

УДК 621.792.053:620.17

doi: 10.32620/aktt.2025.3.03

О. О. ВАМБОЛЬ¹, Ф. М. ГАГАУЗ¹, С. С. КУРЄННОВ¹,
К. П. БАРАХОВ², А. О. ГАРБУЗ²

¹ Національний аерокосмічний університет

“Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна

² Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова,
Харків, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНИХ І МІЦНІСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КЛЕЇВ

Клейове з'єднання широко застосовується у різних галузях промисловості завдяки своїм унікальним властивостям, надаючи можливість вирішення певних інженерних проблеми, пов'язаних з використанням інших типів з'єднань. Суттєва перевага клейових з'єднань у порівнянні з іншими традиційними методами з'єднання (такими як зварювання, клепа́ння, болтове з'єднання та інші) полягає в їх здатності забезпечувати виготовлення великогабаритних інтегрованих конструкцій. Розробка математичних моделей та аналітичних методів для аналізу міцності та проектування клейових з'єднань мають вирішальне значення для вдосконалення та просування технології клейового з'єднання в інженерну практику. При проектуванні клейових з'єднань для оцінки діючих напружень і визначення потрібної площі з'єднання спираються на відомі пружні та міцнісні характеристики клею. Ці властивості визначають розподіл напружень у клейовому шарі, можливий вид руйнувань та загальну несну здатність з'єднання. Отже, клейові з'єднання виступають **об'єктом дослідження** в цій роботі, а **предметом дослідження** є механічні характеристики клею. **Мета роботи** полягає в отриманні значень пружних і міцнісних характеристик клеїв, які використовуються при проектуванні з'єднань та служать основними вхідними даними при моделюванні напруженого деформованого стану різних типів клейових з'єднань. В роботі наведено **результати** експериментального дослідження основних механічних властивостей двох типів клеїв: ВК-9 та 88-НП. У ході експериментальних досліджень отримано модулі зсуву двох клеїв: 361,4 МПа для клею ВК-9 і 16,0 МПа для клею 88-НП. Проведено стандартні випробування для визначення міцності при відриві для двох вибраних клеїв: міцність клею ВК-9 становить 18,17 МПа, для клею 88-НП – 0,19 МПа. В обох випадках визначався характер руйнування клейових з'єднань: тип руйнування зразків, склеєних клеєм ВК-9, переважно відповідав адгезійному руйнуванню, тоді як зразки, склеєні клеєм 88-НП, продемонстрували типовий когезійний і змішаний тип руйнування. Отримані експериментальні дані можуть бути використані як для математичного моделювання напружень у клейових з'єднаннях, так і для розробки та вдосконалення критеріїв руйнування та методів аналізу міцності та проектування клейових з'єднань.

Ключові слова: механічні випробування; клейове з'єднання; з'єднання внапуск; стикове з'єднання; модуль зсуву клею; міцність клею при відриві.

1. Вступ

Складання тонкостінних авіаційних конструкцій традиційно виконується з використанням механічних (болтових або заклепувальних) або клейових з'єднань. Введення отворів, особливо в композитних конструкціях, призводить до концентрації напружень поблизу отвору та викликає нерівномірний їх розподіл в області болтового або заклепувального з'єднання, що може призвести до передчасного руйнування [1, 2]. Основною перевагою клейових з'єднань є можливість виготовлення великогабаритних, економічно ефективних і високоінтегрованих конструкцій [3]. Крім того, вони характеризуються конструктивною простотою та високою ефективністю та

широко використовуються для з'єднання композитних деталей і конструкцій в аерокосмічній техніці. Вагова ефективність клейових з'єднань в композитних конструкціях зумовлена їхньою здатністю розподіляти навантаження на набагато більшу площу, ніж у разі механічних з'єднань, а відсутність концентраторів напружень знижує ризик локального розшарування, що в кінцевому підсумку сприяє потенційній економії ваги клейового з'єднання порівняно з механічним.

1.1. Мотивація дослідження

Мотивацією для даного дослідження послужило зростання інтересу до використання клейових



[Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

з'єднань в конструкції літаків цивільної авіації, безпілотних літальних апаратів, автомобілів і т.п.

Підхід до проектування клейових з'єднань оснований на механіці взаємодії клейового шару зі з'єднуваними деталями за різних умов навантаження. У той самий час тип клейового з'єднання (одностороннє, двостороннє, ступінчасте, на вус тощо) суттєво впливає на розподіл напружень у клейовому шарі та з'єднуваних деталях [4]. Причому експериментальні дослідження несної здатності різних типів з'єднання показують, що їх ефективність багато в чому залежить також і від вибору клею – жорсткого або еластичного, з крихким або пластичним характером руйнування [5]. Використання склеювання для з'єднання композитних деталей надає широке поле можливостей для підвищення міцності за рахунок додаткового армування як клейового шару, так і деталей в зоні з'єднання [6].

Аналітичні рішення для проектування клейових з'єднань зазвичай зосереджені на прогнозуванні напружень та деформацій у клейовому шарі та забезпеченні загальної несної здатності з'єднання при типових експлуатаційних навантаженнях, таких як зсув, відрив, дія навантажень в площині з'єднання і т.д. Ранні роботи Фолькерсена [7] та Голанда і Рейсснера [8] встановили основні принципи для розрахунку напружень і деформацій як в з'єднуваних деталях, так і в клейовому шарі в односторонньому з'єднанні внапуск. Пізніше Харт-Сміт [9] розробив нове математичне формулювання, засноване на припущенні про скінченну жорсткість з'єднуваних деталей, розглядаючи їх як окремі балки. Узагальненню моделі Голанда і Рейсснера на випадок осьової симетрії одно- і двосторонніх з'єднань присвячено роботи [10, 11]. У зазначених вище роботах було закладено основні принципи розробки вдосконалених аналітичних моделей [12] та нових підходів до проектування клейових з'єднань на основі генетичних алгоритмів [13], методів топологічної оптимізації [14, 15], неоднорідного клейового шару [16, 17].

