

УДК 539.3

DOI: <https://doi.org/10.17721/1812-5409.2026/1.22>

Олена ШИКУЛА^{1,2}, д-р фіз.-мат. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-7385-2816
e-mail: ensh@ukr.net

Наталія ЖУКОВА², канд. фіз.-мат. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-2699-3771
e-mail: zhukova_n@ukr.net

Віктор ВИШНІВСЬКИЙ¹, д-р тех. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0003-1923-4344
e-mail: vish_vv@ukr.net

Світлана БІЛОУСОВА¹, канд. фіз.-мат. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-2557-8146
e-mail: svetlana_belousova@ukr.net

¹Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна
²Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАНУ, Київ, Україна

МОДЕЛЬ ДЕФОРМУВАННЯ АРМОВАНИХ У ПЛОЩИНІ ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ФІЗИЧНО НЕЛІНІЙНОЮ МАТРИЦЕЮ

У разі збільшення навантаження багато однорідних і композитних матеріалів проявляють нелінійний характер залежностей між макронапруженнями та макродеформаціями. Це може бути обумовлено фізичною нелінійністю деформування компонентів. Волокнисті матеріали використовують у спорудах і деталях, що функціонують в умовах високих силових і температурних навантажень. З огляду на це прогнозування їхніх нелінійних властивостей є актуальним.

Мета роботи – побудова моделі та дослідження нелінійного деформування армованих у площині волокнистих композитних матеріалів із фізично нелінійною матрицею.

Армовані у площині волокнисті матеріали розглянуто як багатокомпонентні матеріали з випадковим розташуванням волокон, визнаючи матрицю і волокна кожного напрямку окремими компонентами. Будемо вважати, що матеріал волокон – трансверсально-ізоотропний із відносною симетрією уздовж волокон, матеріал матриці – ізоотропний фізично нелінійний. Визначення ефективних деформативних властивостей і напружено-деформованого стану матеріалу відбувається у два етапи. На першому етапі визначено властивості підсистеми, що є односпрямованим волокнистим матеріалом, утвореним волокнами певного напрямку і частиною матриці. Розв'язання задачі першого етапу здійснюється на основі моделі односпрямованого волокнистого матеріалу стохастичної структури. Розв'язок побудовано із застосуванням методу умовних моментів Л. П. Хорошуна. На другому етапі за обчисленими властивостями підсистем визначено ефективні властивості всієї системи. Розв'язок побудовано на основі схеми Фойхта. Нелінійні рівняння, що враховують фізичну нелінійність матриці, розв'язано за ітераційним методом.

Розроблено алгоритм визначення ефективних властивостей та напружено-деформованого стану матеріалу із фізично нелінійною матрицею. Встановлені закони зв'язку між макронапруженнями і макродеформаціями в матеріалі та залежності середніх деформацій і напружень у матриці матеріалу від макродеформацій. Досліджено криві деформування матеріалу. З'ясовано, що нелінійність компонентів суттєво впливає на ефективні деформативні властивості та напружено-деформований стан матеріалу.

Ключові слова: волокнистий композитний матеріал, армовані у площині матеріали, нелінійна матриця, ефективні деформативні властивості, напружено-деформований стан, вплив нелінійності, комп'ютерне моделювання

Класифікація відповідно до AMS 2020: 74-10.

Вступ

Просторово армовані й армовані у площині волокнисті композити набули широкого застосування в різноманітних галузях техніки, де пред'являються вимоги до високої міцності за зниженої маси конструкцій. В умовах зростання навантаження багато однорідних і композитних матеріалів демонструють нелінійний характер залежностей між макронапруженнями та макродеформаціями. Це може бути обумовлене фізичною нелінійністю деформування компонентів. Такий вид нелінійності є типовим для композитів на основі пластичної металевої матриці, а також на основі полімерів за підвищених температур. Армовані у площині волокнисті матеріали використовують в оболонках, що входять у конструкції, які функціонують в умовах значних силових або температурних впливів. З огляду на це прогнозування їхніх нелінійних властивостей і деформування є актуальним.

