

doi: 10.32620/oikit.2024.102.02

УДК 629.735

I. М. Тараненко, В. В. Середенко

Аналіз результатів випробувань на руйнування з'єднань метало-композитних закінцівок

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
“Харківський авіаційний інститут”*

При проектуванні високонавантажених з'єднань метало-композитних закінцівок агрегатів аерокосмічної техніки виникає проблема оцінки їх несучої здатності, перевірки адекватності створених математичних моделей розрахунку реальним результатам випробувань та вивчення залежності технології виробництва таких з'єднань на їх остаточну несучу здатність.

У якості мети дослідження обрано вивчення залежності несучої здатності з'єднань “метал-композит” від технології їх створення та оцінка процесу контролю якості комбінованих з'єднань з циліндричними трансверсальними мікроелементами та адгезійним зв'язком між з'єднувальними деталями.

У якості об'єкта дослідження розглядаються з'єднання пласкої металевої закінцівки з деталлю з вуглепластику за допомогою трансверсальних циліндричних штифтів та клею. Трансверсальні штифти різного діаметру впроваджені у пакет композиту. Розглядаються різні технологічні процеси підготовки поверхні металевої деталі та штифтів для подальшого склеювання з метою максимального підвищення адгезії між полімерним сполучним та металевими елементами з'єднання. Також для більш раціонального розподілу жорсткості та відповідних напружень у деталях металева закінцівка має змінну товщину за довжиною з'єднання.

У якості результатів дослідження оцінено теоретичне руйнівне навантаження з'єднань та порівняно з результатами експериментальних випробувань. Також рекомендовано технологічний процес підготовки поверхні металевої деталі та штифтів для подальшого з'єднання з композитною деталлю, який забезпечує максимальну адгезію між з'єднувальними деталями.

Зроблено висновок щодо діаметру штифтів та форми профільованої металевої деталі, які забезпечують максимальну несучу здатність з'єднання.

Проаналізовано типи руйнування з'єднань та зроблено висновки щодо змін у технології підготовки поверхонь, схеми розташування штифтів та вибору їх діаметру.

У якості висновків сформульовано рекомендації щодо певної технології обробки поверхні металевої деталі, яка гарантує максимальну адгезію між металевою деталлю, штифтами та композитом та обрано актуальні процеси контролю якості з'єднань “метал-композит” з трансверсальними мікроелементами.

Ключові слова: трансверсальні кріпильні елементи, з'єднання “метал-композит”, мікроштифти, клей, адгезія, випробування на розтягування.

Вступ

Для оцінки практичної значущості кваліметричної моделі управління якістю техпроцесів підготовки виробництва (ТПВ) та можливості використання одержаних за допомогою моделі результатів необхідно провести експериментальні параметри дослідження таких процесів в умовах дослідно-промислового (прототипного) виробництва. На двох підприємствах була досліджена номенклатура процесів виробництва таких з'єднань в промислових умовах.

За результатами багатьох досліджень науковцями було встановлено, що найбільш актуальними є з'єднання нахлесткувального типу з товщиною композитної частини у діапазоні 3...7 мм. Такі з'єднання працюють переважно при зсувному навантаженні та невеликих відшарувальних навантаженнях. Це

з'єднання композитних оболонок з металевими днищами та горловинами. Металеві частини таких з'єднань частіше всього виготовляються з титанових сплавів, а композитна частина – з вуглеволокнистих матеріалів, що скріплені різного роду полімерними матрицями, часто епоксидними.

Другим актуальним типом з'єднань є комбіноване болтове з'єднання з підсиленням трансверсальними кріпильними зв'язками. Вони призначені для сприйняття зминальних напружень та деформацій та зменшення впливу міжшарового зсуву.

Мета дослідження – вивчення залежності несучої здатності з'єднань “метал-композит” від технології їх створення та оцінка процесу контролю якості комбінованих з'єднань з циліндричними трансверсальними мікроелементами та адгезійним зв'язком між з'єднувальними деталями.

Огляд літератури. Аналіз основних досліджень у галузі оцінки КТР трансверсальних з'єднань.

Як відомо питання з'єднання елементів конструкцій, особливо у галузі аерокосмічної техніки, є найбільш важливим, тому що з'єднання вносять великий вклад у загальну масу конструкцій та є дуже часто причиною її руйнування. У світовій літературі багато уваги приділяється питанням проектування з'єднань метал-композит. Так у [1] розглянуто загальні інженерні підходи до проектування як адгезійних та і з'єднань різнорідних деталей за допомогою трансверсальних мікроелементів. Огляд можливої практичної реалізації таких з'єднань у вигляді металевих штифтів різного за геометрією перерізу монолітних або окремо виготовлених мікроштифтів зроблено у роботах [2, 3]. Більш детально практичні питання проектування чисто адгезійних з'єднань показано у [4, 5], а чисельне моделювання напружено-деформованого стану адгезійних з'єднань “метал-композит” розглянуто у [6]. Питання обробки поверхні під склеювання за рахунок спеціальної механічної обробки поверхні з'єднувальних деталей проаналізовано у [7]. У джерелах [8, 9] особлива увага приділена питанням вибору сучасних конструкційних клеїв та технології їх нанесенні. Реальні кількісні параметри несучої здатності нахлесткових з'єднань можливо отримати за результатами натурних випробувань. Схеми та методи випробувань розглянуто у [10-12]. Але, що стосується задачі дослідження несучої здатності комбінованих метало-композитних з'єднань з трансверсальними мікроелементами та клеєм, то це питання ще не до кінця вивчене. Також актуальним питанням є вибір технології обробки поверхонь металеві та композитної деталей для забезпечення максимальної адгезії між ними, вибір схеми розташування мікроштифтів, обґрунтування необхідності ступінчастого профілювання деталей за довжиною з'єднання, та оцінка загальної його якості.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження проводилися як за допомогою теоретичних методів – з використанням положень механіки матеріалів та конструкцій, механіки армованих матеріалів, обробки експериментальних даних, так і за допомогою експериментальних методів – випробувань на розтягування зразків нахлесткового з'єднання, методів мікроструктурного аналізу мікрошліфів ділянок з'єднань.

Вибір параметрів метало-композитного з'єднання з трансверсальними мікроелементами та клейовим шаром

У конкретних умовах пріоритетного типу виробництва підприємства з усіх найбільш важливих актуальних властивостей з'єднань було обрано найбільш актуальне – несуча здатність. Для її оцінки було спроектовано зразки з'єднань з кріпильними мікроелементами трансверсальних зв'язків, які спроможні передавати задане навантаження.

