

Оцінка напруженого стану клейових з'єднань на основі одновимірної дискретної моделі

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

В тонкостінних конструкціях клейовим способом можуть з'єднуватися деталі постійної або змінної товщини, що сприймають стискаючі або розтягуючі зусилля в комбінації зі зсувом або без нього. У типових адгезійних з'єднаннях клейовий шар, забезпечуючи передачу зусиль між деталями, працює в умовах складного напружено-деформованого стану – в елементарному об'ємі клею діють усі шість компонентів напружень, які змінюються по довжині, ширині та товщині клейового шару. Складність аналітичної оцінки такого тривимірного напруженого стану зумовила появу ряду розрахункових моделей адгезійних з'єднань, які побудовані на різних припущеннях, що стосуються, як правило, характеру розподілу нормальних та дотичних напружень у деталях та клеї.

В роботі розглянуто чисельний метод для розрахунку напружень в адгезійних з'єднаннях. За основу взято одновимірну модель клейового з'єднання, яка спирається на гіпотезу о рівномірному розподілі напружень по товщині з'єднуваних деталей і клейового шару. Запропонований чисельний метод розрахунку клейового з'єднання оснований на декомпозиції деталей та з'єднувального шару на окремі ділянки, у межах яких напружено-деформований стан вважається постійним. Основна перевага даного підходу полягає в тому, що система диференціальних рівнянь зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Досліджено вплив параметрів дискретної моделі (кількості дискретних в'язів та кроку їх розташування) на точність числового рішення. Для більш точного моделювання клейових з'єднань запропоновано використання дискретної одновимірної моделі, яка характеризується нерівномірним розташуванням дискретних в'язів, що дозволило врахувати нерівномірність розподілу дотичних напружень уздовж з'єднання та підвищити точність обчислень. Проведено параметричне дослідження для порівняння розглянутої дискретної моделі клейового з'єднання з аналітичною моделлю з'єднання внапуск, а також з двовимірною моделлю, побудованою за допомогою методу скінчених елементів. Проаналізовано вплив моделі з'єднувального шару на збіжність чисельного рішення.

Ключові слова: клейове з'єднання, одновимірна модель, з'єднання внапуск, клейовий шар, напруження.

Вступ

Клейові з'єднання характеризуються конструктивною простотою та високою ефективністю, що обумовило їх широке використання при з'єднанні деталей і конструкцій. Їх вагова ефективність пояснюється здатністю розподіляти навантаження по всій поверхні з'єднання на відміну від механічних з'єднань.

На сьогодні відомо безліч розрахункових моделей адгезійних з'єднань, які ґрунтуються на різних припущеннях стосовно характеру розподілу нормальних та дотичних напружень у деталях та клеї. Опис цих моделей, а також проблема впливу таких факторів як ширина з'єднання, жорсткість деталей (змінна, постійна), температурне навантаження та деякі інші можна знайти, наприклад, у роботах [1, 2]. Роботи Фолькерсена [3], Голанда і Рейсснера [4], Харт-Сміта [5] встановили основні принципи для розрахунку напружено-деформованого стану адгезійних з'єднань.

Найбільш проста одновимірна модель адгезійного з'єднання, згідно з якою напруження по товщині деталей і клею розподіляються рівномірно, досить добре

описує напружено-деформований стан (НДС) з'єднання. Як зазначається в роботах [6, 7], ця і більш точна, двовимірна модель дають приблизно однакові значення максимальних дотичних напружень в клеї, хоча розташування цих екстремумів по довжині з'єднання для двох моделей може істотно відрізнятись. На користь одновимірної моделі говорить також той факт, що експериментальні дані, які можна отримати згідно діючих стандартів на випробовування адгезійних з'єднань (тут маються на увазі геометрія зразків, а також методики визначення деформацій і напружень в деталях і клеї), логічно використовувати саме для верифікації одновимірної моделі – до теперішнього часу не запропоновані способи експериментальної оцінки дотичних напружень у клейовому шарі, які в той же час не змінювали б загальної картини розподілу цих напружень у межах з'єднання.

1. Методи дослідження

Метод фізичної дискретизації для визначення внутрішніх зусиль в елементах з'єднання полягає в декомпозиції деталей і клейового шару на окремі ділянки, в межах яких НДС вважається постійним [7]. Основна перевага даного підходу полягає в тому, що система диференціальних рівнянь зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Дана методика є універсальною і дозволяє маневрувати розрахунковою схемою з'єднання в широких межах, враховуючи або відкидаючи з розгляду ті чи інші фактори та особливості геометрії з'єднання та характеру НДС.

Наприклад, використовуючи даний метод в рамках одновимірної моделі з'єднання (див. рис. 1, а, б), розподіл напружень по довжині можна отримати, вирішивши наступну систему рівнянь [7] (див. рис. 1, в, г):

