

## ТОПОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ СИМЕТРИЧНОГО КЛЕЙОВОГО З'ЄДНАННЯ ВНАПУСК

С.С. КУРЕННОВ

**Анотація.** Розглянуто задачу оптимізації профілю шарів, що з'єднані внапуск за допомогою проміжного клейового шару. З'єднання оцінюється за моделлю Фолькерсена, згідно з якою несучі шарі розглядаються як стрижні, які працюють лише на стискання–розтягування, а клейовий шар працює лише на зсув. Метою оптимізації є проектування конструкції з'єднання мінімальної маси за умов виконання обмежень на міцність клейового шару та мінімально припустиму товщину несучих шарів. Профіль несучих шарів описано за допомогою розкладання в ряд Фур'є. Пряму задачу зі знаходження напруженого стану з'єднання стрижнів перемінної товщини розв'язано за допомогою методу скінченних різниць. Задачу оптимізації зведено до пошуку коефіцієнтів ряду Фур'є та довжини з'єднання. Застосовано генетичний алгоритм оптимізації. Розв'язано модельну задачу.

**Ключові слова:** тришарова конструкція, топологічна оптимізація, генетичний алгоритм.

### ВСТУП

Клейові з'єднання внапуск є невід'ємною частиною сучасних композитних конструкцій. Поширеність їх застосування зумовлена такими якостями, як мала маса, технологічність, герметичність, висока аеродинамічна ефективність тощо. Але відомим недоліком з'єднань внапуск є концентрація напружень у клейовому шарі біля кінців з'єднання [1–4]. З метою підвищення міцності з'єднань та зниження концентрації напружень застосовуються певні конструктивні заходи, такі як утворення напливу з надлишків клею на краю склейки, створення фасок на кінцях з'єднаних шарів, застосування функціонально-градієнтних клеїв, уведення у з'єднання поперечних та поздовжніх силових елементів тощо [5]. Зазвичай проектування з'єднання зводиться до пошуку оптимальної довжини склейки за умов постійних за довжиною конструкції пружних та геометричних параметрів шарів. Одним з ефективних заходів зі зниження концентрації напружень у клейовому шарі є застосування з'єднань зі змінною товщиною шарів, з'єднань «на вус». Застосування сучасних адитивних технологій, таких як 3D друк, дозволяє надавати елементам конструкції будь-якої складної форми. Це ставить перед проектувальниками нові завдання, такі як топологічна та структурна оптимізація конструкцій, тобто пошук не одного певного параметра оптимізації, а невідомої функції, яка описує геометрію конструкції або її внутрішню структуру. Але навіть у двовимірній постановці такі задачі наштовхуються на труднощі, зумовлені надвеликою розмірністю задачі [6, 7]. Крім того, отримані результати можуть бути неприйнятними з технологічних, конструктивних або інших міркувань, які не враховано під час постановки задачі [8]. У цій ситуації перспективним напрямом може стати поєднання класичних матема-

тичних моделей стрижнів, балок та пластин і методу дискретизації конструкції з методами оптимізації на основі генетичних еволюційних алгоритмів. Це дозволяє зменшити розмірність задачі без суттєвих утрат у точності математичної моделі.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Схему з'єднання внапуск показано на рис. 1.