Рівень контрольного навантаження оцінено за несучою здатністю композитної деталі товщиною 6 мм, шириною 60 мм, виготовленої з пакету композиту з наступними параметрами: матеріал – 02С300UAP/LY556, укладка – $[0^{\circ}_{10}, 90^{\circ}_4, \pm 45^{\circ}_8]$ (рис. 1). Відповідно до результатів випробувань пакет має наступні характеристики: межа міцності при розтягуванні у напрямку 0° – 578 МПа; модуль пружності при розтягуванні у напрямку 0° – 74 ГПа. У відповідності до початкових даних контрольне значення навантаження дорівнює 208080 Н. Для подальшої роботи необхідно знати зсувні міцнісні та жорсткісні характеристики елементів з'єднання (у цьому випадку тільки композитної деталі, кріпильного елемента та, за необхідності, клейового підшару).

Відповідно до паспортним даних на сполучне LY556 міжшарові характеристики пакету наступні: межа міцності на міжшаровий зсув – 75,8 МПа; модуль міжшарового зсуву – 6150 МПа. У комбінованому з'єднанні з клейовим підшаром товщиною 0,1 мм використано клей БФ-2. Його міцність на зсув – 40 МПа, модуль зсуву – 3500 МПа.

Загальна схема зразка наведена на рис. 1. Металеві фланці виготовлені зі сталі 30ХГСА (товщина у зоні стику 6 мм). Заміна матеріалу зразка з Ті-сплаву на більш міцний обумовлена умовами експерименту. У принципі, при порівняльному аналізі, можна використати різні з'єднання по лівому й правому крайкам композитної деталі. У цьому випадку руйнування буде здійснюватися за найбільш слабкій ланці.

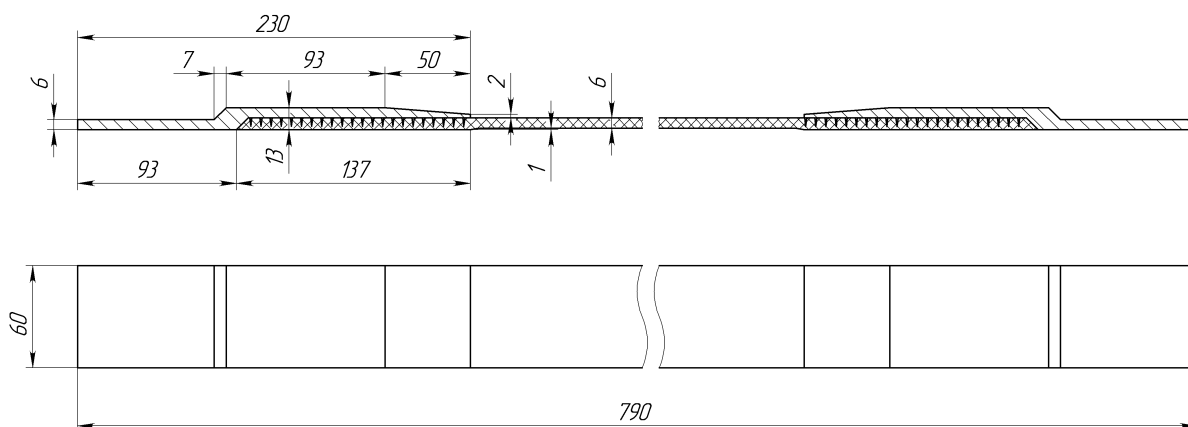


Рис. 1. Схема зразка з'єднання

Для коректного вибору параметрів з'єднання проведено аналіз з'єднувального шару різної композиції. Розглянуто наступні варіанти: клейове з'єднання, штифтове (штифти діаметром 1, 1,5 та 2 мм), комбіноване «клей+штифти». У випадку комбінованого зв'язку його міцність залежить як від властивостей клею та матеріалу штифта, а також від відносної площі штифтів $V_{ке}$.

При виборі відносної площі штифтів $v_{ке}$ було проведено порівняння міцності різних способів зв'язку $\tau_{зв}$ («штифт», «клей+штифт») з міцністю клею (рис. 2). При аналізі графіку можна зробити висновок, що більш кращими варіантами реалізації сполучного шару є ті, які допускають максимально можливу щільність встановлення штифтів. Відповідно до напрацьованого у Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» досвіду значення відносної площі штифтів повинно бути більше 7% ($v_{ке} \geq 0,07$). У цьому випадку ефективність кріпильних елементів буде гарантовано вище, ніж у клею.

Було розглянуто два варіанти розташування штифтів – тетрагональний (рис. 3, а) та шаховий (рис. 3, б).

Необхідне значення відносного кроку розміщення штифтів оцінюється за наступними залежностями:

$$- \text{для випадку рис. 3, а} \quad \bar{t} = \sqrt{\frac{\pi}{4v_{ке}}}; \quad (1)$$

$$- \text{для випадку рис. 3, б} \quad \bar{t} = \sqrt{\frac{\pi}{2v_{ке}}}. \quad (2)$$

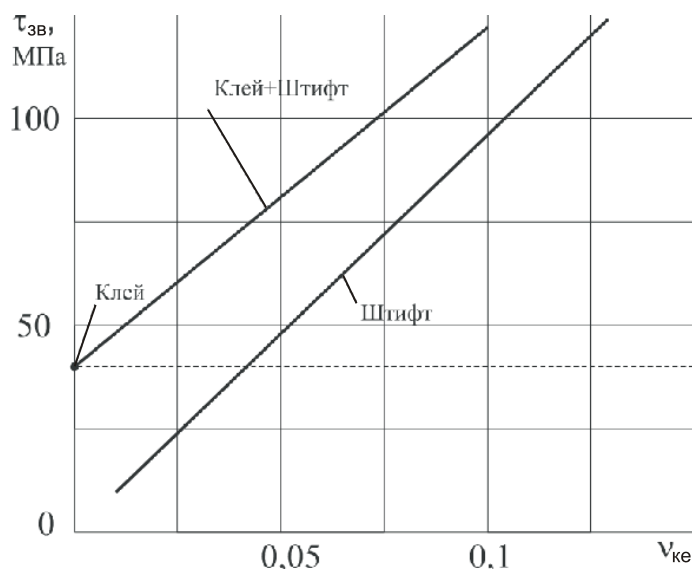


Рис. 2. Значення приведеної міцності «штифтового», «клеє-штифтового» зв'язків та міцності клею

У результаті розрахунку було отримано наступні результати – щоб відносна площа штифта була не менш 7% крок розміщення штифтів за тетрагональною схемою повинен бути не більше 3,35 діаметру, а в разі шахового розташування – не більш 4,74 діаметру. Таким чином, тетрагональне розташування штифтів рішення поставленої задачі не задовольняє. Так як штифти були виготовлені із дроту трьох діаметрів (1, 1,5 та 2 мм), а ширина стику 60 мм, були підібрані наступні варіанти розміщення кріпильних елементів: для діаметру 1 мм – крок 5 мм (відносний крок 5, що трохи більше необхідного); для діаметру 1,5 мм – крок 6 мм (відносний крок 4); для діаметру 2 мм – крок 7 мм (відносний крок 3,5).

