

# Пошкоджуваність армованого композиційного матеріалу з врахуванням схеми укладки

М.І. Бобир<sup>1</sup> • О.В. Тимошенко<sup>1</sup> • Д.К. Фам<sup>1</sup>

Received: 04 November 2021 / Accepted: 24 November 2021

**Анотація.** Розширення використання армованих композиційних матеріалів (АКМ) в силових елементах конструкцій різного призначення вимагає обґрунтованого забезпечення її несучої здатності на стадії проектування та залишкового ресурсу на стадії експлуатації. Відповідні високонавантажнені елементи які виготовлені з АКМ мають анізотропний характер механічних властивостей та крихкий характер руйнування.

Аналіз літературних джерел показує, що на сьогодні практично відсутні феноменологічні моделі деформування та критерії руйнування анізотропних АКМ з врахуванням пошкоджуваності. Знання названих параметрів дозволяє суттєво уточнювати напружено-деформований та граничний стани відповідальних елементів різного призначення.

В даному дослідженні запропоновано моделі визначення граничного значення пошкоджуваності АКМ, що враховує схему укладки кожного шару при різних умовах простого навантаження (розтяг, стиск, зсув). Границі використання представлених в роботі моделей обмежується максимальним кількістю шарів в АКМ (до семи шарів). Представлені криві кінетики накопичення пошкоджуваності з використання енергетичного методу запропонованого Дзюбою, який базується на зміні ентропії матеріалів при деформації для АКМ з різною комбінацією укладок шарів. Визначені параметри моделей, що в свою чергу показало недоцільність врахування всіх параметрів – знехтуванням яких не значно впливають на здатність моделей прогнозувати граничні значення пошкоджуваності.

**Ключові слова:** пошкоджуваність; армований композитний матеріал; прогнозування; граничний стан; схема укладки.

## Вступ

Перспективність дослідження АКМ викликана їх широким розповсюдженням і ростом долі в сучасних сферах виробництва виробів нової техніки.

На сьогодні їх використання супроводжується проведенням комплексу експериментально-теоретичних досліджень з розробкою моделей та критеріїв граничного стану, а також на їх основі ефективних методів розрахунку напружено-деформованого стану елементів конструкцій з врахуванням основних термосилових параметрів експлуатаційного навантаження.

Результати названих досліджень є також основою для вдосконалення технології виготовлення еле-

ментів конструкцій із АКМ із наперед заданими ваговими та фізико-механічними властивостями (міцність та довговічність, відсутність електромеханічної корозії, рівень радіолокаційної помітності та інші).

Відома [1, 2], що експлуатаційне навантаження несучих елементів конструкцій уже на рівні границі витривалості  $\sigma_{-1}$  конструкційного матеріалу супроводжується накопиченням розсіяних руйнувань (пошкоджень) різної природи на мікро та мезорівнях. Тому введення відповідного параметра пошкоджуваності в систему визначальних рівнянь при розрахунках напружено-деформованого стану (НДС). Використання концепції континуальної механіки пошкоджуваності та основних положень термодинаміки незворотніх процесів для металічних конструкційних матеріалів показало свою ефективність. [1, 2] Для АКМ названий метод прогнозування кінетики накопичення пошкоджень та граничного стану практично не досліджений. Враховуючи, як правило крихкий характер руйнування анізотропних АКМ, задачу з розробки методу оцінки їх граничного стану на стадії зародження макротріщини

✉ Д. К. Фам  
fatquan1992@gmail.com

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

можна розв'язувати автономно. Для цього необхідно обґрунтувати ефективний параметр пошкоджуваності та визначити основні термосилові параметри, які впливають на характер кінетики накопичення розсіяних руйнувань та граничний стан. В переліку параметрів важливим є вплив анізотропії АКМ, яка залежить від схеми укладки волокон армування.