Слід зазначити, що більшість існуючих аналітичних і чисельних методів для розрахунку напружень у клейових з'єднаннях враховують скінченну жорсткість (або податливість) з'єднуваних елементів, тобто спираються на набір відомих механічних властивостей як деталей, що склеюються, так і клею. Більш того, критерії руйнування, що використовуються при проектуванні клейових з'єднань, засновані на властивостях, що характеризують міцність клейового шару. Існуючі аналітичні і чисельні методи розрахунку клейових з'єднань дають можливість визначати розподіл нормальних напружень в з'єднуваних деталях, а також розподіл зсувних і відривних напружень в клейовому шарі (рис. 1) з урахуванням скінченної жорсткості з'єднуваних деталей довільної

форми при різних випадках навантаження.

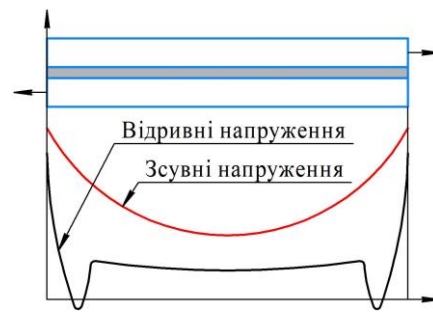


Рис. 1. Розподіл напружень в клейовому шарі

При попередньому проектуванні з'єднання з відомою геометрією деталей оцінка максимальних напружень, що виникають в клейовому шарі, та порівняння з максимально допустимими дозволяє прогнозувати необхідну довжину та ширину з'єднання. Таким чином, експериментальне визначення механічних властивостей клеїв є важливим етапом у розумінні їхньої поведінки під дією зовнішніх навантажень, прогнозуванні характеру руйнування клейових з'єднань та вдосконаленні методів проектування.

1.2. Сучасний стан

Незважаючи на те, що на даний момент розроблено та успішно застосовують ряд стандартних методів і процедур для експериментального визначення технологічних, фізичних, механічних характеристик клеїв [18], довідкової інформації з результатами випробувань окремих клеїв у вільному доступі не так багато, особливо це стосується пружних характеристик клеїв, які рекомендовані для використання в конструкціях авіаційної та ракетно-космічної техніки.

У циклі робіт [19 – 21] наведено результати випробувань щодо визначення модуля пружності та коефіцієнта Пуассона деяких плівкових клеїв різними методами: шляхом механічних випробувань на розтяг смужок [19], вирізаних з плівок, і методом наноіндентування [20], який також використовувався для дослідження властивостей клеїв після витримки у вологому середовищі [21]. Значення модуля зсуву полімерних клеїв були визначені опосередковано, припускаючи ізотропні та однорідні властивості досліджуваних матеріалів.

Результати обширних експериментальних досліджень деформативних характеристик клеїв при зсуві представлені у роботі [22]. Дослідження проводилися при нормальних умовах, а також в умовах підвищеної температури та вологості. Основною метою звіту було зробити ці дані доступними для використання в інженерній практиці при проектуванні та аналізу з'єднань.

У роботі [23] наведено результати експериментальних досліджень границі міцності на зсув термопластичних матеріалів, що широко використовуються для 3Д-друку (ABS, PLA, PETG і TPU) та проаналізовано потенційне використання таких полімерів як конструкційних клеїв.

Отже, проблема проєктування і аналізу міцності клейових з'єднань полягає в тому, що для розрахунку напружень в елементах з'єднання пружні та міцнісні властивості зазвичай добре відомі для склеюваних деталей, тоді як характеристики клею найчастіше складніше визначити [24], а наявних даних, з урахуванням широкої номенклатури сучасних конструкційних клеїв, мало.

1.3. Мета та задачі

Основна мета цієї роботи полягає в отриманні значень механічних характеристик клеїв для використання в подальшому проєктуванні з'єднань та моделюванні напруженого деформованого стану різних типів клейових з'єднань, у тому числі двоклейових. Для проведення експериментальних досліджень вибрано два типи клеїв: ВК-9 (4-компонентний епоксидний клей) та 88-НП (гумова суміш хлоропренового каучуку, в основі якої лежить неопренова фенолформальдегідна смола).

Для реалізації мети поставлено наступні задачі:

- виготовити по дві партії зразків для кожного типу клею для проведення випробувань на визначення модуля зсуву та границі міцності при відриві;
- провести серію механічних випробувань з реєстрацією необхідних даних;
- опрацювати результати випробувань з визначенням середніх значень та коефіцієнта варіації досліджуваних характеристик;
- проаналізувати отримані результати.

2. Методи дослідження

2.1. Матеріали та зразки

Механічні властивості двох вибраних клеїв досліджували на зразках клейового з'єднання метал-метал. Матеріалом з'єднуваних деталей є нержавіюча сталь AISI 304. Визначення модуля зсуву клеїв проводили шляхом випробування на розтягування зразків з'єднання внапуск (ГОСТ 25717, метод Б, див. рис. 2).