В таблиці 1 наведено значення приведеної міцності сполучного шару, мінімальна кількість рядів штифтів (мінімальна довжина стику) за умови рівномірної передачі навантаження й максимальна кількість рядів (максимальна довжина стику), при досягненні якої спостерігався приріст несучої здатності з'єднання.

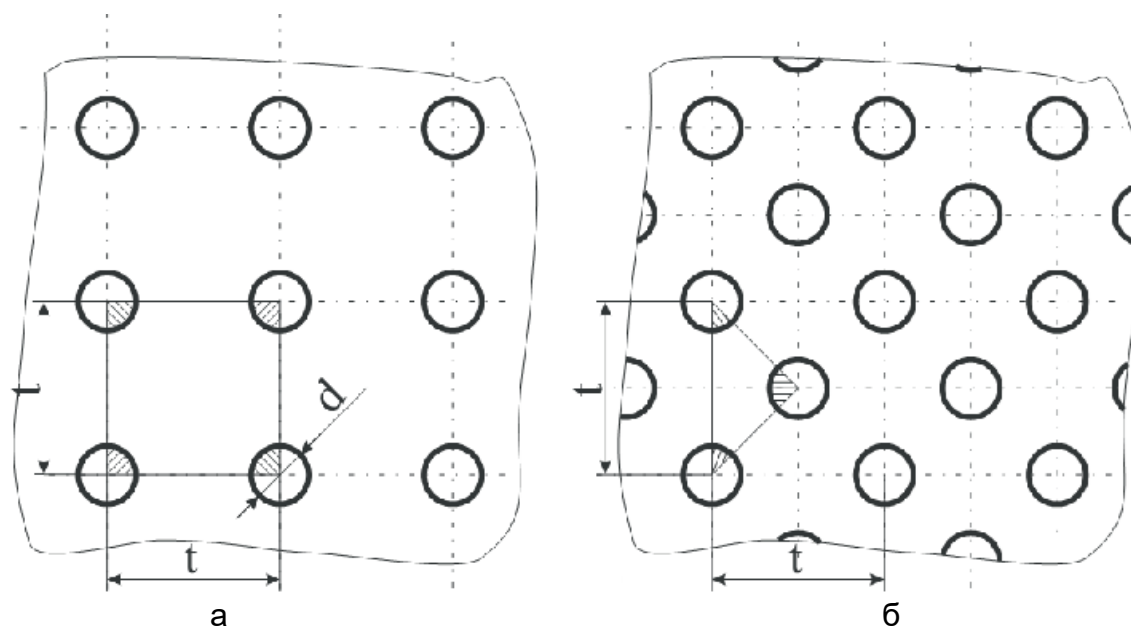


Рис. 3. Схеми встановлення штифтів: а – тетрагональна; б – шахова

Таблиця 1

Оцінка параметрів з'єднання

Вид та параметри з'єднувального шару	Приведена міцність з'єднувального шару, МПа	Мінімальна кількість рядів (кількість штифтів у ряду) / довжина стику, мм	Максимальна кількість рядів / довжина стику, мм	Максимальна початкова (розрахункова) несуча здатність, Н
Клей, $\delta_k=0,1$ мм	40	- / 86,7	- / 120	44210
Штифт $\varnothing 1$ мм, крок 5×5 мм, шахове	60,3	23 (11 по 12 в ряду и 12 по 11) / 57,5	37 / 92,5	54324
Штифт $\varnothing 1,5$ мм, крок 6×6 мм, шахове	94,3	13 (6 по 10 в ряду и 7 по 9) / 39	35 / 105	79841
Штифт $\varnothing 2$ мм, крок 7×7 мм, шахове	123,1	9 (5 по 8 в ряду и 4 по 7) / 31,5	23 / 80,5	101068
Клей+Штифт $\varnothing 1$ мм, крок 5×5 мм, шахове	91,5	15 (8 по 12 в ряду и 7 по 11) / 37,5	37 / 92,5	83980
Клей+Штифт $\varnothing 1,5$ мм, крок 6×6 мм, шахове	120,5	10 (5 по 10 в ряду и 5 по 9) / 30	29 / 87	103308
Клей+Штифт $\varnothing 2$ мм, крок 7×7 мм, шахове	145	10 (5 по 8 в ряду и 5 по 7) / 35	24 / 84	120932

Значення у п'ятому стовпчику табл. 1 вказують граничну величину навантаження, що може витримати з'єднання. Низьке значення навантаження пов'язане з істотною різницею у жорсткості деталей, а саме, сталевий фланець в 2,7 рази жорсткіше композитної деталі. Приймаючи, що вихідну товщину міняти не можна й профілювати композитну деталь технологічно не доцільно, було вирішено плавно зменшувати товщину фланця прямим скосом. У ході проектування з урахуванням вимог уніфікації оснащення були розроблені типові

зразки й конструкторська документація. Було виготовлено 30 зразків (по 10 штук на кожний типорозмір кріпильного елемента).

Випробування були проведені в контрольованих умовах. Отримані значення реальної несучої здатності й відповідних теоретичних значень наведені в табл. 2.

Форми руйнування з'єднання були різноманітні. До моменту руйнування діаграма розтягування була близькою до лінійної. Необхідно відзначити, що розрахунок несучої здатності проводився за спрощеною методикою без урахування температурних навантажень. Ці напруження, можуть досягати 30...50% від межі міцності композитного пакету. З великою вірогідністю слід вважати, що відмінність між прогнозованою несучою здатністю та отриманою експериментально може частково бути пояснено відсутністю урахування температурних напружень. У подальшому слід включити до обов'язкового переліку випробувань оцінку коефіцієнтів температурного лінійного розширення пакету КМ.

Таблиця 2

Несуча здатність з'єднання

Діаметр штифту, мм	Розрахункова несуча здатність, кН	Реальна несуча здатність, кН	Відносне відхилення, %
1	116,6	75	-35,6
1,5	147,2	102,4	-30,4
2	174,8	127,4	-27,1

Для збільшення несучої здатності з'єднання пропонується використовувати східчасту зміну товщини металевої закінцівки. Ефективність даного підходу демонструється на прикладі з'єднання зі штифтами $\varnothing 2$ мм. Сходинок виконані постійної ширини й висоти. Результати розрахунку наведені в таблиці 3.