Нелінійні волокнисті та просторово армовані волокнисті композитні матеріали вивчалися багатьма авторами. Визначенню ефективних властивостей волокнистих композитних матеріалів присвячені дослідження (Хорошун та ін., 1993; Khoroshun et al., 2008; Khoroshun, & Nazarenko, 2013; Maslov, 2017; 2022; Хорошун, & Шикун, 2011; 2016) та ін. Розв'язання лінійної задачі про деформування стохастично неоднорідних волокнистих матеріалів просторового армування було отримано в роботах (Хорошун та ін., 1993; Khoroshun, & Shikula, 2008; Khoroshun, & Nazarenko, 2013). Однак автори вивчали лише лінійне деформування. Не було побудовано моделі деформування в разі нелінійного деформування матриці, тож побудова такої моделі є на часі.

Об'єкт дослідження – армовані у площині волокнисті композитні матеріали.

Метою пропонованої роботи є побудова моделі та дослідження нелінійного деформування армованих у площині волокнистих матеріалів із фізично нелінійною матрицею.

У статті армовані у площині волокнисті матеріали розглянуто як багатокомпонентні матеріали з випадковим розташуванням волокон, визнаючи матрицю і волокна кожного напрямку окремими компонентами. Будемо вважати, що матеріал волокон – трансверсально-ізотропний із віссю симетрії уздовж волокон, матеріал матриці – ізотропний фізично нелінійний. Визначення ефективних деформативних властивостей і напружено-деформівного стану матеріалу проведено у два етапи. На першому етапі з'ясовуємо ефективні властивості підсистеми, що є односпрямованим волокнистим матеріалом, утвореним волокнами певного напрямку і частиною матриці. Розв'язання задачі першого етапу здійснюємо на основі моделі односпрямованого волокнистого матеріалу стохастичної структури. В основу покладено стохастичні диференціальні рівняння теорії пружності, розв'язок побудовано із застосуванням методу умовних моментів Л. П. Хорошуна. На другому етапі за обчисленими властивостями підсистем визначаємо ефективні властивості всієї системи. Розв'язання задачі другого етапу побудовано на основі схеми Фойхта. Нелінійні рівняння, що враховують фізичну нелінійність матриці, розв'язано за ітераційним методом.

1. Матеріали та методи дослідження

Розглянемо просторово армований волокнистий матеріал стохастичною структури, що є системою волокон N напрямків, пов'язаних матрицею. Волокна k -го напрямку характеризуються напрямними косинусами (рис. 1)

$$\gamma_1^{(k)} = \sin \theta_k \cos \varphi_k; \gamma_2^{(k)} = \sin \theta_k \sin \varphi_k; \gamma_3^{(k)} = \cos \theta_k \quad (0 \leq \theta_k \leq \pi/2; 0 \leq \varphi_k \leq 2\pi; k = 1, 2, \dots, N). \quad (1)$$

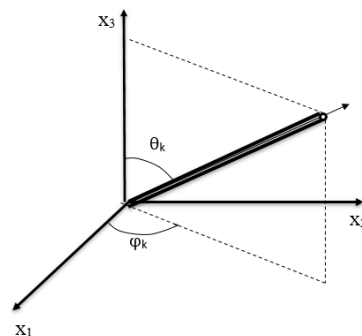


Рис. 1. Напрямні косинуси волокон

Нехай об'ємні вмісти волокон k -го напрямку і матриці дорівнюють відповідно $c_1^{(k)}$ і c_2 . Загальна концентрація волокон $c_1 = \sum_{k=1}^N c_1^{(k)}$, при цьому $c_1 + c_2 = 1$. Визначення ефективних деформативних характеристик матеріалу будемо виконувати у два етапи. На першому етапі з'ясовуємо ефективні властивості підсистеми, що є односпрямованим волокнистим матеріалом, утвореним волокнами k -го напрямку і частиною матриці з об'ємним вмістом $c_2^{(k)} = c_2 c_1^{-1} c_1^{(k)}$.