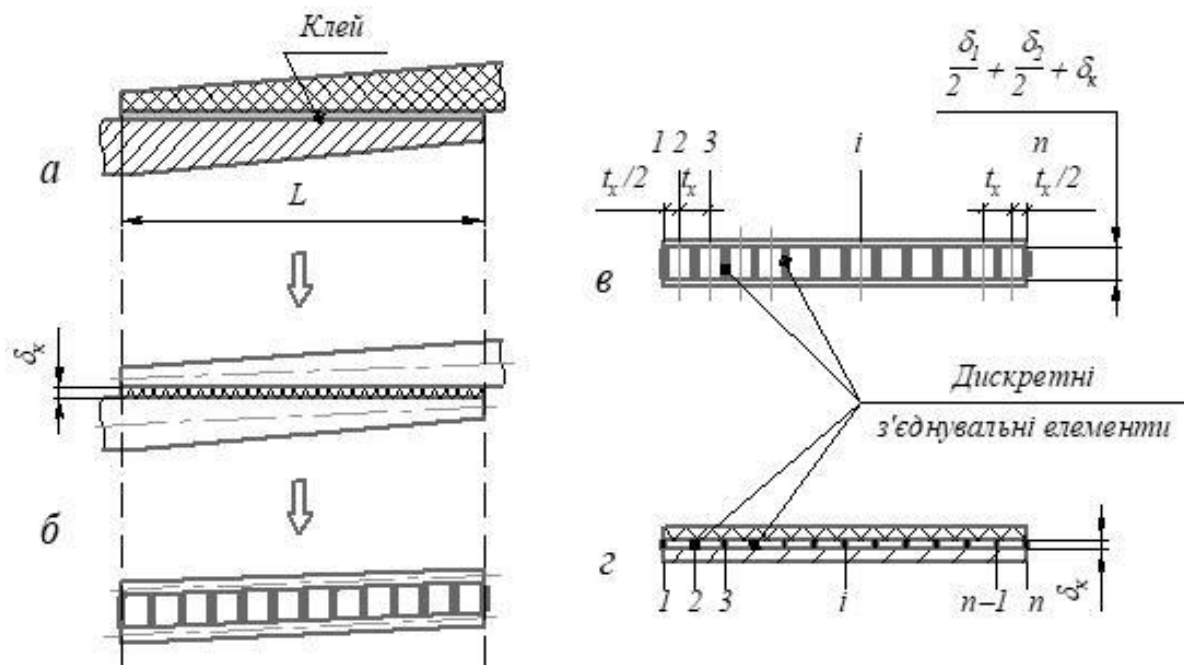


Рис. 1. Схема дискретизації клейового з'єднання

$$N_{2x,i-1}\Pi_{3xi} - N_{2xi}\left(t_x\Pi_{1xi} + t_x\Pi_{2xi} + \Pi_{3xi} + \Pi_{3x,i+1}\right) + N_{2x,i+1}\Pi_{3x,i+1} = -t_x\Pi_{1xi}(N_{1x0} + N_{2x0}), \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad (1)$$

де n – кількість дискретних в'язів (умовних дискретних кріпильних елементів), якими замінюється клей;

$t_x = \frac{L}{n-1}$ – крок дискретних кріпильних елементів (ДКЕ);

Π_{1xi}, Π_{2xi} – осьова податливість з'єднаних деталей:

$$\Pi_{1xi} = \frac{1}{\delta_{1i}E_{1xi}}; \quad \Pi_{2xi} = \frac{1}{\delta_{2i}E_{2xi}}; \quad (2)$$

Π_{3xi} – зсувна податливість з'єднувального шару:

$$\Pi_{3xi} = \frac{\delta_{ci}}{t_x G_{cxz}}; \quad (3)$$

$N_{2x,i}$ – осереднені по товщині нормальні напруження в деталі 2 на i -й ділянці (рис. 2).

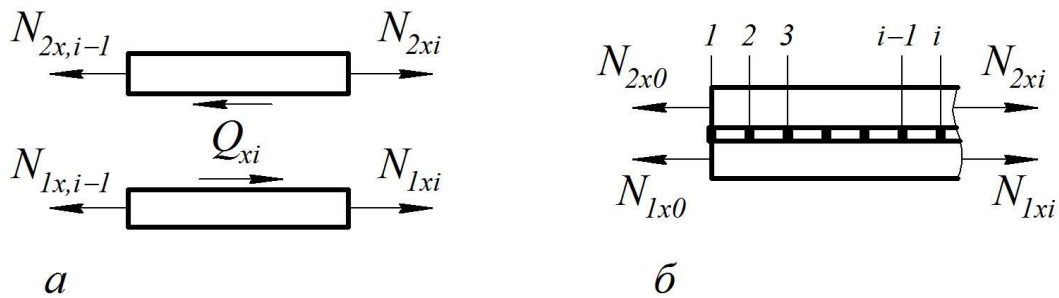


Рис. 2. Внутрішні зусилля на i -й ділянці з'єднання

У формулах (2), (3) позначені:

δ_{1i}, δ_{2i} – середня товщина деталей на i -й ділянці;

δ_{ci}, G_{cxz} – товщина і модуль зсуву з'єднувального шару; в класичній моделі адгезійного з'єднання (дотичні напруження діють лише в клеї) ці параметри являють собою відповідні значення для клею (рис. 1, г):

$$\delta_{ci} = \delta_k; \quad G_{cxz} = G_k. \quad (4)$$

Відповідно до моделі Фолькертсена [3] (у передачі зсувних зусиль, крім клею, беруть участь також прилеглі шари з'єднаних деталей (рис. 1, в)

$$\delta_{ci} = \delta_k + \frac{\delta_{1i}}{2} + \frac{\delta_{2i}}{2}; \quad (5)$$

$$G_{cxz} = \frac{2\delta_k + \delta_{1i} + \delta_{2i}}{2\left(\frac{\delta_k}{G_k} + \frac{\delta_{1i}}{2G_{1xz}} + \frac{\delta_{2i}}{2G_{2xz}}\right)}. \quad (6)$$

У загальному випадку на з'єднання діє система зусиль, зображена на

рис. 3, причому $N_{1x0} + N_{2x0} = N_{1xn} + N_{2xn}$.

