

УДК 539.3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АРМОВАНОГО ШАРУ КОМПОЗИТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

С.О. Пискунов,

д-р техн. наук

Т.А. Бахтваршосєв

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
03056, м.Київ, Берестейський просп., 37*

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.124-130

Отримані співвідношення для опису пружних властивостей шару односпрямованого волокнистого композитного матеріалу зі змінним коефіцієнтом армування в одному з характерних напрямів шару. Розглядається ортотропний матеріал, пружне деформування складових матеріалу, визначення напруженого стану і механічних характеристик здійснено на основі правила сумішей.

Ключові слова: композитні матеріали, шаруваті композити, механічні властивості, ефективний модуль пружності, анізотропія.

Вступ. Композиційні матеріали (КМ) – матеріали, утворені об'ємним поєднанням хімічно різнорідних компонентів – є найперспективнішим засобом створення сучасних конструкцій в різних галузях техніки. При цьому склад, форма та розподіл компонентів в об'ємі матеріалу можуть бути визначені заздалегідь, зокрема при цілеспрямованому проектуванні структури матеріалу відповідно до напруженого стану чи конструктивних особливостей кінцевого виробу. Використання при цьому підходів механіки суцільного середовища дозволяє визначити фізико-механічні властивості матеріалу в цілому, ґрунтуючись на властивостях кожного компонента та забезпечити найбільшу ефективність використання КМ.

Характерною властивістю композитних матеріалів є анізотропія, що часто дозволяє ефективно вирішувати питання співвідношення несучої здатності та питомої ваги КМ. Зазвичай в техніці використовуються анізотропні КМ з певною симетрією властивостей (передбачається, що реальний неоднорідний матеріал є деяким ідеалізованим суцільним однорідним середовищем, що має симетрію будови і властивостей). Значна частина матеріалів є ортотропними (ортогонально анізотропними) і характеризуються наявністю у кожному елементарному обсязі трьох взаємно перпендикулярних площин симетрії властивостей. Для створення та успішного використання КМ у техніці необхідне знання їх фізико-механічних властивостей.

Актуальність проблеми. Значна кількість композиційних матеріалів являє собою сукупність по різному орієнтованих шарів, утворених з односпрямованих паралельних армуючих волокон, з'єднаних між собою матеріалом матриці. Анізотропія властивостей шаруватого композитного матеріалу обумовлена як анізотропією кожного окремого шару, яка є наслідком односпрямованого розташування армуючих волокон так і подальшим комбінуванням цих шарів під різними кутами один до одного. При цьому відмінність фізико-механічних властивостей у двох взаємно-перпендикулярних напрямках в межах окремого шару є суттєво більшою, ніж для їх комбінації. Це дозволяє оптимізувати механічні властивості конструкції в цілому. Визначення фізико-механічних характеристик такого матеріалу передбачає обчислення величин ефективних фізико-механічних характеристик (ЕФМХ) окремого шару – модулів пружності і коефіцієнтів Пуассона при деформуванні шару в напрямках вздовж і поперек волокон, які можуть бути обчислені на основі відомих характеристик окремих складових шару (матриці і волокон) і матеріалу в цілому.

Питання моделювання пружних механічних характеристик односпрямованого композиту розглянуто у значній кількості публікацій як навчального так і дослідницького характеру, наприклад [1-7] та в багатьох інших. При цьому потрібно виділити два підходи до розв'язання цієї проблеми: макроскопічний, що ґрунтується на розгляді шару як суцільного матеріалу і

отриманні відповідних аналітичних виразів на основі співвідношень механіки суцільного середовища без детального урахування форми армуючих волокон [1-4] та мікроскопічний, що, зокрема, може бути реалізований із використанням числових методів та урахувати форму волокон, особливості їх взаємодії з матрицею та інші фактори [5-7]. В першому випадку передбачається усереднення характеристик напружено-деформованого стану по об'єму матеріалу і не урахування локальних ефектів поблизу поверхні розділу армуючої і в'язучої речовини. В другому випадку точність результатів може залежати від особливостей побудови дискретної моделі методу скінченних елементів. Але обидва ці підходи використовуються при проектуванні композитних матеріалів із певними наперед заданими фізико-механічними властивостями і є основою для подальшого визначення напруженого стану і застосування критеріїв міцності композитів (наприклад [8]). Огляд публікацій з питань оцінки міцності композитів наведений, зокрема у [9, 10].