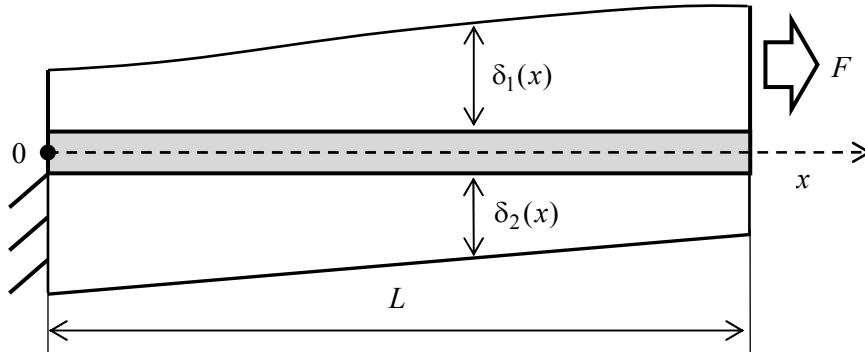


Рис. 1. Схema з'єднання внапуск

Товщина несучих шарів  $\delta_1(x)$  і  $\delta_2(x)$ , товщина з'єднувального шару постійна за довжиною з'єднання і дорівнює  $\delta_0$ . Довжина з'єднання  $L$ . Перший шар навантажено поздовжнім зусиллям  $F$ .

Вважаємо, що матеріали обох несучих шарів однакові. Оскільки за моделлю Фолькерсена [1, 4] несучі шари розглядаються як стрижні, які працюють тільки на розтягування–стискання, то із симетрії крайових умов для шарів впливає симетрія товщини несучих шарів, тобто  $\delta_1(x) = \delta_2(L - x)$ .

Розглянемо диференціальний елемент з'єднання, який показано на рис. 2.

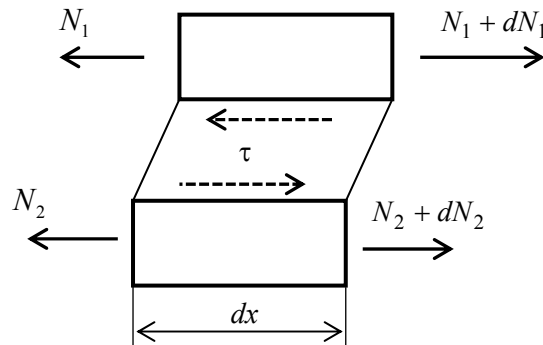


Рис. 2. Рівновага диференціального елемента з'єднання

У несучих шарах діють поздовжні зусилля  $N_1$  і  $N_2$ ; дотичні напруження у клейовому шарі позначимо через  $\tau$ . Будемо вважати, що дотичні напруження постійні за товщиною клейового шару. Рівняння рівноваги несучих шарів мають вигляд

$$\frac{dN_1}{dx} - \tau = 0, \quad \frac{dN_2}{dx} + \tau = 0. \quad (1)$$

З іншого боку,  $N_i = \delta_i \sigma_i = \delta_i E_i \frac{dU_i}{dx}$ , де  $i = 1, 2$ ;  $\sigma_i$  — нормальні напруження у відповідному шарі;  $E_i$  — модуль пружності відповідного шару;  $U_i$  — поздовжні переміщення шару  $i$ .

Дотичні напруження у клейовому шарі пропорційні різниці поздовжніх переміщень несучих шарів [1]:

$$\tau = P(U_1 - U_2), \quad (2)$$

де  $P = \frac{G_0}{\delta_0}$  — жорсткість клейового шару на зсув;  $G_0$  — модуль зсуву клею;  $\delta_0$  — товщина клейового шару.

Диференціюючи рівняння (2) та застосовуючи очевидне рівняння  $N_1 + N_2 = F$ , отримуємо рівняння

$$\frac{d^2 N_1}{dx^2} - P \left( \frac{1}{E_1 \delta_1(x)} + \frac{1}{E_1 \delta_1(x)} \right) N_1 = -\frac{PF}{E_2} \frac{1}{\delta_2(x)} \quad (3)$$

із крайовими умовами  $N_1(0) = 0$  і  $N_1(L) = F$ .

Зауважимо, що у випадку постійної товщини несучих шарів рівняння (3) має відомий аналітичний розв'язок [1]. Але навіть за умов лінійного розподілу товщини за довжиною з'єднання це рівняння аналітичних розв'язків немає. Тому для знаходження напруженого стану з'єднань зі змінними параметрами застосовуються числові методи, зокрема метод скінченних різниць [9, 10].