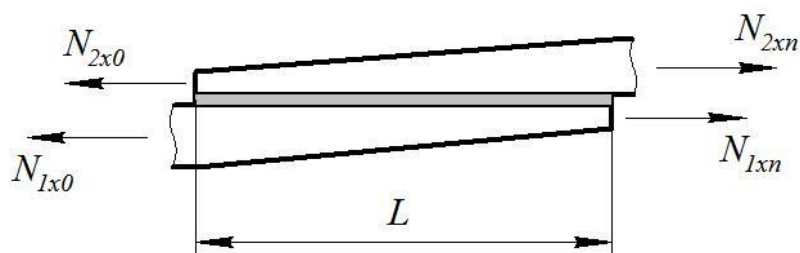


Рис. 3. Зусилля, що діють на з'єднання

Система рівнянь (1) являє собою систему рівнянь з тридіагональною матрицею, для вирішення якої можна використовувати, наприклад, метод прогонки (алгоритм Томаса). Вирішуючи цю задачу відносно $n-1$ невідомих зусиль $N_{2x,i}$ і враховуючи наступні умови рівноваги i -ї ділянки з'єднання (рис. 2)

$$\begin{aligned} N_{1xi} &= N_{1x0} + N_{2x0} - N_{2xi}; \\ Q_{xi} &= N_{1x,i-1} - N_{1xi} = N_{2xi} - N_{2x,i-1}, \end{aligned}$$

знаходять розподіл напружень в деталях і в клеї по n ділянках:

$$\sigma_{1xi} = \frac{N_{1xi}}{\delta_{1i}}; \quad \sigma_{2xi} = \frac{N_{2xi}}{\delta_{2i}}; \quad \tau_{ki} = \frac{Q_{xi}}{t_x}. \quad (7)$$

Використовуючи одновимірну модель, можна знайти розподіл напружень по довжині з'єднання, безпосередньо інтегруючи диференційні рівняння рівноваги (доповнені умовами сумісності деформацій). Однак такі аналітичні рішення можна отримати лише для деяких окремих випадків. Наприклад, при з'єднанні деталей з постійною товщиною у схемі повної передачі зусиль з однієї деталі на іншу ($N_{1x0} = N_{2xn} = N$, $N_{2x0} = N_{1xn} = 0$, див. рис. 4) розподіл дотичних напружень в клеї підпорядковується закону

$$\tau_0(x) = kN \frac{\Pi_{1x} \operatorname{ch} k(L-x) + \Pi_{2x} \operatorname{ch} kx}{(\Pi_{1x} + \Pi_{2x}) \operatorname{sh} kL}, \quad (8)$$

$$\text{де } k = \sqrt{\frac{\Pi_{1x} + \Pi_{2x}}{\Pi_{3x}}}.$$

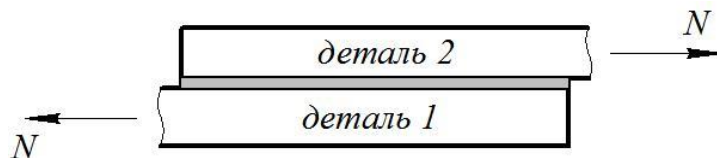


Рис. 4. Схема з'єднання деталей внапуск

2. Параметричні дослідження

Очевидно, що основним параметром, який впливає на точність розрахунку з'єднання методом фізичної дискретизації, є параметр n , який визначає розмірність задачі – системи лінійних алгебраїчних рівнянь (1). Графіки, показані на рис. 5, дають уявлення про ступінь збіжності чисельного рішення

(розглядалася класична модель з'єднувального шару). Для оцінки збіжності обрано максимальне по довжині з'єднання відношення значень дотичних напружень в клеї, знайдених з використанням дискретної моделі (7) і аналітичної формули (8):

$$\Delta\tau = \max_x \left\{ \frac{\tau}{\tau_0} \right\}.$$

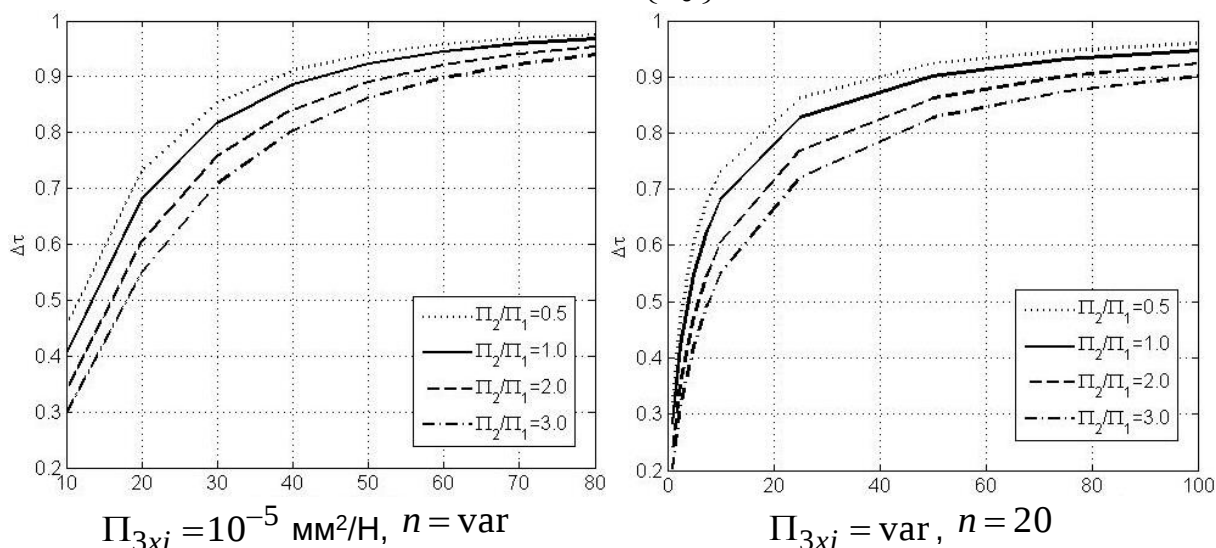


Рис. 5. Вплив податливості деталей та з'єднувального шару на збіжність дискретної моделі ($\Pi_{1xi} = \text{const} = 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$)

З графіків видно, що збіжність чисельного рішення істотно залежить від співвідношення осьових жорсткостей з'єднуваних деталей і зсувної жорсткості клею: при зменшенні жорсткості однієї з деталей і збереженні значень інших параметрів точність дискретної моделі знижується. Навпаки, при зменшенні зсувної жорсткості клею (тобто при збільшенні його податливості) збіжність рішення (1) покращується. Такий вплив можна пояснити особливостями моделі фізичної дискретизації: так як в межах кожної окремої ділянки внутрішні осьові зусилля в деталях вважаються постійними, то функції напружень виходять дискретними, ступінчастими по довжині з'єднання (див. рис. 6).