**Мета роботи** полягає у встановленні закономірностей кінетики накопичення пошкоджень АКМ за різних умов навантаження та з різною схемою укладок волокон, а також встановлення залежності граничного значення величини пошкоджень від схеми укладок. Визначення величини вкладу параметрів моделі на здатність до прогнозування граничної величини пошкоджуваності за різних умов навантаження.

Для розв'язання названої задачі, було проведено критичний аналіз досліджень за даною науковою проблемою. В результаті встановлено, що на сьогодні існують багато інженерних методів по визначенні параметра пошкоджуваності через зміну різних характеристик в матеріалі [3–7]. Серед проаналізованих робіт було виділено один з достатньо фізично обґрунтованих та найпростіших для використання в інженерній практиці підхід, який описаний в роботі [8, 9]. Цей підхід базується на використанні в якості скалярного параметру пошкоджуваності  $D$  зміну ентропії в конструкційному матеріалі під час його деформування у вигляді [8]:

$$D = \frac{S_i}{S_R} = \frac{A_i}{T} \frac{T}{A_R} = \frac{A_i}{A_R}, \quad (1)$$

де  $S_i, S_R$  – поточне та максимальне значення ентропії відповідно,  $A_i$  та  $A_R$  – поточна та гранична площа діаграми деформування АКМ відповідно,  $T$  – температура.

### Результати досліджень

Для встановлення взаємозв'язку граничних значень пошкоджуваності з схемою укладки, проведено експериментальне дослідження на АКМ з схемою укладок (таблиця 1).

З АКМ, які представлені в таблиці 1 підготовлені відповідні зразки для проведення випробування в умовах розтягу, стиску та зсуву. Введемо ось  $X$ , який спів-

падає з напрямком першого шару досліджуваних листів АКМ. Кути укладки інших шарів відкладається від осі  $X$ .

Результати дослідження АКМ у вигляді кривих деформування наведені на рис. 1, де криві 1, 2, 3, 4 відповідають нумерації листів згідно табл. 1.

З відповідними схемами укладки. З них видно що АКМ мають різні механічні властивості в залежності від прикладання зусиль по відношенню до схеми укладки. При цьому найбільші характеристики міцності з крихким характером руйнування отримані в матеріалі з розтягом в напрямку укладки поверхневих (перших) шарів волокна (рис. 1а). В той же час мінімальний опір навантаженню АКМ показує в перпендикулярному до напрямку укладки поверхневих шарів волокна. Розкид характеристик міцності АКМ, виходячи зі діапазону кутів укладки  $D \leq \alpha \leq 60^\circ$  шарів та їх кількості (рис. 1а) незначний. Однак, порівнюючи криві на розтяг та стиск можна вважати, що при проектуванні схеми укладки необхідно вибрати відповідні кути  $\alpha \leq 60^\circ$ . Залежність механічних характеристик АКМ від кількості шарів укладки є неоднозначною. З результатів досліджень видно тільки різке зниження їх значень на зсув при кількості шарів  $n = 4$  (лист 4).