Задачу оптимізації можна сформулювати таким чином: необхідно знайти такий розподіл товщини несучого шару  $\delta_1(x)$  та довжину з'єднання  $L$ , за яких маса з'єднання (з точністю до постійного множника) досягає мінімуму

$$V = \int_0^L \delta_1(x) dx \rightarrow \min$$

і виконується умова міцності з'єднання

$$\tau(x) = \frac{dN_1}{dx} \leq \tau_{\max}.$$

На невідому товщину  $\delta_1(x)$  також накладено умову  $\delta_1(x) \geq \delta_{\min}$ , яка є наслідком технології виробництва. Товщина другого несучого шару  $\delta_2(x)$  знаходиться із  $\delta_1(x)$  автоматично завдяки симетрії конструкції, і тому в задачу не входить. Дотичні напруження у клеї знаходимо з рівняння (1) як похідну від нормальних зусиль  $N_1$ , які, у свою чергу, залежать від невідомої товщини  $\delta_1(x)$  через диференціальне рівняння (3).

## ПОБУДОВА РОЗВ'ЯЗКУ

Для розв'язання задачі застосуємо дискретизацію області  $x \in [0; L]$ , для чого розіб'ємо її на  $N + 1$  вузлових точок  $x_k$  з нумерацією від 0 до  $N$  на кін-

цях відрізка  $x=0$  і  $x=L$ . Застосувавши п'ятиточковий скінченно-різницевий шаблон, рівняння (3) запишемо у вигляді

$$-n_{k-2}^{(1)} + 16n_{k-1}^{(1)} - \alpha_k n_k^{(1)} + 16n_{k+1}^{(1)} - n_{k+2}^{(1)} = -\frac{12h^2 F}{E_2} \frac{P}{\delta_k^{(2)}}, \quad (4)$$

де  $n_k^{(1)} = N^{(1)}(x_k)$ ;  $h = \frac{L}{N}$  — шаг дискретизації;  $\delta_k^{(i)} = \delta^{(i)}(x_k)$ ,

$$\alpha_k = 12P_k h^2 \left( \frac{1}{E_2 \delta_k^{(2)}} + \frac{1}{E_1 \delta_k^{(1)}} \right) + 30; \quad k = 0, 1, \dots, N.$$

Із крайових умов випливає  $n_0^{(1)} = 0$  і  $n_N^{(1)} = F$ , а також  $n_{-1}^{(1)} = -n_1^{(1)}$ ,  $n_{-2}^{(1)} = -n_2^{(1)}$ ,  $n_{N-1}^{(1)} = -n_{N+1}^{(1)}$ ,  $n_{N-2}^{(1)} = -n_{N+2}^{(1)}$ . Це дозволяє звести задачу зі знаходження зусиль у вузлових точках за відомою товщиною несучих шарів  $\delta_k^{(i)}$  до системи лінійних рівнянь.

Відповідно до рівняння (1) маємо

$$\tau_k = \frac{n_{k-2}^{(1)} - 8n_{k-1}^{(1)} + 8n_{k+1}^{(1)} - n_{k+2}^{(1)}}{12h}. \quad (5)$$

Для пошуку оптимальних значень товщини несучих шарів у вузлових точках застосовуємо метод генетичної оптимізації. Для цього можна взяти за шукані змінні  $\delta_k^{(i)}$ . Але, якщо товщина несучих шарів у сусідніх точках суттєво відрізняється (що може трапитися внаслідок мутацій), то розв'язок системи (4) та дотичні напруження у клейовому шарі (5) мають неправдоподібний характер (модель напруженого стану втрачає адекватність). Тому доцільно шукати  $\delta_k^{(i)}$  серед функцій, які мають певну гладкість. Це впливає також з тих міркувань, що шуканий розподіл товщини за довжиною з'єднання найімовірніше буде описуватися гладкою функцією, або функцією лише з кількома кутовими точками. Тому запропоновано застосувати для опису форми несучих шарів ряд Фур'є за косинусами на інтервалі  $\xi \in [0; 1]$ :

$$y(\xi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^M a_n \cos \pi n \xi. \quad (6)$$

