

doi: 10.32620/oikit.2025.105.10

УДК 629.735

І. М. Тараненко

Комплексний метод порівняння варіантів конструктивно-технологічних рішень з'єднань «метал-композит» з урахуванням особливостей їх виготовлення

Національний аерокосмічний університет “Харківський авіаційний інститут”

Розглянуто узагальнений якісний метод вибору варіантів з'єднань типу «метал-композит» для легких літальних апаратів, які потребують мінімізації маси з'єднань.

Проведений огляд сучасної науково-технічної літератури у цій галузі показав актуальність постановки проблеми вибору типу з'єднань. Разом з цим, існуючі методи вибору потребують уточнення, оскільки не містять інформації про кількісні показники технологічного процесу виготовлення з'єднань, що значно впливає на ефективність їх застосування для оцінки різних типів з'єднань.

Для проведення аналізу було розглянуто металеві закінцівки з трьома варіантами конструктивно-технологічного виконання трансверсальних кріпильних елементів: монолітні пірамідальні мікроелементи, що утворюються шляхом механічної обробки, циліндричні мікроелементи, що закріплюються на закінцівці зварюванням або запресовуванням, та листові мікроелементи, що виготовляються на проміжній металевій стрічці, яка у свою чергу закріплюється на закінцівці.

Порівняння варіантів проводилося за наступними групами властивостей: вагові, конструктивно-міцнісні та технологічні.

Слід відзначити, що у попередніх дослідженнях був розроблений та використаний для порівняння конструктивно-технологічних рішень з'єднань «метал-композит» кількісний метод, з безпосереднім розрахунком значень індексів якості процесів підготовки виробництва та виготовлення з'єднань. Цей метод потребує достатньої кількості конкретних довідкових даних та часу для розрахунків. Тому розробка якісного методу порівняння КТР з'єднань є достатньо актуальною.

Метою роботи є підвищення ефективності та якості з'єднань при оптимізації низки властивостей в залежності від цілей (об'єму) виготовлення, призначення виробів, скорочення витрат та часу виготовлення та підготовки виробництва.

Основні задачі дослідження зводяться до якісного та кількісного оцінювання цільових показників за вибраними варіантами конструкції, використовуваних матеріалів та складності процесу виготовлення.

Метод дослідження – комплексний системний аналіз.

У результаті дослідження зроблено відповідні висновки щодо пріоритетності того чи іншого варіанту з'єднання для різних матеріалів та умов виробництва.

Ключові слова: з'єднання «метал+композит», варіанти конструктивно-технологічних рішень, технологія виготовлення, порівняльний аналіз.

Вступ

У теперішній час стає все більш зрозумілою потреба у широкому виготовленні легких та надлегких літальних апаратів (ЛА) безпілотного типу для вирішення різноманітних актуальних задач. Такі апарати повинні мати мінімальну масу при достатній міцності конструкції, високу аеродинамічну якість, просту конструкцію, низьку вартість виготовлення та експлуатації. Поєднання таких вимог до подібних ЛА можливо реалізувати при використанні сучасних композитних матеріалів (КМ) та спеціальних конструктивних рішень щодо з'єднань різних матеріалів. На рис. 1 приведено приклади деяких перспективних конструкцій безпілотних ЛА.

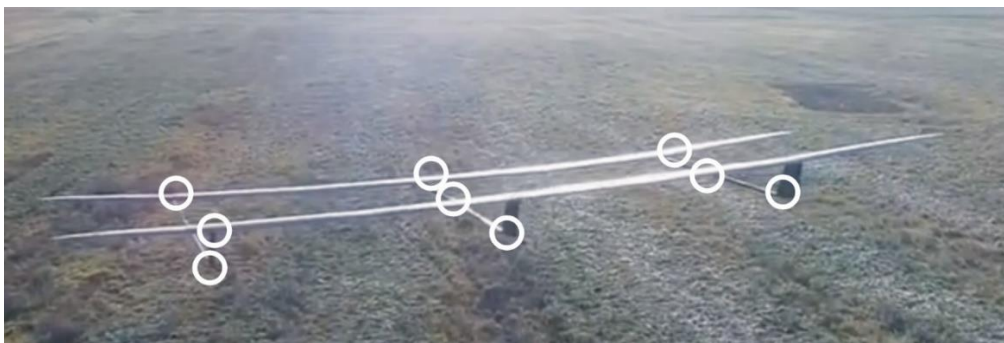
Більшість таких ЛА відрізняються тонкими та довгими несучими поверхнями, простими за конструкцією та тонкими елементами керування та нескладною конструкцією фюзеляжу. Обшивка аеродинамічних поверхонь відносно тонка, не більш 1,0...1,5 мм. Силовий набір ЛА має спрощену конструкцію та часто виконується з КМ. Для зручності транспортування до місця пуску апарата його основні агрегати виконуються членованими та збираються у єдину конструкцію на місці запуску.



а



б



в

Рис. 1. Приклади форм БПЛА:

а – монопланного типу [1]; б – біпланного типу з вертикальним зльотом, посадкою та горизонтальним польотом [2]; в – трьохфюзеляжний БПЛА біпланного типу великої вантажопідйомності або великої дальності польоту [3].
Колами показано потенційні місця використання КТР з'єднань з КЕ малого розміру

Ці особливості ЛА потребують особливого підходу до конструкції місць членування агрегатів, кріплення обшивки до силового набору та місць точкової підвіски вантажу або обладнання.

Традиційні механічні методи кріплення (болтові та заклепкові) в з'єднаннях «метал-композит» або «композит-композит» передбачають складності якісного виконання отворів у шаруватих КМ. Виключно клейові з'єднання мають низку особливостей, які не сприяють якості з'єднання.

У роботі Я.С. Карпова [4] обґрунтовано використання метало-композитних гетерогенних з'єднань (МКГЗ). В таких з'єднаннях трансверсальні металеві кріпильні елементи (КЕ) сприймають та передають навантаження. Найбільш відомі три типи МКГЗ (рис. 2):

- монолітні, у яких трансверсально спрямовані КЕ виконані з матеріалу металевої закінцівки з'єднання;
- циліндричні, у яких КЕ виконані з металевих стрижнів, та які різними способами з'єднуються з металевою закінцівкою;
- листові, у яких КЕ виконані у вигляді тонкої пластини з відігнутими зубцями. Сама пластина (або проміжний кріпильний елемент) кріпиться на металеву закінцівку.