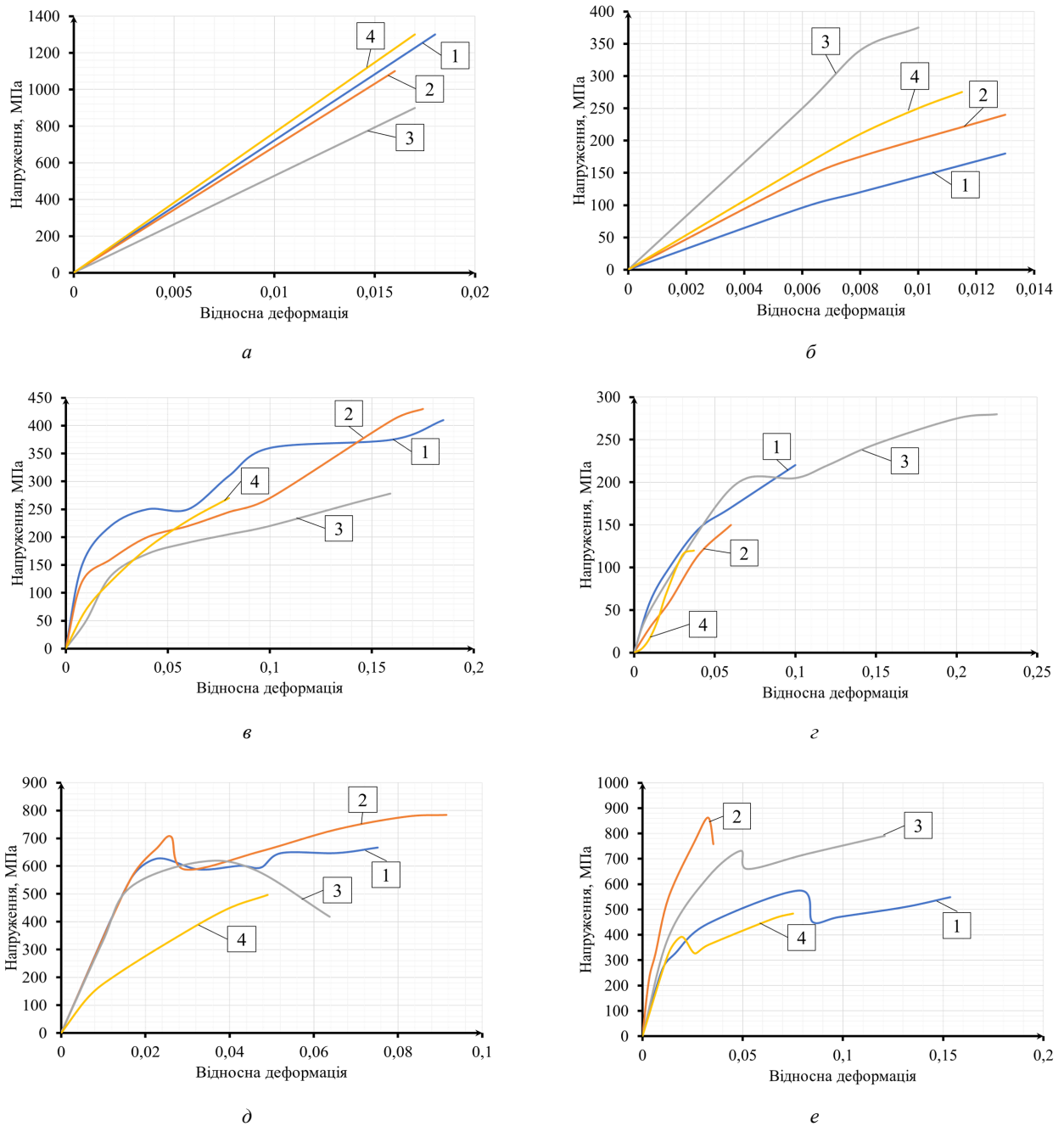
Згідно залежності (1) були отримані відповідні криві кінетики накопичення пошкоджень (рис. 2). При цьому для абсолютно крихкого руйнування АКМ (рис. 1 а) концепція зміни ентропії для експериментального визначення скалярного параметру  $D$  не підтверджується. Тому виникає необхідність розробляти нові, більш точні методи оцінки кінетики накопичення пошкоджень для крихкого типу руйнування АКМ. Подібна методика була розроблена для металічних конструкційних матеріалів з рівнем навантаження від границі витривалості  $\sigma_{-1}$  ( $\sigma_{-1} \leq \sigma \leq \sigma_T$ ), де  $\sigma_T$  – границя текучості матеріалу. Вона базується на вимірюванні відносного електроопору металічного матеріалу [4].

Аналіз результатів, згідно рис. 2 (криві 1–4 відповідають нумерації листів АКМ) показує, що відносно високі показники пошкоджень (до 35 %) проявляються в результаті навантаження на зсув та стиск АКМ з кутами укладки шарів до 45 %. По аналогії з металічними матеріалами з крихким характером руйнування, для АКМ характерно також вищі показники граничних пошкоджень на стиск в порівнянні з такими на розтяг.

