

УДК 669.017

**ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
БАГАТОШАРОВОГО КОМПОЗИТУ****І.В. Бельмас,**

д-р техн. наук, професор

О.І. Білоус,

канд. техн. наук, доцент

Г.І. Танцура,

канд. техн. наук, доцент

Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське

DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.426-440

Шляхом завдання показників плоского деформованого стану з використанням функції напружень, розроблено алгоритм визначення розподілів напружень та деформацій в композитному матеріалі з довільною кількістю та товщиною шарів з різних матеріалів. Алгоритм включає формування матриці коефіцієнтів та вектора вільних членів. Розв'язати системи рівнянь запропоновано методом аналогічним методу прогонки з прямим та зворотнім виконанням. Алгоритм прийнятний для одношарової конструкції, конструкції нижній шар безмежного товстий та для визначення напружень та просторових деформацій в окремому випадку навантаження композитного зразка з шарами квадратної форми. Показано суттєвий вплив механічних характеристик матеріалу шарів на напружено-деформований стан композитного матеріалу шаруватої побудови.

Ключові слова: композитний багатошаровий матеріал, механічні властивості матеріалу, напруження, переміщення, навантаження, функція напружень.

Постановка проблеми. Серед сучасних матеріалів особливе місце посідають композитні. Поєднання різних матеріалів дозволяє розробляти матеріали з комплексом різних властивостей, отримувати оптимальні конструкції. Багатошарові матеріали та конструкції широко вживаються в промисловості та будівництві. Так багатошаровими є гумотросові канати, конвеєрні стрічки, матеріали отриманні шляхом з'єднання шарів різних металів, наприклад, вибухом, наплавленням. Композитним є інструмент абразивної обробки матеріалів. Композитний і наплавлений твердими сплавами інструмент для металообробки. Багатошарові дорожні покриття. Багатошаровими є системи «фундаменти будівель, капітальних споруд - ґрунт з об'єктивно різними механічними властивостями його окремих шарів». Використовуються і природні матеріали що мають композитну шарувату побудову - деревина.

Урахування напруженого стану, деформації складових таких систем суттєво впливає на безпеку та ефективність використання конструкцій, споруд. Разом з тим метод визначення напружено-деформованого стану (НДС) багатошарових конструкцій з шарів різних товщин та різними їхніми механічними властивостями не розроблено. Розробка методу дозволить уточнити уяву про механізм взаємодії та деформування шарів, вплив властивостей матеріалу шарів на цей механізм, підвищити точність

визначення напружено-деформованого стану (НДС) багат шарових конструкцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класифікація та особливості використання композитних матеріалів в сучасному машинобудуванні та приладобудуванні наведені в дослідженні [1]. Волокнисті матеріали використовують як правило для сприйняття навантажень розтягу. За приклад можна привести гумотросовий канат. Волокна визначають міцність та жорсткість матеріалу вздовж волокон. Механічні властивості та механізм руйнування композитного матеріалу визначається трьома параметрами: міцністю волокон, міцністю матеріалу що їх з'єднує та міцністю адгезійного з'єднання складових композиту. Розриви неперервності волокон, як і тросів гумотросового канату, ведуть до зменшення його тягової спроможності.

Шляхом експериментального та чисельного моделювання в статті [2] досліджена міцність композитів зі стрижнів та вуглепластикових тонкостінних оболонок. Дисертація [3] присвячена експериментально-теоретичному аналізу полімерних композиційних оболонок зі склотканини й вуглетканини та з їх пошкодженнями. В статі [4], методами теорії пружності, із застосуванням критерію згасання крайового ефекту, чисельним методом, досліджено крайовий ефект в шаруватому композитному матеріалі з періодично повторюваним дефектом - тріщиною. В роботі [5] розглянуто вплив міцності з'єднання вибухом біметалевих смуг на їх експлуатаційні властивості. В статтях [6 - 8] деформування біметалевих конструкцій в тепловому полі. В роботах [9-14] досліджені деформації двошарових плит, балок на пружній основі, на основі Пастернака. Вплив розривів неперервності елементів армування гумотросових стрічок, канатів, включно, вантових на їх НДС розглянуто в роботах [15-23]. Можливість часткового відновлення тягової спроможності гумотросових канатів (стрічок) у разі поривів тросів обґрунтована в роботах [24, 25]. В [26] досліджено напружений стан з'єднання гумотросових стрічок. В цих роботах канат (стрічка) розглянута як система жорстких на розтяг, паралельних абсолютно жорстких на згин елементів з'єднаних матеріалом що сприймає лише напруження зсуву. Вплив параметрів гумотросового канату на крутильну жорсткість тіла намотки підйомної установки з бобінним органом, як багат шарової конструкції, досліджено в статті [27]. В роботі [28] для опису напружено-деформованого стану восьми вузловий криволінійний скінчений елемент з полінійним законом доповнення функцій переміщень. З використанням варіаційного методу отримано вирази варіацій енергій кінетичної та деформування скінчених елементів.

Аналіз відомих досліджень показав що шаруваті матеріали використовуються, як в конструкціях що деформуються в напрямках розташування шарів так і в напрямках нормальних до них, в машинобудуванні, приладобудуванні та в будівництві. Задача напруженого стану шаруватого матеріалу розглядається як плоска. Кількість шарів, як правило, не перевищує трьох. Матеріал шарів моделюється лінійно

пружним середовищем або в алгоритмі розв'язання задачі використовуються методи чисельного розрахунку. В перших, властивість матеріалів змінювати свій об'єм під дією зовнішніх впливів (коефіцієнт Пуассона) не враховується. Не вирішеною залишається задача розробки методу розрахунку НДС багат шарової композитної конструкції який би враховував усі механічні властивості матеріалу кожного з шарів. Другий підхід не дозволяє отримати аналітичний алгоритм, який би, не лише дозволяв отримати значення показників напружено-деформованого стану, а і дозволяв би більш глибоко розуміти механізм впливу геометричних та механічних параметрів складових композитного матеріалу на такий стан.

Формулювання мети статті. В межах задачі плоского деформування, на основі методів класичної лінійної теорії пружності, розробити алгоритм аналітичного визначення НДС багат шарового композитного матеріалу з шарами довільної кількості, незмінної товщини з урахуванням закріплення, механічних властивостей матеріалу шарів та характеру зовнішнього навантаження.