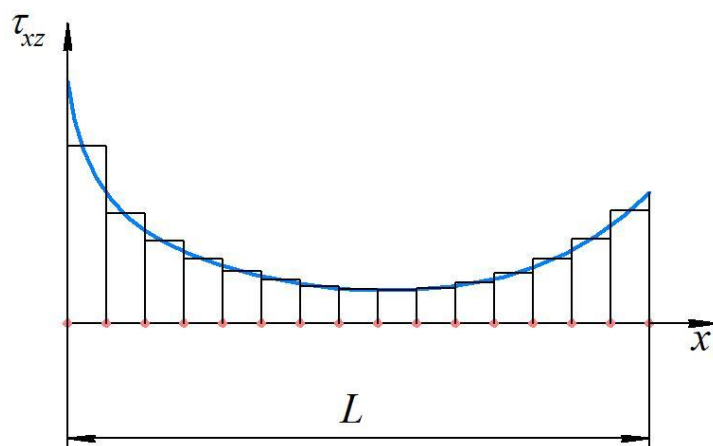


Рис. 6. Розподіл дотичних напружень за дискретною моделлю

Відповідно, чим вище нерівномірність розподілу напружень в з'єднанні, чим більше градієнти цих величин, тим нижче точність чисельного рішення при одному і тому ж ступені дискретизації n . На рис. 7, а показано вплив жорсткості деталей на розподіл дотичних напружень у клеї. При $\Pi_{1xi} = const$ зменшення жорсткості другої деталі призводить до збільшення концентрації напружень по y крайках з'єднання. На рис. 7, б дано порівняння двох моделей з'єднувального шару: класичної і Фолькерсена. З формул (5), (6) випливає, що податливість з'єднувального шару за Фолькерсеном вище, ніж у його класичному уявленні. Це дозволяє припустити, що поєднання методу фізичної дискретизації з моделлю Фолькерсена більш виправдано, ніж з класичною моделлю з'єднувального шару. Ці графіки наочно пояснюють ефекти, описані вище під час аналізу рис. 5, 6.

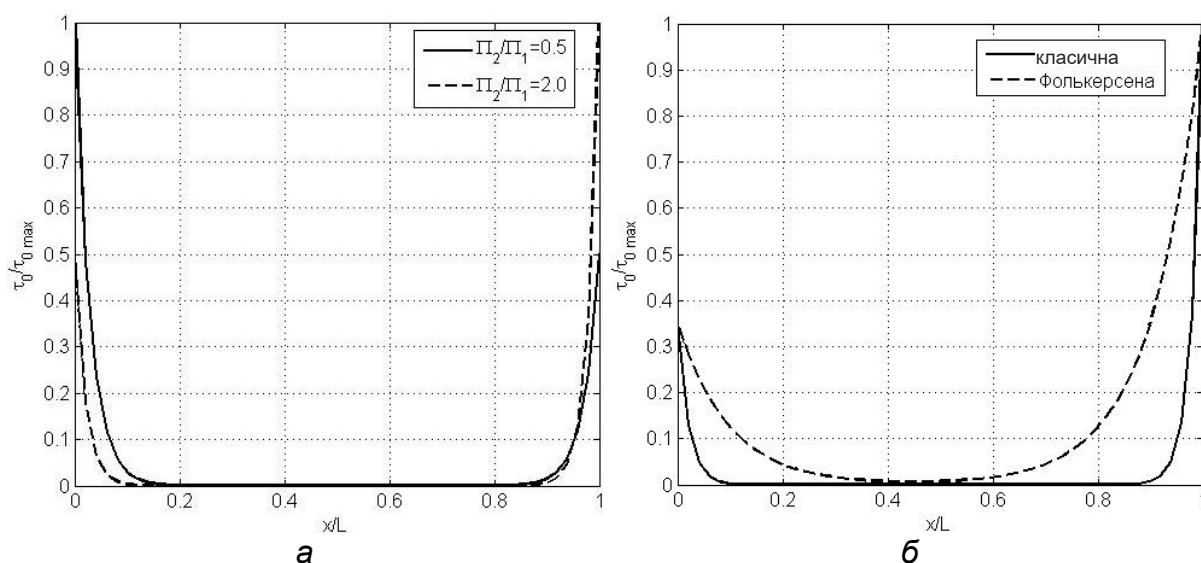


Рис. 7. Розподіл дотичних напружень в клеї по довжині з'єднання

Зазначені особливості методу дискретизації можна врахувати двома способами. По-перше, можна безпосередньо збільшувати кількість ДКЕ n , зменшуючи тим самим крок t_x і, відповідно, різницю між чисельно та аналітично розрахованими значеннями напружень (див. рис. 5, 6). Це, звісно, збільшує розмірність аналізованої задачі, що з урахуванням розвитку інформаційних технологій особливих проблем не створює. Однак слід звернути увагу на те, що чисельні методи вирішення систем рівнянь характеризуються своєю похибкою, яка має властивість накопичуватися в процесі обчислень.

