

doi: 10.32620/oikit.2026.108.12

УДК 621.891:620.17:629.7

О. О. Вамболь¹, Ф. М. Гагауз², К. П. Барахов³,
О. С. Ланець¹, С. М. Пургіна², О. В. Соловійов¹

Гібридні металокомпозитні з'єднання з поздовжніми мікроелементами: аналітичне моделювання та оцінка міцності

¹Національний університет "Львівська політехніка"²Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут"³Харківський національний університет
міського господарства ім. О. М. Бекетова

У роботі розглянуто актуальну проблему підвищення несучої здатності та надійності гетерогенних з'єднань типу «метал–композит», які широко застосовуються в аерокосмічній техніці. Показано, що традиційні адгезійні з'єднання, попри їх технологічні переваги, характеризуються підвищеною чутливістю до якості підготовки поверхонь, а також обмеженою здатністю ефективно сприймати міжшарові дотичні напруження, що знижує їх експлуатаційну надійність.

Запропоновано нове конструктивно-технологічне рішення з'єднання, яке поєднує адгезійний механізм передачі навантаження з додатковим армуванням у вигляді дискретних елементів поздовжнього зв'язку (мікроелементів кріплення). На відміну від класичних підходів, запропонована модель враховує спільну роботу клейового шару та металевих мікроелементів, що дозволяє перерозподілити навантаження та зменшити рівень концентрацій напружень у композитній частині.

Розроблено аналітичну модель, яка базується на припущенні про рівномірний розподіл дотичних напружень уздовж довжини з'єднання та використанні підходів теорії податливості елементів. Отримано систему розрахункових залежностей для визначення основних геометричних параметрів з'єднання, включаючи кількість рядів мікроелементів, довжину зони з'єднання, глибину їх заформовування у композит, а також параметри підсилення композитного пакета.

Виконано числову оцінку параметрів з'єднання для конструкції з вуглепластика на основі односпрямованих волокон та епоксидного адгезиву, армованого сталевими мікроелементами. Проведено аналіз впливу геометричних характеристик елементів поздовжнього зв'язку на несучу здатність з'єднання. Встановлено, що збільшення товщини мікроелементів призводить до зменшення їх кількості при одночасному підвищенні їх індивідуальної несучої здатності, що впливає на оптимальні параметри конструкції.

Отримані результати дозволяють здійснювати інженерне проектування ефективних з'єднань типу «метал–композит» з урахуванням конструктивних та технологічних факторів. Запропонований підхід може бути використаний для подальшої експериментальної верифікації, а також для оптимізації параметрів з'єднань у перспективних аерокосмічних конструкціях.

Ключові слова: полімерні композити; композитні матеріали; метал–композитні з'єднання; адгезійні з'єднання; гетерогенні з'єднання; елементи поздовжнього зв'язку; податливість з'єднання; аерокосмічні конструкції.

Вступ

Застосування композитних конструкцій в аерокосмічній галузі сьогодні стало усталеною практикою і вже не розглядається як інноваційна новинка [1, 2]. Галузь демонструє стійку тенденцію до розширення використання композитних матеріалів, унаслідок чого традиційні металеві елементи поступово витісняються

або замінюються. Завдяки можливості цілеспрямованого формування властивостей на етапі проєктування та їх реалізації через відповідні технологічні процеси, композити відкривають широкі перспективи для створення легких конструкцій із заданими характеристиками. Це, своєю чергою, сприяє розвитку нових підходів до проєктування конструкцій і має позитивний вплив на забезпечення принципів сталого розвитку.

Водночас повна відмова від металів і сплавів у конструкціях аерокосмічної техніки наразі є неможливою. Існує низка елементів, для яких традиційні матеріали залишаються найбільш ефективними або не мають повноцінної альтернативи. Це, зокрема, стосується вузлів, що працюють в умовах підвищених температур, ударних і локальних навантажень, а також зон із високими вимогами до контактної міцності та зносостійкості [3]. У зв'язку з цим задача створення надійних і технологічно ефективних з'єднань типу «метал–композит» залишається актуальною і пріоритетною.

До основних типів з'єднань металевих і композитних елементів належать механічні, адгезійні (клеєві) та комбіновані рішення [3, 4]. Відомо, що головним несучим елементом у високонавантажених композитних конструкціях є волокниста арматура (нитки, джгути) з високоміцних матеріалів. Тому при проєктуванні з'єднань необхідно забезпечувати збереження цілісності волокон, мінімізувати їх викривлення, а також обмежувати рівень міжшарових дотичних напружень, до сприйняття яких композити є обмежено придатними. З огляду на ці положення, утворення отворів і порушення структури композитної частини є небажаними, що обумовлює зростання інтересу до адгезійних з'єднань.