Викладення основного матеріалу. НДС пружного матеріалу можна задати функцією напружень φ (функцією Єрі). Показники НДС в прямокутній системі координат в такому випадку визначаються залежностями.

$$\begin{aligned} u_x &= -\frac{1}{2G} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z}, & u_y &= -\frac{1}{2G} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y \partial z}, & u_z &= \frac{1}{2G} \left(2(1-\mu) \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi, \\ X_x &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \varphi, & Y_y &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \varphi, & Y_x &= \frac{\partial^3 \varphi}{\partial x \partial y \partial z}, \\ Z_z &= \frac{\partial}{\partial z} \left((2-\mu) \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi, & Z_x &= \frac{\partial}{\partial x} \left((1-\mu) \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi, \\ & & Z_y &= \frac{\partial}{\partial y} \left((1-\mu) \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\nabla^2(\dots) = \frac{\partial^2 \dots}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dots}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \dots}{\partial z^2}$; G – модуль зсуву матеріалу.

Прийmemo наступну бігармонійну функцію напружень.

$$\begin{aligned} \varphi &= \sum_{m=1}^{\infty} \left(A_{mn} e^{\rho_{mn} z} + B_{mn} e^{-\rho_{mn} z} + C_{mn} e^{\rho_{mn} z} z + D_{mn} e^{-\rho_{mn} z} z \right) \times \\ &\times \left(R_{mn} \cos(\rho_{mo} x) \cos(\rho_{on} y) + \sin(\rho_{mo} x) \sin(\rho_{on} y) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

де m, n цілі числа; $\rho_{mn} = \pi \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}$; a, b – габаритні розміри в площині $z = \text{const}$ багат шарової конструкції; $A_{mn}, B_{mn}, C_{mn}, D_{mn}, R_{mn}$ – вектори значень невідомих коефіцієнтів.

Прийемо що композитна конструкція має N шарів. Надамо шарам номери ($1 \leq i \leq N$). Їх занесемо у нижні індекси величин які стосуються відповідних шарів. Товщини шарів, з урахуванням їх номерів будемо розглядати як вектор b_i . Аналогічно як вектор розглянемо координати площин взаємодії шарів z_i . Перший шар будемо вважати обмеженим площинами z_0 та z_1 , при цьому $z_0=0$, $z_1=b_1$. Значення координат інших площин

$$z_i = \sum_{j=1}^i b_j .$$

Прийнята форма напружень (2) у вигляді добутку співмножників, залежних від показникових та тригонометричних функцій, дозволяє незалежно від граничних по граням $z=const$ забезпечувати граничні умови деформування зразка по граням $x=a$, $y=b$. Вільні поверхні z_0 та z_N шарів, під дією зовнішніх чинників, можуть переміщатися в трьох ортогональних напрямках. Зовнішніми впливами можуть бути, або безпосередньо задані переміщення вздовж осей x , y , z , або навантаження що викликають такі переміщення (1). Кількість таких чинників шість. Векторів невідомих сталих у обраній функції. (2) чотири. Вказане обмежує можливість використання функції напружень (2). Скоротити кількість граничних умов можливо якщо переміщення u_x , u_y , або напруження Z_x , Z_y будуть дорівнювати нулю. Наведене дозволяє зробити висновок про можливість використання функції напружень (2) для визначення НДС одношарових товстих плит прямокутної форми, з розмірами сторін a та b спертих по периметру за вище згаданих зовнішніх впливів.

Поміж шарами в багатшаровому матеріалі не виникають зазори. Розраховані значення переміщень поверхонь адгезійного з'єднання кожної пари шарів (u_x , u_y , u_z) мають збігатися. Рівними мають бути напруження Z_x , Z_y , Z_z в матеріалах пар шарів в площинах взаємодії. Функція (2) може бути застосована якщо закономірності розподілу переміщень u_x , u_y та напружень Z_x , Z_y в напрямках осей будуть збігатися. Вказане можливе за умови $a=b$. Вона обов'язкова та недостатня. Зовнішнє навантаження має бути незмінним у разі заміни осі x на вісь y та навпаки. Це забезпечить відповідність розподілів напружень та деформацій в напрямках осей x та y і скоротить кількість умов. Воно, відповідно, дозволить використати функцію напружень в розв'язанні поставленої задачі.

Прийнята форма функції Ері може бути застосована і у випадку безмежно великого розміру сторін прямокутних плит (шарів) b (плоска деформація). За таких умов $\rho_{mn} \rightarrow \pi m a^{-1}$, а у функції (2) відсутні тригонометричні функції змінної y .

Таким чином можна виділити три варіанти для яких, за певних вище наведених умов, можливе визначення параметрів напружено-деформованих станів шарів композитного матеріалу з використанням функції напружень (2) за однаковим алгоритмом. Плита одношарова. Багатшарова конструкція з шарів квадратної форми в плані. Багатшарова

конструкція з шарів прямокутної в плані форми з безмежно великою однією зі сторін. Сформулюємо алгоритм на прикладі останнього випадку.

Переміщення та напруження за прийнятої функції (2) відповідно залежностям (1).

$$u_z = \frac{-1}{2G} \sum_{m=1}^{\infty} \left(\left(A_m e^{\rho_m z} + B_m e^{-\rho_m z} \right) \rho_m + \right. \\ \left. + C_m e^{\rho_m z} (4\mu + \rho_m z - 2) + D_m e^{-\rho_m z} (2 + \rho_m z - 4\mu) \right) \times \\ \times \rho_m (R_m \cos(\rho_m x) + \sin(\rho_m x)), \quad (3a)$$

$$u_x = \frac{-1}{2G} \sum_{m=1}^{\infty} \left(\left(A_m e^{\rho_m z} - B_m e^{-\rho_m z} \right) \rho_m + \right. \\ \left. + C_m e^{\rho_m z} (\rho_m z + 1) + D_m e^{-\rho_m z} (1 - \rho_m z) \right) \times \\ \times \rho_m (R_m \sin(\rho_m x) - \cos(\rho_m x)), \quad (3б)$$

$$Z_z = - \sum_{m=1}^{\infty} \left(\left(A_m e^{\rho_m z} - B_m e^{-\rho_m z} \right) \rho_m + \right. \\ \left. + C_m e^{\rho_m z} (2\mu - 1 + \rho_m z) + D_m e^{-\rho_m z} (2\mu - 1 - \rho_m z) \right) \times \\ \times \rho_m^2 (R_m \cos(\rho_m x) + \sin(\rho_m x)), \quad (3в)$$