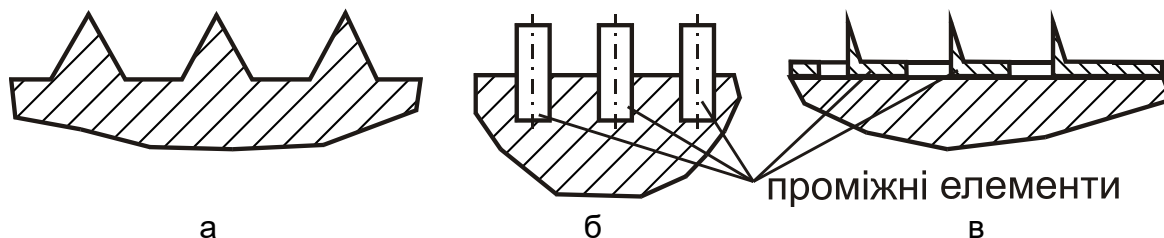


Рис. 2. Варіанти конструктивних рішень формоутворення трансверсальних зв'язків:

а – монолітні; б – циліндричні; в – листові, типу «канцелярська кнопка»

Зазначені конструктивно-технологічні рішення (КТР) при рівних функціональних властивостях мають різну масу та міцність, технологічність, а також тривалість підготовки виробництва та інші властивості.

Метою

роботи є оцінка якості з'єднань «метал-композит» та «композит-композит» та оптимізація процесів їх виготовлення в залежності від поставлених цілей.

Задачею роботи

є розробка математичної моделі вибору оптимального КТР в залежності від поставленої цілі та дослідна перевірка можливостей деяких КТР.

Методи дослідження

Методи досягнення цілей – системний аналіз процесів та кваліметричний метод порівняння варіантів КТР з'єднань.

Огляд результатів досліджень, проведених раніше

Приймаючи до уваги, що в роботі розглядається комплексна задача,

спрямована на порівняння варіантів КТР з'єднань, слід вивчити відомі рішення технологій формоутворення КЕ та методи оцінки їх якості.

Слід відзначити, що у попередніх дослідженнях був розроблений та використаний для порівняння конструктивно-технологічних рішень з'єднань «метал-композит» кількісний метод [5], з безпосереднім розрахунком значень індексів якості процесів підготовки виробництва та виготовлення з'єднань. Цей метод потребує достатньої кількості конкретних довідкових даних та часу для розрахунків. Тому розробка якісного методу порівняння КТР з'єднань є достатньо актуальною.

Доволі широко використовується технологічний процес формоутворення трансверсальних зв'язків (Z-pins) на металевій закінцівці з'єднання. За цією технологією об'єм металевої закінцівки між КЕ послідовно видаляється фрезеруванням торцевою фрезою.

Передбачається, що існує тривимірна модель деталі, яка завантажується до автоматизованого оброблювального центру. Цей центр здійснює мікрOMEХАнічну обробку деталі та утворює трансверсальні елементи на поверхні закінцівки. Відмінною рисою мікрообробки є малі оброблювані припуски (до декількох мікрометрів), тому слід приділяти увагу швидкому видаленню стружки з зони обробки та вибору різального інструменту, враховувати температуру заготовки, жорсткість інструменту та його зношуваність за часом, можливість вібрації обладнання та інші фактори, якими можливо нехтувати при макрообробці.

При фрезеруванні об'єктів малого перерізу рівень дефектів закінцівки, що створюється, значно вище чим при традиційному фрезеруванні з причини малої жорсткості фрезерованих об'єктів. Тобто деформаційні характеристики формоутворених об'єктів повинні враховуватися при проектуванні процесу фрезерування.

Процес формоутворення клиноподібних задирок на поверхні металевої закінцівки за допомогою спеціального різця розглянуто у [6, 7]. Висота таких задирок варіюється у діапазоні 0...0,4 мм [8]. Спосіб формоутворення КЕ за допомогою різця можливо використовувати для достатньо пластичних матеріалів закінцівки. Несуча здатність таких КЕ достатньо низька.

У роботі [9] описано процеси стикового зварювання циліндричних штифтів з поверхнею закінцівки або наплавлення на поверхню штифтоподібних виступів. Обмеженням для таких процесів є властивості зварювання матеріалів закінцівки та штифтів.

Також відомо процеси формоутворення КЕ у вигляді мікрОВИСТУПІВ, які виконані за допомогою 3D-технологій послідовного нанесення шарів металів та сплавів.

У огляді [8] приведено порівняльні характеристики способів з'єднань «метал-композит» та «композит-композит». Слід відзначити, що порівняння проводилося для обмеженої кількості характеристик (до 5 показників), також відсутні відомості про витратні показники супутніх процесів та кількісних показників.

Відомий кількісний комплексний метод порівняння якості технологічних процесів методами кваліметрії [10]. Він дозволяє на основі статистичних даних проводити кількісне порівняння якості варіантів техпроцесів. У цьому випадку якість розглядається як первинний показник найвищого рівня, що задовольняє споживача.

Структура технологічних процесів виготовлення з'єднань

Для повноти порівняння варіантів КТР та їх оптимального вибору необхідно проаналізувати весь ланцюжок технологічних процесів формоутворення КЕ, включаючи основні та супутні процеси. При аналізі варіантів КТР необхідно використовувати системний підхід, загальна структура якого показана на рис. 3.

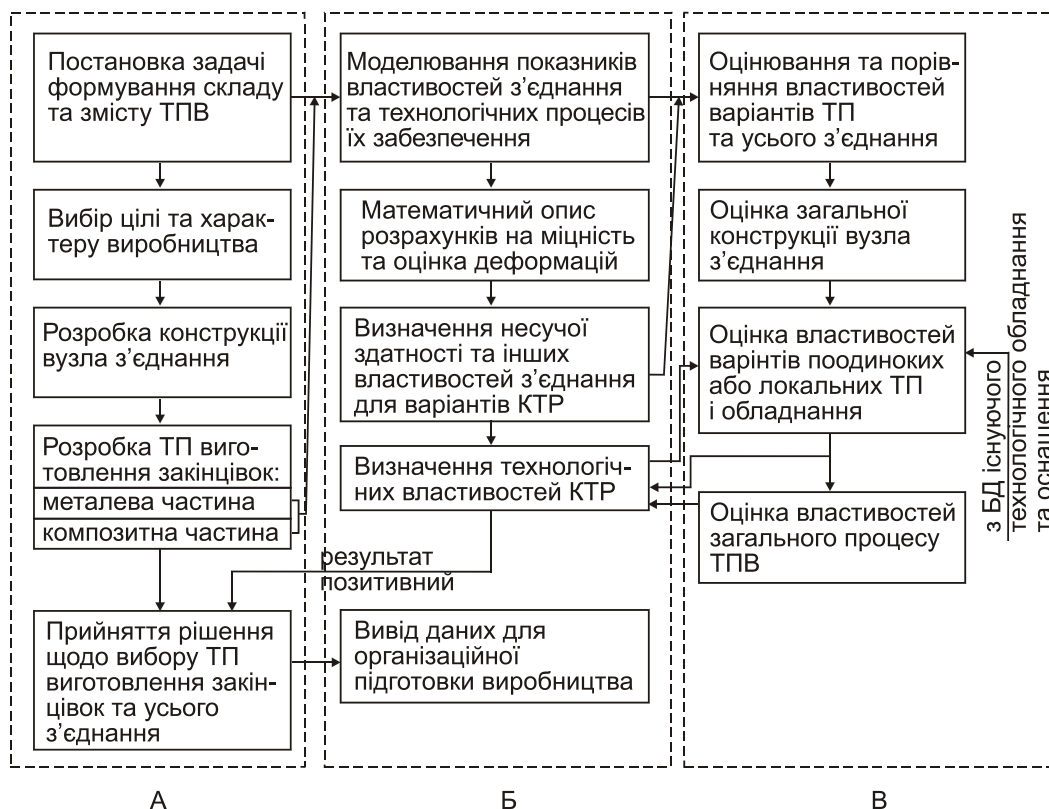


Рис. 3. Загальна структура системного підходу щодо технологічної підготовки виробництва виготовлення з'єднань «метал+композит». БД – база даних

Кожний з приведених на схемі блоків уявляє собою сукупність низки складних процесів. Ця сукупність включає до себе різнопланові процеси взаємодії з замовником продукції та безпосереднім виробництвом (можливість забезпечення властивостей технологічності конструкції з'єднання), з постачальником матеріалів, комплектувальниками продукції та технологічного обладнання, а також низкою зовнішніх факторів.