Другий спосіб полягає в варіюванні кроку ДКЕ: в зонах з великим градієнтом напружень крок повинен бути найменшим, що дозволить при збереженні того ж значення n врахувати дискретність компонентів НДС і підвищити точність розрахунку. Наприклад, для адгезійного з'єднання з повною передачею навантаження (рис. 4) можна використовувати схему розбиття інтервалу (довжини), показану на рис. 8.

Якщо вважати, що зміна кроку за довжиною L підпорядковується закону геометричної прогресії, ділянки t_{xi} збільшуються симетрично від країв з'єднання до його центру ($t_{xi} = t_{xn-i}$), а нерівномірність розбиття контролюється

відношенням довжин найбільшої та найменшої ділянок

$$\lambda = \frac{t_{\max}}{t_{\min}},$$

то для кожної половини інтервалу

$$t_{xi} = t_{xn-i} = t_{\min} \cdot r^{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots, \lfloor n/2 \rfloor, \quad (9)$$

де r – знаменник прогресії:

$$r = (\lfloor n/2 \rfloor - 1) \sqrt[n]{\frac{t_{\max}}{t_{\min}}}; \quad (10)$$

$$t_{\min} = L/S. \quad (11)$$

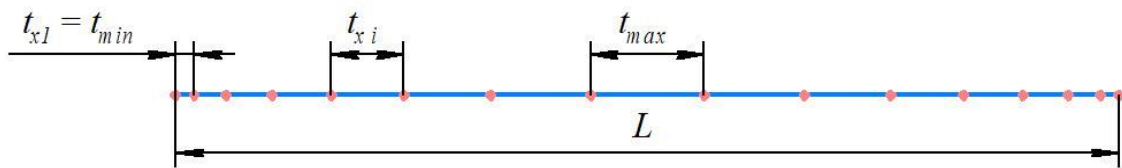


Рис. 8. Зміна кроку ДКЕ по довжині з'єднання

При парному n

$$S = 2 \sum_{i=1}^{\lfloor n/2 \rfloor} r^{i-1} - r^{(\lfloor n/2 \rfloor - 1)}, \quad (12)$$

при непарному

$$S = 2 \sum_{i=1}^{\lfloor n/2 \rfloor} r^{i-1}. \quad (13)$$

На рис. 9 показано вплив нерівномірності кроку ДКЕ на збіжність чисельного рішення (1) до аналітичного (8). Видно, що при постійній кількості ДКЕ зменшення розмірів ділянок у місцях з великими градієнтами внутрішніх зусиль позитивно позначається на точності методу фізичної дискретизації. При $n = 20$ і відношенні $t_{\max}/t_{\min} = 8$ похибка дискретної моделі склала не більше 10% для більшості розрахункових випадків. При збільшенні ступеня дискретизації до 40 та збереженні того ж значення λ ($t_{\max}/t_{\min} = 8$) різниця у рішенні не перевищувала 3%. Таким чином, зазначений спосіб варіювання кроку розташування ДКЕ є досить ефективним засобом підвищення точності розрахунку клейових з'єднань методом фізичної дискретизації.

3. Аналіз клейового з'єднання методом скінчених елементів

Для оцінки достовірності одновимірної моделі був проведений порівняльний аналіз результатів розрахунку дотичних напружень у клеї за дискретною моделлю и методом скінчених елементів (МСЕ), при використанні якого розглядалася двовимірна задача (враховується розподіл напружень в деталях і клейовому шарі як по довжині, так і по товщині).

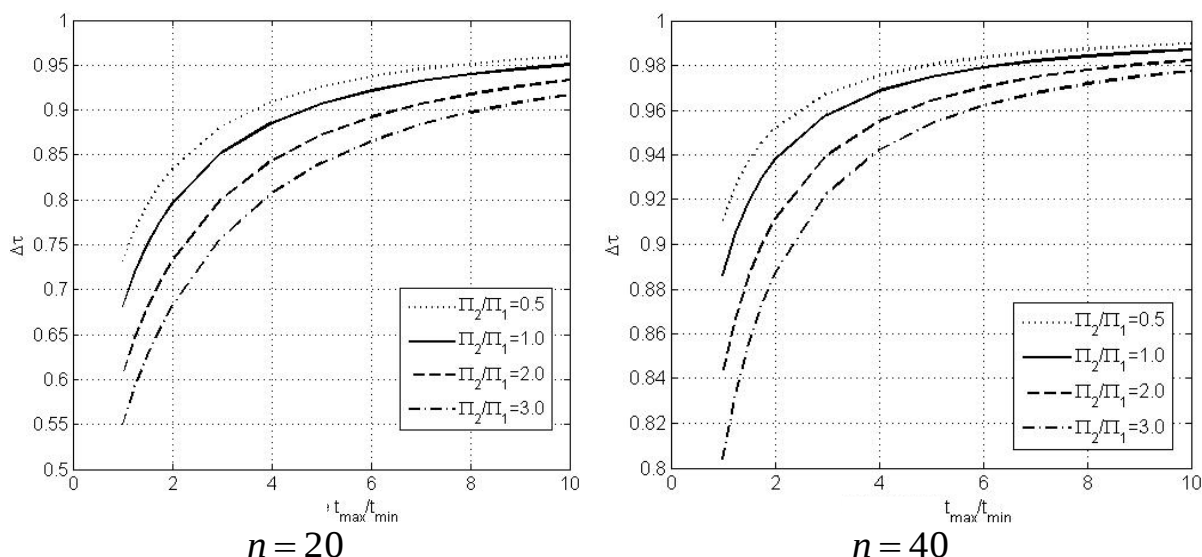


Рис. 9. Вплив нерівномірності дискретизації на збіжність чисельного рішення

Слід зазначити, що вирішення подібних задач за допомогою МСЕ може здійснюватися як із залученням спеціальних додаткових граничних умов, так і без них. Наприклад, на модель можуть накладатися додаткові умови сумісності деформацій в подовжньому напрямку для вузлів з'єднаних деталей і клею в крайніх точках (у перерізах $x=0$ і $x=L$, див. рис. 10).