Граничні значення пошкоджень в залежності від схеми укладки (кути укладки вказані відносно

Таблиця 1. Схема укладок досліджуваних АКМ в роботі

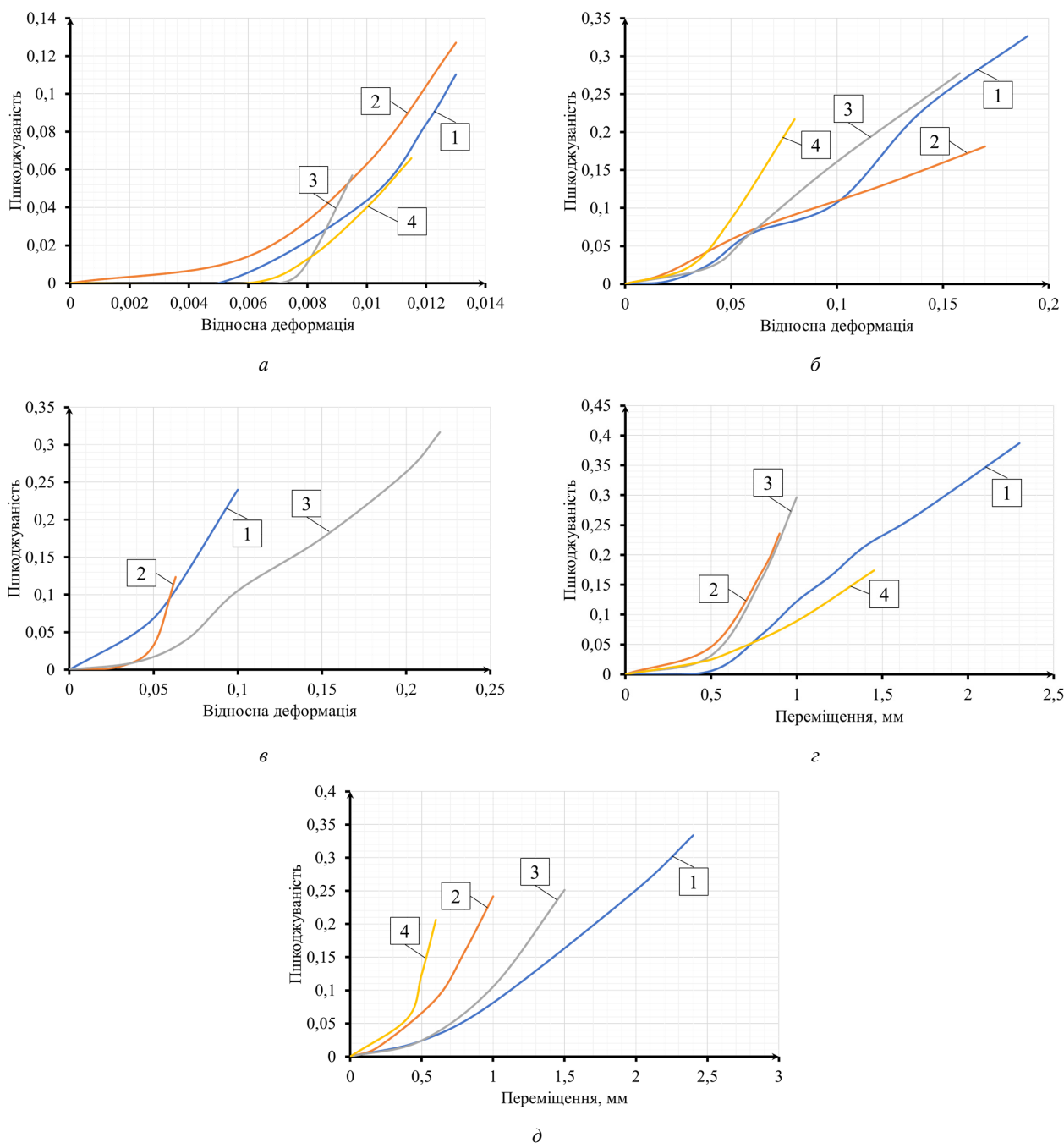
	Лист 1	Лист 2	Лист 3	Лист 4
Схема укладки	0/40/–40/0/–40/40/0	0/45/–45/0/–45/45/0	0/60/–60/–60/60/0	0/50/–50/0