Блок А (постановка задачі) включає до себе вибір цілі оптимізації конструкції. Можна допустити, що для подібних конструкцій пріоритетними можуть бути наступні цілі:

- мінімізація масових параметрів у з'єднаннях «метал+композит»;
- мінімізація термінів та витрат на підготовку для початку випробувального (прототипного) виробництва;
- забезпечення мінімуму затрат ресурсів усіх видів при серійному виробництві;
- забезпечення максимальних значень усіх складових властивостей надійності;
- створення умов для реалізації високої точності та технологічності

конструкції при виготовленні, експлуатації та ремонті, умов уніфікації та стандартизації виробництва.

Для надлегких ЛА безумовно пріоритетною є перша із зазначених цілей. Але враховуючи умови використання таких конструкцій та їх виготовлення необхідно враховувати показники вартості та технологічності. Таким чином, проявляються декілька цілей та задача оптимізації конструкції ускладнюється. Виникає необхідність аналізу декількох варіантів КТР з'єднань.

Ефективний аналіз варіантів КТР слід проводити, використовуючи моделювання показників властивостей з'єднань та техпроцесів їх утворення (блок Б). Але синтез математичних моделей, що описують ту чи іншу властивість, неможливий без відповідних кількісних критеріїв та методів їх комплексного оцінювання (блок В).



Рис. 4. Загальна структура ТПВ формоутворення мікроелементів на металевій закінцівці з'єднання. Пунктиром показано загальна частина структури ТПВ для усіх варіантів конструкцій мікроелементів; ТВ – ,технологія виробництва, ТП – технолгічний процес, ЕРО – електро-ерозійна обробка

Для прикладу розглянемо структурні схеми послідовності технологічної підготовки виробництва декількох варіантів КТР з'єднань «метал-композит»:

- монолітних (рис. 3);
- циліндричних (штифтових) (рис. 4);
- листових (рис. 5).

Визначення показників технологічності процесів, що вказані на рис. 4-6 проводиться за довідковими даними [11].

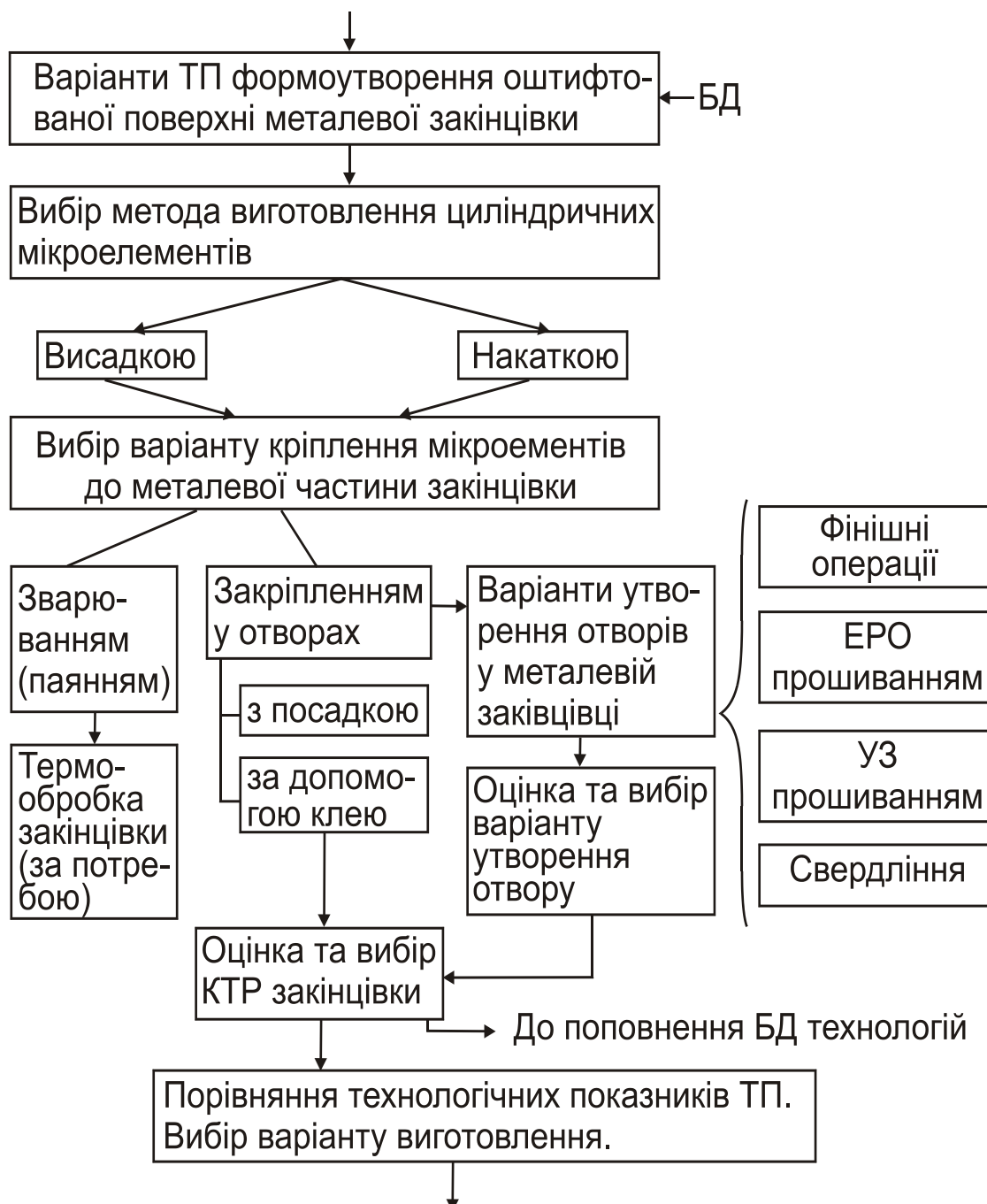


Рис. 5. Структура ТПВ при виборі варіантів ТП формоутворення циліндричних мікроелементів на металевих частинах закінцівки (УЗ – ультразвукове)