Конструктивно-технологічні рішення клеєвих з'єднань зі ступінчастими або скошеними металевими законцюваннями широко застосовуються в умовах дії зсувних зусиль, які переважно сприймаються клеєвим шаром. Водночас такі з'єднання частково передають і осьові зусилля. Для оцінювання їх несучої здатності при сприйнятті осьових навантажень використовують результати досліджень адгезійних з'єднань зі змінними геометричними параметрами [5, 6]. Зокрема, для з'єднань типу «на вус» приймається, що дотичні напруження уздовж довжини з'єднання розподіляються наближено рівномірно, що дозволяє розглядати типовий елемент (рис. 1).

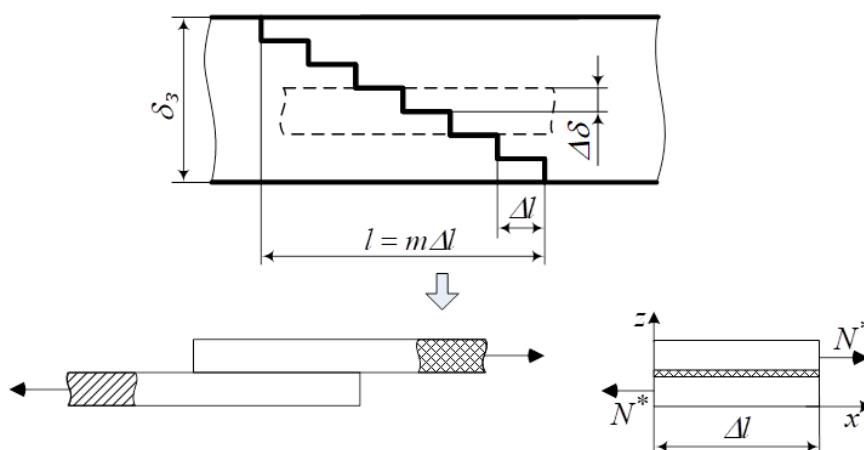


Рис. 1. Типовий елемент адгезійного з'єднання

Справедливість такої розрахункової схеми підтверджується тим, що за наявності великої кількості сходинок ступінчасте з'єднання за своїми

характеристиками наближається до скошеного з'єднання типу «на вус». Водночас міцність і надійність адгезійних з'єднань істотно залежать від адгезійних властивостей матеріалів і якості підготовки поверхонь [5, 7, 8]. Це зумовлює необхідність пошуку альтернативних конструктивних рішень, які б поєднували переваги адгезійних з'єднань і водночас усували їхні недоліки.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні узагальненої аналітичної моделі гетерогенного з'єднання типу «метал–композит» з дискретними елементами поздовжнього зв'язку, яка, на відміну від відомих підходів, враховує спільну роботу клейового шару та металевих мікроелементів у процесі передачі навантаження. Запропонована схема з'єднання, принципова реалізація якої наведена на рисунку 2, дозволяє підвищити ефективність передавання навантаження без істотного порушення структури композитного матеріалу.

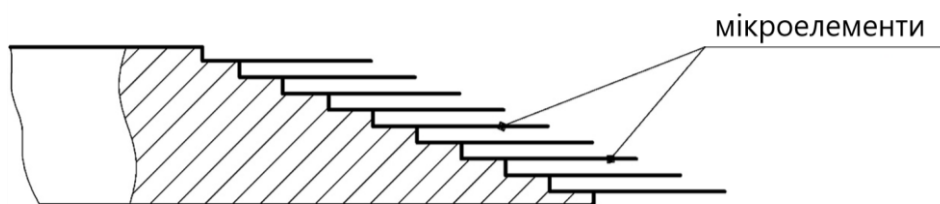


Рис. 2. З'єднання з елементами поздовжнього зв'язку

У межах запропонованої моделі:

- отримано аналітичні залежності для визначення раціональних геометричних параметрів з'єднання (довжини зони з'єднання, кількості та кроку розташування мікроелементів, глибини їх заформовування);
- встановлено взаємозв'язок між жорсткісними характеристиками елементів системи та характером розподілу дотичних напружень у зоні з'єднання;
- удосконалено підхід до інженерної оцінки несучої здатності комбінованих з'єднань за рахунок урахування податливості складових елементів.

Запропонований підхід орієнтований на використання на ранніх етапах проектування та дозволяє отримувати інженерно обґрунтовані оцінки параметрів з'єднання без застосування складних чисельних методів.

1. Методи дослідження

Розглянемо розрахункову схему з'єднання з елементами поздовжнього зв'язку (рис. 3). Композитна частина конструкції моделюється як шарувата ортотропна структура, у якій кожен шар являє собою односпрямований композиційний матеріал. Такий підхід відповідає сучасним уявленням про будову багатошарових композитів і дозволяє коректно враховувати їх анізотропні властивості.

У першому наближенні вважається, що внутрішня структура композиту неістотно впливає на його здатність чинити опір міжшаровому зсуву. У зв'язку з цим межу міцності та модуль пружності при міжшаровому зсуві для всього пакета прийнято рівними відповідним характеристикам односпрямованого шару. Таке припущення спрощує розрахунок і є допустимим для інженерних оцінок.

Матеріал фітинга та мікроелементів поздовжнього зв'язку приймається металевим, що зумовлює істотно вищі значення жорсткості та міцності порівняно з композитною частиною конструкції.