Зразки виготовлялися з урахуванням рекомендацій щодо застосування конкретного клею (рис. 3). Технологія виготовлення зразків з'єднань на основі клею ВК-9 включає наступні операції:

- шліфування та знежирення поверхонь склеюваних деталей;

- змішування компонентів клею з використанням рекомендованих масових пропорцій 60:40 для компонентів 1 і 2 (епоксидної і поліамідної смол). Потім до суміші додають компоненти 3 і 4 (суміш продуктів АГМ-3 та АДЕ-3) з розрахунку 0,6 і 0,012 мас. ч. відповідно. Життєздатність компаунду становить 30 хвилин за нормальних умов;

- нанесення клею на склеюванні поверхні в один шар;

- затвердіння клею у два етапи: 1) 24 години при температурі 23°C та тиску 0,01 МПа; 2) 1 годину при температурі 60°C та тиску 0,01 МПа.

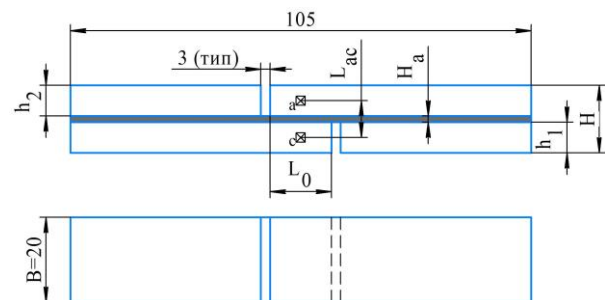


Рис. 2. Загальний вид зразка клейового з'єднання внапуск для визначення модуля зсуву

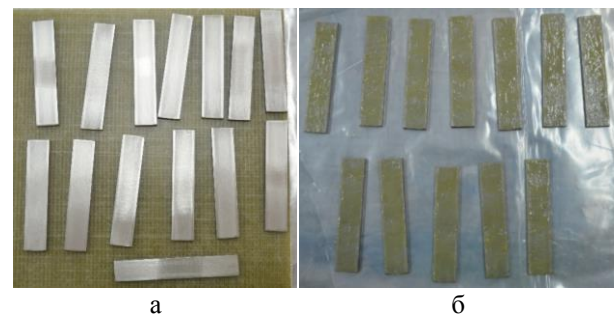


Рис. 3. Окремі операції виготовлення зразків клейового з'єднання внапуск

Міцність клеїв при відриві визначали на зразках клейових стикових з'єднань двох циліндричних стержнів (ASTM D2095, див. рис. 4).



Рис. 4. Циліндричний зразок стикового з'єднання для визначення границі міцності при відриві

Процес склеювання деталей з використанням клею 88-НП включав наступні операції:

- шліфування та знежирення склеюваних поверхонь;
- нанесення клею на поверхні в два шари, кожен шар сушився близько 15 хвилин;
- склеюванні поверхні щільно притискалися протягом 1 хвилини і витримувалися 24 години при температурі +23°C для повного склеювання.

2.2. Метод визначення модуля зсуву клею

Форма та розміри зразків клейового з'єднання внапуск для експериментального визначення модуля зсуву наведені на рис. 2. Склеюванні деталі являють собою металеві смужки шириною 20 мм з однаковою товщиною 3,8 мм. В рамках цього дослідження було виготовлено та випробувано по 5 дослідних зразків для кожного типу клею (рис. 5).

Перед випробуваннями були виміряні наступні параметри (див. рис. 2):

- довжина клейового шару (L_0);
- ширина зразка (B);
- відстань між контрольними точками а і с (L_{ac});
- загальна товщина зразка (H) і обчислена товщина клейового шару в зоні напуску (H_a).

Модуль зсуву клею можна отримати з лінійного співвідношення напруження-деформація, припускаючи, що дотичне напруження рівномірно розподілене по товщині з'єднання.

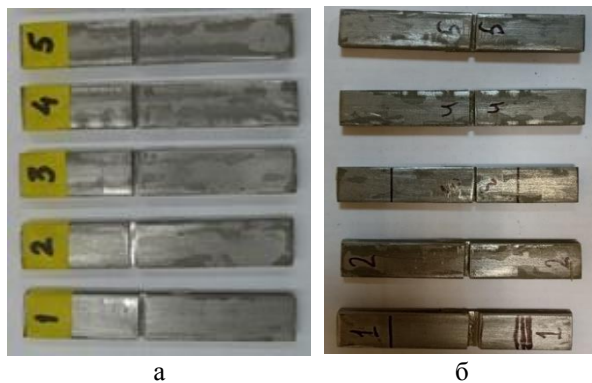


Рис. 5. Зразки клейового з'єднання внапуск, склеєні клеєм ВК-9 (а) і клеєм 88-НП (б)

Враховуючи малу зсувну деформацію, проста геометрична оцінка дає наступний вираз (див. рис. 6):

$$\operatorname{tg} \gamma \approx \gamma = \frac{\Delta L}{L_{ac}} = \frac{\Delta_1 + \Delta_a + \Delta_2}{L_{ac}}, \quad (1)$$

або, припускаючи однакову товщину та податливість

склеюваних деталей $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_s$

$$\gamma = \frac{2\Delta_s + \Delta_a}{L_{ac}}. \quad (2)$$

Згідно із законом Гука для склеюваних деталей і клейового шару

$$2\Delta_s = \frac{\tau}{G_s}(L_{ac} - H_a); \quad \Delta_a = \frac{\tau}{G_a}H_a, \quad (3)$$

де G_s , G_a – модулі зсуву деталей і клею відповідно.