2. Визначення ефективних деформативних властивостей просторово армованих волокнистих матеріалів

Нехай макрооб'єм просторово армованого волокнистого матеріалу перебуває в умовах однорідного навантаження. Позначимо пружні сталі волокон k -го напрямку $\lambda_{ij}^{(k)}$, а деформативні характеристики матриці, що залежать від деформації, – $\lambda_2 = \lambda_2(\epsilon)$, $\mu_2 = \mu_2(\epsilon)$. Тоді вирази для ефективних характеристик підсистеми мають такий вигляд (Гузь та ін., 2003; Хорошун та ін., 1993):

$$\begin{aligned} \lambda_{11}^{*(k)} + \lambda_{12}^{*(k)} &= c_1^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2c_2^{(k)}(\lambda_2 + \mu_2) - \frac{c_1^{(k)}c_2^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)} - 2\lambda_2 - 2\mu_2)^2}{2c_1^{(k)}(\lambda_2 + \mu_2) + c_2^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2m^{(k)}}; \\ \lambda_{11}^{*(k)} - \lambda_{12}^{*(k)} &= c_1^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) + 2c_2^{(k)}\mu_2 - \frac{c_1^{(k)}c_2^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)} - 2\mu_2)^2}{2c_1^{(k)}\mu_2 + c_2^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) + \frac{2m^{(k)}n^{(k)}}{n^{(k)} + 2m^{(k)}}}; \\ \lambda_{13}^{*(k)} &= c_1^{(k)}\lambda_{13}^{(k)} + c_2^{(k)}\lambda_2 - \frac{c_1^{(k)}c_2^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)} - 2\lambda_2 - 2\mu_2)(\lambda_{13}^{(k)} - \lambda_2)}{2c_1^{(k)}(\lambda_2 + \mu_2) + c_2^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2m^{(k)}}; \\ \lambda_{33}^{*(k)} &= c_1^{(k)}\lambda_{33}^{(k)} + c_2^{(k)}(\lambda_2 + 2\mu_2) - \frac{2c_1^{(k)}c_2^{(k)}(\lambda_{13}^{(k)} - \lambda_2)^2}{2c_1^{(k)}(\lambda_2 + \mu_2) + c_2^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2m^{(k)}}; \\ \lambda_{44}^{*(k)} &= c_1^{(k)}\lambda_{44}^{(k)} + c_2^{(k)}\mu_2 - \frac{c_1^{(k)}c_2^{(k)}(\lambda_{44}^{(k)} - \mu_2)^2}{c_1^{(k)}\mu_2 + c_2^{(k)}(\lambda_{44}^{(k)} + s^{(k)})}. \end{aligned} \quad (2)$$

Ефективні характеристики (2) – компоненти тензорів ефективних пружних характеристик у локальній системі координат x'_i , де вісь x'_3 паралельна волокнам підсистеми. У загальній системі координат згідно з перетворенням

$$\begin{aligned} x'_i &= \alpha_{ij}x'_j; x'_i = \alpha_{ji}x_j; \alpha_{11} = \cos \theta \cos \varphi; \alpha_{12} = -\sin \varphi; \alpha_{13} = \sin \theta \cos \varphi; \\ \alpha_{21} &= \cos \theta \sin \varphi; \alpha_{22} = \cos \varphi; \alpha_{23} = \sin \theta \sin \varphi; \alpha_{31} = -\sin \theta; \alpha_{32} = 0; \alpha_{33} = \cos \theta. \end{aligned} \quad (3)$$

Тензори ефективних деформативних характеристик $\lambda_{ijlm}^{*(k)}$ у загальній системі координат виражаються через відповідні тензори $\lambda_{ijlm}^{*(k)}$ в локальній системі координат співвідношеннями

$$\lambda_{ijlm}^{*} = \alpha_{ip} \alpha_{jq} \alpha_{lr} \alpha_{ms} \lambda_{pqrs}^{*} \quad (4)$$