$$X_x = - \sum_{m=1}^{\infty} \left(\left(A_m e^{\rho_m z} - B_m e^{-\rho_m z} \right) \rho_m + \right. \\ \left. + C_m e^{\rho_m z} (2\mu + 1 + \rho_m z) + D_m e^{-\rho_m z} (2\mu + 1 - \rho_m z) \right) \times \\ \times \rho_m^2 (R_m \sin(\rho_m x) - \cos(\rho_m x)), \quad (3г)$$

$$X_z = - \sum_{m=1}^{\infty} \left(\left(A_m e^{\rho_m z} + B_m e^{-\rho_m z} \right) \rho_m + \right. \\ \left. + C_m e^{\rho_m z} (2\mu + \rho_m z) + D_m e^{-\rho_m z} (\rho_m z - 2\mu) \right) \times \\ \times \rho_m^2 (R_m \sin(\rho_m x) - \cos(\rho_m x)). \quad (3 д)$$

Нехай можливі граничні умови (переміщення та сили) по поверхням z_0 та z_N задані рядами Фур'є

$$f(u_z) = \sum_{m=0}^{\infty} \eta_m \cos(\rho_m x) + \xi_m \sin(\rho_m x), \quad (4a)$$

$$f(u_x) = \sum_{m=0}^{\infty} \chi_m \cos(\rho_m x) + \delta_m \sin(\rho_m x), \quad (4б)$$

$$f(Z_z) = \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m \cos(\rho_m x) + \phi_m \sin(\rho_m x), \quad (4в)$$

$$f(X_z) = \sum_{m=0}^{\infty} \varphi_m \cos(\rho_m x) + \upsilon_m \sin(\rho_m x). \quad (4г)$$

Прийmemo що по граням усіх шарів паралельних осі z діють одні і ті самі граничні умови. Відповідно до умов визначення напружено-деформованих станів шарів композитного матеріалу, прирівняємо

переміщення або напруження (3) граничним умовам (4). Отримаємо $4m$ рівнянь з $8m$ невідомими якщо кількість шарів більша за одиницю. В протилежному випадку отримаємо $4m$ неоднорідних рівнянь з $4m$ невідомими. Окремо зауважмо що в отриманих рівняннях взаємозалежні лише рівняння з однаковими значеннями параметра m . Таким чином з $4m$ неоднорідних рівнянь з $4m$ невідомими отримаємо m систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Їх розв'язок визначає вектори невідомих коефіцієнтів та дозволяє визначити НДС одношарової плити.

Для визначення невідомих для багатошарового матеріалу $4m$ рівнянь, отриманих з умови навантаження (деформування) зовнішніх шарів доповнимо рівняннями взаємодії та сумісності деформування шарів. Для зручності розв'язання систем рівнянь систему сформуємо наступним чином. Пари рівнянь для поверхні z_0 для кожного m будемо вважати першими парами в кожній з таких m систем. Пари рівнянь для поверхні z_N - останніми.

Рівняння взаємодії шарів відтворюють наступні умови. Нерозривність усього композитного матеріалу під дією зовнішнього навантаження. Рівність сил дії одного шару силам протидії суміжного. Запишемо вказані умови взаємодії для довільних i -того та $i+1$ -ого та шарів:

$$\begin{aligned} \text{коли } 1 \leq i < N \quad u_z(i, z_i) = u_z(i+1, z_i), \quad u_x(i, z_i) = u_x(i+1, z_i), \\ X_z(i, z_i) = X_z(i+1, z_i), \quad Z_z(i, z_i) = Z_z(i+1, z_i). \end{aligned} \quad (5)$$

Умови сумісності (5) деформування додають ще $4m(N-1)$ однорідних рівнянь. Вони остаточно формують m систем лінійних алгебраїчних рівнянь порядку $4N$. До складу систем входять рівняння їх загальною кількістю невідомих не більших за вісім. Як наслідок, значна кількість співмножників (коефіцієнтів) невідомих систем рівнянь дорівнюють нулю. Матриці коефіцієнтів розріджені та структуровані. Вони, в основному, сформовані з блоків по чотири рядки з вісьмома елементами для кожного значення m . Елементи кожного наступного блоку зсунуті на чотири позиції в напрямі зростання номерів елементів в рядах. Вільні члени системи в кожному блоці дорівнюють нулю. Однотипність m матриць дозволяє розробити спільно для них алгоритм розрахунку.

Першому блоку в системі передують два рядки з чотирьох елементів – вони враховують граничні умови. Як мінімум один з двох перших вільних членів відмінний від нуля. Перші два рядки матриць дозволяють, методом Гауса, вилучити по чотири перших елементи з двох рівнянь суміжного блоку (з наступних чотирьох рядків). В процесі вилучення не менш ніж одному з вільних членів буде надане значення відмінне від нуля. До складу отриманих двох рівнянь (рядків матриці) входять по чотири елементи одних і тих самих стовбців.

З точки зору механіки, ці рівняння відтворюють взаємодію першого (навантаженого) шару з другим. І для другого шару їх можна вважати зовнішнім навантаженням. Відповідно, повторити цикл перетворень здійсних для першого шару. Отримати вирази впливу другого шару композиту на третій. Такі повтори перетворень для наступних груп

рівнянь (шарів матеріалу) аналогічні діям методу прогонки розв'язання стрічкових систем алгебраїчних рівнянь.

До останнього блоку рівнянь ввійдуть додатково дві пари рівнянь зовнішнього впливу на останній шар. Фактично, для кожного значення m отримаємо систему четвертого порядку неоднорідних лінійних алгебраїчних рівнянь з чотирма невідомими. Розв'язок рівнянь останнього блоку дозволяє знайти значення останніх чотирьох елементів вектору рішень системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Зворотню дією, як і в методі прогонки, визначити решту шуканих складових вектору невідомих функції напружень (2) для заданого m .

В згаданій функції u , відповідно, v та w залежних від неї, виразах показників НДС багат шарової конструкції параметр m має безмежно зростати. В практиці його значення обмежують інтервалом ($1 \leq m \leq M$). Величину M обирають з умови достатнього рівня точності шуканого рішення. В результаті розв'язання M систем визначають коефіцієнти бігармонійної функції напружень (2). Визначені коефіцієнти, як коефіцієнти виразів показників НДС багат шарового композитного матеріалу, визначають останній. Наведена послідовність і становить собою шуканий алгоритм.