**Рис. 1.** Діаграми деформування АКМ з різними видами навантажень: *a* – розтяг (напрямок прикладання навантаження в напрямку осі  $X$ ); *b* – розтяг (навантаження перпендикулярно до осі  $X$ ); *c* – стиск (навантаження в напрямку осі  $X$ ); *d* – стиск, навантаження перпендикулярно до осі  $X$ ; *e* – зсув (навантаження в напрямку осі  $X$ ); *f* – зсув (навантаження перпендикулярно до осі  $X$ )

напрямку дії навантаження) та типу навантаження показані в табл. 2. В ній прийнято за основу АКМ, який має сім шарів укладки. У випадку меншої їх кількості в табл. 2 прийнято умовно відсутні шари записати з кутом укладки 100 градусів.

Для побудови математичної моделі залежності граничного значення пошкодження на стадії зародження макротріщин  $D_R$  від схеми укладки згідно табл. 1, обрано лінійну модель:



**Рис. 2.** Кінетика накопичення пошкоджень при різних умовах навантаження: в) - стиск, прикладання навантаження перпендикулярно осі X; г) - зсув, прикладання навантаження в напрямку осі X; д) - зсув, прикладання навантаження перпендикулярно до осі X

$$D_R(\alpha_i) = b_0 + \sum_1^7 b_i \cdot \alpha_i \quad (2)$$

де  $b_0, b_i$  - параметри моделі, відповідно.

Лінійна залежність широко використовується в інженерних розрахунках в якості математичної моделі

для опису будь-якої складної залежності. Визначення параметрів моделі проводилось за методикою, яка детально описана в роботах [10–12].

Значення параметрів показані в табл. 3.

З даної таблиці видно, що параметр  $b_1$  та  $b_6$ , не впливають на результати визначення граничного значення пошкоджуваності  $D_R$

Таблиця 2. Гранична пошкоджуваність АКМ в залежності схеми укладки та типу навантаження

Тип навантаження	Номер схеми	Кути та номери шарів	Кути, град							Dr
			1	2	3	4	5	6	7	
Розтяг поздовжній	1	Лист1	0	40	-40	0	-40	40	0	0
	2	Лист2	0	45	-45	0	-45	45	0	0
	3	Лист3	0	60	-60	100	-60	60	0	0
	4	Лист4	100	0	50	100	-50	0	100	0
Розтяг поперечний	5	Лист1	0	40	-40	0	-40	40	0	0,1103
	6	Лист2	0	45	-45	0	-45	45	0	0,1269
	7	Лист3	0	60	-60	100	-60	60	0	0,0569
	8	Лист4	100	0	50	100	-50	0	100	0,0661
Стиск поздовж	1	Лист1	0	40	-40	0	-40	40	0	0,3265
	2	Лист2	0	45	-45	0	-45	45	0	0,1811
	3	Лист3	0	60	-60	100	-60	60	0	0,2776
	4	Лист4	100	0	50	100	-50	0	100	0,2168
Стиск поперечний	5	Лист1	0	40	-40	0	-40	40	0	0,2399
	6	Лист2	0	45	-45	0	-45	45	0	0,1235
	7	Лист3	0	60	-60	100	-60	60	0	0,3164
	8	Лист4	100	0	50	100	-50	0	100	0
Зсув вздовж	1	Лист1	0	40	-40	0	-40	40	0	0,3871
	2	Лист2	0	45	-45	0	-45	45	0	0,2358
	3	Лист3	0	60	-60	100	-60	60	0	0,2964
	4	Лист4	100	0	50	100	-50	0	100	0,1739
Зсув поперек	5	Лист1	0	40	-40	0	-40	40	0	0,3338
	6	Лист2	0	45	-45	0	-45	45	0	0,2418
	7	Лист3	0	60	-60	100	-60	60	0	0,2511
	8	Лист4	100	0	50	100	-50	0	100	0,2063