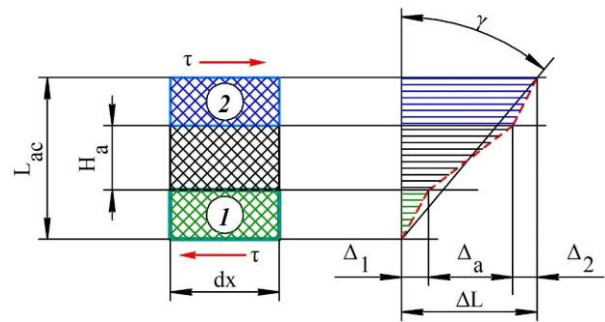


Рис. 6. Схематичне представлення деформованого стану клейового з'єднання

Підстановка виразів (3) у формулу (2) і припущення, що $\gamma L_{ac} = \Delta L$, призводить до наступного співвідношення:

$$\Delta L = \frac{\tau}{G_s}(L_{ac} - H_a) + \frac{\tau}{G_a}H_a. \quad (4)$$

Остаточно, припускаючи, що зсувні напруження рівномірно розподілені по довжині клейового з'єднання, тобто напруження є відношенням прикладеного навантаження до площі з'єднання, модуль зсуву клею можна розрахувати на основі виміряних і зареєстрованих у ході випробувань параметрів за такою формулою (ГОСТ 25717, метод Б):

$$G_a = \frac{\Delta P \cdot H_a}{B \cdot L_0 \left(\Delta L - \frac{\Delta P (L_{ac} - H_a)}{B \cdot L_0 \cdot G_s} \right)}, \quad (5)$$

де ΔP – зареєстрований приріст навантаження на лінійній ділянці кривої навантаження-переміщення; ΔL – зареєстрований приріст переміщення, що відповідає збільшенню навантаження ΔP .

Механічні випробування проводилися на розривній машині ZD-10/90 з використанням відеоекстензометра (рис. 7), до складу якого входить камера та програмне забезпечення для обробки відеосигналу.



Рис. 7. Загальний вигляд стану і обладнання для механічних випробувань

Вимірювання подовження зразка ΔL під час навантаження проводили в режимі реального часу шляхом фіксації відстані між маркерами на бічній поверхні металевих смужок (рис. 8).



Рис. 8. Контрастні маркери на бічних поверхнях склеюваних деталей

Навантаження зразків, склеєних клеєм ВК-9, проводили до руйнування. Враховуючи значну податливість клею 88-НП, процес запису даних припинявся при досягненні значних переміщень без помітного збільшення навантаження.

2.3. Метод визначення границі міцності клею при відриві

Визначення границі міцності клеїв при відриві у цьому дослідженні проводилося на зразках клейових стикових з'єднань металевих циліндричних стержнів. Ідея цього методу полягає в прикладенні до зразка розтягуючої сили, спрямованої перпендикулярно до площини з'єднання. Випробування зразків склеєних клеєм ВК-9 здійснювалося на розривній машині ZD-10/90 (рис. 9, а), зразки з'єднань склеєних клеєм 88-НП були випробувані на розривній машині РМУ-0,05-1 (рис. 9, б).

Міцність клею при відриві розраховувалась як відношення граничного навантаження на площу склеювання.



Рис. 9. Випробування зразків для визначення границі міцності клеїв при відриві

3. Результати і обговорення

Діаграми навантаження-переміщення, записані під час випробувань зразків з'єднання внапуск, представлені на рис. 10. Результати експериментального визначення модуля зсуву для двох клеїв за формулою (5) представлені в табл. 1.

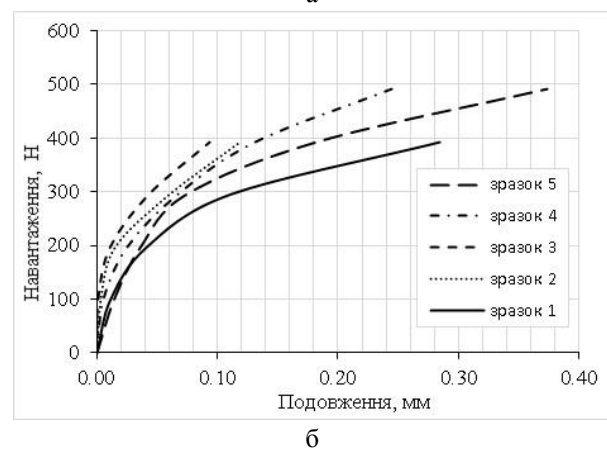
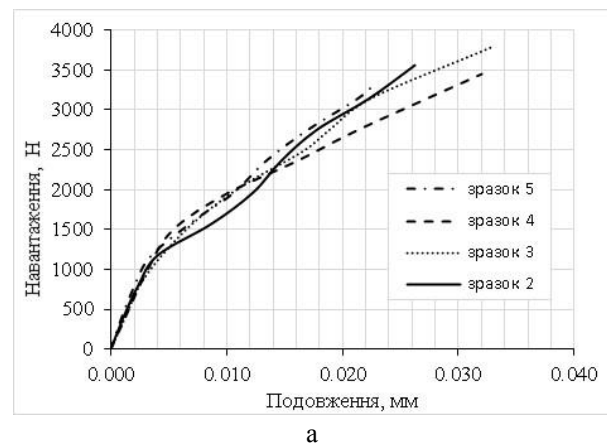


Рис. 10. Діаграми навантаження-переміщення для зразків з'єднання внапуск: а – клей ВК-9; б – клей 88-НП

Таблиця 1

Результати механічних випробувань
на визначення модуля зсуву клеїв

Зразок	Клей ВК-9			Клей 88-НП		
	L ₀ , мм	H _a , мм	G _a , МПа	L ₀ , мм	H _a , мм	G _a , МПа
1	10.61	0.20	—	12.23	0.20	7.3
2	9.71	0.21	388.1	10.44	0.15	23.7
3	11.35	0.19	284.4	12.70	0.07	27.5
4	10.56	0.23	367.4	11.61	0.17	14.4
5	10.49	0.20	405.9	11.43	0.29	6.9
Середнє значення, МПа			361.4	16.0		
Коефіцієнт варіації, %			14.9	58.7		

Для зразків з'єднання внапуск склеєних клеєм ВК-9 тип руйнування в основному відповідав адгезійному. Для зразків склеєних клеєм 88-НП спостерігалося характерне когезійне руйнування з'єднання.