Відповідно до табл. 3 ефективність застосування східчастої форми металевої деталі висока, але спостерігається стабілізація несучої здатності (за умови збереження довжини стику). Так що робити більше чотирьох переходів товщини у цьому випадку не доцільно, тому що значного приросту несучої здатності не спостерігається, а в зоні тонкої частини деталі виникають проблеми зі змінанням штифтом стінки отвору.

Таблиця 3

Розрахункова несуча здатність з'єднання східчастого фланця

Кількість сходів	Довжина сходу, мм	Висота сходу, мм	Несуча здатність, кН	Відносний приріст несучої здатності, %*
2	65	3	168,7	+39,4
3	43,3	2	198,3	+63,9
4	32,5	1,5	202,3	+67,2

* порівняння з максимальною початковою несучою здатністю 120,9 кН

У цілому, досягнута несуча здатність з'єднання на основі кле-штифтового зв'язку зі штифтами діаметром 1, 1,5 і 2 мм становить відповідно 36, 49,2 і 61,3 % від несучої здатності композитної деталі. Такий результат пояснюється високою концентрацією навантаження уздовж стику й негативним впливом температурних напружень. Східчасте профілювання металевої деталі дозволяє в середньому

збільшити несучу здатність на 60...70 %. У цьому випадку несуча здатність з'єднання на шпифтах діаметром 2 мм досягне 97,3 % від несучої здатності композитної деталі. Для подальшого підвищення несучої здатності з'єднання можна змінювати склад (кут укладання, клей і інші параметри) сполучного шару уздовж стику.

2. Дослідження мікроструктури ПКМ у зоні заформування трансверсальних кріпильних мікроелементів

У частині досліджених зразків спостерігалось руйнування у вигляді вириву МЕ з тіла композитної деталі та руйнування армувальних волокон у деяких шарах. Для визначення причин такого типу руйнування було проведено дослідження мікроструктури полімерних КМ у зоні заформування трансверсальних кріпильних МЕ, виготовлені мікрошліфи, схема вирізки яких представлена на рис. 4.

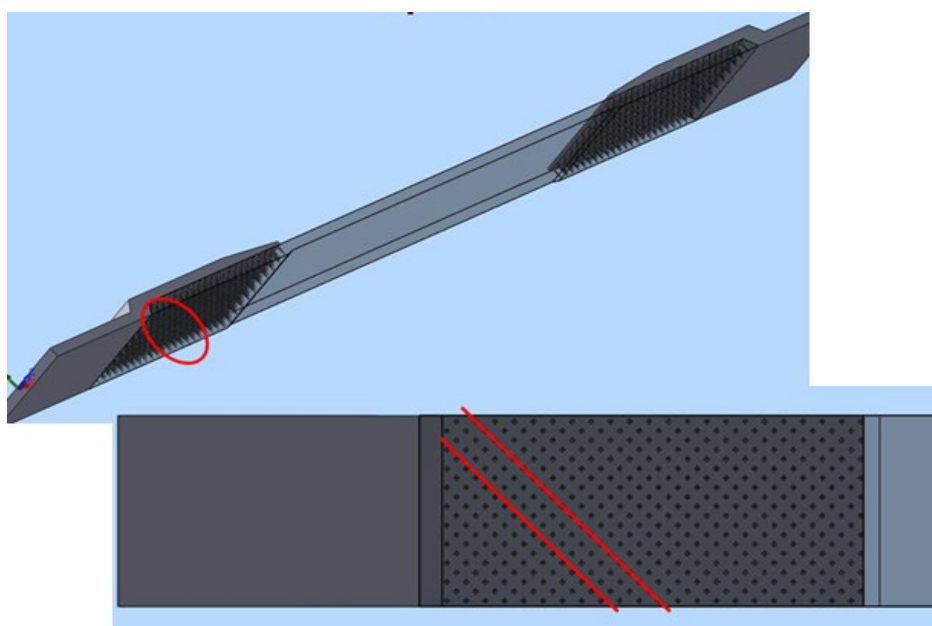


Рис. 4. Схема вирізання мікрошліфів для дослідження мікроструктури з'єднання з елементами поперечного зв'язку

Для оцінки впливу трансверсальних кріпильних МЕ на структуру вуглепластику проведений його аналіз після навантаження. Аналіз мікроструктури зразків проводився з використанням стереоскопічного мікроскопу МБС-9.

Фотографії мікроструктур зразків представлені на рис. 5–7. Мікроструктурний аналіз показав:

- при впровадженні трансверсальних кріпильних елементів відбувається незначне порушення площинності шарів;
- відсутні помітні зони руйнування вуглецевих волокон, які потенційно можливі при впровадженні МЕ до сітки арматури;
- у зоні заформування трансверсального кріпильного МЕ спостерігається скривлення вуглецевих волокон;
- в окремих ділянках спостерігається локальне відшарування волокон від сполучного.

З метою вивчення щільності поєднання сполучного з металевими КЕ використовувалися зразки з повздовжніми зв'язками композита та металевим дротом. Мікроструктура аналізувалася за допомогою мікроскопу ZEISS NEORHOT 21, який дозволяє розширити діапазон збільшення.

Дослідження проводилися у два етапи:

- на першому вивчалася мікроструктура межі з'єднання між сполучним та металом до навантаження;
- на другому – після навантаження.

У результаті дослідження було виявлено, що порушення щільності з'єднання двох компонентів та відриву волокон арматури не спостерігалось на більшості зразків. Але після випробувань на цій межі спостерігалось порушення адгезійних зв'язків (рис. 8). У зафіксованих випадках зони порушення зв'язків розташовуються біля мікрозападин поверхні металевого дроту.

Ці результати натякають на необхідність досліджень щодо підвищення міцності адгезійних зв'язків на межі сполучне-металева поверхня технологічними методами.