Таблиця 3. Параметри моделей за регресійним аналізом

	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$
Розтяг	0,13552	0	0,00184	0,00306	0,00054	0,00196	0	-0,00245
Стиск	0,08901	0	-0,00648	-0,00718	-0,00036	-0,00311	0	0,00367
Зсув	0,52941	0	0,00373	0,00613	0,00080	0,00276	0	-0,00604

В результаті, залежність граничного значення накопичення пошкоджень від схеми укладки при різних умовах навантаження приймає вигляд:

– для розтягу

$$D_r^{poz}(\alpha_i) \cdot 10^3 = 135,52 + 1,84\alpha_2 + 3,06\alpha_3 + 0,54\alpha_4 + 1,96\alpha_5 - 2,45\alpha_7 \quad (3)$$

– для стиску

$$D_r^{cm}(\alpha_i) \cdot 10^3 = 89,01 - 6,48\alpha_2 - 7,18\alpha_3 - 0,36\alpha_4 - 3,11\alpha_5 + 3,67\alpha_7 \quad (4)$$

– для зсуву

$$D_r^{zc}(\alpha_i) \cdot 10^3 = 529,41 + 3,73\alpha_2 + 6,11\alpha_3 + 0,8\alpha_4 + 2,76\alpha_5 - 6,04\alpha_7 \quad (5)$$