Ефективні характеристики всієї системи відповідно до схеми Фойхта визначаємо формулами

$$\lambda_{ijlm}^{**} = \frac{1}{c_1} \sum_{k=1}^N c_1^{(k)} \lambda_{ijlm}^{*(k)} \quad (5)$$

Підставляючи (4) у (5) і переходячи до матричних позначень, отримуємо

$$\begin{aligned} \lambda_{ijlm}^{**} = & \frac{1}{c_1} \sum_{k=1}^N c_1^{(k)} \{ [\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)} \alpha_{l1}^{(k)} \alpha_{m1}^{(k)} + \alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)} \alpha_{l2}^{(k)} \alpha_{m2}^{(k)} + \frac{1}{2} (\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)} + \alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)}) (\alpha_{l1}^{(k)} \alpha_{m2}^{(k)} + \alpha_{l2}^{(k)} \alpha_{m1}^{(k)})] \lambda_{1111}^{*(k)} + \\ & + [\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)} \alpha_{l2}^{(k)} \alpha_{m2}^{(k)} + \alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)} \alpha_{l1}^{(k)} \alpha_{m1}^{(k)} - \frac{1}{2} (\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)} + \alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)}) (\alpha_{l1}^{(k)} \alpha_{m2}^{(k)} + \alpha_{l2}^{(k)} \alpha_{m1}^{(k)})] \lambda_{1122}^{*(k)} + \\ & + \alpha_{i3}^{(k)} \alpha_{j3}^{(k)} \alpha_{l3}^{(k)} \alpha_{m3}^{(k)} \lambda_{3333}^{*(k)} + [(\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)} + \alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)}) \alpha_{l3}^{(k)} \alpha_{m3}^{(k)} + \alpha_{i3}^{(k)} \alpha_{j3}^{(k)} (\alpha_{l1}^{(k)} \alpha_{m1}^{(k)} + \alpha_{l2}^{(k)} \alpha_{m2}^{(k)})] \lambda_{1313}^{*(k)} + \\ & + [(\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j3}^{(k)} + \alpha_{i3}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)}) (\alpha_{l1}^{(k)} \alpha_{m3}^{(k)} + \alpha_{l3}^{(k)} \alpha_{m1}^{(k)}) + (\alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j3}^{(k)} + \alpha_{i3}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)}) (\alpha_{l2}^{(k)} \alpha_{m3}^{(k)} + \alpha_{l3}^{(k)} \alpha_{m2}^{(k)})] \lambda_{44}^{*(k)} \}. \end{aligned} \quad (6)$$

Зауважимо, що у випадку фізичної нелінійності матриці, оскільки $\lambda_2(<\varepsilon_{ij}^2>)$, $\mu_2(<\varepsilon_{ij}^2>)$, ефективні деформативні характеристики (6) також є функціями середніх у матриці деформацій $<\varepsilon_{ij}^2>$. Тому для визначення ефективних властивостей просторово армованого матеріалу потрібно встановити співвідношення між середніми деформаціями в матриці $<\varepsilon_{ij}^2>$ та макродеформаціями $<\varepsilon_{ij}>$, що задаються. Вони мають такий вигляд:

$$c_2 <\varepsilon_{ij}^2> = -[\lambda_{ijpq}^{1*} - \lambda_{ijpq}^{2*}]^{-1} [\lambda_{pqlm}^{**} - \lambda_{pqlm}^{1*}] <\varepsilon_{lm}>. \quad (7)$$

Формули (2)–(4), (6), (7) дають можливість написати ітераційний алгоритм визначення ефективних деформативних характеристик просторово армованого матеріалу за заданих макродеформацій.