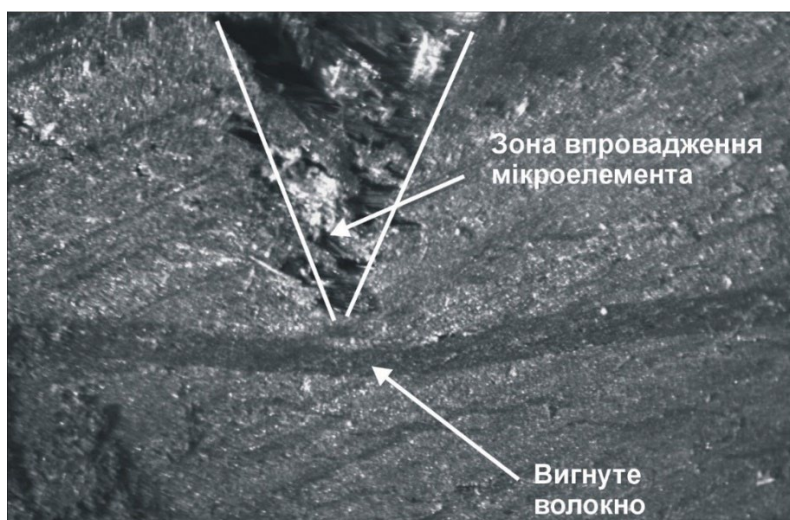


Рис. 5. Мікроструктура вуглепластику в зоні заформування трансверсального кріпильного МЕ, який вирвано при навантаженні, збільшення – $\times 28$

Тобто ці дослідження мікроструктури досліджених зразків дозволяють зробити наступні висновки:

- спостерігається викривлення волокон арматури у діапазоні відносних шагів циліндричних МЕ 3,5...5,0 та тетрагональної структурою розташування штифтів, але вони не носять критичного характеру для несучої здатності з'єднання;

- спостерігається нерівномірний розподіл сполучного в досліджуваних перерізах зразків: у деяких місцях його надлишок, у деяких – непросочені волокна. Ця ситуація може визначатися двома факторами: не відповідною в'язкістю сполучного або недостатнім та нерівномірним притисканням при просочуванні шарів пакету.

Виключити подібні відхилення від рекомендованих значень слід за рахунок жорсткого контролю режимів операцій монтажу з'єднання.

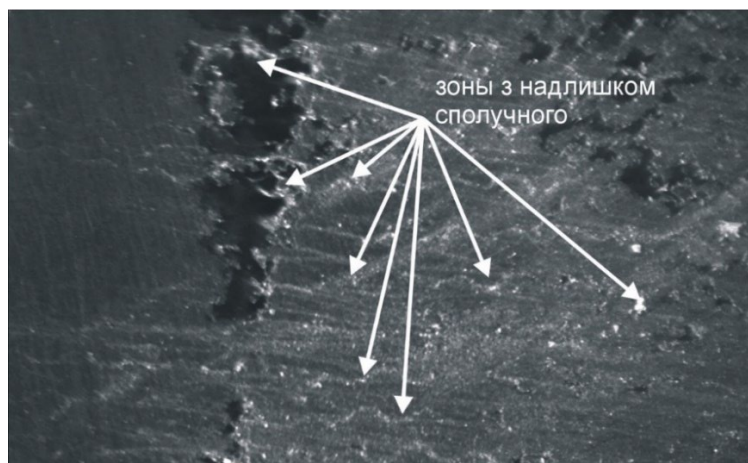


Рис. 6. Мікроструктура вуглепластику в зоні заформування трансверсальних кріпильних МЕ, збільшення – x28

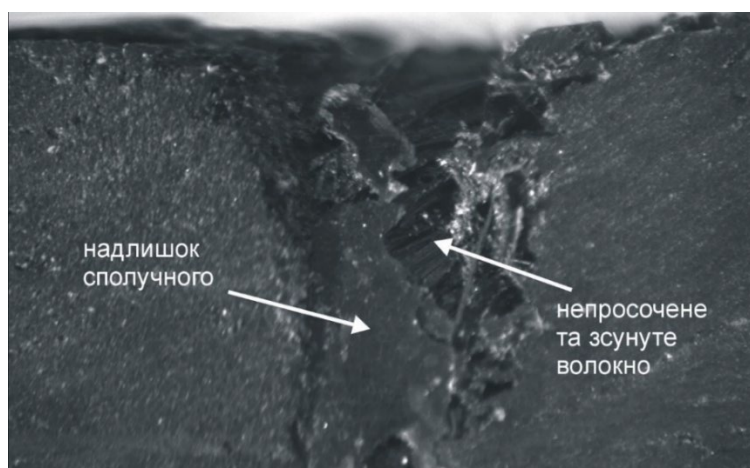


Рис. 7. Мікроструктура зони заформування трансверсального кріпильного МЕ, збільшення – x28

3. Дослідження методів підвищення адгезійної міцності

Визначення адгезійної міцності є досить складним завданням, рішення якого присвячені роботи [4-6]. Відсутність у цей час єдиного підходу до теорії адгезії пояснюється складністю й різноманітністю явищ, що протікають на границі розподілу фаз (рис. 8). Їхній аналіз показує, що до числа істотних факторів, що впливають на адгезійну міцність і безпосередньо пов'язаних з конструюванням з'єднання, можна віднести:

- процеси попередньої підготовки поверхні кріпильних елементів;
- склад покриття;
- технологічні процеси нанесення покриття.
- оновлення поверхні адгезійного зчеплення, тобто видалення з цих поверхонь різного роду забруднень, окислів, плівок;
- підвищення площі поверхні адгезійного зчеплення металу та композиту;
- використання проміжних шарів з матеріалів, що мають необхідне зчеплення до металу та композиту визначеного складу.

Технологічні процеси, які відповідають цим факторам відповідають: знежирення та травлення металевих поверхонь різними речовинами,

декапування, зачищення поверхні абразивними матеріалами (піскоструминна обробка), нанесення на поверхні еластичних клеїв.

Задачею проведених досліджень є порівняльна оцінка технологій підвищення адгезійної міцності з'єднань "метал+композит". У якості стержня для випробування використовувався сталевий дріт діаметром 0,25 мм, а матеріалом для просочування зони суміщення було сполучне на основі компаунда К-153, смоли ЕД-20 та твердника ПЕПА (12%).

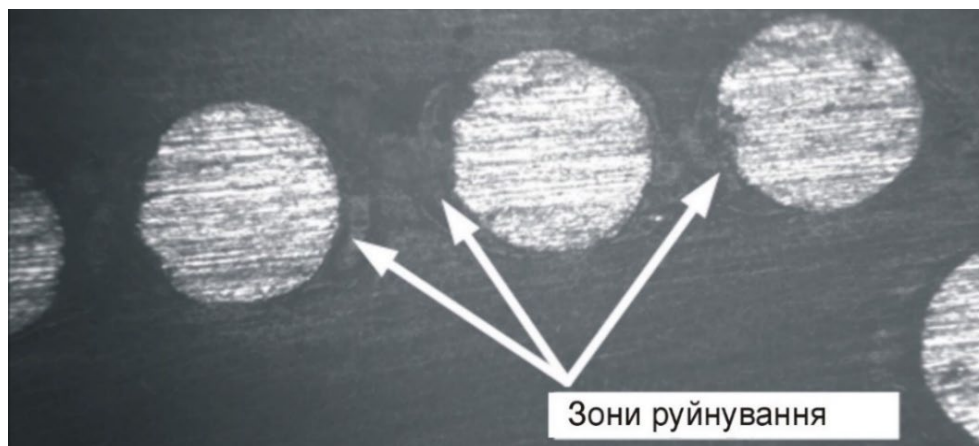


Рис. 8. Мікроструктура углепластика з поздовжніми елементами – металевими дротами, збільшення x125

Методика проведення досліджень була наступною. Відрізок дроту, затиснутий у спеціальному пристрої, заформовувався до пакету КМ на визначену глибину L. Після полімеризації пакет встановлювався до розривної машини та дріт висмикувався з пакету КМ з фіксацією зусилля N. Випробування проводилися на 8-10 зразках. Варіанти підготовки поверхні проволони до склеювання: знежирювання в ацетоні, абразивне зачищення та протирання дрантям. Варіанти покриттів: оксидна плівка, клей БФ-2. Експериментальні дані приведено у табл. 4.