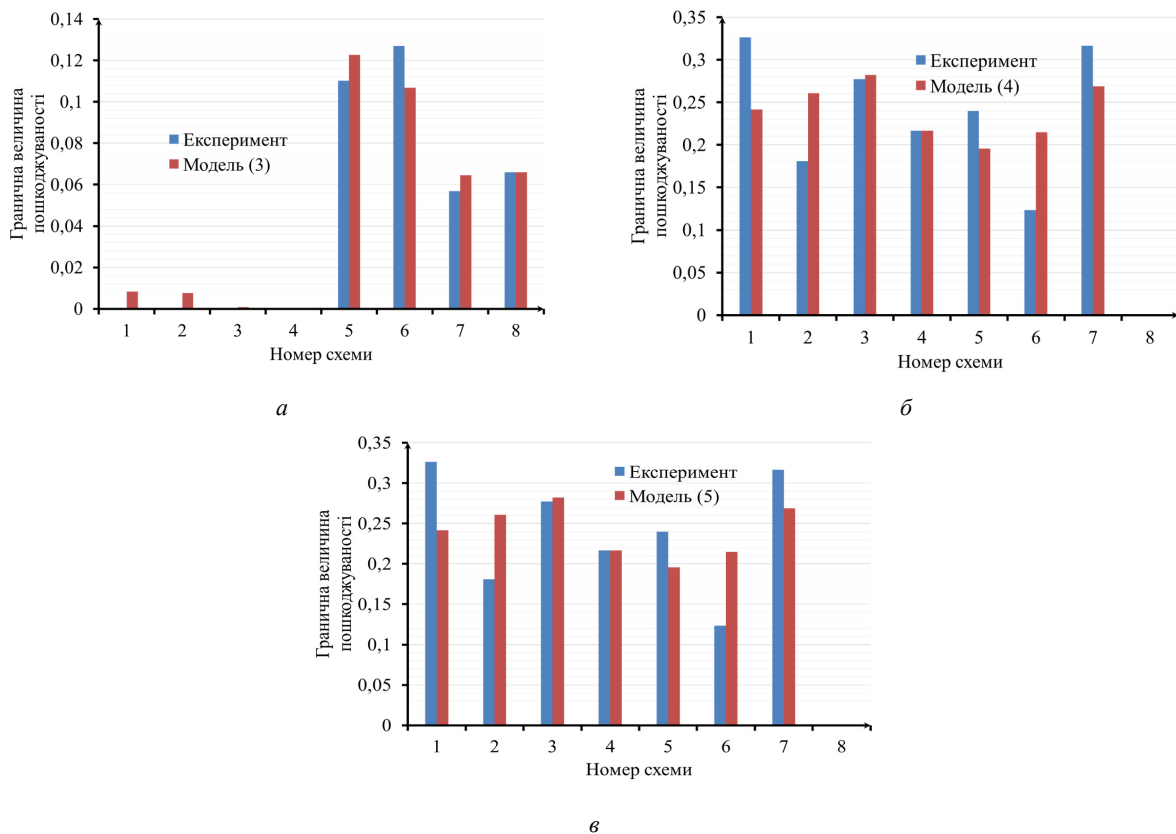


Рис.3. Порівняння розрахункових даних з експериментальними: а – розтяг, б – стиск, в – зсув

Порівняння запропонованих моделей (3)–(5), з відповідними експериментальними значеннями представлено на рис. 3.

З них видно задовільну відповідність експериментальних та розрахункових результатів.

### Висновки

Встановлено закономірності кінетики накопичення пошкоджуваності для представлених в роботі АКМ за різних умов навантаження та з різною схемою укладки волокон.

Показано, що механічні властивості АКМ суттєво залежать від напрямку дії експлуатаційного навантаження та кількості шарів укладки армуючого волокна (табл. 2). Найвищими характеристиками міцності з абсолютно крихким механізмом руйнування характе-

ризуються АКМ з розтягом в напрямку укладки поверхневих шарів армуючого волокна, а мінімальна несуча здатність АКМ – за умов прикладання навантаження в перпендикулярному до названого напрямку укладки.

Встановлено, що оптимальними з позиції забезпечення відповідних механічних характеристик АКМ необхідно вибирати кути укладки армуючого волокна в діапазоні  $0 \leq \alpha \leq 60^0$  та кількості шарів  $n \geq 4$ .

Обґрунтовано, що феноменологічна модель пошкоджуваності, яка базується на концепції зміни ентропії не може використовуватися для абсолютно крихкого характеру руйнування АКМ.

На основі регресійного аналізу розроблено феноменологічні моделі розсіяного руйнування (пошкодження) на стадії зародження макротріщини в залежності від схеми укладки шарів армування при різних умовах навантаження.

### References

- [1] D.K. Fam, et al., “Kinetika nakopleniya povrezhdenii i kriterii predel'nogo sostoyaniya konstruktsionnykh materialov”, *Mechanics and Advanced Technologies*, No. 1 (82), pp. 131–138, 2018. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.82.127123>
- [2] M. Bobyr, et al., “Phenomenological damage models of anisotropic structural materials”, *Journal of Mechanical Engineering NTUU “Kyiv Polytechnic Institute”*, No. 67, pp. 5–13, 2013.
- [3] C. Chow, J. Wang, “An anisotropic theory of elasticity for continuum damage mechanics”, *International Journal of Fracture*, No. 33, pp. 3–16, 1987. <https://doi.org/10.1007/BF00034895>



