corporation. Massachusetts (USA): Concord, 2010. – 328 p.

16. ANSYS Workbench. URL: <https://cae-expert.ru/product/ansys-workbench> (last access: 04.12.2017).

Армированные полимерные материалы для упаковки

А.Я. Карвацкий, д.т.н.,

И.О. Микуленок, д.т.н., В.А. Караулова

Исследованы эффективные механические свойства новых композиционных полимерных материалов в зависимости от характеристик матрицы, а также армирующего волокна природного происхождения и его объемной доли в материалах. Использование тары и упаковки, в частности бутылок и канистр, изготовленных из предлагаемых композиционных полимерных материалов, армированных растительными волокнами, которые относятся к возобновляемому сырью, одновременно решает две важные задачи: повышение прочности изделий, а, следовательно, обеспечение ресурсосбережения, и возможность ускоренного естественного разложения использованной тары и упаковки.

Ключевые слова: полимер, волокна природного происхождения, композиционный материал, механические свойства, тара, упаковка, утилизация.

The reinforced polymeric materials for packing

A. Ya. Karavatskii, Dr., I. O. Mikulionok, Dr.,

V. O. Karaulova

Effective mechanical properties of new composition polymeric materials depending on characteristics of a matrix, and also the reinforcing fiber of a natural origin and its volume portion in the materials are investigated. Use of a tare and packing, in particular the bottles and canisters manufactured of the offered composite polymeric materials reinforced by vegetable fibers which belong to renewable raw materials at the same time solves two important problems: increase of strength of products, and consequently ensuring resource-saving, and a possibility of the accelerated natural decomposition of the used tare and packing.

Key words: polymer, fibers of a natural origin, composition material, mechanical properties, tare, packing, utilization.