Таблиця 4

Вибірка з загального протоколу випробувань щодо оцінки адгезійної міцності з'єднання "метал+композит"

№ п/п	Операції підготовки поверхні	Склад покриття	L, мм	N, Н	N/L, Н/мм	Коефіцієнт варіації, %
1	знежирювання в ацетоні, промивання водою, протирання дрантям	оксидна плівка	2,0	60,4	30,2	7,9
			4,0	72,1	18,0	7,8
			6,0	72,2	12,0	10,6
			8,0	78,3	9,78	9,5
			12,0	80,0	6,67	6,8
			16,0	82,2	5,14	7,4
			20,0	92,3	4,61	5,9
2	знежирювання в ацетоні, промивання водою, протирання дрантям	БФ-2 +К153 +8% ПЕПА	2,0	67,9	34,0	20,3
			3,0	92,9	31,0	10,9
			4,0	94,6	23,7	6,9

Продовження табл. 4

№ п/п	Операції підготовки поверхні	Склад покриття	L, мм	N, Н	N/L, Н/мм	Коефіцієнт варіації, %
3	декапування, промивання водою, протирання дрантям	БФ-2	2,0	61,3	30,6	7,6
			3,0	72,0	24,0	12,9
			4,0	82,0	20,5	12,1
			8,0	60,3	7,5	6,3
4	абразивне зачищення, знежирювання в ацетоні, протирання дрантям	без покриття	2,0	46,2	31,1	2,2
			3,0	54,8	28,3	6,9
			4,0	57,4	14,4	4,9
			5,0	62,4	15,5	4,8
5	знежирювання в бензині Б-70, протирання дрантям	3	2,0	62,6	31,3	7,3
			3,0	85,5	28,5	12,6
			4,0	81,7	20,4	2,1
			5,0	99,0	20,0	5,8
6	знежирювання в бензині Б-70, протирання дрантям, декапування, промивання водою	1	2,0	16,5	8,2	4,3
			4,0	25,3	8,3	6,3
			6,0	30,2	5,0	18,8
			8,0	34,2	4,5	3,5
			12,0	43,8	3,6	8,0

Аналіз експериментальних результатів демонструє наступне:

– абразивне видалення оксидних плівок та інших забруднень поверхні, а також її декапування суттєво підвищують адгезійне зчеплення компаунда зі сталюю поверхнею. Середнє збільшення відносного зусилля виривання складає більш 3% при доволі низькому коефіцієнті варіації 2.2...7,9;

– використання проміжного шару між компаундом та металевою поверхнею (БФ-2, БФ-2 + K153 + 8% ПЕПА) збільшують адгезійну міцність у 1,13...1,32 рази;

– значно гірші результати експериментів одержано у варіантах зчеплення металевої поверхні у стані поставки з компаундом.

4. Результати механічних досліджень

З урахуванням попередніх висновків для дослідно-промислових випробувань на розтягання була виготовлена партія зразків зі структурою КМ [05/905/+454/-454] з вуглепластика 02C300UAP/Araldite LY556. Випробування проводились на розривній машині "ZD-10/90" зі швидкістю 2 мм/хв. Зовнішній вигляд одного із варіантів зразків показано на рис. 9.

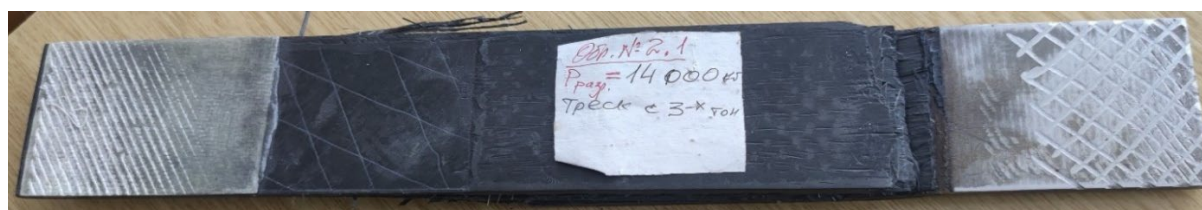


Рис. 9. Зовнішній вигляд зразка після випробування

Особливу увагу слід приділити видам (модам) руйнування зразків:

– руйнування композиту у регулярній частині з'єднання без видимих ушкоджень у нерегулярній частині;

– теж саме, але з частковим витяганням мікроштифтів з металевої

закінцівки;

- розшарування у тілі композитної частини з-за недостатньої міжшарової міцності на зсув;
- відшарування пакету КМ від поверхні металевих закінцівок з витяганням (або без витягання) циліндричних мікроелементів з отворів металеві закінцівки;
- комбінація вищеназваних мод руйнування.

Характерний приклад відшарування усього пакету КМ від металеві закінцівки показано на рис. 10. Це є свідомством недостатньої міцності з'єднання МЕ с закінцівкою та низького адгезійного зчепленні пакету композиту с закінцівкою.



Рис. 10. Зовнішній вигляд повного відшарування пакету КМ (знизу) від металеві закінцівки (зверху). Усі циліндричні мікроелементи витягнуті з металеві закінцівки

Циліндричні мікроелементи у цьому прикладі було з'єднано з посадкою натяжіння, але ступінь натяжіння був недостатній. Для виключення подібної моди руйнування необхідно жорстко контролювати зусилля витягування МЕ з отворів або використовувати зварювання для їх з'єднання.

В даному випадку металева закінцівка була виконана з алюмінієвого сплаву, а самі МЕ зі сталюого дроту. Ця комбінація матеріалів виключала зварювання.

Приклад руйнування при міжшаровому розшаруванні пакету КМ показаний на рис. 11. На ньому чітко видно (вигляд під кутом), що у більш товстій частині металеві закінцівки МЕ не витягнуті з отворів (більша глибина запресовування), а у тоншій частині вони витягнуті. Міжшарове розшарування виникло з-за міжшарового зсуву, тобто невідповідно підібраної структури пакету КМ та слабкої міжшарової адгезії.