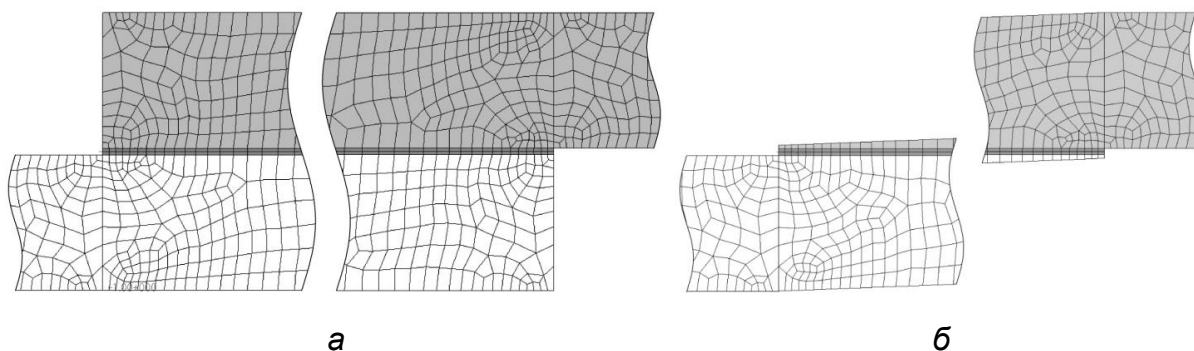


Рис. 10. Скінченно-елементні моделі з'єднання внапуск (а) і з'єднання зі скошеними кромками (б)

Розподіл дотичних напружень у клеї для з'єднання внапуск показано на рис. 11, а, для з'єднання зі скошеними кромками – на рис. 11, б. Параметри з'єднання були обрані такими:

- довжина з'єднання $L = 50$ мм;
- деталь 1 – сталь, $E = 200$ ГПа, $\delta_1 = 2$, мм;
- деталь 2 – вуглепластик, $E_x = 70$ ГПа, $G_{xz} = 8$ ГПа, $\delta_2 = 2$ мм;
- клей – $G = 5$ ГПа; $\delta_k = 0,1$ мм.

Як показує аналіз наведених графіків, використання додаткових умов спільності деформацій, про які говорилося вище, суттєво змінює НДС на кромках з'єднання (див. рис. 11, суцільна лінія, далі – випадок 1) порівняно з розрахунком

без накладення цих обмежень (на рис. 11 штрихова лінія, далі – випадок 2). Як видно з графіків, у випадку 1 характер розподілу дотичних напружень у клейовому шарі багато в чому ідентичний картині НДС згідно з двовимірною моделлю, а для випадку 2 розподіл дотичних напружень за МСЕ схожий з таким для розглянутої вище одновимірної моделі.

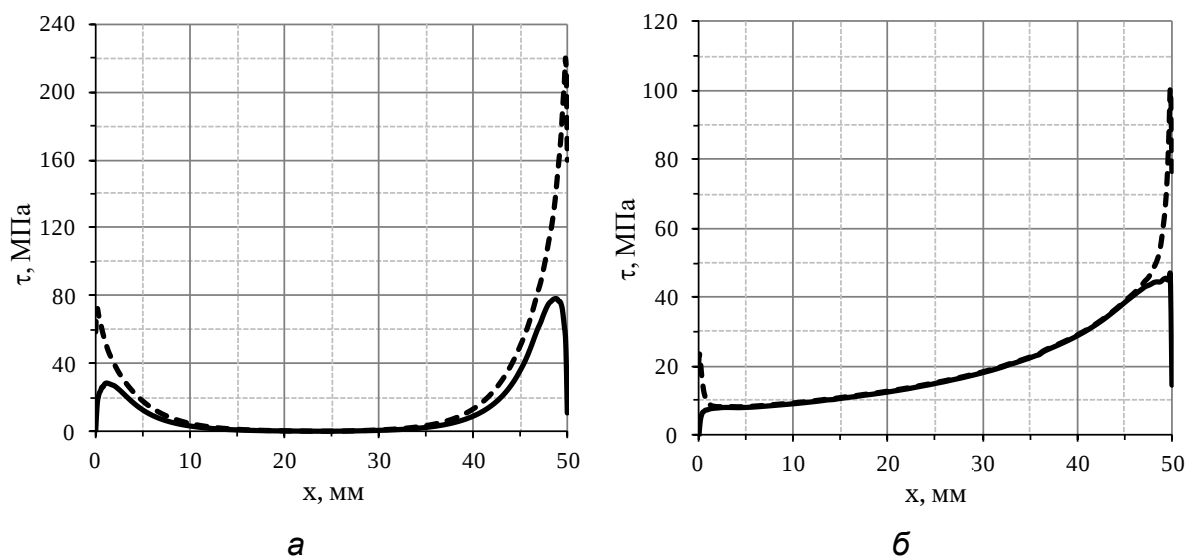


Рис. 11. Результати розрахунку МСЕ двох типів з'єднання металевої та композитної деталей

На рис. 12 показано порівняння результатів розрахунку адгезійного з'єднання на основі трьох моделей: одновимірної, з класичним підходом до моделювання з'єднувального шару (КМЗШ) і згідно з гіпотезами Фолькертсена (МФЗШ) і МСЕ (описаний вище випадок 2).