Елементи конструкцій, які виготовляються з композитних матеріалів, з конструктивних міркувань та для забезпечення міцності можуть мати геометричну форму, яка характеризується зміною характерних геометричних розмірів вздовж певної координати, що може призводити до збільшення відстані між волокнами, і, як наслідок, до змінення щільності армування вздовж однієї з координат. Це є характерним, наприклад при збільшенні довжини паралелі конічної оболонки по висоті при армуванні оболонки вздовж меридіану, або збільшенні довжини кола сферичного поясу при його армуванні вздовж радіусу. Окремо можна виділити випадок прямокутних панелей (пластин або плит) змінної товщини. Відповідні особливості розташування армуючих волокон у матриці показані на рис.1. Аналогічно можна розглянути випадок, коли для збільшення несучої здатності доцільним є використання волокон змінної товщини, хоча виготовлення такого матеріалу технологічно може виявитись більш складним. При проектуванні таких конструкцій необхідним є коректне обчислення фізико-механічних характеристик шару. Зауважимо, що подібні випадки в перелічених вище та інших відомих наукових працях не розглядаються. Метою цієї роботи є отримання співвідношень для визначення фізико-механічних характеристик шару композитного матеріалу зі урахуванням змінення щільності армування вздовж характерного напрямку шару.

Вихідні фізичні співвідношення. Розглянемо окремий шар композиційного матеріалу, який являє собою сукупність односпрямованих волокон, занурених у в'язучу речовину матриці. Такий шар може бути складовою пакету, скріплених один з одним. Для опису фізико-механічних характеристик введемо систему координат так, що вісь x_1 спрямована вздовж армуючих волокон, а площина $x_2 - x_3$ утворює поперечний переріз шару композиту (рис. 1).

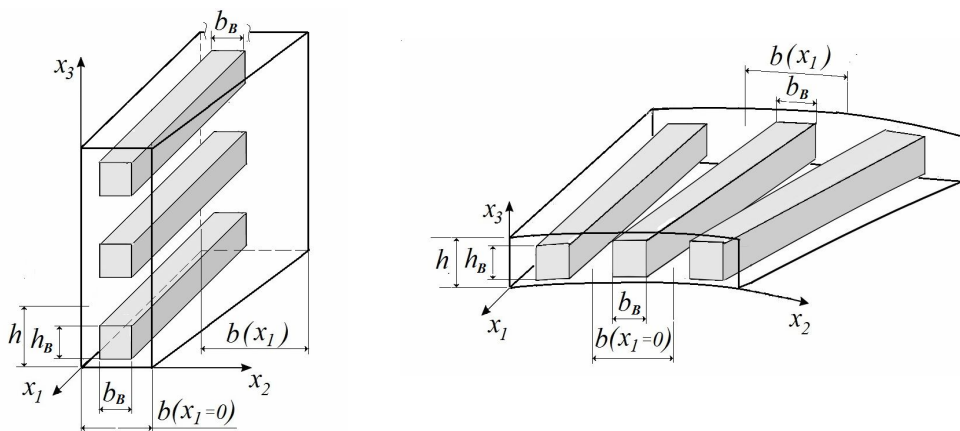


Рис. 1. Армований шар волокнистого КМ зі змінними геометричними розмірами

Матеріали волокон і матриці вважаються однорідними і ізотропними, їх деформації є малими і для опису деформування кожного з цих матеріалів застосовується закон Гука:

$$\sigma_{\alpha\alpha} = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{\alpha\alpha} + \mu \varepsilon_{(3-\alpha)(3-\alpha)}), \quad \sigma_{12} = \frac{E}{1+\mu} \varepsilon_{12}, \quad \alpha=1,2. \quad (1)$$