Якщо розбити інтервал  $\xi \in [0; 1]$ , як і інтервал  $x \in [0; L]$ , на  $N+1$  вузлових точок  $\xi_k$ , то можна описати форму першого несучого шару за допомогою довжини  $L$  та товщини у вузлових точках  $\delta_k^{(1)}$ , які можна розрахувати за допомогою рівняння (6) як

$$\delta_k^{(1)} = y(\xi_k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^M a_n \cos \pi n \xi_k. \quad (7)$$

При цьому  $\delta_k^{(2)} = \delta_{N-k}^{(1)}$ .

Форма (7) зручна для знаходження маси несучого шару

$$V = \int_0^L \delta_1(x) dx = \frac{a_0}{2} L. \quad (8)$$

Щільність матеріалу у формулі (8) вважаємо рівною одиниці, оскільки конкретне значення щільності не впливає на результат оптимізації. Застосування саме косинусів у формулі (7) має перевагу над синусами завдяки тому, що у даному випадку на кінцях інтервалу, у точках  $\xi = 0$  і  $\xi = 1$ , значення функції може відрізнятись від нуля і набувати будь-якого значення, на відміну від розкладання в ряд Фур'є за синусами.

Таким чином, невідомими параметрами, які необхідно знайти в результаті оптимізації, є довжина з'єднання  $L$  та набір коефіцієнтів  $a_0, a_1, \dots, a_M$ , які описують зміну товщини несучого шару вздовж з'єднання.

Для реалізації генетичного алгоритму необхідно створити фітнес-функцію, яка б давала змогу ранжувати різні розв'язки (особини) за якістю і наближеністю до оптимуму. Вочевидь ця функція має містити масу (площу) конструкції (8) та штрафи за перевищення напружень у клейовому шарі максимально припустимих значень  $\tau_{\max}$ , а також за те, що товщина несучого шару менша за мінімально припустиму  $\delta_{\min}$ . Таким чином, можемо, наприклад, фітнес-функцію записати у такій формі:

$$\Phi = L \frac{a_0}{2} + \begin{cases} Z_1 \frac{\max_k(|\tau_k|)}{\tau_{\max}}, & \max_k(|\tau_k|) > \tau_{\max}; \\ 0, & \max_k(|\tau_k|) \leq \tau_{\max}; \end{cases} + \begin{cases} Z_2 \frac{\delta_{\min}}{\min_k(\delta_k)}, & \min_k(\delta_k) < \delta_{\min}; \\ 0, & \min_k(\delta_k) \geq \delta_{\min}. \end{cases} \quad (9)$$

Тут  $Z_1$  і  $Z_2$  — великі числа, які визначають величину штрафу за вихід розв'язку у неприпустиму область;  $\max_k(|\tau_k|)$  — максимальні значення абсолютних значень дотичних напружень у клейовому шарі за всіма вузловими точками у ділянці склеювання (5);  $\min_k(\delta_k)$  — мінімальна товщина несучого шару за всіма вузлами у ділянці склеювання.

Таким чином, якщо розв'язок (набір  $L$  та  $a_0, a_1, \dots, a_M$ ) є припустимим, то фітнес-функція (9) дорівнює площі несучого шару (8). Але якщо напруження у клейовому шарі хоча б в одній вузловій точці перевищують припустимі, або (та) товщина несучого шару хоча б в одній вузловій точці менша за припустиму, то до площі додаються ще штрафні доданки. Таким чином, для розв'язання задачі оптимізації необхідно знайти такий набір  $L$  та  $a_0, a_1, \dots, a_M$ , який мінімізує функцію (9).

Для розв'язання поставленої задачі оптимізації застосуємо генетичний алгоритм [11, 12], який складається з таких етапів:

1. Побудова початкової популяції векторів  $\vec{h}^{(j)}$ , де  $j = 1, \dots, N_g$  ( $N_g$  — кількість особин у популяції). Кожен вектор (особина) містить компоненти  $L^{(j)}$  та  $a_0^{(j)}, a_1^{(j)}, \dots, a_M^{(j)}$ .