З метою уніфікації технологічного процесу виготовлення елементів поздовжнього зв'язку, а також для забезпечення коректної оцінки впливу їх жорсткості на загальну несучу здатність з'єднання, ширина кріпильного елемента b_k та крок їх встановлення t_y приймаються сталими.

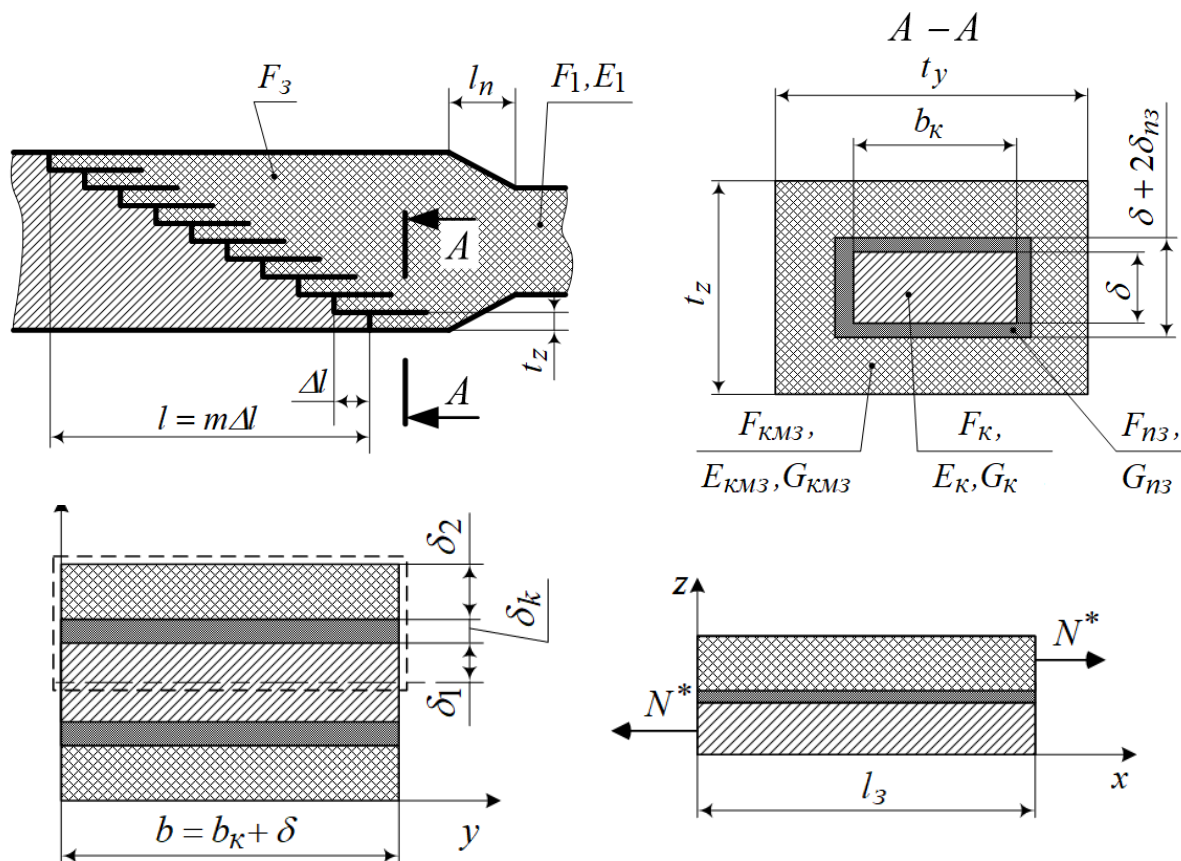


Рис. 3. Розрахункова схема адгезійного з'єднання мікроелемента з композитним матеріалом

Це дозволяє зменшити кількість змінних параметрів та забезпечити відтворюваність результатів розрахунку. На рисунку 4 наведено прийняті типорозміри кріпильних мікроелементів.

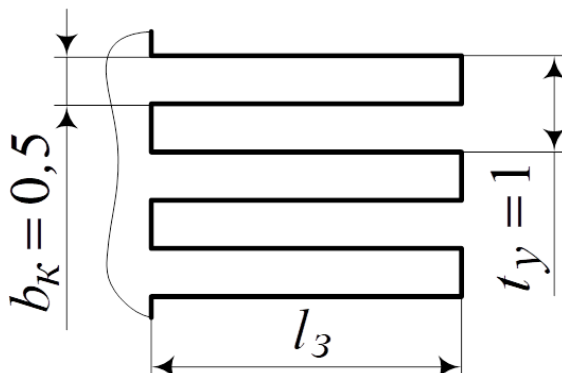


Рис. 4. Елементи поздовжнього зв'язку

Припускаючи, що передача навантаження з однієї деталі на іншу здійснюється переважно через елементи поздовжнього зв'язку, а міцність зварного з'єднання мікроелементів із металевим фітингом є ідеальною, сумарну площу цих елементів можна визначити за формулою:

$$A_{\Sigma} = \frac{N_p}{F_k}, \quad (1)$$

де N_p – розрахункове навантаження; F_k – допустиме напруження (межа міцності) матеріалу елементів поздовжнього зв'язку.