Слід зазначити, що напружений стан у клейовому шарі з'єднання характеризується ефектом концентрації зсувних напружень на краях зони напуску (див. рис. 1). Існують різні конструктивні рішення, спрямовані на зниження концентрації напружень і, як наслідок, підвищення міцності клейових з'єднань. Суть таких конструктивних рішень полягає у реалізації нерівномірного розподілу товщини склеюваних деталей та/або клейового шару по довжині з'єднання [25, 26]. Спосіб застосування більш ніж двох типів клеїв [27, 28] також демонструє суттєвий потенціал для підвищення міцності клейового з'єднання. Клеї, розглянуті в цьому дослідженні, відповідають основній ідеї такого підходу: більш податливий клей наноситься ближче до країв напуску, тоді як більш жорсткий – у середній частині з'єднання.

Результати випробувань для визначення міцності клеїв при відриві наведено в табл. 2. Характер руйнування деяких зразків стикових клейових з'єднань показаний на рис. 11.

Таблиця 2

Результати випробувань щодо визначення границі міцності клеїв при відриві

Зразок	Клей ВК-9		Клей 88-НП	
	Руйнівна сила, Н	Границя міцності, МПа	Руйнівна сила, Н	Границя міцності, МПа
1	13979.7	19.78	135.4	0.19
2	12753.4	18.04	147.2	0.21
3	12262.9	17.35	116.7	0.17
4	13832.6	19.57	117.7	0.17
5	11380.0	16.10	157.0	0.22
Середнє значення, МПа		18.17	0.19	
Коефіцієнт варіації, %		8.5	13.2	

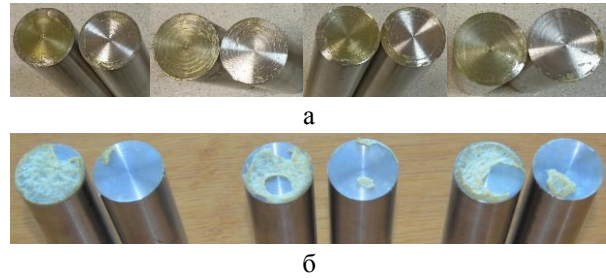


Рис. 11. Характер руйнування стикових клейових з'єднань: а – клей ВК-9; б – клей 88-НП

Висновки

У даній роботі наведено результати експериментального дослідження механічних властивостей двох клеїв: ВК-9 і 88-НП. Клеї, розглянуті в цьому дослідженні, обрані згідно концепції змішаного клейового з'єднання, спрямованій на зменшення ефекту нерівномірного розподілу напружень по довжині клейового з'єднання шляхом поєднання двох або більше клеїв з досить різними пружними властивостями.

У ході серії експериментальних досліджень отримано модулі зсуву двох клеїв: модуль зсуву клею ВК-9 становить 361,4 МПа, для клею 88-НП – 16,0 МПа. Отримані дані можуть бути використані для математичного моделювання та розрахунку одно- або двосторонніх клейових з'єднань з різною формою склеюваних деталей: плоских, скошених або ступінчастих.

Також були проведені випробування для визначення міцності при відриві двох вибраних клеїв. Міцність при відриві клею ВК-9 становить 18,17 МПа, а для клею 88-НП – 0,19 МПа.

В обох випробуваннях було визначено характер руйнування: для зразків, склеєних клеєм ВК-9, характер руйнування в основному відповідав адгезійному типу, тоді як зразки, склеєні клеєм 88-НП, продемонстрували когезійний та змішаний тип руйнування.

Отримані експериментальні дані плануються використати в подальших дослідженнях авторів, спрямованих на розробку та вдосконалення математичних моделей і аналітичних методів аналізу міцності, оптимізації конструкції та форми однокомпонентних та змішаних клейових з'єднань.