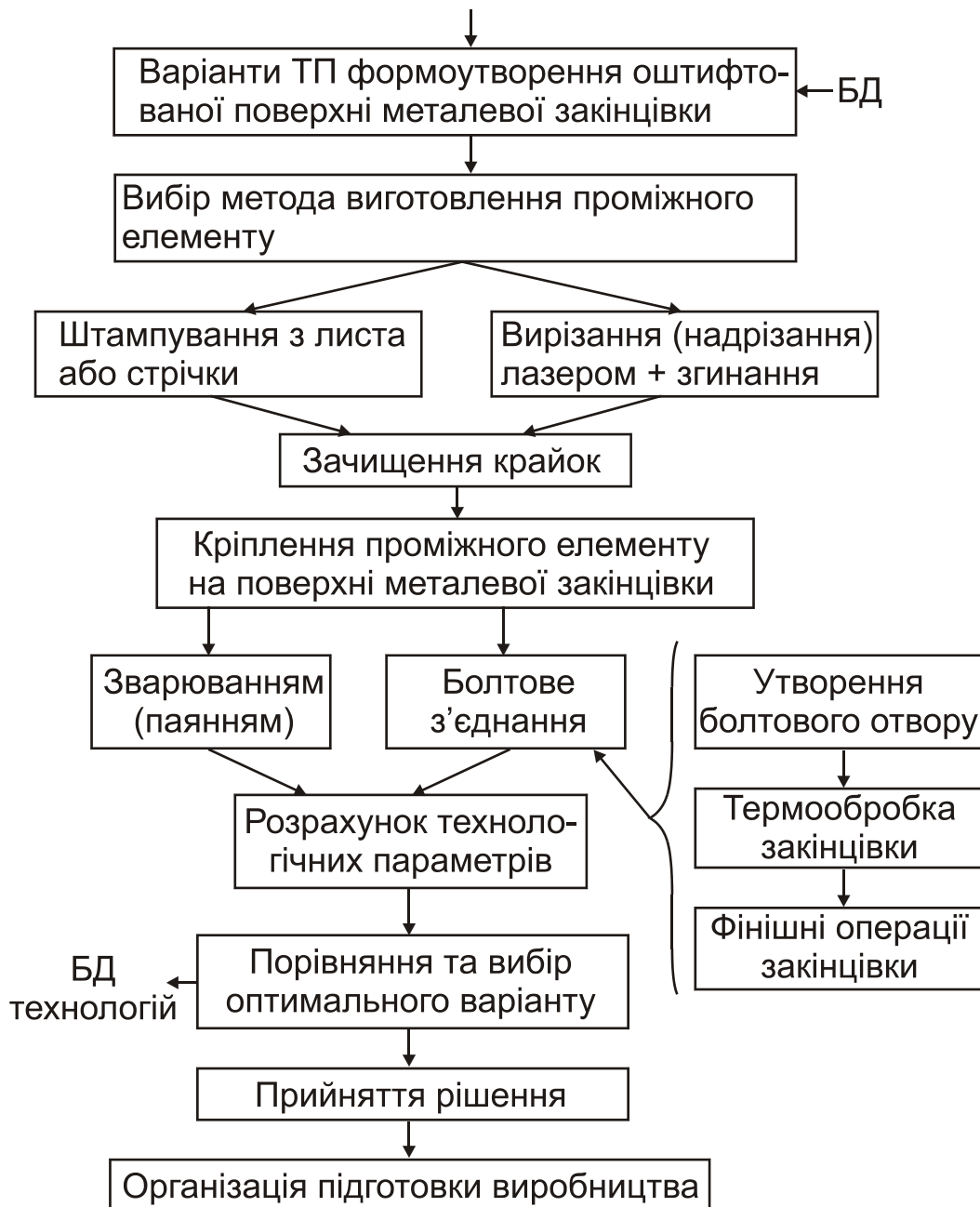


Рис. 6. Структура процесів ТПВ при виборі варіантів ТП оштифтування металевої закінцівки з'єднання «метал+композит» з використанням листових проміжних елементів

Порівняльний аналіз варіантів КТР

За конструктивно-міцнісними міркуваннями геометричні параметри варіантів КТР розраховуються за умови однакової міцності усіх з'єднань. Для цього використовується залежності, що описують умови міцності елементів гетерогенного з'єднання [4]:

$$\sqrt{\left[\left(Q_i + S_i \right) t_{yi} \right]^2 + \left(R_{ij} t_{xi} \right)^2} \leq f_{ке зр} \tau_{ке}; \quad \sqrt{\left[\left(Q_i + S_i \right) t_{yi} \right]^2 + \left(R_{ij} t_{yi} \right)^2} \leq F_{зм} \sigma_{зм};$$

$$\sqrt{\left[\left(Q_i + S_i \right) t_{yi} \right]^2 + \left(R_{ij} t_{xi} \right)^2} \leq F_{3M} \tau_{KM};$$

$$\frac{\sigma_{1xi}^2}{F_{1xi}^2} - \frac{\sigma_{1xi}\sigma_{1yi}}{F_{1xi}^2} + \frac{\sigma_{1yi}^2}{F_{1yi}^2} + \frac{\tau_{1xyi}^2}{F_{1xyi}^2} \leq 1;$$

$$\sqrt{\sigma_{2xi}^2 + \sigma_{2yi}^2 + 4\tau_{2xyi}^2} \leq F_2;$$

У цих залежностях прийнято наступні позначення (рис. 7).