Відзначимо, що в практиці, зокрема при розрахунках фундаментів, виникає потреба враховувати значну (безмежну) товщину останнього – N -того шару за якої безмежно зростають окремі складові функції напружень. Водночас, безмежне зростання координати z не може супроводжуватися безмежним зростанням переміщень матеріалу та напружень в ньому. Врахуємо вказане. У виразах показників НДС композитного матеріалу (3) для останнього шару приймемо $A_{Nm} = C_{Nm} = 0$. При цьому кількість рівнянь заданих виразами (5) – (10) за кожного значення m , зменшиться, як і кількість невідомих на два.

Нами, в якості прикладу, визначено НДС композитної конструкції – дво шарового композитного матеріалу ($N=2$) довжиною та товщиною в 1м ($a=1\text{м}$). Товщини шарів рівні. Модулі зсуву матеріалу шарів прийнято, відповідно, $G_1=10^4\text{МПа}$, та $G_2=10^3\text{МПа}$.

Розглянуто два випадки. У першому випадку коефіцієнти Пуассона матеріалу шарів прийняті відповідно рівними $\mu_1=0,5$ та $\mu_2=0$. В другому навпаки, $\mu_1=0$ та $\mu_2=0,5$. Кількість членів сум прийняли $M=14$. Краї шарів утримуються силами тертя такими що вони зафіксовані від переміщень в напрямку осі z . Перший шар по вільній поверхні навантажено нормальною рівномірно розподіленою силою в 1МПа на частині шару довжиною в $0,5\text{м}$ симетрично його середини. На вільну поверхню другого шару зовнішні сили не діють – усі коефіцієнти функцій можливих зовнішніх чинників (4), окрім ϕ_m , прийняті рівними нулю.

На рис. 1 наведено розподіл нормальних напружень в перерізах матеріалу шарів вздовж осі x з різними значеннями координати z .

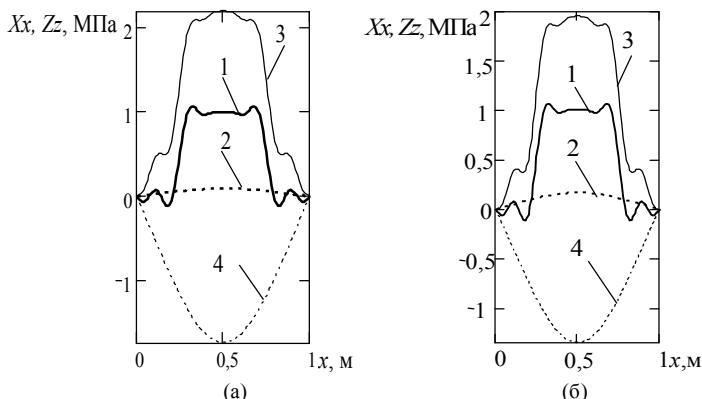


Рис. 1 Розподіли вздовж осі x нормальних навантажень та напружень Zz , Xx в матеріалі першого шару

На рис. 3(а) подано результати розрахунків для першого випадку ($\mu_1=0,5$ та $\mu_2=0$), на рис. 3(б) для другого ($\mu_1=0$ та $\mu_2=0,5$). На обох зображеннях криві 1 відтворюють розподіл прикладеного до вільної поверхні першого шару матеріалу навантаження Zz . Криві 2, 4 ілюструють розподіли напружень Zz та Xx по поверхні взаємодії шарів, Криві 3 відтворюють нормальні напруження Xx на вільній поверхні першого шару. Форма кривої 1 свідчить про достатньо високий рівень відповідності дійсної та заданої, обмеженою кількістю складових, форми зовнішнього навантаження.

Якісно розподіли нормальних напружень Xx в обох випадках збігаються. Спостерігається відмінність в кількісних показниках – в показниках що впливають на показники міцності композитної конструкції. По товщині плити напруження Zz суттєво зменшуються (криві 2). В другому випадку ($\mu_1=0$ та $\mu_2=0,5$) амплітуда зміни обох нормальних напружень дещо менша.

Під дією зовнішнього навантаження в зразку виникають нормальні ортогонально спрямовані напруження Xx . Максимальні їх значення, практично вдвічі, перевищують максимальні значення прикладених. Напруження Xx по поверхні взаємодії плит (крива 4) від'ємне.

Прийнята схема закріплення композита не накладає обмежень на переміщення матеріалу плити в напрямі осі x . Симетрично розподілені, нормальні напруження Xx призводять до асиметричного переміщення масивів матеріалу плити - від середини ($x=a/2$) до країв ($x=0$) або ($x=a$) (рис. 2). На рис. 2 позначення зображень (а) і (б) та кривих, зображених на них, відповідають прийнятим для рис. 1(а) і рис. 1(б).

Якісно характери переміщень для різних значень коефіцієнта Пуассона, як і нормальних напружень, збігаються. Амплітуди переміщень для випадку наведеному на рис. 2(б) ($\mu_1=0$ та $\mu_2=0,5$) більші. Залежність деформацій від коефіцієнта Пуассона матеріалів шарів свідчить про вплив останнього на жорсткість композитної конструкції.

Внаслідок симетрії розподілу нормальних напружень X_x переміщення вздовж осі x , відносно середини ($x=a/2$), косиметричні (криві 3, 4). Відношення нормальних напружень X_x в матеріалах першого та другого шарів на межі їх взаємодії в першому випадку (рис. 2(a)) перевищує співвідношення модулів пружності. Зі зменшенням коефіцієнта Пуассона матеріалу першого шару та його зростання для матеріалу другого, співвідношення зменшується.