Внесок авторів: огляд та аналіз літератури, стандартних методів досліджень полімерних клеїв, формулювання мети та задач дослідження, написання рукопису роботи – **С. С. Куреннов**; виготовлення зразків та проведення механічних випробувань – **К. П. Барахов, Ф. М. Гагауз**; опрацювання та статистична обробка результатів експериментів – **О. О. Вамболь, А. О. Гарбуз**; написання рукопису роботи – всі автори.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо матеріалів цієї публікації, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Benatar, A. *Joining of composites* [Text] / A. Benatar, J. Jr. Gillespie, & K. Kedward // *Advanced Composites Manufacturing* / ed. by T.G. Gutowski. – New York : John Wiley & Sons Publishers, 1997. – P. 487–512.
2. Jones, R. M. *Mechanics of composite materials* [Text] / R. M. Jones. – 2nd ed. – New York : Taylor and Francis Publishers, 1999. – 538 p. DOI: 10.1201/9781498711067.
3. van Rijn, L. P. V. M. *Towards the fastenerless composite design* [Text] / L. P. V. M. van Rijn // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 1996. – Vol. 27, no. 10. – P. 915–920. DOI: 10.1016/1359-835X(96)00009-7.
4. Shishesaz, M. *Effects of joint geometry and material on stress distribution, strength and failure of bonded composite joints: an overview* [Text] / M. Shishesaz, & M. Hosseini // *The Journal of Adhesion*. – 2018. – Vol. 96, no. 12. – P. 1053–1121. DOI: 10.1080/00218464.2018.1554483.
5. *Comparison of different adhesively-bonded joint types for mechanical structures* [Text] / N. G. C. Barbosa, R. D. S. G. Campilho, F. J. G. Silva, & R. D. F. Moreira // *Applied Adhesion Science*. – 2018. – Vol. 6. – Article No. 15. DOI: 10.1186/s40563-018-0116-1.
6. 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. – Article No. 113923. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113923.
7. Volkersen, O. *Die niekraftverteilung in zugbeanspruchten mit konstanten laschenquerschnitten* [Text] / O. Volkersen // *Luftfahrtforschung*. – 1938. – Vol. 15 – P. 41–47.
8. Goland, M. *The stresses in cemented joints* [Text] / M. Goland, & E. Reissner // *Journal of Applied Mechanics*. – 1944. – Vol. 11, no. 1. – P. 17–27. DOI: 10.1115/1.4009336.
9. *Adhesive-bonded single lap joints* [Electronic resource] / L. J. Hart-Smith // NASA CR-112236. – Hampton, Virginia: Langley Research Center, 1973. – Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740005083> (accessed: 12.02.2025).
10. Барахов, К. П. Узагальнення моделі Голанда і Рейсснера на випадок осьової симетрії [Текст] / К. П. Барахов // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2021. – № 2(170). – С. 12–19. DOI: 10.32620/akt.2022.2.01.
11. *Напружено-деформований стан пластини, яка послаблена круговим вирізом та посилена двома круглими накладками* [Текст] / С. С. Куреннов, К. П. Барахов, О. О. Вамболь, & В. М. Степаненко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2022. – № 2(178). – С. 4–13. DOI: 10.32620/akt.2022.2.01.
12. *Analytical models of adhesively bonded joints – Part I: Literature survey* [Text] / L. F. M. da Silva, P. J. C. das Neves, R. D. Adams, & J. K. Spelt // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2009. – Vol. 29, no. 3. – P. 319–330. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2008.06.005.
13. *Application of genetic algorithm for double-lap adhesive joint design* [Text] / S. Kurennov, K. Barakhov, O. Polyakov, & I. Taranenko // *Archive of Mechanical Engineering*. – 2023. – Vol. 70, no. 2. – P. 27–42. DOI: 10.24425/ame.2022.144074.
14. Munk, D. J. *Topology and shape optimization methods using evolutionary algorithms: a review* [Text] / D. J. Munk, G. A. Vio, & G. P. Steven // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2015. – Vol. 52, no. 3. – P. 613–631. DOI: 10.1007/s00158-015-1261-9.
15. Kurennov, S. *Topology optimization of adhesively bonded double lap joint* [Text] / S. Kurennov, K. Barakhov, & I. Taranenko // *In Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods. Advanced Structured Materials* / ed. by H. Altenbach [et al.]. – 2024. – Vol. 204. – P. 303–323. DOI: 10.1007/978-3-031-54063-9_21.
16. da Silva, L. F. M. *Joint strength optimization by the mixed-adhesive technique* [Text] / L. F. M. da Silva, & M. J. C. Q. Lopes // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2009. – Vol. 29, no. 5. – P. 509–514. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2008.09.009.
17. Kurennov, S. *Topological optimization BI-adhesive double lap adhesive joint. One-dimension model* [Text] / S. Kurennov, K. Barakhov, & O. Vambol // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2023. – Article No. 103474. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2023.103474.
18. Petrie, E. M. *Handbook of Adhesives and Sealants* [Text] / E. M. Petrie. – 3rd ed. – New York : McGraw Hill, 2021. – 784 p.

19. Konnerth, J. Elastic properties of adhesive polymers. I. Polymer films by means of electronic speckle pattern interferometry [Text] / J. Konnerth, W. Gindl, & U. Müller // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2006. – Vol. 103, no. 6. – P. 3936–3939. DOI: 10.1002/app.24434.

20. Elastic properties of adhesive polymers. II. Polymer films and bond lines by means of nanoindentation [Text] / J. Konnerth, A. Jäger, J. Eberhardsteiner, U. Müller, & W. Gindl // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2006. – Vol. 102, no. 2. – P. 1234–1239. DOI: 10.1002/app.24427.

21. Elastic properties of adhesive polymers. III. Adhesive polymer films under dry and wet conditions characterized by means of nanoindentation [Text] / J. Konnerth, F. Stöckel, U. Müller, & W. Gindl // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2010. – Vol. 118, no. 3. – P. 1331–1334. DOI: 10.1002/app.32342.

22. Shear Stress-Strain Data for Structural Adhesives [Electronic resource] / J. Tomblin, W. Seneviratne, P. Escobar, & Y. Yoon-Khian // *Technical Report DOT/FAA/AR-02/97*. – 2002. – 60 p. Available at: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA411505> (accessed: 12.02.2025).

23. Öz, Ö. A comprehensive experimental study of the potential use of 3D printable thermoplastic polymers as structural adhesives [Text] / Ö. Öz, & F. H. Öztürk // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. – Vol. 137. – P. 6073–6090. DOI: 10.1007/s00170-025-15532-9.

24. da Silva, L. F. M. Measurement of the mechanical properties of structural adhesives in tension and shear over a wide range of temperatures [Text] / L. F. M. da Silva, & R. D. Adams // *Journal of Adhesion Science and Technology*. – 2005. – Vol. 19, no. 2. – P. 109–141. DOI: 10.1163/1568561053148449.