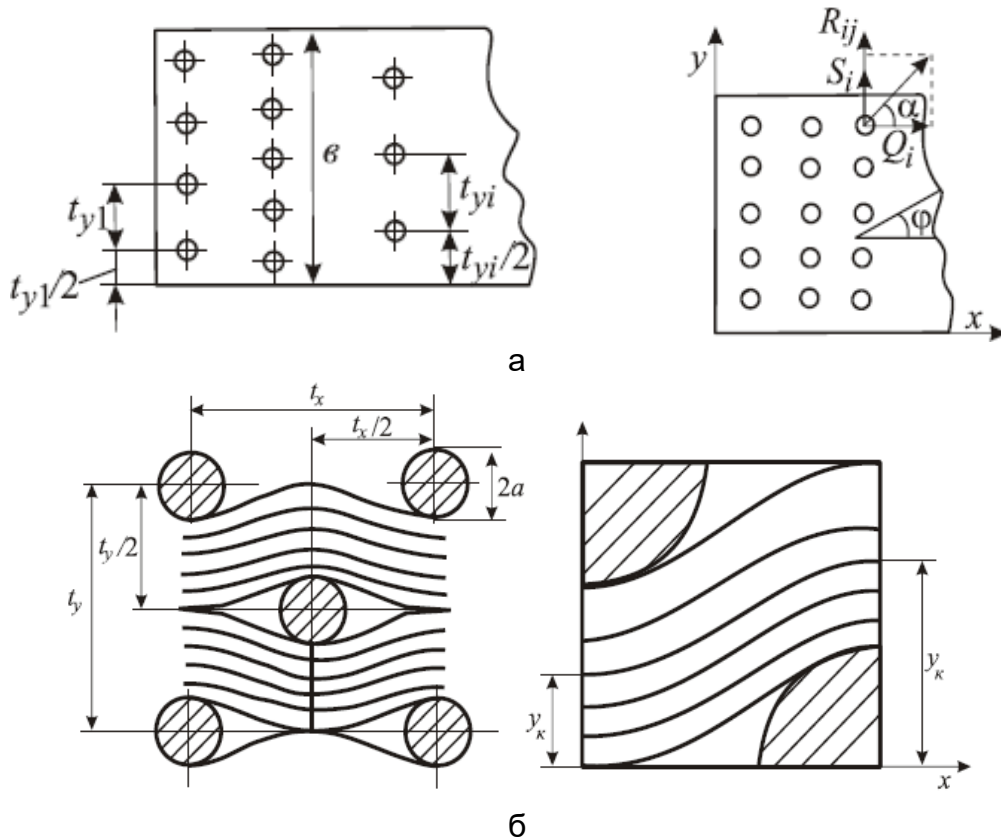


Рис. 7. Позначення для міцнісного розрахунку:

σ , τ – компоненти нормальних та дотичних напружень у елементах з'єднання;
 F – межа міцності композиту (індекси “зм” – на зминання, “зр” – на зріз,
 “ке” – кріпильний елемент); R , Q – реакції від нормального навантаження;
 S – реакція від зсувного навантаження

Як показує схема розташування волокон (ниток) КМ між КЕ (рис. 7, б) поперечні розміри зони, що незаповнена волокнами, зменшується при зменшенні поперечного розміру КЕ за напрямком розташування волокон. Тобто, об'ємний вміст волокон КМ збільшується у зоні встановлення листових КЕ у порівнянні з монолітними та циліндричними КЕ. Це твердження є вірним при орієнтації площини зубця листового варіанту вздовж волокон КМ. Але в з'єднаннях композитних деталей з металевими закінцівками достатньо часто використовується структура КМ з різним спрямуванням волокон. Навіть для шарів з нормальною орієнтацією волокон по відношенню до площини зубця значення коефіцієнта γ не буде перевищувати аналогічних значень для монолітних КЕ.

Тобто, з точки зору підвищення об'ємного вмісту волокон КМ у зоні з'єднання використання листових кріпильних елементів є більш доцільним у порівнянні з іншими КТР.

Порівняння варіантів КТР за технологічними особливостями (властивостями)

Повернемося до структурних схем послідовних технологічних перетворень при реалізації трьох варіантів КТР з'єднань (рис. 4-6). Поперед всього слід звернути увагу на кількість процесів формоутворення КЕ. Для монолітних КЕ це фактично один техпроцес – фрезерування або електрофізична обробка. Для виготовлення циліндричних КЕ необхідно реалізувати три техпроцеси: формоутворення безпосередньо самих КЕ (штифтів), підготовка поверхні металевої закінцівки та кріплення КЕ до цієї поверхні (зварювання, посадка з натягом та інші процеси). Для варіанту листовими КЕ необхідно реалізувати два техпроцеси – штампування зубців у стрічці та кріплення ділянок стрічки до закінцівки (зварюванням, паяння або механічним болтовим з'єднанням).

Таким чином, пріоритетна характеристика варіантів КТР за ознакою кількості необхідних техпроцесів має наступний вигляд:

Монолітні КЕ – Листові КЕ – Циліндричні КЕ.

Далі слід розглянути ознаку кількості технологічного оснащення та приладів для виконання відповідних техпроцесів. Для формоутворення монолітних КЕ на поверхні металевої закінцівки різних геометричних форм. Це прилади для позиціювання оброблюваної поверхні відносно інструменту, закріплення закінцівки та взаємного переміщення. Більша кількість подібних приладів необхідна при формоутворенні циліндричних КЕ. Для формоутворення листових КЕ можливо використовувати універсальні прилади для формоутворення зубців на стрічці штампуванням на механічних пресах. Для закріплення ділянок стрічки необхідних розмірів можливо використовувати універсальні координатні столи у поєднанні зі зварювальним обладнанням.

Виходячи з цього, пріоритетна характеристика варіантів КТР за ознакою кількості необхідних технологічних приладів та обладнання може бути записана наступним чином:

Листові КЕ – Монолітні КЕ – Циліндричні КЕ.

Наступною ознакою для комплексного аналізу особливостей варіантів КЕ є кількість ресурсовитрат для формоутворення різних варіантів КТР. При цьому необхідно враховувати властивість технологічної оброблюваності різних матеріалів. Так, у роботі [5] на основі довідкових даних проведено порівняння відносних значень трудових витрат K^T та витрат енергії K^E при виконанні розглянутих варіантів КТР на однаковій площі поверхні металевої закінцівки за допомогою різних процесів для трьох матеріалів.

На приведених графіках відносні показники K^T та K^E визначаються залежностями:

$$K^T(K^E) = \frac{K_{\min}}{K_{\max}},$$

де $K_{\max}$ – максимальний розмірний показник відповідного параметру;
 $K_{\min}$ – мінімальний розмірний показник того ж параметру у низці процесів.

Звернемо увагу, що на рис. 8 вздовж осі ординат відкладено логарифмічні значення параметрів, тому мінімальному значенню відповідає нуль.

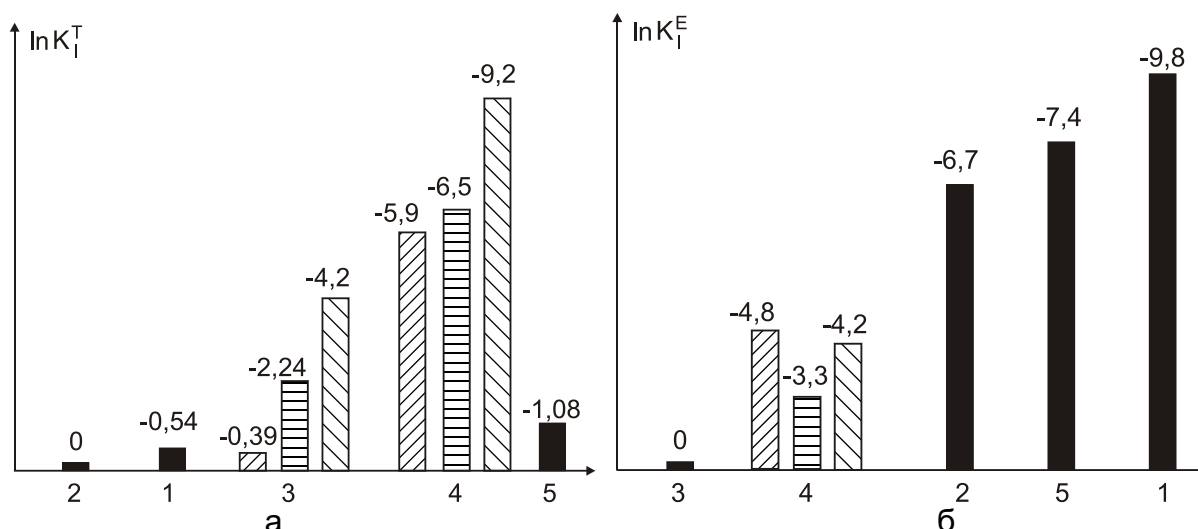


Рис. 8. Порівняння відносних показників формоутворення КЕ за допомогою різних процесів для різних матеріалів:

Процеси: 1 – стикове приварювання КЕ; 2 – встановлення КЕ з натягом у отвори; 3 – фрезерування КЕ; 4 – формоутворення КЕ за допомогою електро-ерозійної обробки (ЕЕО); 5 – штампування-вирубання КЕ у стрічці та кріплення стрічки до закінцівки зварюванням

Матеріали – – Al-сплави; – нержавіючі сталі; – Ті-сплави

Чорним кольором виділено середні значення для усіх матеріалів

Значення $\ln K^T$ та $\ln K^E$ показано зі знаком (-), що відповідає правилам логарифмування.

Фактично відносні параметри K^T та K^E визначають у скільки разів у ступені відповідний показник процесу перевищує мінімальне значення цього параметру у розглянутому ряду процесів. Наприклад, мінімальне значення трудомісткості формоутворення КЕ відповідає КЕ з титанових сплавів отриманих методом електро-ерозійного прошивання. При цьому мінімальні витрати енергії відповідають процесам встановлення штифтів у отвори з натягом.

Виходячи із значень, що приведено на рис. 7, пріоритетна характеристика процесів за показником трудомісткості техпроцесів може бути представлена наступним чином:

– для Al-сплавів (стикове зварювання практично не використовується)

Фрезерування КЕ – Листові КЕ – Формоутворення методами ЕЕО;

– для матеріалів групи Fe-Cr-Ni

Формоутворення методами ЕЕО – Стиконе зварювання – Листові КЕ;

– для титанових сплавів

Стиконе зварювання – Листові КЕ – Фрезерування монолітних КЕ;

При виборі КТР на основі властивості мінімальних витрат енергії (показник K^E) пріоритетна послідовність буде наступною:

– для Al-сплавів

Формоутворення монолітних КЕ методами ЕЕО – Встановлення циліндричних КЕ з натягом – Листові КЕ;

– для матеріалів групи Fe-Cr-Ni

Формоутворення монолітних КЕ методами ЕЕО – Встановлення циліндричних КЕ з натягом – Листові КЕ;

– для титанових сплавів

Формоутворення монолітних КЕ методами ЕЕО – Листові КЕ – Стикове зварювання.

Як показала дослідна проробка з'єднань низки конструкцій, важливою властивістю варіантів КТР з'єднань «метал-композит» та «композит-композит» є властивість уніфікації. Ця властивість характеризує спроможність формоутворювати КЕ на поверхнях різних форм, різною кількістю рядів КЕ з різних матеріалів закінцівок. Цій властивості найбільш повно відповідає КТР з проміжними КЕ у вигляді стрічки з зубцями.

Відзначимо, що у рядах пріоритетних особливостей (розглядається загалом до 9 властивостей), або, по-іншому, властивостей технологічних процесів формоутворення КЕ на металевих за кінцівках з'єднань "метал-композит", монолітні КЕ займають шість перших пріоритетних позицій, листові КЕ – три позиції. На другому місці листові КЕ, які займають чотири позиції, монолітні – 2 позиції, а циліндричні – 3 позиції. На третьому місці ряду знаходяться циліндричні КЕ (займають 3 позиції) та листові КЕ (також 3 позиції). При такому аналізі не враховується метод формоутворення монолітних КЕ – механічне фрезерування або формоутворення методами ЕЕО.

Таким чином, можна вважати, що пріоритетними за технологічними особливостями або властивостями є монолітні або листові КЕ.

Експериментальні дослідження стану з'єднання після навантаження

Достатньо інформативно для вибору варіантів КТР є стан з'єднання «метал-композит» після навантаження до повного або часткового руйнування зразків. Випробування зразків проводилося на розтягування та зсув.

На рис. 9 показано часткове руйнування з'єднання закінцівки з алюмінієвого сплаву з деталлю з вуглепластику.



Рис. 9. Повздовжній переріз зруйнованого шляхом розшарування зразка. Зразок препарований вздовж у площині ряду пірамідальних КЕ у нахлестковому з'єднанні

На цьому зразку видно повне відшарування пакету композиту від металевої закінцівки та часткове розшарування пакету КМ. Руйнування монолітних КЕ пірамідальної форми не спостерігається. Ця характерна картина руйнування є свідомством того, що монолітні КЕ відповідають умовам міцності, але з'єднання на основі такого КТР потребують підвищеної уваги до умов адгезії між пакетом КМ, закінцівкою та міжшаровою адгезії.

На рис. 10 показано характерну картину руйнування з'єднання з циліндричними КЕ. Можна спостерігати повне відшарування пакету КМ від закінцівки з алюмінієвого сплаву, частковий зріз штифтів на передніх ділянках з'єднання та часткове висмикування штифтів з отворів. На більш віддалених від краю ділянках з'єднання спостерігається їх вигін у напрямку діючого

навантаження.

Така мода руйнування є свідомством про недостатній ступінь гарантованого натягу штифтів при запресуванні в металеву закінцівку та недостатньої площі перерізу КЕ у перших рядах штифтів для спротиву діючому навантаженню. Строге виконання вимог необхідного гарантованого натягу ускладнює техпроцес формоутворення закінцівки.



Рис. 10. Зовнішній вигляд металевої закінцівки зразка, зі знятим пакетом композита після руйнування.

Починаючи з лівого краю штифти у першому та частково у другому рядах – зрізані, у другому та наступних рядах – висмикнуті з отворів, у останніх рядах – вигнуті у напрямку навантаження

На рис. 11 показано фрагмент конструкції фітингу лонжерону, який був навантажений поперечною силою та згинальним моментом.

На виносках показано характерні ділянки руйнування: відшарування пакету КМ від закінцівки з монолітними КЕ, зріз пірамідальних КЕ та часткове руйнування шарів КМ, які дотичні до закінцівки. Ця картина руйнування підтверджує зроблені вище висновки про необхідність ускладнення техпроцесів формоутворення КЕ шляхом контролю якості поверхні закінцівки для створення умов якісної адгезії, більш точного розрахунку потрібного перерізу штифтів на зріз.

Ефективність функціонального призначення листових КЕ експериментально було перевірено на прикладі підвищення несної здатності болтових з'єднань «метал-композит» (рис. 11). Відомо, що використання болтових (заклепкових) з'єднань «метал-композит» часто недостатньо надійно із-за зминання та розтріскування шарів композиту. Армування ділянок КМ навколо отвору трансверсально розташованими твердими мікроелементами підвищує жорсткість таких ділянок. На рис. 12 показано порівняння стану двох зон навколо отвору, підсиленого металевими накладками:

– перша зона оточена якнайменш двома рядами трансверсальних листових елементів

– друга зона знаходиться на межі кріпильної пластини та з однієї сторони вона не підкріплена трансверсальними КЕ.