3. Дослідження ефективних деформативних властивостей армованих у площині волокнистих матеріалів

Нехай волокна розташовані у площині x_1x_2 уздовж сторін рівностороннього трикутника. Концентрації волокон за різними напрямками в площині x_1x_2 вважаємо однаковими. У цьому випадку маємо матеріал із гексагональною симетрією. На рис. 2–5 побудовано відповідно графіки залежностей осьових і зсувних макронапружень від макродеформацій за різних об'ємних концентрацій волокон c_1 .

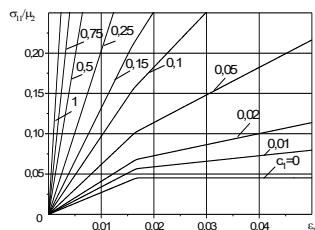


Рис. 2. Залежність макронапруження $<\sigma_{11}>$ від макродеформації $<\varepsilon_{11}>$

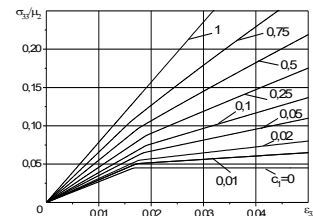


Рис. 3. Залежність макронапруження $<\sigma_{33}>$ від макродеформації $<\varepsilon_{33}>$

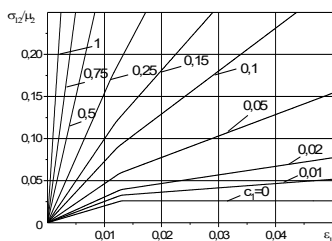


Рис. 4. Залежність макронапруження $<\sigma_{12}>$ від макродеформації $<\varepsilon_{12}>$

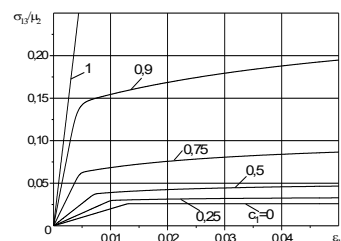


Рис. 5. Залежність макронапруження $<\sigma_{13}>$ від макродеформації $<\varepsilon_{13}>$

Матеріал добре витримує всі осьові навантаження, нелінійно деформується тільки за невеликого об'ємного вмісту волокон, а за зсувних навантажень у напрямку, перпендикулярному площині розташування волокон, нелінійність матриці дуже суттєво впливає на деформування композиту за всіх значень об'ємного вмісту волокон.

Дискусія і висновки

Побудовано модель і досліджено нелінійне деформування армованих у площині волокнистих композитних матеріалів із фізично нелінійною матрицею. Розроблено алгоритм визначення ефективних властивостей і напружено-деформованого стану матеріалу із фізично нелінійною матрицею. Встановлено закони зв'язку між макронапруженнями і макродеформаціями в матеріалі та залежності середніх деформацій і напружень у матриці матеріалу від макродеформацій. Досліджено криві деформування матеріалу. З'ясовано, що нелінійність компонентів суттєво впливає на ефективні деформативні властивості та напружено-деформований стан матеріалу. Матеріал добре витримує всі осьові навантаження, нелінійно деформується тільки за невеликого об'ємного вмісту волокон, а за зсувних навантажень у напрямку, перпендикулярному площині розташування волокон, нелінійність матриці дуже суттєво впливає на деформування композиту за всіх значень об'ємного вмісту волокон.

Внесок авторів: Олена Шикун – концептуалізація; методика; Наталія Жукова – створення алгоритму для розрахунків; Віктор Вишнівський – програмне забезпечення; Світлана Білоусова – графічна інтерпретація чисельних результатів.

Джерела фінансування. Роботу виконано в межах НДР "Дослідження поведінки композитних матеріалів різної структури (армованих короткими волокнами та шаруватих) та оболонкових конструкцій з них в умовах дії стискаючих навантажень", № держреєстрації 0119U103519, Інститут механіки НАНУ.