2. За даними наборами параметрів обчислення відповідних значень  $\Phi_j = \Phi(\vec{h}^{(j)})$  за формулою (9). Для цього необхідно за значеннями коефіцієнтів  $a_0^{(j)}, a_1^{(j)}, \dots, a_M^{(j)}$  і  $L^{(j)}$  знайти товщини несучих шарів у вузлових точках та шаг дискретизації  $h^{(j)} = L^{(j)} N^{-1}$ , розв'язати пряму задачу зі знахо-

дження поздовжніх зусиль у першому несучому шарі (4), і знайдені результати застосувати для знаходження дотичних напружень у клейовому шарі (5).

3. *Селекція.* Ранжуємо наявні в популяції вектори  $\vec{h}^{(j)}$  згідно з відповідними значеннями фітнес-функції  $\Phi_j$ .

4. Відбір з популяції  $2k$  (де  $2k < N_g$ ) елементів  $\vec{h}^{(j)}$ . Імовірність потрапляння у вибірку може залежати або від номера в ранжованому списку або від значень  $\Phi_j$ . Необхідно, щоб у вибірку потрапляли найкращі особини  $\vec{h}^{(j)}$  з популяції, які мають менші значення фітнес-функції.

5. *Вибір батьків.* Розбиваємо  $2k$  відібраних особин на пари і отримуємо  $k$  пар батьків.

6. *Схрещування.* Випадковим чином обираємо для кожної нової особини параметрів  $L^{(j)}$  та  $a_0^{(j)}, a_1^{(j)}, \dots, a_M^{(j)}$  з обох батьківських особин. У результаті даної операції отримуємо популяцію  $k$  нових особин.

7. *Мутація.* У реалізованій версії алгоритму мутації відбуваються лише з деякою невеликою часткою компонентів векторів  $\vec{h}^{(j)}$  особин, які виникли в результаті схрещування. Мутація полягає в зміні значень компонентів вектора на деяке незначне відхилення. Величина випадкового відхилення може описуватися, наприклад, розподілом Гауса з нульовим математичним сподіванням, а значення дисперсії бути пропорційною абсолютному значенню коефіцієнта  $a_n$ . Тобто більші за абсолютним значенням коефіцієнти Фур'є мутують з більшою дисперсією, а менші — з меншою. Якщо коефіцієнт  $a_n$  дорівнює нулю, то внаслідок мутацій середньоквадратичне відхилення набуває певного фіксованого значення  $\sigma_0$ .

8. Після внесення змін до генного коду нащадки повертаються в основну популяцію, яка збільшується з  $N_g$  до  $N_g + k$  особин. Після цього особини знову ранжуються за значеннями фітнес-функції  $\Phi_j$  і  $k$  гірших особин вилучаються з популяції.

9. *Перевірка критерію зупину.* Якщо критерію зупину (наприклад, задана кількість циклів розмноження  $K$ ) не досягнуто — повернення до пункту 4.

## МОДЕЛЬНА ЗАДАЧА

Розглянемо приклад застосування запропонованої методики для проектування з'єднання. Беремо такі параметри  $E_1 = E_2 = 70$  ГПа,  $G_0 = 0,8$  ГПа,  $\delta_0 = 0,1$  мм, мінімальна припустима товщина несучого шару  $\delta_{\min} = 0,7$  мм, максимальні припустимі дотичні напруження у клейовому шарі  $\tau_{\max} = 25$  МПа. З'єднання, навантажене зусиллям  $F = 500$  кН/м. Нехай кількість особин у популяції  $N_g = 50$ . Для розв'язання задачі зі знаходження напруженого стану з'єднання обрано  $N = 50$  точок дискретизації. Для опису функції зміни товщини несучих шарів за довжиною з'єднання застосовано  $M = 30$