Під дією навантаження овалізація першого отвору значно менша ніж

другого. Це є свідомством того, що подібне армування зони навколо отвору під механічний КЕ досить успішно виконує задані функції.

Зовнішній вигляд зразка для випробувань дозволяє зробити висновок про мінімальну деформацію армувальних зубців після інтенсивного навантаження. Це, у свою чергу, показує високу працездатність листових КЕ з зубцями.



Рис. 11. Фрагмент конструкції фітингу лонжерону після випробувань. Матеріал закінцівок – Д16Т, композитної частини закінцівки – вуглепластик 02С300UAP/Araldite LY556, структура $[0_{10}/90_4/+45_8/-45_8]$



а



б



в

Рис. 12. Зовнішній вигляд зразків «метал-композит» з листовими КЕ:
а – перед навантаженням. Видно різну орієнтацію поверхонь зубців; б – вигляд зразків після розтягування (вид зверху на зону підсилювання); в – вигляд зразків після розтягування (вид на елементи підсилювання з торця, повернуто на 180° відносно вигляду на позиції а). Руйнівне навантаження – 23,5 кН.

Обговорення отриманих результатів

Описані результати випробувань дозволяють зробити наступні узагальнення:

1. Монолітні КЕ рідше схильні до механічного руйнування під дією навантаження. Але при їх використанні частіше спостерігається відшарування пакету КМ від металевої закінцівки. Зменшити цей небажаний ефект можливо шляхом профілювання вздовж висоти пірамідальних або конічних КЕ (виконання

якореподібних або гарпуноподібних КЕ, хоч це більш складний процес).

2. Найбільш частим видом руйнування КТР з'єднання з циліндричними КЕ, які закріплені у отворах з натягом у металевій закінцівці, є висмикування КЕ з отворів. Більш працездатним рішенням кріплення циліндричних КЕ можна вважати стикове зварювання (електричне або лазерне).

3. У проведеній низці експериментів більш працездатним виявилися листові КЕ у якості проміжного елемента між пакетом КМ та металевою закінцівкою, а також підсилюючого елемента для болтових з'єднань.

Висновки

У роботі приведено результати аналізу особливостей КТР метало-композитних гетерогенних з'єднань «метал-композит», які пропонується використовувати у конструкціях легких та надлегких літальних апаратів.

1. Приведено огляд науково-технічних статей світового рівня, який показав широкий інтерес до цієї галузі досліджень. У низці робіт розглянуто подібні конструкції та зроблено спроби їх порівняльного аналізу за загальними властивостями з'єднань.

2. У роботі порівнюються особливості КТР з'єднань, у яких використовуються монолітні, циліндричні (шифтові) та листові кріпильні елементи. Порівняння особливостей різних КТР проведено за допомогою вивчення властивостей таких з'єднань – властивостей ваги, конструктивно-міцнісних, технологічних. Працездатність варіантів з'єднань та характерні види їх руйнування перевірено експериментально.

3. У результаті досліджень встановлено, що однозначних рекомендацій щодо використання того чи іншого варіанту КТР отримати неможливо. Надання пріоритету певному варіанту КТР закінцівок залежить від з'єднувальних матеріалів: Al-сплави, сплави на основі системи Fe-Cr-Ni, Ti-сплави; умов виробництва та його цілей. Так для з'єднань Al-сплавів з композитною деталлю (з скло- або вуглепластика) за багатьма особливостями пріоритетними є КТР з монолітними КЕ, які виконуються механічним фрезеруванням або методами ЕЕО. При завданні прототипної цілі виробництва пріоритетним є КТР з листовими КЕ.

4. Характерними видами руйнування розглянутих варіантів КТР є: відшарування пакету КМ від металевої закінцівки, зріз та висмикування циліндричних КЕ із отворів у металевій закінцівці. Зминання КЕ у з'єднаннях спостерігається дуже рідко.

Загалом можливо рекомендувати розглянуті варіанти КТР з'єднань «метал-композит» для використання у різних конструкціях вузлів та агрегатів легких та надлегких літальних апаратів.

Відзначені недоліки дослідження

1. У представленому матеріалі порівняльного аналізу низки властивостей варіантів КТР відсутнє кількісне порівняння, спираючись лише на зовнішні признаки. Їх кількісне оцінювання потребує пошуку великої кількості конкретних кількісних даних щодо відповідних техпроцесів. Але уточнена оцінка властивостей варіантів принципово не змінює отримані висновки.

2. За тією ж самою причиною не розглянуто технічні вимоги, які потенційно можуть бути пред'явлено до розглянутої продукції.

Список літератури

1. У турецькій компанії Bayraktar заявили, коли в Україні добудують завод з виробництва БПЛА [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <https://nv.ua/ukraine/events/bayraktar-stroitelstvo-zavoda-po-proizvodstvu-bpla-v-ukraine-zavershat-v-2025-godu-50461177.html> (29.10.2024).
2. TU Delft's Newest Tailsitter Drone Is Designed for Outback Delivery A hybrid delta biplane design results in efficiency, range, and pinpoint landings [Електронний ресурс] . – Режим доступа : <https://spectrum.ieee.org/tu-delft-tailsitter> (29.10.2024).
3. ArusDuo - безпілотний біплан-псевдосупутник із сонячними панелями [Електронний ресурс] . – Режим доступа : <https://itc.ua/blogi/arusduo-bespilotnyi-biplan-psevdosputnik-s-solnechnymi-panelyami/> (29.10.2024).
4. Karpov, Ya. S. Joints of articles and units made of composites [Text] / Ya. S. Karpov / – Kharkiv: Nat. Aerosp. Univ. «KhAI», 2006. – 359 p. ISBN 966-662-133-9.
5. Тараненко, І. М. Розрахунково-аналітичне порівняння показників властивостей варіантів конструктивно-технологічних рішень трансверсальних з'єднань «метал+композит» // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології, 2022, №96, С. 4-23, doi:10.32620/oikit.2022.96.01, <http://nti.khai.edu/ojs/index.php/oikit/issue/view/153>.
6. Buffa, G.; Bafari, D.; Campanella, D.; Fratini, L. An innovative friction stir welding based technique to produce dissimilar light alloys to thermoplastic matrix composite joints. Procedia Manuf. 2016, 5, 319–331, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.028>.
7. Abibe, A.B.; Amancio-Filho, S.T.; dos Santos, J.F.; Hage, E. Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer-metal staked joints. Mater. Des. 2013, 46, 338–347, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.043>.
8. Anna Galińska, Cezary Galiński. Mechanical Joining of Fibre Reinforced Polymer Composites to Metals—A Review. Part II: Riveting, Clinching, Non-Adhesive Form-Locked Joints, Pin and Loop Joining / Polymers. – Published 28 July 2020, Volume 12(8). – Issue 1681, pp. 1 – 40; <https://doi.org/10.3390/polym12081681>. <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/8/1681/htm>.
9. Eduardo E. Feistauer, Jorge F. dos Santos, Sergio T. Amancio-Filho. A review on direct assembly of through-the-thickness reinforced metal–polymer composite hybrid structures / Polymer Engineering and Science, Published: April 2019. – Volume 59, Issue 4. – pp. 661 – 674. <https://doi.org/10.1002/pen.25022>.
10. Azgaldov, Garry G. The ABC of Qualimetry Toolkit for measuring the immeasurable / Garry G. Azgaldov, Alexander V. Kostin, Alvaro E. Padilla Omiste, Ridero, 2015, 167 p, ISBN 978-5-4474-2248-6, http://www.labrate.ru/kostin/20150831_the_abc_of_qualimetry-text-CC-BY-SA.pdf.
11. Mechanical processing of composites at aircrafts assembling (analytical review) [Text] : monograph / A. V. Kryvoruchko, V. A. Zaloga, V. A. Kolesnik et al; edited by V.A. Zaloga. – Sumy : «University book», 2013. – 272 p. ISBN 978-680-694-2.