Список використаних джерел

- Гузь, А. Н., Хорошун, Л. П., Михайлова, М. И., Бабич, Д. В., & Шикун, Е. Н. (2003). *Механика композитов: Т. 12. Прикладные исследования* (А. Н. Гузь, Ред.). "А.С.К."
- Хорошун, Л. П., Маслов, Б. П., Шикун, Е. Н., & Назаренко, Л. В. (1993). *Механика композитов: Т. 3. Статистическая механика и эффективные свойства материалов* (А. Н. Гузь, Ред.). Наукова думка. <https://librarygo.lpnu.ua/?elbook=mehanyka-kompozytov-v-12-tomah-tom-3-statysticheskaya-mehanyka-y-%D1%8Dffektyvn%D1%8Be-svoystva-materyalov>
- Хорошун, Л. П., & Шикун, Е. Н. (2011). Деформирование физически нелинейных стохастических композитных материалов. Деформирование и кратковременная повреждаемость физически нелинейных стохастических композитных материалов. *Успехи механики: Т. 6* (кн. 2) (А. Н. Гузь, Ред.). Литера ЛТД.
- Хорошун, Л. П., & Шикун, Е. Н. (2016). Ефективні деформовні властивості волокнистих композитних матеріалів при нелінійному деформуванні компонентів. *Доповіді Національної академії наук України*, 6, 47–55. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2016.06.047>
- Khoroshun, L. P., Nazarenko, L. V., Müller, W. H., & Wille, R. (2008). Homogenization of Unidirectional and Arbitrarily Oriented Fiber-Reinforced Materials by the Method of Conditional Moments. *PAMM Proc. Appl. Math. Mech.*, 8, 10451–10452. <https://doi.org/10.1002/pamm.200810451>
- Khoroshun, L. P., & Nazarenko, L. V. (2013). Deformation and damage of composite materials with anisotropic components (Review). *Int. Appl. Mech.*, 49(4), 388–455. <https://doi.org/10.1007/s10778-013-0578-6>
- Khoroshun, L. P., & Shikula, E. N. (2008). Deformation of physically nonlinear stochastic composites. *Int. Appl. Mech.*, 44(12), 1325–1351. <https://doi.org/10.1007/s10778-009-0159-x>
- Maslov, B. P. (2017). Stress concentration in nonlinear viscoelastic composites. *J. Mech Adv Technol.*, 79(1), 5–10. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.66490>
- Maslov B. P. (2022). Nonlinear hereditary creep of isotropic composites of random structure. *Int. Appl. Mech.* 58(1), 75–90. <https://doi.org/10.1007/s10778-022-01136-3>

References

- Guz, A. N., Khoroshun, L. P., Mikhailova, M. I., Babich, D. V., & Shikula, E. N. (2003) *Mechanics of composites: T. 12. Applied research* (A. N. Guz, Ed.). "A.S.K." [in Russian].
- Khoroshun, L. P., & Nazarenko, L. V. (2013). Deformation and damage of composite materials with anisotropic components (Review). *Int. Appl. Mech.*, 49(4), 388–455. <https://doi.org/10.1007/s10778-013-0578-6>
- Khoroshun, L. P., & Shikula, E. N. (2008). Deformation of physically nonlinear stochastic composites. *Int. Appl. Mech.*, 44(12), 1325–1351. <https://doi.org/10.1007/s10778-009-0159-x>
- Khoroshun, L. P., & Shikula, E. N. (2011). *Deformation of physically nonlinear stochastic composite materials. Deformation and short-term damage of physically nonlinear stochastic composite materials*. Advances in Mechanics: Vol. 6 (book 2) (by A. N. Guz, Ed.). Litera LTD [in Russian].
- Khoroshun, L. P., & Shikula, E. N. (2016) Effective deformation properties of fibrous composite materials with nonlinear deformation of components. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 6, 47–55 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2016.06.047>
- Khoroshun, L. P., Maslov, B. P., Shikula, E. N., & Nazarenko, L. V. (1993). *Mechanics of composites: Vol. 3. Statistical mechanics and effective properties of materials* (A. N. Guz, Ed.). Nauk. Dumka [in Russian]. <https://librarygo.lpnu.ua/?elbook=mehanyka-kompozytov-v-12-tomah-tom-3-statysticheskaya-mehanyka-y-%D1%8Dffektyvn%D1%8Be-svoystva-materyalov>
- Khoroshun, L. P., Nazarenko, L. V., Müller W. H., & Wille, R. (2008). Homogenization of Unidirectional and Arbitrarily Oriented Fiber-Reinforced Materials by the Method of Conditional Moments. *PAMM Proc. Appl. Math. Mech.*, 8, 10451–10452. <https://doi.org/10.1002/pamm.200810451>
- Maslov, B. P. (2017). Stress concentration in nonlinear viscoelastic composites. *J. Mech Adv Technol.*, 79(1), 5–10. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.66490>
- Maslov, B. P. (2022). Nonlinear hereditary creep of isotropic composites of random structure. *Int. Appl. Mech.* 58(1), 75–90. <https://doi.org/10.1007/s10778-022-01136-3>