Матеріали волокна і матриці знаходяться в ідеальному контакті на межі поділу, локальні змінення напруженого стану там не урахуються. Матеріал волокон сприймає напруження стиску і розтягу, волокна розташовані регулярно. Для формалізації опису форма волокон прийнята прямокутною.

Площа поперечного перерізу шару в цілому є змінною: розміри поперечного перерізу характерного фрагменту шару композиту, що містить волокно – $b(x_1)$ і h , характерні розміри волокна – b_B і h_B .

Для опису напружено-деформованого стану композиту, в припущенні повного виконання умов сумісності деформацій на межі розділу волокно–матриця та відсутності розшарувань під час деформування, параметри, які використовуються при описі напружено-деформованого стану (зокрема напруження, деформації, модуль пружності, характеристики міцності) можуть бути подані у вигляді лінійної функції від об'ємної частки матеріалу волокон:

$$Y_{ij} = Y_{ijB} \psi + Y_{ijM} (1 - \psi), \quad (2)$$

де Y_{ij} – узагальнене позначення перелічених вище фізико-механічних характеристик або параметрів, що урахує їх прив'язку до вісей координат; «В» і «М» – індекси, як визначають належність характеристики або параметру матеріалу до волокна або матриці відповідно; ψ – об'ємна частка матеріалу волокна (параметр армування).

У випадку змінення щільності армування для опису питомої частки волокон в поперечному перерізі в двох напрямках можна ввести наступні величини:

$$\psi_2(x_1) = \frac{b_B}{b(x_1)}, \quad \psi_3 = \frac{h_B}{h}. \quad (3)$$

У випадку змінного поперечного перерізу шару в формулі (2) параметр ψ є пропорційним до $\psi_2(x_1)$. В свою чергу для ψ_2 можна записати:

$$\psi_2(x_1=0) = \frac{b_B}{b(x_1=0)}.$$

Тоді, з урахуванням (3)

$$\psi_2(x_1) = \psi_2(x_1=0) \frac{b(x_1=0)}{b(x_1)}. \quad (4)$$

Напружений стан шару КМ складної форми. Деформування армованого шару матеріалу КМ складної форми в цілому також вважається пружним і може бути описано законом Гука. Для умов плоского напруженого стану ($\sigma_{33} = 0$) в межах шару закон деформування можна подати у вигляді:

$$\{\sigma\} = [C^*] \{\varepsilon\}, \quad (5)$$

де $[C^*]$ – матриця жорсткості матеріалу для плоского напруженого стану, компоненти якої c_{ij} є функцією фізико-механічних характеристик матеріалів волокон і матриці та параметру армування:

$$[C^*] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 \\ c_{21} & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$\{\sigma\}$ і $\{\varepsilon\}$ – вектори-стовпці, які складаються з незалежних компонент тензора напружень і тензора деформацій для випадку плоского напруженого стану:

$$\{\sigma\} = \{\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \tau_{12}\}^T, \quad \{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{11} \quad \varepsilon_{22} \quad \gamma_{12}\}^T. \quad (7)$$

Індекси, використані у співвідношеннях (5)-(7) є прив'язаними до системи координат шару композитного матеріалу.