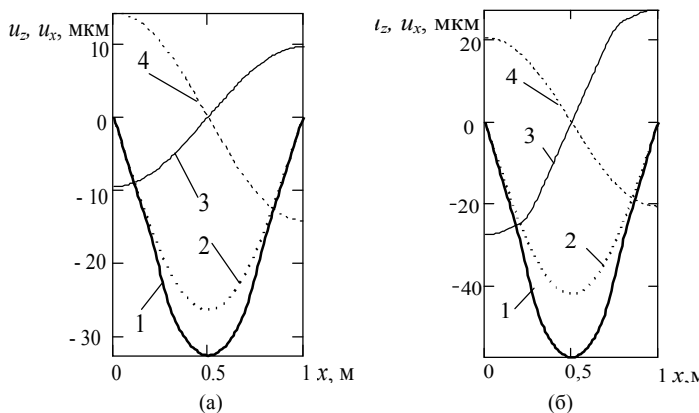


Рис. 2. Розподіл вздовж осі x переміщень u_z, u_x поверхонь першої плити

Не змінними залишається перераховані особливості НДС розглянутої конструкції за відсутності другого шару, включно, з безмежним зростанням товщини першого. Разом з тим, в одношаровій конструкції, розподіли нормальних напружень не залежать від значень коефіцієнта Пуассона матеріалу $\bar{\nu}_x$ значення перевищують значення вказаних напружень в першому шарі в інтервалі можливих значень коефіцієнта Пуассону. Деформація навантаженої поверхні шару найбільші при коефіцієнті Пуассона матеріалу навантаженого шару рівному нулю. Вони перевищують переміщення навантажених поверхонь інших випадках, включно і в двошаровій конструкції.

Загалом, наведені результати свідчать про суттєвий вплив властивостей матеріалу шарів, зокрема коефіцієнта Пуассона, на НДС шаруватого композиту. Відповідно, урахування властивостей матеріалу шарів в алгоритмі розрахунку НДС шаруватого композитного матеріалу дозволяє підвищити точність розрахунків.

Висновки. Шаруваті матеріали широко використовуються в машинобудуванні, приладобудуванні та в будівництві. Задача розробки методу розрахунку НДС багатшарової композитної конструкції який би враховував механічні характеристики матеріалу кожного з шарів актуальна. В межах задачі плоского деформування, з використанням функції напружень лінійної теорії пружності, розроблено алгоритм аналітичного визначення НДС багатшарового композитного матеріалу з шарами незмінної товщини та рівної довжин. Він може бути використаний

для розрахунку просторового НДС композитної конструкції квадратної в плані форми навантаженої нормальною рівновіддаленою від країв конструкції силою або має відповідне переміщення вказаної поверхні. Алгоритм комплексно враховує. Механічні властивості матеріалу шарів, їх кількість, геометричні параметри, характер закріплення, навантаження композитного зразка. Він дозволяє визначати НДС композитного матеріалу, включно і одношарового, останній шар якого має безмежну товщину. Встановлено характер впливу коефіцієнту Пуассона на НДС шаруватого композиту. Якісний характер розподілів напружень та переміщень матеріалу в межах шару не залежать від його значень. Амплітуда змін напружень та переміщень по товщині шару зростає зі зменшенням коефіцієнта. В одношаровій конструкції при плоскому деформуванні нормальні напруження не залежать від значень коефіцієнта Пуассона матеріалу. Їх значення перевищують значення вказаних напружень в першому шарі двошарового матеріалу не залежно від значень коефіцієнта Пуассону. Деформації навантаженої поверхні шару найбільші за коефіцієнту Пуассона матеріалу навантаженого шару рівному нулю. Вони перевищують переміщення навантажених поверхонь двошарової конструкції та одношарової безмежної товщини за більшого згаданого коефіцієнту матеріалу з якого вони виготовлені.

Результати отримані з використанням розробленого алгоритму можна, в межах лінійної постановки, вважати достатньо достовірними тому що вони отримані на основі класичних методів лінійної теорії пружності, шляхом розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь рівноваги та сумісного деформування шарів під впливом зовнішнього навантаження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Рогов В.А., Шкарупа М.И., Велис А.К.* Классификация композиционных материалов и их роль в современном машиностроении. - Вестник РУДН, серия Инженерные исследования, 2012, N2. с 41-49.
2. *Антонов Ф.К.* Экспериментальное и численное моделирование космического рефлектора на основе композитных стержней// Решетневские чтения. –№1., Выпуск 18. –2014. –с. 45-46.
3. *Бондар Н.В.* Міцність авіаційних оболонок із композитів з урахуванням робочого середовища та експлуатаційного пошкодження. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.07.02 –Проектування, виробництво та випробування літальних апаратів. – Національний авіаційний університет МОН України, Київ, 2019. 154 с.
4. *Бистров В.М., Декрет В.А., Зеленський В.С.* Крайовий ефект у шаруватому композитному матеріалі при недосконалому контакті між шарами. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. - 2021 № 33, с.5-16.
5. *Загорянский В.Г.* Влияние прочности соединения и температуры на способность к изгибу биметаллических полос, полученных плакированием взрывом. - Научный вестник ДГМА.№2(17Е), 2015.с. 46-53.
6. *Глазюков В.В., Маркин А.А., Пашинов С.В.* Биметаллическая пластина в однородном температурном поле. - Механика композиционных материалов и конструкций. Том 23 №3 2017 с. 331-343.
7. *Бардин Т., Дробенко Б.* Напружено-деформований стан контактних біметалевих термоперетворювачів. - Сучасні проблеми термомеханіки – 2021 збірник наукових праць Міжнародної наукової конференції та міні – симпозіумів / Львів Інститут прикладних

- проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України . 15 – 17 вересня 2021 р., Львів, Україна – 2021. – 215 С. 39-40.
8. *Ванкевич Т.* Моделювання розрахунку інформативних параметрів біметалевих контактних термоперетворювачів. - Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп’ютерні науки та інформаційні технології” 2012. № 732. с.31-35.
 9. *Барменкова Е.В., Андреев В.А.* Изгиб двухслойной балки на упругом основании с учетом массовых сил и деформаций сдвига. - Вестник МГСУ. 2010. №3. с. 87-93.
 10. *Гаджиев М.А., Бабанов В.В., Гусейнов Я.И.* Решение задачи Буссинеса и его применение для балок на упругом основании однодольного случая неоднородности по глубине. - Научно-технический и производственный журнал. Жилищное строительство. 2013, №5, с. 55 – 57.
 11. *Козел А.Г.* Математическая модель деформирования круговой трехслойной пластины на основании Пастернака. - Проблемы физики, математики и техники, 2017, № 1 (30), С. 42–46.
 12. *Потапов В.Д.* К вопросу о расчете балок на нелокально упругом основании. - Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2014, № 4 с. 63-68
 13. *Старовойтов Э.И., Козел А.Г.* Напряженно-деформированное состояние трехслойной круговой пластины, связанной со сложным основанием. - Компьютерное моделирование: анализ, управление, оптимизация, 2018, №2. с.73-80.
 14. *Карнаухова Г.С.* Розрахунок будівельних конструкцій круглих плит на змінній пружній основі: дис. канд. техн. наук : 05.23.01 - Будівельні конструкції, будівлі та споруди / Одеська державна академія будівництва та архітектури. Одеса, 2021. 208 с.
 15. *Колосов Л.В., Бельмас И.В.* Исследование прочностных характеристик образцов поврежденных резинотросовых лент. - Известия вузов. Горный журнал. - 1990, N 8, с.81-84.
 16. *Колосов Л.В., Бельмас И.В.* Экспериментальные исследования агрегатной прочности РТЛ. Известия вузов. Горный журнал. - 1991, N 1, с.85-87.
 17. *Бельмас И.В.* Напряженное состояние резинотросовой ленты при произвольном повреждении тросов. - Проблемы прочности и надежности машин 1993, N6 с. 45-48
 18. *Волоховский В.Ю., Радин В.П., Рудяк М.Б.* Концентрация усилий в тросах и несущая способность резинотросовых конвейерных лент с повреждениями. - Вестник МЭИ №5, 2010, стр. 5-12.
 19. *Belmas I., Kolosov D.* The stress-strain state of the stepped rubber-rope cable in bobbin of winding. Technical and Geoinformationel Sitems in Mining. Taylor & Francis Group, London, UK 2011 с. 211-214
 20. *Ponay V.A.* Шахтные уравнивающие канаты: монография / А.В. Попай. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2016. – 263 с.
 21. *Belmas I., Kolosov D., Kolosov O., Onyshchenko S.* Stress-strain state of a conveyor belt with cables of different rigidity and their breakages (Напряжено-деформований стан конвеєрної стрічки з тросами різної жорсткості та з ушкодженнями). Fundamental and applied researches in practice of leading scientific schools Volume 26, Number 2, 2018 p 231-236
 22. *Колосов Д.Л., Білоус О.І., Гуров І.А.* Міцність відновленої гумотросової стрічки. Математичні проблеми технічної механіки та прикладної математики – 2019. Міжнародна наукова конференція. Матеріали конференції Дніпро, Кам’янське -2019 – с. 126-127.
 23. *Belmas I.V., Bilous O.I., Tansura G.I., Shvachka A.V., Gupalo U.Yu.* Research of a static cable rope with a break of a cable. Опір матеріалів і теорія споруд/Strength of Materials and Theory of Structures. 2022. № 108 p. 349 – 359.
 24. *Belmas I., Kolosov D., Onyshchenko S., Bobylova I.* Partial restoration of tractive ability of rubber-cable tractive element with damaged cable base (Часткове відновлення тягової здатності гумотросового тягового елемента з пошкодженою тросовою основою) Збірник наукових праць національного гірничого університету 2020 №60. с. 196-206
 25. *Бельмас І.В., Колосов Д.Л., Чечель Т.О., Воробйова О.М., Черниш О.М.* Вплив зміни в часі механічних властивостей гуми на напружений стан гумотросового тягового органа з ушкодженням тросом. - Збірник наукових праць національного гірничого університету 2020 №61. с. 149-155
 26. *Танцур Г.І.* Гнучкі тягові органи. Стикові з’єднання конвеєрних стрічок. – Дніпродзержинськ: ДДГУ, 2010 - 127 с.
 27. *Zabolotnyi, K.S., Panchenko, O.V., Zhupiiiev, O.L., & Polushyna, M.V.* (2018). Influence of parameters of a rubber-rope cable on the torsional stiffness of the body of the winding (Вплив параметрів гумотросового канату на крутильну жорсткість тіла намотки). Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. (5), 54–63. DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/11.

28. Гондляр О.В., Онопрієнко В.Ю., Нікітін Р.С. Эволюция напряжено-деформованого стану обладнання та захисних конструкцій аес з урахуванням зон руйнування від впливу сейсмічних навантажень. - Вісник НТУ "ХПІ". 2014. №26(1069). С.45-51.

REFERENCES

1. Rogov V.A., Shkarupa M.I., Velis A.K. Klassifikatsiya kompozitsionnykh materialov i ih rol v sovremennom mashinostroenii (Classification of composite materials and their role in modern engineering). Bulletin of PFUR (People's Friendship University of Russia), series Engineering studies, 2012, № 2. pp. 41-49.
2. Antonov F.K. Eksperimentalnoe i chislennoe modelirovanie kosmicheskogo reflektora na osnove kompozitnykh stержnev (Experimental and numerical modeling of a space reflector based on composite rods) // Reshetnev readings. – № 1, Issue 18. – 2014. - p. 45-46.
3. Bondar N.V. Mitsnist aviatsiynykh obolonok iz kompozitiv z urakhuvanniam robochoho seredovyscha ta ekspluatatsiinoho poshkodzhennia (The strength of aircraft shells made of composites taking into account the working environment and operational damage. Dissertation for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 07.05.02) – Design, production and testing of aircraft. - National Aviation University of the Ministry of Education and Culture of Ukraine, Kyiv, 2019. - 154 p.
4. Bystrov V.M., Decret V.A., Zelenskyi V.S. Kraiovyi efekt u sharuvatomu kompozytnomu materialy pry nedoskonalomu kontakti mizh sharamy (Edge effect in layered composite material with imperfect contact between layers). - Problems of computational mechanics and strength of structures 2021 № 33. - p.5-16.
5. Zagoryansky V.G. Vliyanie prochnosti soedineniya i temperatury na sposobnost k izgibu bimetallicheskih polos, poluchennykh plakirovaniem vzryivom (Effect of joint strength and temperature on the ability to bend bimetallic strips obtained by explosion plating). - Scientific Bulletin of the DSMBA (Donbas State Machine-Building Academy). № 2(17E), 2015. p. 46-53.
6. Glagolev V.V., Markin A.A., Pashinov S.V. Bimetallicheskaya plastina v odnorodnom temperaturnom pole (A bimetallic plate in a uniform temperature field). - Mechanics of composite materials and structures. Volume 23. № 3, 2017. - p. 331-343.
7. Bardyn T., Drobenko B. Napruzhenno-deformovanyi stan kontaktnykh bimetalnykh termoperetvoriuvachiv (Stress-strain state of contact bimetallic heat exchangers). - Modern problems of thermomechanics - 2021 collection of scientific papers of the International scientific conference and mini-symposia / Lviv Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics named after Ya. S. Pidstrychacha of the National Academy of Sciences of Ukraine. September 15-17, 2021, Lviv, Ukraine - 2021. - 215 pp. 39-40.
8. Vankevich T. Modeliuvannya rozrakhunku informatyvnykh parametriv bimetalnykh kontaktnykh termoperetvoriuvachiv (Modeling of the calculation of informative parameters of bimetallic contact heat exchangers). - Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" "Computer Sciences and Information Technologies" 2012. № 732. p.31-35.
9. Barmenkova E.V., Andreev V.A. Izgib dvuhslonnoy balki na uprugom osnovanii s uchedom massovykh sil i deformatsiy sdviga (Bending of a two-layer beam on an elastic foundation, taking into account mass forces and shear deformations). - Bulletin of MSCU (Moscow State Construction University). 2010. № 3. p.p. 87-93.
10. Gadzhiev M.A., Babanov V.V., Huseynov Y.I. Reshenie zadachi Bussineska i ego primenenie dlya balok na uprugom osnovanii odnogo sluchaya neodnorodnosti po glubine (The solution of the Boussinesq problem and its application to beams on an elastic foundation in the uniform case of depth inhomogeneity). - Scientific, technical and production journal. Housing construction. 2013, № 5, p. 55-57.
11. Kozel A.G. Matematicheskaya model deformirovaniya krugovoy trehsloynnoy plastiny na osnovanii Pasternaka (Mathematical model of deformation of a circular three-layer plate based on Pasternak. Problems of physics, mathematics and technology, 2017, № 1 (30), 42-46.
12. Potapov V.D. K voprosu o raschete balok na nelokalno uprugom osnovanii (To the question of the calculation of beams on a non-locally elastic foundation). - Building mechanics of engineering structures and construction, 2014, № 4, p. 63-68.
13. Starovoitov E.I., Kozel A.G. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie trehsloynnoy krugovoy plastiny, svyazannoy so slozhnyim osnovaniem (Stress-deformed state of a three-layer circular plate connected to a complex base). - Computer modeling: analysis, management, optimization, 2018, № 2. pp. 73-80.