Отримано редакцією журналу / Received: 25.09.25
Прорецензовано / Revised: 26.02.26
Схвалено до друку / Accepted: 16.04.26
Опубліковано / Published: 05.06.26

Elena SHIKULA^{1,2}, DSc (Phys. & Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-7385-2816
e-mail: ensh@ukr.net

Nataliia ZHUKOVA², PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-2699-3771
e-mail: zhukova_n@ukr.net

Victor VYSHNIVSKYI¹, DSc (Engin.), Prof.
ORCID ID: 0000-0003-1923-4344
e-mail: vish_vv@ukr.net

Svitlana BILOUSOVA¹, PhD (Phys. & Math.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-2557-8146
e-mail: svetlana_belousova@ukr.net

¹State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine

²S. P. Tymoshenko Institute of Mechanics, National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

MODEL OF DEFORMATION OF IN-PLANE REINFORCED FIBROUS MATERIALS WITH PHYSICALLY NONLINEAR MATRIX

With increasing load, many homogeneous and composite materials exhibit nonlinear relationships between macrostresses and macrostrains. This may be due to the physical nonlinearity of component deformation. Fibrous materials are used in structures and parts operating under high force and temperature loads. Therefore, predicting their nonlinear properties is relevant.

The aim of the work is to build a model and study the nonlinear deformation of in-plane reinforced fibrous composite materials with a physically nonlinear matrix.

In-plane reinforced fibrous materials are considered as multicomponent materials with a random arrangement of fibers, considering the matrix and fibers of each direction as separate components. We will assume that the fiber material is transversely isotropic with an axis of symmetry along the fibers, the matrix material is isotropic physically nonlinear. The determination of the effective deformation properties and the stress-strain state of the material is carried out in two stages. At the first stage, the properties of the subsystem, which is a unidirectional fibrous material formed by fibers of a certain direction and part of the matrix, are determined. The solution of the first stage problem is carried out on the basis of a model of a unidirectional fibrous material of a stochastic structure. The solution is built using the method of conditional moments of L.P. Khoroshun. At the second stage, the effective properties of the entire system are determined based on the calculated properties of the subsystems. The solution is built on the basis of the Voichita scheme. Nonlinear equations that take into account the physical nonlinearity of the matrix are solved by the iterative method.

An algorithm for determining the effective properties and stress-strain state of a material with a physically nonlinear matrix has been developed. The laws of the relationship between macrostresses and macrostrains in the material and the dependence of the average strains and stresses in the material matrix on macrostrains have been established. The deformation curves of the material have been studied. It has been established that the nonlinearity of the components significantly affects the effective deformation properties and the stress-strain state of the material.

Keywords: *fibrous composite material, in-plane reinforced materials, nonlinear matrix, effective deformation properties, stress-strain state, influence of nonlinearity, computer modeling*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.