Розрахункове навантаження визначається з урахуванням несучої здатності композитної частини:

$$N_p = F_1 \delta_1 b_1, \quad (2)$$

де F_1 – межа міцності композитного матеріалу з відповідною структурою; b_1 , δ_1 – відповідно ширина та товщина поперечного перерізу композиту в регулярній (ненарощеній) частині.

Кількість рядів елементів поздовжнього зв'язку m при заданій ширині зони з'єднання B_3 , кроці встановлення t_y та геометричних параметрах елементів (b_k , δ_k) визначається за залежністю:

$$m = \frac{A_{\Sigma} t_y}{b_k \delta_k B_3}. \quad (3)$$

Отримана залежність (3) впливає з умови рівності сумарної площі поперечних перерізів елементів поздовжнього зв'язку необхідній розрахунковій площі. Як зазначалося вище, ступінчасте клейове з'єднання за характером передачі навантажень є аналогічним з'єднанню типу «на вус», для якого допускається рівномірний розподіл дотичних напружень уздовж довжини зони з'єднання. Це припущення є спрощенням і може призводити до недооцінки локальних пікових напружень, однак є прийнятним для інженерних оцінок на ранніх стадіях проектування. У рамках цього припущення вважається, що передача зусиль між деталями здійснюється переважно через клейовий шар.

Для побудови аналітичної залежності довжини зони з'єднання використано аналогію з класичною моделлю клеєвого з'єднання, що дозволяє перейти від суцільного розподілу напружень до дискретної системи елементів поздовжнього зв'язку. Тоді довжину зони з'єднання у першому наближенні можна визначити за аналогією зі з'єднанням «на вус» (рис. 1):

$$l_3 \geq \frac{N_p}{F_{n3} B_3}. \quad (4)$$

де F_{n3} – допустиме напруження зрізу клею.

З урахуванням технологічної ненадійності клейових з'єднань, можливих дефектів виготовлення, а також на основі практичних рекомендацій [5, 8], довжину зони з'єднання зазвичай приймають рівною подвоєній ширині цієї зони:

$$l_3 = 2B_3. \quad (5)$$

Спираючись на основні положення математичної моделі адгезійного з'єднання, визначається глибина заформовування елементів поздовжнього зв'язку в композит. Як розрахункове зусилля, що сприймається адгезійним з'єднанням, приймається максимальна несуча здатність одного елемента поздовжнього зв'язку при розтягу (рис. 3).

Податливість елементів з'єднання на одиницю довжини визначається такими виразами:

$$P_{1x} = \frac{l}{\delta_1 E_k}, \quad P_{2x} = \frac{l}{\delta_2 E_{кмз}}, \quad k^2 = \frac{P_{1x} + P_{2x}}{P_c}. \quad (6)$$

Податливість з'єднувального шару P_c залежить від прийнятої моделі клейового з'єднання:

– для моделі Фолькерсена [9], відповідно до якої деформації зсуву враховуються як у клеї, так і в прилеглих шарах:

$$P_c = \frac{\delta_1}{2G_k} + \frac{\delta_2}{2G_{кмз}} + \frac{\delta_{нз}}{G_{нз}}; \quad (7)$$

– для класичної моделі [10], в якій вважається, що всі дотичні напруження зосереджені виключно в клейовому шарі:

$$P_c = \frac{\delta_{нз}}{G_{нз}}. \quad (8)$$

Параметри розрахункової моделі визначаються за такими співвідношеннями, які отримано на основі геометричних співвідношень (рис. 3):

$$b = \delta + b_k, \quad \delta_1 = \frac{\delta b_k}{2b}, \quad \delta_2 = \frac{l}{2b} \left[t_z t_y - \delta^2 \left(1 + \bar{\delta}_{нз} \right) \left(\frac{b_k}{\delta} + \bar{\delta}_{нз} \right) \right], \quad \bar{\delta}_{нз} = \frac{2\delta_{нз}}{\delta}. \quad (9)$$

Оскільки товщина покриття мікроелементів не має істотного впливу на несучу здатність з'єднання, у розрахунках (9) приймається $\delta_{нз}=0,01$ мм.

Для забезпечення надійної роботи з'єднання передбачається додаткове підсилення зони стику. Найбільш достовірним способом визначення необхідного рівня підсилення є експериментальне визначення коефіцієнта α :

$$\alpha = \frac{N_p}{N^*}, \quad (10)$$

де N^* – руйнівне навантаження для з'єднання без підсилення.

У першому наближенні можна вважати, що:

$$F_{nc} \geq F_k,$$

де F_{nc} – міцність посилення; F_k – міцність елемента.