Зазначені напруження σ_{11} , σ_{22} і τ_{12} діють на бокових гранях фрагмента композиту, рівномірно розподілені по поверхнях граней, усереднені по ним та викликають середні лінійні та кутові деформації ε_{11} , ε_{22} і γ_{12} . Вважається, що односпрямований матеріал зазнає плоского напруженого стану. В термінах зазначених середніх деформацій і напружень закон Гука для КМ можна записати у вигляді:

$$\varepsilon_{11}=(\sigma_{11}/E_1)-\mu_{21}(\sigma_{22}/E_2); \quad \varepsilon_{22}=(\sigma_{22}/E_2)-\mu_{12}(\sigma_{11}/E_2); \quad \gamma_{12}=\tau_{12}/G_{12}. \quad (8)$$

де E_1 і E_2 – ефективні (усереднені) модулі пружності композиційного матеріалу вздовж і поперек волокон; G_{12} – ефективний модуль зсуву у площині шару; $\mu_{\alpha\beta}$ – ефективні коефіцієнти Пуассона, які визначають величину поперечної деформації в напрямку "β" від дії навантаження в напрямку "α".

У випадку розтягу в напрямі вісі x_1 для компонент напруженого стану шару внаслідок прийнятих припущень можна записати:

$$\sigma_{11}=\sigma_{11_B}\psi+\sigma_{11_M}(1-\psi),$$

Деформації в цьому ж напрямку будуть однакові:

$$\varepsilon_{11_B}=\varepsilon_{11_M}=\varepsilon_{11}.$$

Вважаючи в першому наближенні $\sigma_{11_B}=E_B\varepsilon_{11_B}$ і $\sigma_{11_M}=E_M\varepsilon_{11_M}$ та, в першому з рівнянь (8) $\mu_{21}=0$, отримаємо:

$$\sigma_{11}=[E_B\psi+E_M(1-\psi)]\varepsilon_{11}=E_1\varepsilon_{11},$$

де $E_1=E_B\psi+E_M(1-\psi)$.

Міркуючи аналогічним чином для випадку деформування поперек волокон можна отримати вираз для E_2 , а виконуючи розв'язок з урахуванням поперечних деформацій і ψ_3 – уточнені вирази ефективних модулів пружності та $\mu_{\alpha\beta}$. Підставляючи отримані таким чином вирази у закон Гука (5) можна виділити вирази для компонент матриці жорсткості КМ:

$$\begin{aligned} c_{11} &= \frac{(1-\psi_3)E_M}{1-\mu_M^2} + \psi_3 \left(\psi E_B + (1-\psi)E_M + \frac{[\psi\mu_M + (1-\psi)\mu_B]^2 E_M E_B}{\psi(1-\mu_B^2)E_M + (1-\psi)(1-\mu_M^2)E_B} \right), \\ c_{22} &= \frac{(1-\psi_3)E_M}{1-\mu_M^2} + \psi_3 \left(\frac{E_M E_B}{\psi(1-\mu_B^2)E_M + (1-\psi)(1-\mu_M^2)E_B} \right), \\ c_{12} = c_{21} &= \frac{(1-\psi_3)\mu_M E_M}{1-\mu_M^2} + \psi_3 \left(\frac{[\psi\mu_M + (1-\psi)\mu_B]^2 E_M E_B}{\psi(1-\mu_B^2)E_M + (1-\psi)(1-\mu_M^2)E_B} \right), \\ c_{33} &= \frac{(1-\psi_3)E_M}{(1+\mu_M)} + \psi_3 \left(\frac{E_M E_B}{(1-\psi)(1+\mu_M)E_B + \psi(1+\mu_B)E_M} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

В подальшому ці величини можуть бути використані для визначення ефективних характеристики багатошарового композиту:

$$E_{xx}=\overline{c_{11}}-(\overline{c_{12}})^2/\overline{c_{22}}, \quad E_{yy}=\overline{c_{22}}-(\overline{c_{12}})^2/\overline{c_{11}}, \quad G_{xy}=\overline{c_{66}}, \quad \mu_{xy}=\frac{\overline{c_{12}}}{\overline{c_{22}}}, \quad \mu_{yx}=\frac{\overline{c_{12}}}{\overline{c_{11}}}. \quad (10)$$

В останньому виразі $\overline{c_{ij}}$ є компонентами матриці жорсткості КМ у загальній системі координат x_{kz} , яка вводиться для опису фізико-механічних властивостей композиту в цілому. Їх обчислення здійснюється з урахуванням повороту на кут φ_k кожного з шарів k пакету відносно цієї системи координат x_{kz} , та товщин шарів, віднесених до загальної товщини пакету [1, 2, 4].