Інший характерний приклад міжшарового розшарування при використанні ступінчастої закінцівки показаний на рис. 12.

На цьому рисунку можна бачити, що міжшарове розшарування частіше спостерігається в зонах розташування шарів препрегу, викладених під кутами $\pm 45^\circ$ до напрямку діючого навантаження. Звертає на себе увагу коректна форма запресованих МЕ, що практично не порушує структуру їх розташування та розшарування пакету КМ за кількома поверхнями (на не вздовж однієї).



Рис. 11. Приклад міжшарового руйнування пакету КМ при ступінчастій металевій закінцівці. Місце зміни товщини показано колом. Знизу вигляд з бокового торцю, зверху вигляд під кутом на розшароване з'єднання



Рис. 12. Міжшарове розшарування та ступінчаста закінцівка. Зразок препаровано вздовж лінії дії навантаження

Руйнування пакету композиту у регулярній частині з'єднання у краю суміщення с закінцівкою показано на рис. 13.

Руйнування зв'язків між металевою закінцівкою та першими трьома рядами МЕ при їх шаховому розташуванні достатньо зрозуміло з теоретичної точки зору – у цій зоні діють максимальні зсувні напруження. Руйнування у регулярній частині композиту, скоріш всього, визначаються не достатньо раціонально обраною структурою самого композиту.

Вид зверху на відшаровану частину пакету КМ показаний на рис. 14.

На рисунку видно, що розшарування виникло вздовж поверхонь шарів, що розташовані під кутом 45° до напрямку діючого навантаження. Декілька рядів штифтів було витягнуті з отворів металевої закінцівки (більш світлим тоном висвітлені їх торцеві поверхні). Але більша частина МЕ була вирвана з пакету КМ. Видно темні, практично круглі отвори – сліди від вирваних МЕ. З двох сторін до отворів примикають менш темні зони подовженої форми. Це щільні зони непримикання виникають з-за деякого згину армувальних волокон біля бокових поверхонь МЕ. Форма та розміри цих зон (навіть при шаховому розташуванні МЕ) визначають проекту вимогу до мінімізації поперечного розміру штифтів. Але технологічні складності встановлення МЕ перешкоджають зменшенню їх

діаметру менш ніж 0,5...0,8 мм. Слід очікувати, що це протиріччя вирішиться при появі 3D-процесів формоутворення тонких, але міцних стержнів.



Рис. 13. Вид руйнування пакету КМ у регулярній частині, що торкається металевої закінцівки. Спостерігаються витягнуті із закінцівки МЕ у частині, що найближча до пакету КМ (чорні отвори)



Рис. 14. Вид зверху на відшаровану частину пакету КМ

Висновки

1. Результати дослідно-промислового впровадження розробок показали необхідність урахування при кваліметричному аналізі варіантів КТР ланцюжка техпроцесів, спрямованих на підвищення адгезійної міцності склеюваних середовищ та контролю цих процесів. Найбільш придатним у конкретних умовах впровадження оказався процес піскоструминної обробки металевих поверхонь з послідовним промиванням та нанесенням проміжного шару між металом та композитом (склад – клей БФ-2 +К153 + 8%ПЕПА).

2. Найбільше навантаження руйнування забезпечую шахову розташування мікроштифтів за рахунок їх більшого питомого вмісту у композиті у порівнянні з прямокутним розташуванням.

3. Найбільш актуальними оказались процеси контролю якості з'єднання з натягом циліндричних МЕ діаметром 2 мм з металевою закінцівкою та забезпечення адгезійної міцності з'єднувальних поверхонь.

Список літератури

1. Карпов, Я. С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных

материалов [Текст] / Я. С. Карпов / – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2006. – 359 с. ISBN 966-662-133-9.

2. Тараненко, І. М. Використання методів ерозійної розмірної обробки для формоутворення трансверсальних кріпильних елементів з'єднаннях “метал-композит” // *Mech. Adv. Technol.* Vol. 6, No. 3, 2022, С. 269–276, DOI: 10.20535/2521-1943.2022.6.3.264786, <http://journal.mmi.kpi.ua/article/view/264786>.

3. Mirzaei, A., Darbandi, A. H., Taghavian, S. H. Experimental investigation of the effect of adhesive-impregnated pins on the mechanical behavior of z-pinned lap shear joints // *Mech. of Comp. Mater.*, 2021. – Vol. 57, No. 5. – С. 975–988. – <https://doi.org/10.22364/mkm.57.5.12>.

4. Campilho, Raul D. S. G. Design of Adhesive Bonded Joints. Porto, MDPI, 2024, 240 p., ISBN978-3-0365-9907-6 (Hardback). – ISBN978-3-0365-9908-3 (PDF). – <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-9908-3>.

5. Campilho, Raul D.S. Design of Adhesive Bonded Joints [Text] / D. S. Raul G. Campilho // *Processes*. – November 2023. – Vol. 11(12). – 3369. – <https://doi.org/10.3390/pr11123369>.

6. Sánchez-Arce, Isidro J. Numerical analysis of the dynamic behaviour of adhesive joints: A review [Text] / Isidro J. Sánchez-Arce, L.D.C. Ramalho, Diogo C. Gonçalves, J. Belinha, R.D.S.G. Campilho // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – October 2022. – Vol. 118. – 103219. – <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103219>.

7. Petrie, E. The fundamentals of adhesive joint design and construction [Text] / E. Petrie // *Metal Finishing*. – 2008. – Vol.106(11). – P. 55–57. – DOI: 10.1016/S0026-0576(08)80314-5.

8. Structural Adhesives and NVH. Selector Guide. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dm.henkel-dam.com/is/content/henkel/GBS-4809.pdf> (19.08.2024).

9. Structural bonding solutions. High performance adhesives. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://industry.sika.com/dam/dms/global-industry/structural-bondingsolutionshighperformanceadhesives.pdf> (19.08.2024).

10. Budzik, Michal K. Testing mechanical performance of adhesively bonded composite joints in engineering applications: an overview [Text] / Michal K. Budzik, Markus Wolfahrt, Paulo Reis, Marcin Kozłowski, José Sena-Cruz, Loucas Papadakis, Mohamed Nasr Saleh, Klara V. Machalicka, Sofia Teixeira de Freitas, Anastasios P. Vassilopoulos // *The Journal of Adhesion*. – 17 Aug 2021. – P. 2133–2209. – <https://doi.org/10.1080/00218464.2021.1953479>.

11. Durability testing of adhesively bonded composites. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.compositesworld.com/articles/durability-testing-of-adhesively-bonded-composites> (19.08.2024).