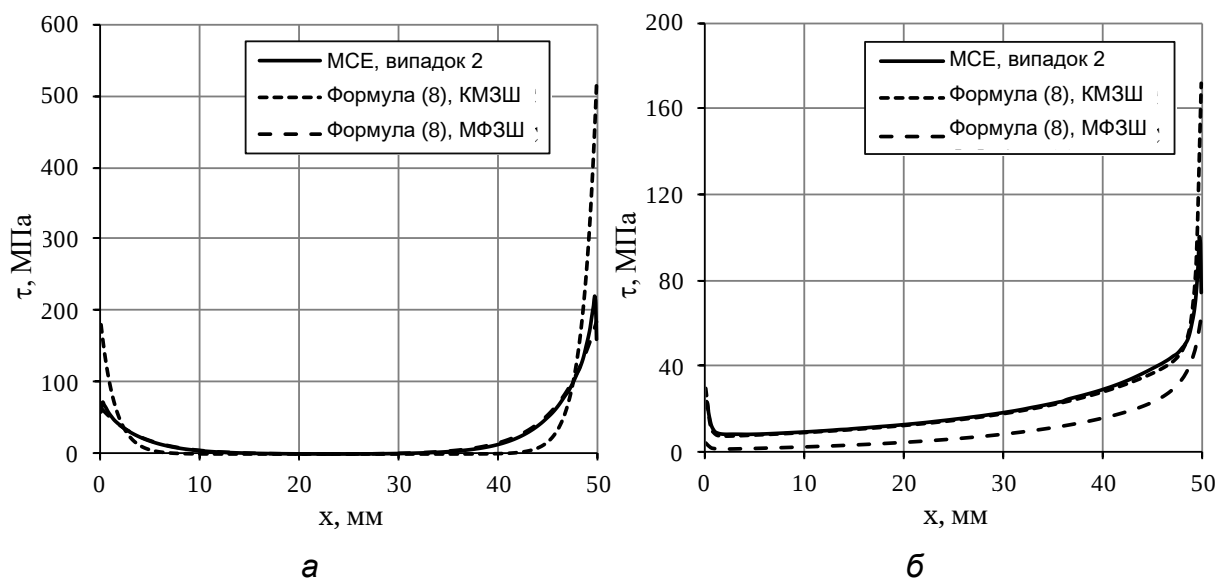


Рис. 12. Порівняння результатів за одновимірною моделлю та МСЕ

Видно, що картина розподілу дотичних напружень у клеї виходить загалом

ідентичною у всіх трьох випадках. Однак максимальні напруження можуть відрізнятися досить сильно. Для з'єднання внапуск (рис. 10, а) найбільш близьким до МСЕ виявляється розрахунок за гіпотезою Фолькерсена (див. рис. 12, а), а для з'єднання зі скошеними кромками (рис. 10, б) – розрахунок за класичною моделлю (рис. 12, б).

Висновки

Запропоновано чисельний метод розрахунку клейового з'єднання оснований на декомпозиції з'єднуваних деталей та клейового шару на окремі ділянки, у межах яких напружено-деформований стан вважається постійним. Перевага даного підходу полягає в тому, що система диференціальних рівнянь зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь з тридіагональною матрицею, для вирішення якої можна використовувати метод прогонки. Досліджено вплив параметрів дискретної моделі (кількості дискретних в'язів та кроку їх розташування) на точність числового рішення. Показано, що використання дискретної одновимірної моделі, яка характеризується нерівномірним розташуванням дискретних в'язів, суттєво підвищує точність обчислень. При нерівномірній дискретизації з'єднання на 20 ділянок і ступені нерівномірності 8 (відношенні максимальної довжини ділянки з'єднання до мінімальної) похибка обчислень за дискретною моделлю склала не більше 10%. При збільшенні кількості ділянок до 40 та збереженні того ж значення ступені нерівномірності дискретизації різниця у рішенні не перевищувала 3%. Проведено параметричні дослідження для порівняння розглянутої дискретної моделі клейового з'єднання з аналітичною моделлю з'єднання внапуск, а також з двовимірною моделлю, побудованою за допомогою методу скінчених елементів, за результатами яких встановлено, що:

- для клейових з'єднань деталей розрахунок за одновимірною моделлю у поєднанні з гіпотезами Фолькерсена для з'єднувального шару призводить до дотичних напружень схожих з розподілом, обчисленим за моделлю МСЕ. При цьому розрахунок за одновимірною моделлю дає нижчі значення пікових напружень у клеї (приблизно на 10...15%), тобто, завищує міцність з'єднання в порівнянні з МСЕ;

- при з'єднанні деталей зі змінною товщиною доцільно використовувати одновимірну модель з класичним уявленням з'єднувального шару. У цьому випадку розподіл дотичних напружень в клеї буде найбільш близьким до НДС, одержаним з використанням МСЕ, а розрахунок йде в запас міцності (екстремальні значення напружень будуть вище величин, отриманих МСЕ).

Список літератури

1. Analytical models of adhesively bonded joints – Part I: Literature survey [Текст] / Lucas F.M. da Silva [et al.] // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2009. – Vol. 29, no. 3. – P. 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.06.005>.
2. Kupski, J. Design of adhesively bonded lap joints with laminated CFRP adherends: Review, challenges and new opportunities for aerospace structures [Текст] / J. Kupski, S. Teixeira de Freitas // Composite Structures. – 2021. – Vol. 268. – 113923. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113923>.
3. Volkersen, O. Die niekraftverteilung in zugbeanspruchten mit konstanten

laschenquerschriften [Текст] / O. Volkersen // Luftfahrtforschung. – 1938. – 15 – P. 41–47.

4. Goland, M. The stresses in cemented joints [Текст] / M. Goland, E. Reissner // Journal of Applied Mechanics. – 1944. – Vol. 11, no. 1. – P. 17–27. <https://doi.org/10.1115/1.4009336>.

5. Hart-Smith, L. J. Adhesive-bonded single lap joints [Електронний ресурс] // NASA CR-112236. – Hampton, Virginia: Langley Research Center, 1973. – Режим доступу: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740005083> (12.03.2025).