членів ряду Фур'є. У початковій популяції довжину з'єднання взято однаковою у всіх особин  $L = 50$  мм, а розподіл товщини за довжиною з'єднання — лінійним, за яким товщина першого шару змінюється від випадкових значень товщини: від 0,7–3 мм при  $x = 0$  до 3 мм при  $x = L$ . Кількість особин, обраних для схрещування, —  $2k = 16$ . Імовірність мутації довжини з'єднання та мутації коефіцієнтів  $a_n$  беремо 0,2. Середньоквадратичне відхилення за мутацій довжини з'єднання  $\sigma = 0,1$  мм коефіцієнт варіації за мутацій коефіцієнтів  $a_n$  становив  $c_v = 0,005$  і фіксований доданок  $\sigma_0 = 10^{-8}$ . Кількість циклів  $K = 25000$ . Для більшої точності виконано 10 таких еволюційних моделювань, а отримані результати (довжину з'єднання і товщину несучих шарів у вузлових точках) осереднено. Знайдена оптимальна довжина з'єднання  $L = 41,3$  мм. Результати достатньо стабільні — середньоквадратичне відхилення за 10 числовими експериментами становить 0,8 мм.

Графіки оптимальної товщини шарів зображено на рис. 3.

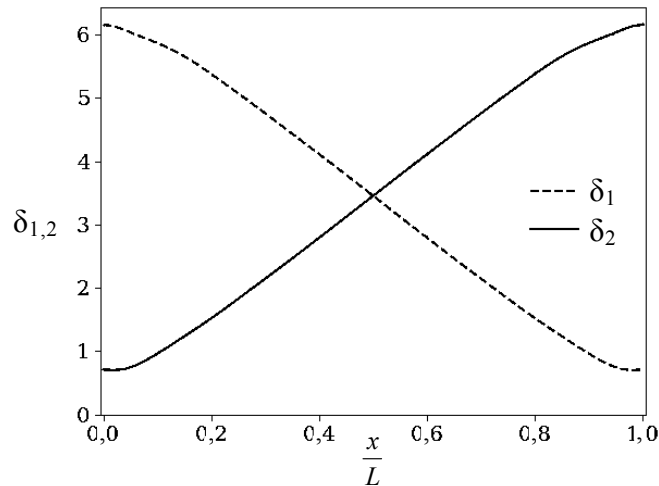


Рис. 3. Оптимальна товщина несучих шарів у мм

Відповідні дотичні напруження у клейовому шарі показано на рис. 4.

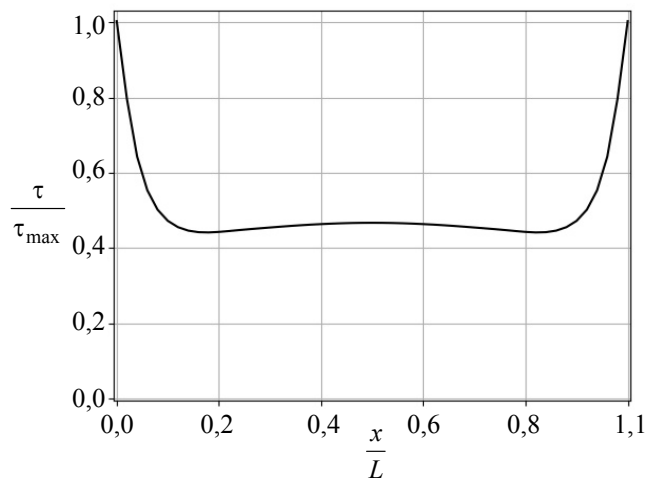


Рис. 4. Дотичні напруження у клейовому шарі

Як видно з графіків, у результаті оптимізації товщина навантажених кінців несучих шарів збільшилась більше ніж удвічі порівняно з відповідними значеннями у початковій популяції і перевищує 6 мм. Ненавантажені кінці мають мінімально припустиму за умовами задачі товщину 0,7 мм. На більшій частині довжини з'єднання товщина змінюється за лінійним законом. Дотичні напруження у клейовому шарі також на більшій частині довжини з'єднання постійні, хоча біля кінців з'єднання спостерігається концентрація напружень.