Тоді у першому наближенні прийнято:

$$\alpha = 1 + \frac{F_{yc}}{F_l}. \quad (11)$$

Висота «сходинок» металевого фітинга $\Delta\delta$ (рис. 1), яка одночасно визначає крок розміщення елементів за товщиною t_z , визначається за формулою:

$$\Delta\delta = \frac{\delta_3}{m+1}, \quad \Delta l = \frac{l}{m}. \quad (12)$$

Кількість додаткових шарів композитного матеріалу в зоні підсилення визначається параметром l_3 , тобто довжиною заформовування елементів поздовжнього зв'язку в законцівку композиту, а також довжиною сходинок Δl . Це безпосередньо впливає на ефективність передачі навантаження між деталями. На рисунку 5 наведено типовий елемент, який ілюструє механізм передачі зусиль у зоні з'єднання з однієї деталі на іншу.

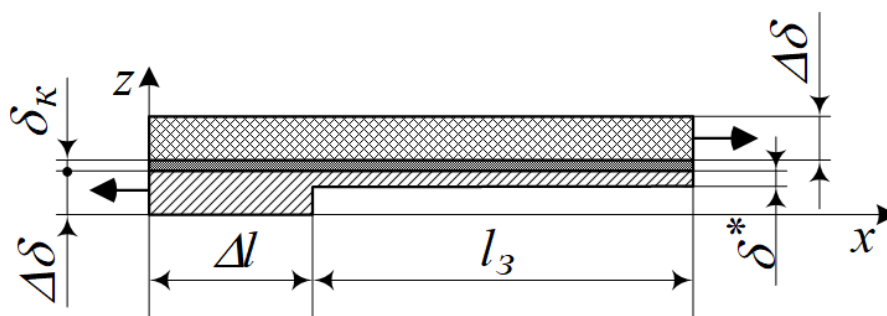


Рис. 5. Типовий елемент

Тоді кількість додаткових шарів композитного пакета визначається за залежністю:

$$n_{yc} = \frac{\delta_1(\alpha - 1) - n_i\delta}{\delta_{01}}, \quad (13)$$

де δ_1 – товщина одного моношару композиту; n_i – кількість рядів елементів поздовжнього зв'язку в розглянутому перерізі.

Оскільки руйнування клейового шару призводить до втрати працездатності елементів поздовжнього зв'язку, тоді гранична несуча здатність з'єднання визначається умовою руйнування клейового шару, що еквівалентно втраті працездатності елементів поздовжнього зв'язку. Гранична несуча здатність з'єднання, за умови руйнування елементів поздовжнього зв'язку та рівномірного розподілу дотичних напружень уздовж довжини з'єднання, визначається як:

$$F_{max} = F_{nz} \cdot l_{nz} \cdot B_3. \quad (14)$$

Отримані аналітичні залежності дозволяють визначити основні геометричні параметри з'єднання, а також виконати інженерну оцінку його несучої здатності з урахуванням конструктивних і технологічних факторів.

2. Результати дослідження параметрів та технології виготовлення з'єднання з елементами поздовжнього зв'язку

За наведеною аналітичною моделлю було проведено розрахунок параметрів виготовлення зразків з'єднання з елементами поздовжнього зв'язку для подальшого випробовування та верифікації аналітичної моделі.

Відповідно до технічного завдання, ширина і товщина поперечного перерізу композиту в регулярній частині були регламентовані і складали 60 і 6 мм відповідно.

Матеріал композитної частини – вуглепластик на основі односпрямованої стрічки та епоксидного компаунду Araldite LY556. Згідно з результатами попередніх експериментальних досліджень, межа міцності та модуль пружності для наданого вуглепластика становлять $F_1 = 580,74$ МПа та $E_1 = 74,2$ ГПа.

Враховуючи те, що структура композиту слабо впливає на його здатність чинити опір міжшаровому зсуву, межа міцності та модуль пружності на міжшаровий зсув для наданої композитної структури приймалися рівними відповідним характеристикам односпрямованого шару композиту, а саме: $F_{кмз} = 60$ МПа; $G_{кмз} = 3,7$ ГПа.

В якості матеріалу фітинга і мікроелементів поздовжнього зв'язку розглядалась сталь 30ХГСА з наступними властивостями: $F_\phi = F_k = 1200 \dots 1500$ МПа;

$E_{\phi}=E_k = 210$ ГПа.

Для матеріалу адгезиву було прийнято такі параметри: $G_{\text{пз}}=1,3$ ГПа; $F_{\text{пз}} = 50$ МПа.

За проведеними розрахунками відповідно до формули (2) навантаження на зразок складе приблизно 210 кН.

Для оцінки впливу товщини поздовжніх елементів на несучу здатність з'єднання розглядалися та аналізувалися ряд значень $\delta_k \in [0,3 \text{ мм}; 0,4 \text{ мм}; 0,5 \text{ мм}]$.

Використовуючи залежність (3) при заданих розмірах b_k, δ_k, t_y (рис. 3) отримано відповідні значення m (табл. 1). Отримані дрібні значення, конструктивно збільшуються до наступного цілого числа. Очевидно, що збільшення товщини кріпильного елемента буде призводити до зменшення кількості елементів ряду.