У випадку використання окремого шару як складової конструкції системи координат шару і загальна система координат збігається ($c_{ij} = c_{ij}$, $xyz \equiv x_1x_2x_3$).

Висновки. В даній статті отримані вирази для моделювання фізико-механічних характеристик окремого односпрямованим шару композитного матеріалу складної форми з змінним параметром армування вздовж одного з напрямів. Ці вирази можуть бути використані, зокрема, при проектуванні КМ із заданими властивостями та обчислення ефективних фізико-механічних характеристик композитного матеріалу, складеного з шарів складної форми.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Верецака С.М.* Механіка композиційних матеріалів. Навч. посібник – Суми, СумДУ, 2013. – 156 с.
2. *Долгов О.М.* Композиційні матеріали : *Електронний ресурс+ : навч. наоч. посіб. / О. М. Долгов, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2024. – 126 с.
3. *Kaw, Autar K.* Mechanics of composite materials / Autar K. Kaw. – 2nd ed. (Mechanical engineering ; v. 29) – Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – 457 p.
4. *Шукаєв С.М., Пискунов С.О., Мусієнко О.С.* Механіка композиційних матеріалів. Навч. посібник – Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 170 с.
5. *Морозов А.В.* Визначення ефективних пружних характеристик односпрямованого композитного матеріалу. – Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки, Том 31 (70) Ч. 1 № 2 2020. – С.44-51. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/07>.
6. *Kryshchuk, M., Shukayev, S., Rubashevskiy, V.* (2021). Modeling of Mechanical Properties of Composite Materials Under Different Types of Loads. In: Altenbach, H., Amabili, M., Mikhlin, Y.V. (eds) Nonlinear Mechanics of Complex Structures. Advanced Structured Materials, vol 157. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75890-5_3
7. *Shukaev S., Rubashevskiy V.* Effect of constructive parameters on tensile strength of 3D-printed PLA-graphite composite // ACTA TECHNICA NAPOCENSIS-Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING. – Vol.65. – 2022. – P.239-244.
8. *Бобир М.І.* Критерій граничного стану композиційних матеріалів // Mechanics and Advanced Technologies. – 2022. – Vol. 6, No. 3. – P.229-236.
9. *Карпов Я.С., Ставиченко В.Г.* Сравнительный анализ подходов к оценке прочности слоистых композиционных материалов // Проблемы прочности. – 2008, № 4. – С.36-42.
10. *Optimum stacking sequence design of composite materials Part II: Variable stiffness design Hossein Ghiasi *, Kazem Fayazbakhsh, Damiano Pasini, Larry Lessard – Compositr Structures. – 93, 2010 (1-13) – <https://www.sciencedirect.com/journal/composite-structures/>*