25. Haghani, R. Effect of laminate tapering on strain distribution in adhesive joints: Experimental investigation [Text] / R. Haghani, M. Al-Emrani, & R. Kliger // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2009. – Vol. 29, no. 7. – P. 972–985. DOI: 10.1177/0731684408102698.

26. Розподіл напружень у клейовому шарі залежно від форми краю з'єднання [Текст] / С. С. Куреннов, К. П. Барахов, О. О. Вамболь, & О. С. Пічугіна // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2022. – № 3. – С. 4–12. DOI:

27. Golewski, P. Tensile behaviour of double- and triple-adhesive single lap joints made with spot epoxy and double-sided adhesive tape [Text] / P. Golewski // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, no. 21. – Article No. 7855. DOI: 10.3390/ma15217855.

28. A comprehensive experimental study on BI-adhesive single lap joints using DIC technique [Text] / F. Ramezani, M. R. Ayatollahi, A. Akhavan-Safar, & L. F. M. da Silva // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2020. – Vol. 102. – Article No. 102674. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102674.

References

1. Benatar, A., Kedward, K., & Gillespie J. W. Jr. Joining of Composites, Chapter 12 in *Advanced Composites Manufacturing*, T. G. Gutowski (ed.). John Wiley & Sons Publishers, 1997, pp. 487–512.

2. Jones, R. M. *Mechanics of composite materials*, 2nd ed. Taylor and Francis Publishers, 1999. 538 p. DOI: 10.1201/9781498711067.

3. van Rijn, L. P. V. M. Towards the fastenerless composite design. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1996, vol. 27, iss. 10, pp. 915–920. DOI: 10.1016/1359-835X(96)00009-7.

4. Shishesaz, M. Effects of joint geometry and material on stress distribution, strength and failure of bonded composite joints: an overview. *The Journal of Adhesion*, 2018, vol. 96, iss. 12, pp. 1053–1121. DOI: 10.1080/00218464.2018.1554483.

5. Barbosa, N. G. C., Campilho, R. D. S. G., Silva, F. J. G., & Moreira, R. D. F. Comparison of different adhesively-bonded joint types for mechanical structures. *Applied Adhesion Science*, 2018, vol. 6, article no. 15. DOI: 10.1186/s40563-018-0116-1.

6. Kupski, J. Design of adhesively bonded lap joints with laminated CFRP adherends: Review, challenges and new opportunities for aerospace structures. *Composite Structures*, 2021, vol. 268, article no. 113923. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113923.

7. Volkersen, O. Die niekraftverteilung in zugbeanspruchten mit konstanten laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung*, 1938, vol. 15, pp. 41–47.

8. Goland, M., & Reissner, E. The stresses in cemented joints. *Journal of Applied Mechanics*, 1944, vol. 11, no. 1, pp. 17–27. DOI: 10.1115/1.4009336.

9. Hart-Smith, L. J. *Adhesive-bonded single lap joints*. NASA CR-112236. 1973.

10. Barakhov, K. P. Uzahalnennia modeli Holanda i Reissnera na vypadok osovoi symetrii [Generalization of the Holland and Reissner Model in Case of Axial Symmetry]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 2(170), pp. 12–19. DOI: 10.32620/akt.2021.2.02. (In Ukrainian).

11. Kurennov, S., Barakhov, K., Vambol, O., & Stepanenko, V. Napruzhenno-deformovanyy stan plastyny, yaka poslablena kruhovym vyrizom ta posylena dvoma kruhlymy nakladkami [The stress-strain state of a plate is weakened by a circular cutout and reinforced by two round patches]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 2, pp. 4–13. DOI: 10.32620/akt.2022.2.01. (In Ukrainian).

12. da Silva, L. F. M., das Neves, P. J. C., Adams, R. D., & Spelt, J. K. Analytical models of adhesively bonded joints. Part I: Literature survey. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009, vol. 29, no. 3, pp. 319–330. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2008.06.005.