## ВИСНОВКИ

1. Запропоновано методику оптимізації форми клейового з'єднання внапуск, яка забезпечує мінімум маси конструкції. Методика ґрунтується на спільному застосуванні класичних моделей механіки і методу скінченних різниць з генетичними алгоритмами оптимізації.

2. Завдяки гнучкості еволюційних алгоритмів оптимізації не складає труднощів розвинути запропонований підхід на більш точні математичні моделі з'єднань, які враховують вигин конструкції і напруження відриву у клейовому шарі, а також на інші задачі, які можуть бути зведені до одновимірних [3, 13, 14].

3. У фітнес-функцію може бути додані додаткові члени, які враховують міцність несучих шарів, обмеження на величину переміщень та більш складні критерії міцності клейового шару [2].

4. Перехід від неперервних змінних до дискретних дозволяє розв'язувати задачі оптимізації не тільки для клейових з'єднань внапуск, але і для багаторядних болтових з'єднань та комбінованих клеєболтових.

5. Подальший розвиток запропонованої методики розв'язання задач топологічної оптимізації, яка основана на поєднанні методу скінченних різниць та генетичних алгоритмів, можна також спрямувати на розв'язання двовимірних задач оптимізації шаруватих конструкцій [15–19].

Якщо умови задачі такі, що припустимий розв'язок не існує (наприклад, завелике навантаження  $F$ ), то, призначивши у рівняння (9)  $Z_2 > Z_1$  у результаті оптимізації отримуємо розв'язок, який можна реалізувати фізично ( $\delta_k^{(1)} \geq \delta_{\min}$ ), але який лише мінімізує напруження у з'єднанні, утім не забезпечує виконання умови міцності з'єднання.

## ЛІТЕРАТУРА

1. L.F.M.da Silva, P.J.C. das Neves, R.D. Adams, and J.K. Spelt, "Analytical models of adhesively bonded joints. Part I: Literature survey", *Int. Journal Adhes. & Adhesiv.*, vol. 29, pp. 319–330, 2009. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2008.06.005.
2. S.S.Kurenнов, "Refined Mathematical Model of the Stress State of Adhesive Lap Joint: Experimental Determination of the Adhesive Layer Strength Criterion", *Strength Mater.*, vol. 52, pp. 779–789, 2020. doi: 10.1007/s11223-020-00231-5.
3. S.S. Kurenнов, K.P. Barakhov, and A.G. Poliakov, "Stressed State of the Axisymmetric Adhesive Joint of Two Cylindrical Shells under Axial Tension", *Materials Science Forum*, vol. 968, pp. 519–527, 2019. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.968.519.