12. Redmann, A. Evaluation of Single-Lap and Block Shear Test Methods in Adhesively Bonded Composite Joints [Text] / Alec Redmann, Vinay Damodaran, Felix Tischer, Pavana Prabhakar, Tim A. Osswald // *Journal of Composite Science*. – January 2021. – Vol. 5(1). – P. 27. – <https://doi.org/10.3390/jcs5010027>.

References

1. Ya. S. Karpov. “Joints of articles and units made of composites” (In Russian), Kharkiv, Nat. Aerosp. Univ. “KhAI”, 359 p, 2006, ISBN 966-662-133-9.

2. Taranenko, I. M. Application of erosion dimensional treatment methods for creation transversal fasteners in “metal-composite” joints // *Mech. Adv. Technol.* Vol. 6,

No. 3, 2022, pp. 269–276, DOI: 10.20535/2521-1943.2022.6.3.264786, <http://journal.mmi.kpi.ua/article/view/264786>.

3. Mirzaei, A., Darbandi, A. H., Taghavian, S. H. Experimental investigation of the effect of adhesive-impregnated pins on the mechanical behavior of z-pinned lap shear joints // *Mech. of Comp. Mater.*, 2021. – Vol. 57, No. 5. – P. 975–988. – <https://doi.org/10.22364/mkm.57.5.12>.

4. Campilho, Raul D. S. G. Design of Adhesive Bonded Joints. Porto, MDPI, 2024, 240 p., ISBN978-3-0365-9907-6 (Hardback). – ISBN978-3-0365-9908-3 (PDF). – <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-9908-3>.

5. Campilho, Raul D.S. Design of Adhesive Bonded Joints [Text] / D. S. Raul G. Campilho // *Processes*. – November 2023. – Vol. 11(12). – 3369. – <https://doi.org/10.3390/pr11123369>.

6. Sánchez-Arce, Isidro J. Numerical analysis of the dynamic behaviour of adhesive joints: A review [Text] / Isidro J. Sánchez-Arce, L.D.C. Ramalho, Diogo C. Gonçalves, J. Belinha, R.D.S.G. Campilho // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – October 2022. – Vol. 118. – 103219. – <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103219>.

7. Petrie, E. The fundamentals of adhesive joint design and construction [Text] / E. Petrie // *Metal Finishing*. – 2008. – Vol.106(11). – P. 55–57. – DOI: 10.1016/S0026-0576(08)80314-5.

8. Structural Adhesives and NVH. Selector Guide. [Electronic resource]. Режим доступу: <https://dm.henkel-dam.com/is/content/henkel/GBS-4809.pdf> (19.08.2024).

9. Structural bonding solutions. High performance adhesives. [Electronic resource]. Режим доступу: <https://industry.sika.com/dam/dms/global-industry//structural-bondingsolutionshighperformanceadhesives.pdf> (19.08.2024).

10. Budzik, Michal K. Testing mechanical performance of adhesively bonded composite joints in engineering applications: an overview [Text] / Michal K. Budzik, Markus Wolfahrt, Paulo Reis, Marcin Kozłowski, José Sena-Cruz, Loucas Papadakis, Mohamed Nasr Saleh, Klara V. Machalicka, Sofia Teixeira de Freitas, Anastasios P. Vassilopoulos // *The Journal of Adhesion*. – 17 Aug 2021. – P. 2133-2209. – <https://doi.org/10.1080/00218464.2021.1953479>.

11. Durability testing of adhesively bonded composites. [Electronic resource]. – Режим доступу : <https://www.compositesworld.com/articles/durability-testing-of-adhesively-bonded-composites> (19.08.2024).

12. Redmann, A. Evaluation of Single-Lap and Block Shear Test Methods in Adhesively Bonded Composite Joints [Text] / Alec Redmann, Vinay Damodaran, Felix Tischer, Pavana Prabhakar, Tim A. Osswald // *Journal of Composite Science*. – January 2021. – Vol. 5(1). – P. 27. – <https://doi.org/10.3390/jcs5010027>.

Надійшла до редакції 16.12.2024, розглянута на редколегії 16.12.2024

Analysis of tearing test results for joining tips of metal-composite joints

Designing highly loaded joints of metal-composite ends of aerospace engineering units meets the problem of assessing their bearing capacity, checking the adequacy of created mathematical calculation models to real testing results, and studying the dependence of the production technology of such joints on their final load-bearing

capacity.

The study of the dependence of the load-bearing capacity of "metal-composite" joints on the technology of their creation and the evaluation of the quality control process of combined joints with cylindrical transversal microelements and the adhesive bond between connecting parts was chosen as the goal of the research.

The joint of a flat metal tip with a carbon fiber part using transverse cylindrical pins and adhesive is considered as an object of research. Transversal pins of different diameters are inserted into the composite package. Various technological processes of preparing the surface of the metal part and pins for subsequent adhesive joining are considered in order to maximize the adhesion between the polymer binder and the metal elements of the joint. Also, for a more rational distribution of stiffness and corresponding stresses in the parts, the metal tip has a variable stepped thickness along the length of the joint.

As the results of the study, the theoretical failure load of the joints was evaluated and compared with the results of experimental tests. Also the technological process of preparing the surface of the metal part and the pins for further joining with the composite part is recommended, which ensures maximum adhesion between the joining parts.

A conclusion was made regarding the diameter of the pins and the shape of the profiled metal part, which ensure the maximum load-bearing capacity of the connection.

The types of joint failure were analyzed and conclusions were drawn regarding changes in the technology of surface preparation, the layout of the pins and the choice of their diameter.

As conclusions, recommendations were formulated regarding a certain technology for surface treatment of a metal part, which guarantees maximum adhesion between the metal part, pins and composite, and actual processes of quality control of "metal-composite" joints with transversal microelements were selected.

Key-words: transversal fastening elements, "metal-composite" joint, micropins, adhesive, adhesion, tension test.

Відомості про авторів:

Тараненко Ігор Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, професор каф. 403 "Композитних конструкцій та авіаційного матеріалознавства" Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", Україна, e-mail: igor.taranenko@khai.edu ,ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9554-0162>

Середенко Вікторія Валентинівна – ст. викладач каф. 403 "Композитних конструкцій та авіаційного матеріалознавства" Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", Україна, e-mail: v.seredenko@khai.edu, ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-7282-8046>

About the Authors

Taranenko Igor – Ph.D., Professor of department of Composite Structures and Aviation Materials, National Aerospace University "KhAI", Ukraine, e-mail: igor.taranenko@khai.edu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9554-0162>

Seredenko Viktoria – Senior Lecturer of department of Composite Structures and Aviation Materials, National Aerospace University "KhAI", Ukraine, e-mail: v.seredenko@khai.edu, ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-7282-8046>