13. Kurennov, S., Barakhov, K., Polyakov, O., & Taranenko, I. Application of genetic algorithm for double-lap adhesive joint design. *Archive of Mechanical Engineering*, 2023, vol. 70, no. 2, pp. 27-42. DOI: 10.24425/ame.2022.144074.
14. Munk, D. J., & Vio, G. P. Topology and shape optimization methods using evolutionary algorithms: a review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2015, vol. 52, no. 3, pp. 613-631. DOI: 10.1007/s00158-015-1261-9.
15. Kurennov, S., Barakhov, K., & Taranenko, I. Topology optimization of adhesively bonded double lap joint, in *Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods. Advanced Structured Materials*, ed. by Altenbach, H [et al.], 2024, vol. 204, pp. 303-323. DOI: 10.1007/978-3-031-54063-9_21.
16. da Silva, L. F. M., & Lopes, M. J. C. Q. Joint strength optimization by the mixed-adhesive technique. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009, vol. 29, no. 5, pp. 509-514. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2008.09.009.
17. Kurennov, S., Barakhov, K., & Vambol, O. Topological optimization BI-adhesive double lap adhesive joint. One-dimension model. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2023, article no. 103474. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2023.103474.
18. Petrie, E. M. *Handbook of Adhesives and Sealants*. 3rd ed. New York, McGraw Hill, 2021. 784 p.
19. Konnerth, J., Gindl, W., & Müller, U. Elastic properties of adhesive polymers. I. Polymer films by means of electronic speckle pattern interferometry. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, vol. 103, no. 6, pp. 3936-3939. DOI: 10.1002/app.24434.
20. Konnerth, J., Jäger, A., Eberhardsteiner, J., Müller, U., & Gindl, W. Elastic properties of adhesive polymers. II. Polymer films and bond lines by means of nanoindentation. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, vol. 102, no. 2, pp. 1234-1239. DOI: 10.1002/app.24427.
21. Konnerth, J., Stöckel, F., Müller, U., & Gindl, W. Elastic properties of adhesive polymers. III. Adhesive polymer films under dry and wet conditions characterized by means of nanoindentation. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, vol. 118, no. 3, pp. 1331-1334. DOI: 10.1002/app.32342.
22. Tomblin, J., Seneviratne, W., Escobar, P., & Yoon-Khian, Y. Shear Stress-Strain Data for Structural Adhesives. Technical Report DOT/FAA/AR-02/97, 2002. 60 p.
23. Öz, Ö., & Öztürk, F.H. A comprehensive experimental study of the potential use of 3D printable thermoplastic polymers as structural adhesives. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 137, pp. 6073-6090. DOI: 10.1007/s00170-025-15532-9.
24. da Silva, L. F. M., & Adams, R. D. Measurement of the mechanical properties of structural adhesives in tension and shear over a wide range of temperatures. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2005, vol. 19, no. 2, pp. 109-141. DOI: 10.1163/1568561053148449.
25. Haghighi, R. Al-Emrani, M., & Kliger, R. Effect of laminate tapering on strain distribution in adhesive joints: Experimental investigation. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2009, vol. 29, no. 7, pp. 972-985. DOI: 10.1177/0731684408102698.
26. Kurennov, S. S., Barakhov, K. P., Vambol, O. O., & Pichuhina, O. S. Rozpodil napruzhen' u kleyovomu shari zalezno vid formy krayu z'yednannya [The stress distribution in the adhesive layer depending on the shape of the joint edge]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 3, pp. 4-12. DOI: 10.32620/aktt.2022.3.01. (In Ukrainian).
27. Golewski, P. Tensile behaviour of double- and triple-adhesive single lap joints made with spot epoxy and double-sided adhesive tape. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 21, article no. 7855. DOI: 10.3390/ma15217855.
28. Ramezani, F., Ayatollahi, M. R., Akhavan-Safar, A., & da Silva, L. F. M. A comprehensive experimental study on BI-adhesive single lap joints using DIC technique. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2020, vol. 102, article no. 102674. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102674.

Надійшла до редакції 10.04.2025, розглянута на редколегії 20.05.2025

EXPERIMENTAL STUDY OF ELASTIC AND STRENGTH PROPERTIES OF ADHESIVES

**Oleksii Vambol, Fedir Gagauz, Serhii Kurennov,
Kostiantyn Barakhov, Alla Garbuz**

Adhesive bonding is widely used across various industrial sectors due to its unique properties, offering effective solutions to certain engineering challenges associated with other types of joints. A significant advantage of adhesive bonding over traditional joining methods (such as welding, riveting, or bolting) is its capacity to facilitate the manufacturing of large-scale integrated structures. The development of mathematical models and analytical methods for

analyzing the strength and designing adhesive joints is crucial for improving and advancing adhesive bonding technology in engineering practice. The design of adhesive joints relies on the known elastic and strength properties of the adhesive, which are used to evaluate the acting stresses and to determine the required bonding area. These properties influence the stress distribution within the adhesive layer, the possible type of failure, and the overall load-bearing capacity of the joint. Accordingly, this study focuses on adhesive joints, with particular attention to the mechanical characteristics of the adhesive material. The work aims to determine the elastic and strength properties of adhesives used in the design, serving as the primary input data for modelling the stress-strain state of various types of adhesive joints. The paper presents the results of an experimental investigation into the key mechanical properties of two adhesives: VK-9 and 88-NP. In the course of the experimental studies, the shear moduli of two adhesives were obtained: 361.4 MPa for VK-9 adhesive and 16.0 MPa for 88-NP adhesive. Standard tests were also conducted to determine the peel strength for the two selected adhesives: the strength of VK-9 adhesive is 18.17 MPa, and for 88-NP adhesive it is 0.19 MPa. In both cases, the nature of the failure of the adhesive joints was determined: the failure type of the samples glued with VK-9 adhesive preferably corresponded to adhesive failure, while the samples glued with 88-NP adhesive demonstrated a typical cohesive and mixed failure type. The experimental data obtained can be used both for mathematical modelling of stress distribution in adhesive joints and for the development and refinement of failure criteria, strength analysis methods, and design approaches for adhesive joints.

Keywords: mechanical testing; adhesive joint; lap joint; butt joint; shear modulus of adhesive; adhesive peel strength.

Вамболь Олексій Олександрович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства, Національний аерокосмічний університет “Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна.

Гагауз Федір Миронович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедри композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства, Національний аерокосмічний університет “Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна.

Куреннов Сергій Сергійович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедри вищої математики та системного аналізу, Національний аерокосмічний університет “Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна.

Баратов Костянтин Петрович – канд. техн. наук, доц., в.о. зав. каф. теоретичної і будівельної механіки, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків, Україна.

Гарбуз Алла Олегівна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. теоретичної і будівельної механіки, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків, Україна.

Oleksii Vambol – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor at the 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, Scopus Author ID: 58019307600.

Fedir Gagauz – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor at 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, Scopus Author ID: 56440089400.

Sergiy Kurennov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Higher Mathematics and System Analysis, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: kurennov.ss@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3835-3288, Scopus Author ID: 11839716000.

Kostiantyn Barakhov – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Acting Head of the Department of Theoretical and Structural Mechanics, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: kpbarakhov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1714-7917, Scopus Author ID: 57211205257.

Alla Garbuz – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Theoretical and Structural Mechanics, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: alla.garbuz@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3795-3142.