Таблиця 1

Кількість рядів елементів поздовжнього зв'язку m
(ширина зони з'єднання $B_3 = 60$ мм)

Товщина кріпильного елемента, δ_k , мм	Розрахункова кількість рядів елементів поздовжнього зв'язку m	Конструктивна кількість рядів елементів поздовжнього зв'язку m
0,3	15,47	16
0,4	11,61	12
0,5	9,28	10

Відповідно до висунутих припущень передачі навантажень аналогічно до з'єднання «на вус», використовуючи залежність (4) розрахункова довжина з'єднання становить не менше 70 мм.

Отримане розрахункове значення довжини з'єднання менше за подвійну ширину, тож у цьому випадку приймається значення 120 мм, яке додатково забезпечить надійність клеєвого з'єднання кріпильного елемента з композитною частиною.

Залежність (12) дозволяє визначити довжину "сходинок" металевого фітинга (рис. 1), яка залежить від товщини кріпильного елемента (табл. 2).

Водночас глибина заформовування кріпильних елементів у композит залежить від граничної несучої здатності мікроелемента – N^* , яке розраховується за формулою:

$$N^* = \frac{(F_k b_k \delta_k)}{2(b_k + \delta_k)}, \quad (15)$$

Ця залежність (15) отримана з умови рівномірного розподілу напружень у поперечному перерізі елемента. Згідно з формулою (15) при заданих умовах гранична несуча здатність мікроелемента для кожного випадку товщина знаходиться в діапазоні від 140,6 Н/мм для кріпильного елемента товщиною 0,3 мм до 187,5 Н/мм у випадку кріпильного елемента товщиною 0,5 мм (табл. 2).

Інші параметри розрахункової моделі клейового з'єднання двох деталей (рис. 3), в тому числі податливості елементів з'єднання визначалися залежностями (6), (7) і (9) і наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Параметри розрахункової моделі адгезійного з'єднання
з кріпильними елементами

Параметри розрахункової моделі								
δ_k , мм	δ_1 , мм	δ_2 , мм	$\delta_{пз}$, мм	Δl , мм	N^* , Н/мм	Податливість адгезійного шару, P_c , 10^{-8} м/Н	Податливості деталей	
							P_{1x} , 10^{-8} м/Н	P_{2x} , 10^{-8} м/Н
0,3	0,094	0,209	0,01	8	140,6	3,656	5,079	6,460
0,4	0,111	0,212		10	166,7	3,713	4,286	6,354
0,5	0,125	0,215		12	187,5	3,758	3,810	6,271

З отриманих результатів видно, що $P_{1x} < P_{2x}$, що свідчить про більшу жорсткість відповідної частини з'єднання. У зв'язку з цим максимальні дотичні напруження виникають поблизу кінця зони з'єднання $x=l_3$. З урахуванням цього для кожного типу кріпильних елементів визначено глибину заформовування (табл. 3).

За формулою (11) визначалась висота «сходів» металевго фітинга $\Delta\delta$ (рис. 1), або крок установки поздовжніх елементів за товщиною t_z (табл. 3).

Таблиця 3

Параметри встановлення кріпильних елементів

Товщина кріпильного елемента, δ_k , мм	Глибина заформовування l_3 , мм	Крок установки поздовжніх елементів $\Delta\delta$, мм
0,3	11,25	0,5
0,4	13,33	0,6
0,5	15,0	0,7

З урахуванням отриманого раніше параметра l_3 у кожному перерізі пакета композитної деталі у зоні законцівки зусилля будуть передаватися в середньому через три ряди мікроелементів, як показано на рисунку 6.

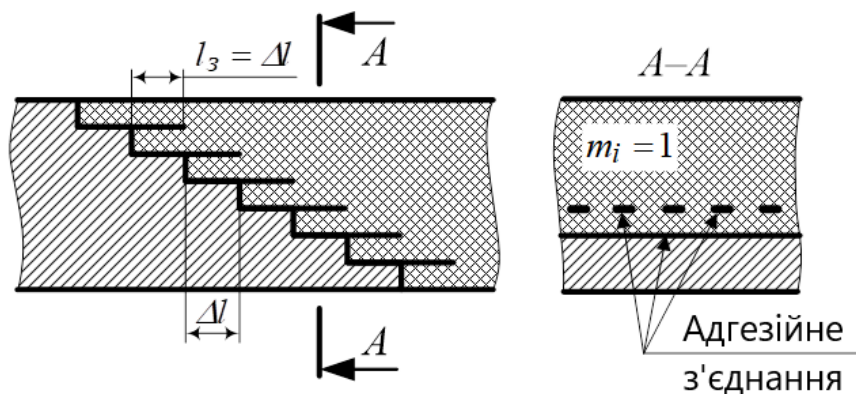


Рис. 6. Глибина заформування

Тоді за середньої товщини 0,4 мм мінімальна кількість додаткових шарів КМ за формулою (13) складе чотири шари.