14. *Karnaukhova G.S.* Rozrakhunok budivelnykh konstrukttsii kruhlykh plyt na zminnii pruzhnii osnovi: dys. kand. tekhn. nauk : 05.23.01 (Calculation of building structures of round slabs on a variable elastic base: dissertation. candidate technical Sciences: 05.23.01). - Construction structures, buildings and structures / Odesa State Academy of Construction and Architecture. Odesa, 2021. 208 p.
15. *Kolosov L.V., Belmas I.V.* Issledovanie prochnostnykh karakteristik obraztsov povrezhdennykh rezinotrosovykh lent (Investigation of the strength characteristics of samples of damaged rubber rope tapes). - News of universities. Mountain magazine. - 1990, № 8, pp. 81-84.
16. *Kolosov L.V., Belmas I.V.* Issledovanie prochnostnykh karakteristik obraztsov povrezhdennykh rezinotrosovykh lent (Experimental studies of aggregate strength of rubber cable tape). - News of universities. Mountain magazine. - 1991, № 1, pp. 85-87.
17. *Belmas I.V.* Napryazhennoe sostoyanie rezinotrosovoy lentyi pri proizvolnom povrezhdenii trosov (The stressed state of the rubber cord belt in case of arbitrary damage to the cables). - Problems of Strength and Reliability of Machines 1993, №6 p. 45-48.
18. *Volokhovskiy V.Yu., Radin V.P., Rudyak M.B.* Kонтсentratsiya usilyi v trosah i nesuschaya sposobnost rezinotrosovykh konveyernykh lent s povrezhdeniyami (Concentration of efforts in ropes and bearing capacity of damaged rubber cord conveyor belts). - MPEI Bulletin No. 5, 2010, pp. 5-12.
19. *Belmas I., Kolosov D.* The stress-strain state of the stepped rubber-rope cable in bobbin of winding. Technical and Geoinformationel Sіstems in Mining. Taylor & Francis Group, London, UK 2011 c. 211-214
20. *Ropai V.A.* Mine balancing ropes: monograph / A.V. Rope. - Dnepropetrovsk: National Mining University, 2016. -- 263 p.
21. *Belmas I., Kolosov D., Kolosov O., Onyshchenko S.* Stress-strain state of a conveyor belt with cables of different rigidity and their breakages.. Fundamental and applied researches in practice of leading scientific schools Volume 26, Number 2, 2018 p 231-236
22. *Kolosov D.L., Bilous O.I., Gurov. I.A.* Mitsnist vidnovlenoi humotrosovoi strichky. Matematychni problemy tekhnichnoi mekhaniky ta prykladnoi matematyky – 2019. (The technique of the updated rubber-rope cable. Mathematical Problems of Technical Mechanics and Applied Mathematics – 2019). - International Science Conference. Materials of the conference. Dnipro, Kam'yanske -2019 - s.126-127.
23. *Belmas I.V., Bilous O.I., Tansura G.I., Shvachka A.V., Gupalo U.Yu.* Research of a static cable rope with a break of a cable. Strength of Materials and Theory of Structures. 2022. № 108 p. 349 – 359.
24. *Belmas I., Kolosov D., Onyshchenko S., Bobylova I.* Partial restoration of tractive ability of rubber-cable tractive element with damaged cable base Збірник наукових праць національного гірничого університету 2020 №60. c. 196-206.
25. *Belmas I.V., Kolosov D.L., Chechel T.O., Vorobjova O.M., Chernish O.M.* Vplyv zminy v chasi mekhanichnykh vlastyivostei humy na napruzhenyi stan humotrosovoho tiahovoho orhana z ushkodzhenym trosom (Infusion of change in the hours of mechanical power of gumi on the stresses of the mill of the gumotrovoy traction body with a cable lug). - Collection of Science Practices of the National University of Economics 2020 №61. With. 149-155
26. *Tansura G.I.* Hnuchki tiahovi orhany. Stykovi ziednannia konveyernykh strichok (Flexible traction bodies. Butt joints of conveyor belts). - Dniprodzerzhinsk: DDTU, 2010 – 127 p.
27. *Zabolotnyi, K.S., Panchenko, O.V., Zhupitiev, O.L., & Polushyna, M.V.* (2018). Influence of parameters of a rubber-rope cable on the torsional stiffness of the body of the winding. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. (5), 54□63. DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/11.
28. *Gondlyakh O.V., Onoprienko V.Yu., Nikitin R.E.* Evoliutsiia napruzhenno-deformovanoho stanu obladnannia ta zakhysnykh konstrukttsii aes z urakhuvanniam zon ruinuvannia vid vplyvu seismichnykh navantazhen (Evolution of the stress-strain state of equipment and protective structures of nuclear power plants taking into account the zones of destruction due to the influence of seismic loads). - Visnyk NTU "KhPI". 2014. № 26(1069). P.45-51.