6. Karpov, Ya. S. Jointing of high-loaded composite structural components. Part 2. Model-ing of stress-strain state [Текст] / Ya. S. Karpov // Strength of Materials. – 2006. – Vol. 38, no. 5. – P. 481 – 491. <https://doi.org/10.1007/s11223-006-0067-9>.

7. Карпов, Я. С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов [Текст] / Я. С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 359 с.

References

1. Analytical models of adhesively bonded joints – Part I: Literature survey [Text]/ Lucas F.M. da Silva [et al.]// International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2009. – Vol. 29, no. 3. – P. 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.06.005>.

2. Kupski, J. Design of adhesively bonded lap joints with laminated CFRP adherends: Review, challenges and new opportunities for aerospace structures [Text] / J. Kupski, S. Teixeira de Freitas // Composite Structures. – 2021. – Vol. 268. – 113923. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113923>.

3. Volkersen, O. Die niekraftverteilung in zugbeanspruchten mit konstanten laschenquerschriften [Text] / O. Volkersen // Luftfahrtforschung. – 1938. – 15 – P. 41 –47.

4. Goland, M. The stresses in cemented joints [Text] / M. Goland, E. Reissner // Journal of Applied Mechanics. – 1944. – Vol. 11, no. 1. – P. 17–27. <https://doi.org/10.1115/1.4009336>.

5. Hart-Smith, L. J. Adhesive-bonded single lap joints [Electronic resource] // NASA CR-112236. – Hampton, Virginia: Langley Research Center, 1973. – Mode of access: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740005083> (12.02.2025).

6. Karpov Ya.S. Jointing of high-loaded composite structural components. Part 2. Modeling of stress-strain state [Text] / Ya. S. Karpov // Strength of Materials. – 2006. – Vol. 38, no. 5. – P. 481 – 491. <https://doi.org/10.1007/s11223-006-0067-9>.

7. Karpov, Ya. S. Soedineniya detalej i agregatov iz kompozicionnyh materialov [Text] / Ya. S. Karpov. – Kharkiv, Nat. Aerosp. Univ. “KhAI”, 2006. – 359 p.

Надійшла до редакції 12.03.2025, розглянута на редколегії 12.03.2025

Stress analysis of adhesive joints based on a one-dimensional discrete model

Adhesive bonding in thin-walled structures can be used to join structural elements of constant or variable thickness that withstand compressive or tensile forces in combination or without shear forces. In typical adhesive joints, the adhesive layer, which ensures the transfer of forces between the parts, operates under conditions of a complex stress-strain state - in the representative volume of the adhesive all six stress

components act, which vary along the length, width, and thickness of the adhesive layer. The challenges of the analytical assessment of such a three-dimensional stress state have led to the development of a number of analytical models for adhesive joints, based on various assumptions, usually concerning the character of the distribution of normal and shear stresses in the joined parts and the adhesive.

This paper presents a numerical method for calculating stresses in adhesive joints. It is based on a one-dimensional model of an adhesive joint, which assumes uniform distribution of stresses across the thickness of the joined parts and the adhesive layer. The proposed numerical method for calculating an adhesive joint is based on the decomposition of the joined parts and the adhesive layer into separate sections, within which the stress-strain state is considered constant. The main advantage of this approach is that the system of differential equations is reduced to a system of linear algebraic equations. The influence of the discrete model parameters (the number of sections and the step of their arrangement) on the accuracy of the numerical solution is investigated. For more accurate modeling of adhesive joints, it is proposed to use a discrete one-dimensional model, which is characterized by an uneven arrangement of discrete ties, which made it possible to take into account the uneven distribution of shear stresses along the joint and to increase the accuracy of calculations. A parametric study was conducted to compare the proposed discrete model of an adhesive joint with an analytical model of the lap joint, as well as with a two-dimensional model created using the finite element method. The influence of the approach to modelling the adhesive layer on the convergence of the numerical solution is analyzed.

Keywords: adhesive joint, one-dimensional model, lap joint, adhesive layer, stress.

Відомості про авторів:

Гагауз Федір Миронович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства Національного аерокосмічного університету «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: f.gagauz@khai.edu. ORCID 0000-0001-6880-1857.

Вамболь Олексій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства Національного аерокосмічного університету «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: olexii.vambol@khai.edu. ORCID 0000-0002-1719-8063.

Кривенда Сергій Петрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства Національного аерокосмічного університету «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: s.kryvenda@khai.edu. ORCID 0009-0001-7095-6919.

Павленко Віталій Миколайович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства Національного аерокосмічного університету «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: v.pavlenko@khai.edu. ORCID 0000-0001-6871-2133.

Пургіна Світлана Михайлівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства Національного аерокосмічного університету «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: s.purhina@khai.edu. ORCID 0000-0001-6992-5210.

About the authors:

Fedir Gagauz – Ph.D., Assoc. Prof. of Department of Composite Structures and Aviation Materials, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: f.gagauz@khai.edu. ORCID 0000-0001-6880-1857.

Oleksii Vambol – Ph.D., Assoc. Prof. of Department of Composite Structures and Aviation Materials, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: olexii.vambol@khai.edu. ORCID 0000-0002-1719-8063.

Serhii Kryvenda – Ph.D., Assoc. Prof. of Department of Composite Structures and Aviation Materials, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: s.kryvenda@khai.edu. ORCID 0009-0001-7095-6919.

Vitaliy Pavlenko – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Composite Structures and Aviation Materials, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: v.pavlenko@khai.edu. ORCID 0000-0001-6871-2133.

Svitlana Purhina – Ph.D., Assoc. Prof. of Department of Composite Structures and Aviation Materials, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: s.purhina@khai.edu. ORCID 0000-0001-6992-5210.