Гранична оцінка несучої здатності з'єднання в припущенні про розрив елементів поздовжнього зв'язку та рівномірний розподіл дотичних напружень по довжині з'єднання визначалась за формулою (13) і після розрахунків склала 360 кН. Отримане значення свідчить про достатню несучу здатність з'єднання та узгоджується з розрахунковим навантаженням, що підтверджує працездатність запропонованого конструктивного рішення.

У подальшому актуальною є задача врахування технологічних аспектів, пов'язаних із визначенням параметрів формування [11, 12] та оцінкою напружено-деформованого стану з'єднання під час виготовлення.

Висновки

У роботі розроблено аналітичну модель гетерогенного з'єднання типу «метал–композит» з елементами поздовжнього зв'язку, яка враховує спільну роботу адгезійного шару та дискретних металевих мікроелементів при передачі навантаження.

Отримано замкнені розрахункові залежності для визначення основних конструктивних параметрів з'єднання, зокрема кількості рядів елементів поздовжнього зв'язку, довжини зони з'єднання, кроку їх розташування та глибини заформовування у композитний матеріал.

Встановлено, що збільшення товщини мікроелементів призводить до зменшення їх кількості при одночасному зростанні індивідуальної несучої здатності, що визначає перерозподіл навантаження в зоні з'єднання та впливає на вибір раціональних параметрів конструкції.

Показано, що характер розподілу дотичних напружень визначається співвідношенням податливостей елементів системи; при цьому максимальні напруження локалізуються у зонах з більшою жорсткістю, що необхідно враховувати при проектуванні.

Визначено параметри підсилення композитної частини в зоні з'єднання, включаючи необхідну кількість додаткових шарів, що забезпечує підвищення надійності та зниження ризику локального руйнування.

Розрахункова гранична несуча здатність з'єднання становить близько 360 кН і перевищує задане експлуатаційне навантаження, що свідчить про працездатність запропонованого конструктивного рішення.

Слід зазначити, що запропонована модель базується на припущенні рівномірного розподілу дотичних напружень та не враховує локальні концентрації напружень, тому отримані результати мають інженерно-оціночний характер і є найбільш придатними для попередніх стадій проектування.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну та/або чисельну верифікацію моделі, а також уточнення напружено-деформованого стану з урахуванням реальної структури композитного матеріалу.

References

1. Chairi, M. Composite materials: A review of polymer and metal matrix composites, their mechanical characterization, and mechanical properties [Text] / M. Chairi, J. El Bahaoui, I. Hanafi, F. Mata Cabrera, G. Di Bella // IntechOpen. – 2023. <https://doi.org/10.5772/intechopen.106624>.

2. Sajan, S. A review on polymer matrix composite materials and their applications [Text] / S. Sajan, D. Philip Selvaraj // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 47, Part 15. – P. 5493–5498. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.034>.
3. El-Sisi, A. Failure behavior of composite bolted joints: Review [Текст] / A. El-Sisi, A. Hassanin, F. Alsharari, N. Galustanian, H. Salim // *CivilEng*. – 2022. – Vol. 3, No. 4. – P. 1061–1076. <https://doi.org/10.3390/civileng3040060>.
4. Kurennov, S. Application of genetic algorithm for double-lap adhesive joint design [Текст] / S. Kurennov, K. Barakhov, O. Polyakov, I. Taranenko // *Archive of Mechanical Engineering*. – 2023. – Vol. 70, No. 2. – P. 27–42. <https://doi.org/10.24425/ame.2022.144074>.
5. Karpov, Y. S. Jointing of high-loaded composite structural components. Part 2. Modeling of stress-strain state [Text] / Y. S. Karpov // *Strength of Materials*. – 2006. – Vol. 38. – P. 481–491. <https://doi.org/10.1007/s11223-006-0067-9>.
6. 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>
7. Taranenko, I., & Seredenko, V. Analysis of tearing test results for joining tips of metal-composite joints [Text] / I. Taranenko, V. Seredenko // *Open Information and Computer Integrated Technologies*. – 2025. – No. 102. – P. 32–48. <https://doi.org/10.32620/oikit.2024.102.02>.
8. Jointing of high-loaded composite structural components. Part 1. Design and engineering solutions and performance assessment [Text] / Y. S. Karpov // *Strength of Materials*. – 2006. – Vol. 38. – P. 234–240. <https://doi.org/10.1007/s11223-006-0036-3>.
9. Volkersen, O. Die niekraftverteilung in zugbeanspruchten mit konstanten laschenquerschriften [Text] / O. Volkersen // *Luftfahrtforschung*. – 1938. – 15. – P. 41–47.
10. Ries, M. Mechanical behavior of adhesive joints: A review on modeling techniques [Text] / M. Ries // *Computer Methods in Materials Science*. – 2024. – Vol. 24, No. 4. – P. 5–35. <https://doi.org/10.7494/cmms.2024.4.1010>.
11. Effect of heating conditions during moulding on residual stress–strain behaviour of a composite panel [Текст] / A. Kondratiev, V. Píštěk, O. Vambol, P. Kučera // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14. – 1660. <https://doi.org/10.3390/polym14091660>.
12. Dewangan, B., & Chakladar, N. D. Modelling of residual stress during curing of a polymer under autoclave conditions and experimental validation [Text] / B. Dewangan, N. D. Chakladar // *Computational Materials Science*. – 2024. – Vol. 241. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2024.113038>.