Стаття надійшла 28.10.2022

Бельмас І.В., Білоус О.І., Танцура Г.І.

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАГАТОШАРОВОГО КОМПЗИТУ

В лінійній постановці розроблено алгоритм аналітичного визначення та досліджено окремий випадок визначення напружено-деформованого стану багатошарового композитного матеріалу. Алгоритм базується на використанні функції напружень (Ері) та на залежності усіх показників напружено-деформованого стану матеріалу кожного шару від її форми. наведені можливі зовнішні чинники що впливають на композитну конструкцію. Для загального випадку побудови композитної конструкції, сформована послідовність складення матриці коефіцієнтів та вектору вільних членів системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Розв'язок системи алгебраїчних рівнянь запропоновано здійснювати методом аналогічним методу прогонки але для блоків з чотирьох рівнянь доповнених двома рівняннями впливу попереднього в розрахунку шару. В результаті виконання дій подібних прямій та зворотній прогонці, отримати вектори значень коефіцієнтів вирізів показників напружено-деформованого стану матеріалу усіх шарів, як складових сум. Доведена прийнятність алгоритму для визначення напружень та просторових деформацій в окремому випадку навантаження композитного зразка з шарами квадратної форми. Показана можливість використання алгоритму для випадку значної (безмежно великої) товщини найвіддаленішого від навантаженого шару композитної конструкції та одношарового (монолітного) матеріалу. Встановлено наступне. Характери розподілу нормальних напружень та переміщень навантаженому шарі двошарового композитного матеріалу. Вони якісно збігаються за різних значень коефіцієнтів Пуассона матеріалів шарів. Амплітуда зніми напружень та переміщення по товщині навантаженого шару зростає зі зменшенням коефіцієнта Пуассона. Відношення екстремальних значень нормальних напружень в матеріалі навантаженого шару залежить не лише від співвідношень модулів зсуву або модулів поздовжньої пружності, а і від співвідношення значень коефіцієнтів Пуассона матеріалів шарів.

Ключові слова: композитний багатошаровий матеріал, механічні властивості матеріалу, напруження, переміщення, навантаження, функція напружень.

Belmas I.V., Bilous O.I., Tantsura A.I.

DETERMINATION OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF A MULTILAYER COMPOSITE

An analytical determination algorithm was developed in the linear formulation, and a particular case of determining the stress-deformed state of a multilayer composite material was investigated. The algorithm is based on the use of the stress function (Ery) and the dependence of all indicators of the stress-deformed state of the material of each layer on its shape. Possible external factors affecting the composite structure are given. For the general case of building a composite structure, the sequence of adding the matrix of coefficients and the vector of free members of the system of linear algebraic equations is formed. The solution of the system of algebraic equations is proposed to be carried out by a method similar to the pre-race method, but for blocks of four equations supplemented by two equations of the influence of the previous layer in the calculation. As a result of actions similar to direct and reverse pre-race, we will obtain vectors of coefficient values of expressions of indicators of the stress-deformed state of the material of all layers as component sums.

The acceptability of the algorithm for determining stresses and spatial deformations in a separate case of loading a composite sample with square layers is proven. The possibility of using the algorithm for the case of a significant (infinitely large) thickness the farthest from the loaded layer of the composite structure and single-layer (monolithic) material is shown. The following is established: characteristics of the distribution of normal stresses and displacements in the loaded layer of a two-layer composite material. They qualitatively coincide for different values of the Poisson coefficients of the layer materials. The amplitude of stress relief and displacements across the thickness of the loaded layer increases with a decrease in Poisson's ratio. The ratio of extreme values of normal stresses in the material of the loaded layer depends not only on the ratio of the shear moduli or the longitudinal elasticity moduli but also on the ratio of the values of the Poisson coefficients of the materials of the layers.

Key words: composite multilayer material, mechanical properties of the material, stress, displacement, load, stress function.

УДК 622.673

Бельмас І.В., Білоус О.І., Танцура Г.І. Визначення напружено-деформованого стану багатoshарового композиту // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА. 2022. – Вип. 109. – С. 426-440.

Розглядається алгоритм визначення напружено-деформованого стану багатoshарового композитного матеріалу.

Табл. 0. Іл. 2. Бібліогр. 28 назв.

UDC 622.673

Belmas I.V., Bilous O.I., Tantsura H.I. Determination of the stress-deformed state of a multilayer composite // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA. 2022. – Issue 109. – P. 426-440.

The algorithm for determining the stress-deformed state of a multilayer composite material is considered.

Tabl. 0. Fig. 2. Ref. 28.

УДК 622.673

Бельмас І.В., Белоус Е.И., Танцура А.И. Определение напряженно-деформованного состояния многослойного композита // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУСА. 2022. – Вип. 109. – С. 426-440.

Рассматривается алгоритм определения напряженно-деформованного состояния многослойного композитного материала.

Табл. 0. Ил. 2. Библиогр. 28 назв.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування та зварювання

Адреса робоча: 51900, м. Кам'янське, вул. Дніпробудівська, 2, ДВНЗ «Дніпровський державний технічний університет», БЕЛЬМАС Іван Васильович

Мобільний тел.:+38098 5412812

E-mail: belmas09@meta.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2112-0303>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, Секретар механічного факультету, доцент кафедри галузеве машинобудування

Адреса робоча: 51900, м. Кам'янське, вул. Дніпробудівська, 2, ДВНЗ «Дніпровський державний технічний університет», БІЛОУС Олена Іванівна

Мобільний тел.:+380978786830

E-mail: bilouselena66@gmail.com

ORCIDID: <http://orcid.org/0000-0001-6398-8843>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування та зварювання

Адреса робоча: 51900, м. Кам'янське, вул. Дніпробудівська, 2, ДВНЗ «Дніпровський державний технічний університет», ТАНЦУРА Ганна Іванівна

Мобільний тел.: +380971939382

E-mail: hannaivan71@gmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8672-1153>