REFERENCES

1. *Vereshchaka S.M.* Mekhanika kompozytsiinykh materialiv. Navch.posibnyk [Mechanics of composite materials. Study guide] – Sumy, SumDU, 2013. – 156 s.
2. *Dolhov O. M.* Kompozytsiini materialy : *Elektronnyi resurs+ : navch. naoch. posib. [Composition materials: *Electronic resource. Study guide]/ O. M. Dolhov, Nats. tekhn. un-t «Dniprovskia politekhnika» – Dnipro : NTU «Dniprovskia politekhnika», 2024. – 126 s.
3. *Kaw, Autar K.* Mechanics of composite materials / Autar K. Kaw. – 2nd ed. (Mechanical engineering ; v. 29) – Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – 457 p.
4. *Shukaiev S.M., Pyskunov S.O., Musiienko O.S.* Mekhanika kompozytsiinykh materialiv. Navch.posibnyk [Mechanics of composite materials. Study guide] – Kyiv, KPI im.Ihoria Sikorskoho, 2024. – 170 s.
5. *Morozov A.V.* Vyznachennia efektyvnykh pruzhnykh kharakterystyk odnospriamovanoho kompozytnoho material [Determination of effective elastic characteristics of unidirectional composite material]. – Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Serii: tekhnichni nauky, Tom 31 (70) Ch. 1 № 2 2020. – S.44-51. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/07>.
6. *Kryshchuk, M., Shukayev, S., Rubashevskiy, V.* (2021). Modeling of Mechanical Properties of Composite Materials Under Different Types of Loads. In: Altenbach, H., Amabili, M., Mikhlin, Y.V. (eds) Nonlinear Mechanics of Complex Structures. Advanced Structured Materials, vol 157. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75890-5_3/
7. *Shukaev S., Rubashevskiy V.* Effect of constructive parameters on tensile strength of 3D-printed PLA-graphite composite // ACTA TECHNICA NAPOCENSIS-Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING. – Vol.65. – 2022. – P.239-244.
8. *Bobyry M.I.* Kryterii hranychnoho stanu kompozytsiinykh materialiv [Criterion of the limit state of composite materials] // Mechanics and Advanced Technologies. – 2022. – Vol. 6, No. 3. – P.229-236 [in Ukrainian].
9. *Karpov Ya.S., Stavychenko V.H.* Sravnytelnyi analiz podkhdov k otsenke prochnosti sloystykh kompozytsyonnykh materialov [Comparative analysis of approaches to assessing the strength of layered composite materials] // Strength of materials. – 2008, № 4. – PP.36-42. [in Russian].
10. *Optimum stacking sequence design of composite materials Part II: Variable stiffness design Hossein Ghiasi *, Kazem Fayazbakhsh, Damiano Pasini, Larry Lessard – Compositr Structures. – 93, 2010 (1-13) – <https://www.sciencedirect.com/journal/composite-structures/>*

Стаття надійшла до редакції 01.09.2024

Пискунов С.О., Бахтаваршоев Т.А.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АРМОВАНОГО ШАРУ КОМПОЗИТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

Однією з відмінних властивостей композитних матеріалів є їх анізотропія, що дозволяє, зокрема, максимально ефективно використовувати їх міцнісні властивості. Елементи конструкцій, які виготовляються з композитних матеріалів, з конструктивних міркувань та для забезпечення міцності можуть мати геометричну форму, яка характеризується зміною характерних геометричних розмірів вздовж певної координати. Це може призводити до збільшення відстані між волокнами, і, як наслідок, до зміння щільності армування вздовж однієї з координат. Це є характерним, наприклад при збільшенні довжини паралелі конічної оболонки по висоті при армуванні оболонки вздовж меридіану, або збільшення довжини кола сферичного поясу при його армуванні вздовж радіусу. Окремо можна виділити випадок прямокутних панелей (пластин або плит) змінної товщини. Для урахування впливу цих обставин на фізико-механічні характеристики шару введений змінний від характерної координати параметр армування, що характеризує об'ємну частку матеріалу волокна. Вважається, що матеріали волокна і матриці знаходяться в ідеальному контакті на межі поділу, локальні змінення напруженого стану там не ураховуються. Матеріал волокон сприймає напруження стиску і розтягу, волокна розташовані регулярно. Для формалізації опису форма волокон прийнята прямокутною. На основі цих положень отримані співвідношення для опису пружних властивостей шару односпрямованого волокнистого композитного матеріалу зі змінним коефіцієнтом армування в одному з характерних напрямів шару – компоненти матриці жорсткості ортотропного композиту, на основі яких в подальшому можуть бути визначені ефективні характеристики композитного матеріалу (модулі пружності і коефіцієнти Пуассона у напрямках вздовж і поперек волокон).