References

1. U turetskii kompanii Bayraktar r zaiavyly, koly v Ukraini dobuduiut zavod z vyrobnytstva BPLA [Elektronnyi resurs] . – Rezhym dostupa : <https://nv.ua/ukraine/events/bayraktar-stroitelstvo-zavoda-po-proizvodstvu-bpla-v->

ukraine-zavershat-v-2025-godu-50461177.html (29.10.2024).

2. TU Delft's Newest Tailsitter Drone Is Designed for Outback Delivery A hybrid delta biplane design results in efficiency, range, and pinpoint landings [Електронний ресурс] . – Режим доступа : <https://spectrum.ieee.org/tu-delft-tailsitter> (29.10.2024).

3. ApusDuo - Bezpilotnyi biplan-psevdosuputnyk iz soniachnymy paneliamy [Elektronnyi resurs] . – Rezhym dostupa: <https://itc.ua/blogi/apusduo-bespilotnyi-biplan-psevdosputnik-s-solnechnyimi-panelyami/> (29.10.2024).

4. Karpov, Ya. S. Joints of articles and units made of composites [Text] / Ya. S. Karpov / – Kharkiv: Nat. Aerosp. Univ. «KhAI», 2006. – 359 p. ISBN 966-662-133-9.

5. Taranenko, I. M. Rozrakhunkovo-analitychne porivniannia pokaznykiv vlastyvoستي va-riantiv konstruktyvno-tekhnolohichnykh rishen transversalnykh z'iednan «metal+kompozyt» // Vidkryti informatsiini ta komp'iuterni intehrovani tekhnolohii, 2022, №96, S. 4-23, doi:10.32620/oikit.2022.96.01, <http://nti.khai.edu/ojs/index.php/oikit/issue/view/153>.

6. Buffa, G.; Bafari, D.; Campanella, D.; Fratini, L. An innovative friction stir welding based technique to produce dissimilar light alloys to thermoplastic matrix composite joints. Procedia Manuf. 2016, 5, 319–331, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.028>.

7. Abibe, A.B.; Amancio-Filho, S.T.; dos Santos, J.F.; Hage, E. Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer-metal staked joints. Mater. Des. 2013, 46, 338–347, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.043>.

8. Anna Galińska, Cezary Galiński. Mechanical Joining of Fibre Reinforced Polymer Composites to Metals—A Review. Part II: Riveting, Clinching, Non-Adhesive Form-Locked Joints, Pin and Loop Joining / Polymers. – Published 28 July 2020, Volume 12(8). – Issue 1681, pp. 1 – 40; <https://doi.org/10.3390/polym12081681>. <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/8/1681/htm>.

9. Eduardo E. Feistauer, Jorge F. dos Santos, Sergio T. Amancio-Filho. A review on direct assembly of through-the-thickness reinforced metal–polymer composite hybrid structures / Polymer Engineering and Science, Published: April 2019. – Volume 59, Issue 4. – pp. 661 – 674. <https://doi.org/10.1002/pen.25022>.

10. Azgaldov, Garry G. The ABC of Qualimetry Toolkit for measuring the immeasurable / Garry G. Azgaldov, Alexander V. Kostin, Alvaro E. Padilla Omiste, Ridero, 2015, 167 p, ISBN 978-5-4474-2248-6, http://www.labrate.ru/kostin/20150831_the_abc_of_qualimetry-text-CC-BY-SA.pdf.

11. Mechanical processing of composites at aircrafts assembling (analytical review) [Text] : monograph / A. V. Kryvoruchko, V. A. Zaloga, V. A. Kolesnik et al; edited by V.A. Zaloga. – Sumy : «University book», 2013. – 272 p. ISBN 978-680-694-2.

Надійшла до редакції 25.08.2025, розглянута на редколегії 25.08.2025

A comprehensive method for comparison of optimal structural and manufacturing solutions for metal-composite joints considering distinctions of their manufacture

A generalized qualitative method for selecting variants for “metal-composite” joints for light aircraft requiring minimization of joint mass is considered.

A review of modern scientific and technical literature in this field has shown the relevance of the problem of selecting the type of joints. At the same time, existing selection methods require high accuracy. They do not contain quantitative information about the technology of manufacturing joints, which significantly affects their efficiency and quality.

The following three design options for joints with transverse fasteners were selected for analysis: monolithic pyramidal microelements made on a metal tip, cylindrical microelements installed on the tip surface by welding or pressing, and sheet microelements made on an intermediate metal strip, which in turn is attached on the tip.

The comparison of options was carried out according to the following groups of properties: weight, structural strength and technological features.

It should be noted that in previous studies, a quantitative method was developed and used to compare structural and technological solutions of “metal-composite” joints, with direct calculation of the values of the quality indices of the processes of preparation for production and manufacturing of joints. This method requires a sufficient amount of specific reference data and time for calculations. Therefore, the development of a qualitative method for comparing the joints structural-manufacturing solutions is quite relevant.

The purpose of the work is to increase the efficiency and quality of joints while minimizing several properties depending on the goals (volume) of production, the purpose of products, reducing costs and time for manufacturing and preparation for production.

The main tasks of the study are reduced to qualitative and quantitative assessment of target indicators according to the selected design options, materials used and the complexity of the manufacturing process.

The research method is a complex system analysis.

As a result of the study, relevant conclusions were drawn regarding the priority of a particular connection option for different materials and production conditions.

Keywords: metal+composite joint, options for structural and manufacturing solutions, manufacturing technology, comparative analysis.

Відомості про автора:

Тараненко Ігор Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, професор композитних конструкцій та авіаційного матеріалознавства Національного аерокосмічного університету “Харківський авіаційний інститут”, Україна, м. Харків, e-mail: igor.taranenko@khai.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9554-0162>

About the Author:

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