Надійшла до редакції 1.04.2026, розглянута на редколегії 15.04.2026

Hybrid Metal–Composite Joints with Longitudinal Micro-Elements: Analytical Modeling and Strength Assessment

This paper addresses the relevant problem of improving the load-bearing capacity and reliability of heterogeneous metal–composite joints widely used in aerospace engineering. It is shown that conventional adhesive joints, despite their technological advantages, exhibit high sensitivity to surface preparation quality and

limited ability to effectively transfer interlaminar shear stresses, which reduces their operational reliability.

A novel design and technological solution is proposed, combining the adhesive load transfer mechanism with additional reinforcement in the form of discrete longitudinal connecting elements (micro-fasteners). In contrast to classical approaches, the proposed model accounts for the combined action of the adhesive layer and metallic micro-elements, enabling load redistribution and reducing stress concentrations in the composite part.

An analytical model is developed based on the assumption of a uniform distribution of shear stresses along the joint length and the application of compliance-based approaches. A system of design equations is obtained for determining the main geometric parameters of the joint, including the number of rows of micro-elements, the joint length, the embedment depth into the composite, and the parameters of composite reinforcement.

A numerical evaluation of the joint parameters is performed for a structure made of unidirectional carbon fiber-reinforced polymer bonded with an epoxy adhesive and reinforced with steel micro-elements. The influence of geometric characteristics of the longitudinal connecting elements on the load-bearing capacity is analyzed. It is established that increasing the thickness of the micro-elements leads to a reduction in their number while simultaneously increasing their individual load-bearing capacity, which affects the optimal design parameters.

The obtained results enable engineering design of efficient metal–composite joints considering both structural and technological factors. The proposed approach can be used for further experimental validation as well as for optimization of joint parameters in advanced aerospace structures.

Keywords: polymer composites, composite materials, metal–composite joints, adhesive joints, heterogeneous joints, longitudinal joining elements, joint compliance, aerospace structures.

Відомості про авторів:

Вамболь Олексій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри авіаційної та виробничої інженерії Національного університету “Львівська політехніка”, Львів, Україна, e-mail: oleksii.o.vambol@lpnu.ua. ORCID: [0000-0002-1719-8063](https://orcid.org/0000-0002-1719-8063).

Гагауз Федір Миронович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства Національного аерокосмічного університету “Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна, e-mail: f.gagauz@khai.edu. ORCID: [0000-0001-6880-1857](https://orcid.org/0000-0001-6880-1857).

Баратов Костянтин Петрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: Kostiantyn.Barakhov@kname.edu.ua. ORCID: [0000-0003-1714-7917](https://orcid.org/0000-0003-1714-7917).

Ланець Олексій Степанович – доктор технічних наук, проф., професор кафедри авіаційної та виробничої інженерії Національного університету

“Львівська політехніка”, Львів, Україна, e-mail: oleksii.s.lanets@lpnu.ua.
ORCID: [0009-0005-9631-717X](https://orcid.org/0009-0005-9631-717X).

Пургіна Світлана Михайлівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства Національного аерокосмічного університету “Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна, e-mail: s.purhina@khai.edu. ORCID: [0000-0001-6992-5210](https://orcid.org/0000-0001-6992-5210).

Соловійов Олег Віталійович – доктор технічних наук, ст. наук. співробітник, професор кафедри авіаційної та виробничої інженерії Національного університету “Львівська політехніка”, Львів, Україна, e-mail: oleh.v.soloviov@lpnu.ua. ORCID: [0009-0005-9192-8481](https://orcid.org/0009-0005-9192-8481).

About the authors:

Oleksii VAMBOL – Ph.D., Assoc. Prof. of the Department of Aviation and Manufacturing Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, e-mail: oleksii.o.vambol@lpnu.ua. ORCID: [0000-0002-1719-8063](https://orcid.org/0000-0002-1719-8063).

Fedir GAGAUZ – Ph.D., Assoc. Prof. of the 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](https://orcid.org/0000-0001-6880-1857).

Kostiantyn BARAKHOV – Ph.D., Assoc. Prof. of the Department of Theoretical and Structural Mechanics, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine, e-mail: Kostiantyn.Barakhov@kname.edu.ua. ORCID: [0000-0003-1714-7917](https://orcid.org/0000-0003-1714-7917).

Oleksii LANETS – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Aviation and Manufacturing Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, e-mail: oleksii.s.lanets@lpnu.ua. ORCID: [0009-0005-9631-717X](https://orcid.org/0009-0005-9631-717X).

Svitlana PURHINA – Ph.D., Assoc. Prof. of the 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](https://orcid.org/0000-0001-6992-5210).

Oleh SOLOVIOV – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Aviation and Manufacturing Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, e-mail: oleh.v.soloviov@lpnu.ua. ORCID: [0009-0005-9192-8481](https://orcid.org/0009-0005-9192-8481).