- [4] M.I. Bobyr, *et al.*, “Sposib viznachennya kinetiki ruinuvannya materialiv v protsesi ikh pruzhno-plastichnogo deformuvannya”, Nomer patentu: 65499 15.03.2004 – (Bul. No. 3).
- [5] N.A. Bonora, “Strain capacity assessment of API X65 steel using damage mechanics”, *J Frattura ed Integrita Strutturale*, No. 11, pp. 315–327, 2017. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.42.33>
- [6] Z. Su, Progressive damage modeling of open-hole composite laminates under compression, *Compos. Struct.*, No. 122, pp. 507–517, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.022>
- [7] I. Lapczyk, J. Hurtado, “Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials”, *Compos. Part. A Appl. Sci. Manuf.*, Vol. 38, pp. 2333–2341, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.01.017>
- [8] V.S. Dzyuba, “Termodinamicheskii podkhod k otsenke povrezhdaemosti armirovannykh plastikov”, *Institut problem prochnosti ANURSR*, 1984.
- [9] S. Zhou *et al.*, “Experimental and numerical investigation of open hole carbon fiber composite laminates under compression with three different stacking sequences”, *Journ. Mater. Res. Technol.*, Vol. 8, pp. 2957–2968. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.05.003>
- [10] M.N. Stepnov, *Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy*, Moscow: Mashinostroenie, 1985.
- [11] Standart, A. S. T. M. Standart Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading, ASTM D3410/D3410 M-16, ASTM International: Philadelphia, PA. USA 2016.
- [12] I.I. Eliseeva, M.M. Yuzbashev, *Obshchaya Teoriya Statistiki*, Moscow: Finansy i statistika, 2004.

## Damage of the reinforced composite material taking into account the laying scheme

M. I. Bobyr, O. V. Tymoshenko, D. Q. Pham

**Abstract.** Expanding the use of reinforced composite materials (RCM) in the power elements of structures for various purposes requires reasonable provision of its load-bearing capacity at the design stage and residual life at the stage of operation. Suitable high-load elements made of RCM have anisotropic mechanical properties and brittle fracture.

Analysis of the literature shows that today there are virtually no phenomenological models of deformation and criteria for the destruction of anisotropic RCM, taking into account the damage. Knowledge of these parameters allows you to significantly clarify the stress-strain and limit states of the responsible elements for different purposes.

In this study, models are proposed to determine the limit value of the damage of the RCM, which takes into account the scheme of laying each layer under different conditions of simple loading (tension, compression, shear). The limits of use of the models presented in the work are limited by the maximum number of layers in the RCM (up to seven layers). Curves of damage accumulation kinetics are presented using the energy method proposed by Dziuba, which is based on the change of entropy of materials during deformation for RCM with different combination of layer layouts. The parameters of the models were determined, which in turn showed the expediency of taking into account all the parameters - neglect of which does not significantly affect the ability of models to predict the limit values of damage.

**Keywords:** damage; reinforced composite material; limit state; laying scheme.

## Поврежденность армированного композиционного материала с учетом схемы укладки

Н. И. Бобырь, А. В. Тимошенко, Д. К. Фам

**Аннотация.** Расширение использования армированных композиционных материалов (АКМ) в силовых элементах конструкций разного назначения требует обоснованного обеспечения ее несущей способности на стадии проектирования и остаточного ресурса на стадии эксплуатации. Подходящие высоконагруженные элементы, изготовленные из АКМ, имеют анизотропный характер механических свойств и хрупкий характер разрушения.

Анализ литературных источников показывает, что на сегодняшний день практически отсутствуют феноменологические модели деформирования и критерии разрушения анизотропных АКМ с учетом повреждаемости. Знание названных параметров позволяет существенно уточнять напряженно-деформированное и предельное состояния ответственных элементов различного назначения.

В данном исследовании предложены модели определения граничного значения повреждаемости АКМ, учитывающей схему укладки каждого слоя при различных условиях простой нагрузки (растяжение, сжатие, сдвиг). Границы использования представленных в работе моделей ограничивается максимальным количеством слоев в АКМ (до семи слоев). Представлены кривые кинетики накопления повреждаемости с использованием энергетического метода, предложенного Дзюбой, который базируется на изменении энтропии материалов при деформации для АКМ с различной комбинацией укладок слоев. Определены параметры моделей, что в свою очередь показало нецелесообразность учета всех параметров – пренебрежением которых не влияют на способность моделей прогнозировать предельные значения повреждаемости.

**Ключевые слова:** повреждаемость; армированный композитный материал; прогнозирование; предельное состояние; схема укладки.