4. E.H. Wong and J. Liu, "Interface and interconnection stresses in electronic assemblies – A critical review of analytical solutions", *Microelectronics Reliability*, vol. 79, pp. 206–220, 2017. doi: 10.1016/j.microrel.2017.03.010.
5. J. Kupski and S. Teixeira de Freitas, "Design of adhesively bonded lap joints with laminated CFRP adherends: Review, challenges and new opportunities for aerospace structures", *Composite Structures*, vol. 268, 113923, 2021. doi:10.1016/j.compstruct.2021.113923.
6. R.H. Kaye and M. Heller, "Through-thickness shape optimisation of bonded repairs and lap joints", *Int. Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 22, pp. 7–21, 2002.
7. R.Q. Rodríguez, R. Picelli, P. Sollero, and R. Pavanello, "Structural shape optimization of bonded joints using the ESO method and a honeycomb-like mesh", *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 28:14-15, pp. 1451–1466, 2014. doi: 10.1080/01694243.2012.698112.
8. H. Ejaz, A. Mubashar, I.A. Ashcroft, E. Uddin, and M. Khan, "Topology Optimisation of Adhesive Joints Using Non-Parametric Methods", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 81, pp. 1–10, 2018. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2017.11.00.
9. F. Thamm, "Stress Distribution in Lap Joints With Partially Thinned Adherends", *The Journal of Adhesion*, vol. 7:4, pp. 301–309, 1976. doi: 10.1080/00218467608075061.
10. Y.S. Karpov, "Jointing of high-loaded composite structural components. Part 2. Modeling of stress-strain state", *Strength Mater*, vol. 38, pp. 481–491, 2006. doi: 10.1007/s11223-006-0067-9.
11. V. Sineglazov, K. Riazanovskiy, and O. Chumachenko, "Multicriteria conditional optimization based on genetic algorithms", *System Research and Information Technologies*, no. 3, pp. 89–104, 2020. doi: 10.20535/SRIT.2308-8893.2020.3.07.
12. Y. Bodyanskiy, A. Shafronenko, and I. Pliss, "Credibilistic fuzzy clustering based on evolutionary method of crazy cats", *System Research and Information Technologies*, no. 3, pp. 110–119, 2021. doi: 10.20535/SRIT.2308-8893.2021.3.09.
13. S. Kurennov, N. Smetankina, V. Pavlikov, D. Dvoretzkaya, and V. Radchenko, "Mathematical Model of the Stress State of the Antenna Radome Joint with the Load-Bearing Edging of the Skin Cutout", *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2021. ICoRSE 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 305, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-83368-8\_28.
14. K. Barakhov, D. Dvoretzka, and O. Poliakov, "One-Dimensional Axisymmetric Model of the Stress State of the Adhesive Joint", *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 188, pp. 310–319, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-66717-7\_26.
15. A. Kondratiev and V. Gaidachuk, "Weight-based optimization of sandwich shelled composite structures with a honeycomb filler", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1(1), pp. 24–33, 2019. doi: 10.15587/1729-4061.2019.15492.
16. L. Tong and X. Sun, "Shape optimization of bonded patch to cylindrical shell structures", *International journal for numerical methods in engineering*, vol. 58, pp. 793–820, 2003. doi: 10.1002/nme.802.
17. C.H. Wang and A.J. Gunnion, "Optimum shapes of scarf repairs", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40(9), pp. 1407–1418, 2009. doi: 10.1016/j.compositesa.2009.02.009.
18. S.S. Kurennov, O.G. Polyakov, and K.P. Barakhov, "Two-Dimensional Stressed State of an Adhesive Joint. Nonclassical Problem", *Journal of Mathematical Sciences*, vol. 254(1), pp. 156–163, 2021. doi: 10.1007/s10958-021-05295-5.
19. S.S. Kurennov, "Determining Stresses in an Adhesive Joint with a Longitudinal Unadhered Region Using a Simplified Two-Dimensional Theory", *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 60(4), pp. 740–747, 2019. doi: 10.1134/s0021894419040199.

Надійшла 24.01.2022

**INFORMATION ON THE ARTICLE**

**Sergey S. Kurennov**, ORCID: 0000-0002-3835-3288, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Ukraine, e-mail: kurennov.ss@gmail.com

**TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF A SYMMETRIC SINGLE-LAP ADHESIVE JOINT / S.S. Kurennov**

**Abstract.** The profile optimization problem for layers overlapped with an interjacent adhesive layer is considered. The joint is considered according to the Volkersen model, according to which the base layers are considered as rods that act only in stress-strain, and the adhesive layer acts only in shear. The aim of the optimization is to design a joint structure of minimum mass under the strength restrictions for the adhesive layer and the minimally allowable base layer thickness. The base layers profile is described by a Fourier series expansion. The direct stress state problem for the joint of variable thickness rods is solved by the finite difference method. The optimization problem is reduced to the problem of determining Fourier series coefficients and the joint length. A genetic optimization algorithm was used. The model problem is solved.

**Keywords:** three layer construction, topological optimization, genetic algorithm.