Ключові слова: композитні матеріали, шаруваті композити, механічні властивості, ефективний модуль пружності, анізотропія.

Pyskunov S.O., Bakhtavarshoev T.A.

MODELING OF THE ELASTIC PROPERTIES OF THE REINFORCED LAYER OF COMPOSITE ELEMENTS OF COMPLEX FORM STRUCTURES

One of the distinctive properties of composite materials is their anisotropy, which allows, in particular, to use their strength properties as efficiently as possible. Elements of structures that are made of composite materials, for structural reasons and to ensure strength, can have a geometric shape, which is characterized by a change in characteristic geometric dimensions along a certain coordinate. This can lead to an increase in the distance between the fibers, and, as a result, to a change in the reinforcement density along one of the coordinates. This is characteristic, for example, when increasing the length of the parallel of the conical shell in height when reinforcing the shell along the meridian, or increasing the length of the circle of the spherical belt when it is reinforced along the radius. The case of rectangular panels (plates or slabs) of variable thickness can be highlighted separately. In order to take into account the influence of these circumstances on the physical and mechanical characteristics of the layer, the variable reinforcement parameter characterizing the volume fraction of the fiber material is introduced from the characteristic coordinate. It is assumed that the fiber and matrix materials are in perfect contact at the separation boundary, local changes in the stress state are not taken into account there. The material of the fibers perceives compressive and tensile stresses, the fibers are arranged regularly. To formalize the description, the shape of the fibers is assumed to be rectangular. On the basis of these provisions, the relations for describing the elastic properties of a layer of a unidirectional fibrous composite material with a variable reinforcement ratio in one of the characteristic directions of the layer are obtained - the components of the stiffness matrix of the orthotropic composite, on the basis of which the effective characteristics of the composite material can be determined in the future (moduli of elasticity and Poisson's ratios in the directions along and across the fibers).

Key words: composite materials, layered composites, mechanical properties, effective modulus of elasticity, anisotropy.

УДК 539.4

Пискунов С.О., Бахтаваршоев Т.А. **Моделювання пружних властивостей армованого шару композитних елементів конструкцій складної форми** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2024. – Вип. 113. – С. 124-130.

Отримані співвідношення для опису пружних властивостей шару односпрямованого волокнистого композитного матеріалу зі змінним коефіцієнтом армування в одному з характерних напрямів шару. Розглядається ортотропний матеріал, пружне деформування складових матеріалу, визначення напруженого стану і механічних характеристик здійснено на основі правила сумішей.

Табл. 0. Іл. 1. Бібліогр. 10 назв.

UDC 539.4

Pyskunov S.O., Bakhtavarshoev T.A. **Modeling of elastic properties of the reinforced layer of composite elements of structures of complex shape** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-&-Technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2024. – Issue 113. – P. 124-130.

The relations for describing the elastic properties of a layer of unidirectional fibrous composite material with a variable reinforcement coefficient in one of the characteristic directions of the layer has been obtained. An orthotropic material is considered, the elastic deformation of the material components, the determination of the stress state and mechanical characteristics is carried out on the basis of the rule of mixtures.

Tabl. 0. Fig. 1. Ref. 10.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): професор, доктор технічних наук, завідувач кафедрою динаміки і міцності машин та опору матеріалів НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Пискунов Сергій Олегович.

Адреса: 03056 Україна, м. Київ, просп. Берестейський, 37, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, кафедра динаміки і міцності машин та опору матеріалів.

Мобільний тел.: +38(050) 962-66-14

E-mail: s.piskunov@kpi.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3987-0583>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): аспірант кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Бахтаваршоев Тимур Алігавхарович

Адреса: 03056 Україна, м. Київ, просп. Берестейський, 37, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, кафедра динаміки і міцності машин та опору матеріалів.

робочий тел.: +38(044) 204-95-35.

E-mail: timur22298@gmail.com