

doi: 10.32620/oikit.2022.96.01

УДК 629.735

І. М. Тараненко

Розрахунково-аналітичне порівняння показників властивостей варіантів конструктивно-технологічних рішень трансверсальних з'єднань “метал + композит”

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

В статті актуалізуються питання вибору варіантів для цільової оптимізації технологічної підготовки виробництва (ТПВ) для різних КТР реалізації складання метало-композитних деталей та вузлів з трансверсальними зв'язками. Розглянуто декілька варіантів конструктивно-технологічних рішень (КТР) з'єднань. Для дослідження обрано три типи виконання кріпильних зв'язків – з монолітними пірамідальними, циліндричними та листовими мікроелементами (МЕ).

Сформовано структурні схеми можливих технологічних процесів формоутворення кріпильних мікроелементів різних форм. Ці схеми враховують вплив як основних так і допоміжних операцій, які потрібно враховувати при оцінці тривалості процесу виготовлення та оцінці витрат енергії.

При порівнянні кількісних параметрів техпроцесів розглянуто можливість виготовлення кріпильних мікроелементів з алюмінієвих, титанових сплавів та нержавіючих сталей.

У якості порівнюваних технологічних процесів (ТП) виготовлення трансверсальних кріпильних мікроелементів розглянуто фрезерування дисковими та циліндричними фрезами та сучасні методи електроерозійної обробки матеріалів електрод-інструментом та рухомим дротом.

Визначено актуальні для цілей вибору властивості технологічних процесів формоутворення кріпильних елементів. До них віднесено тривалість виготовлення зв'язків та необхідних для цього енерговитрат.

Синтезовано кваліметричну модель вибору технологічних процесів з їх оптимізацією у відповідності до цільових функцій. Визначено та обґрунтовано вхідні, керовані та вихідні параметри моделі. Запропоновано підхід до розрахунку комплексного показника якості виготовлення кріпильних мікроелементів, за допомогою якого розраховано та порівняно чисельні показники якості різних техпроцесів. Зроблено узагальнені висновки.

Ключові слова: з'єднання “метал + композит”, трансверсальні кріпильні зв'язки, властивості техпроцесів, кваліметричний аналіз

Вступ

У світовому авіабудуванні широко використовуються композитні матеріали (КМ), які мають високі питомі властивості міцності та жорсткості. Структура КМ складається з двох фаз – наповнювача (часто волокнистих матеріалів), що має значно вищі міцність та жорсткість у порівнянні з другим компонентом – матрицею, що об'єднує волокна в одне ціле тіло деталі або агрегату. Але з'єднання КМ з металом (металевим фітінгом) вимагає вирішення низки складних задач. Такі з'єднання КМ з металом повинні мати необхідну несучу здатність, мінімальну масу та бути технологічними при складанні з'єднання.

Традиційні механічні з'єднання (болтові або заклепкові) не в повній мірі відповідають технічним вимогам (ТВ) до них з причини їх невисокої надійності (що визначається властивостями КМ), відрізняються великою масою та низькою технологічністю складання [1-5]. Адгезійні (клеюві) з'єднання не мають

необхідного рівня несучої здатності та великі за габаритами.

Відомий широкий набір варіантів конструкцій перехідних з'єднань, такі як метало-композитні гетерогенні зв'язки (МКГЗ) [5]. В цих з'єднаннях металеві мікроелементи (МЕ), закріплені на поверхні металевої закінцівки у трансверсальному напрямку (Z-pins), впроваджуються у тіло композитної деталі у незаполімеризованому стані та затверджуються разом із нею. Кожний МЕ передає навантаження, втримуючи напруження зрізу та також зминання, оточуючий його композит повинен також витримувати таке навантаження. У деяких випадках до металевої закінцівки прикладаються також відривальні зусилля, тому МЕ надається деяка поздовжня форма, що ускладнює його виривання.

Відома низка конструктивно-технологічних рішень (КТР) формоутворення трансверсальних кріпильних елементів на металевій закінцівці з'єднання [2, 4-6, 8-13, 16-18, 20, 21, 23-25, 27].

Метою

роботи є підвищення техніко-економічної ефективності та якості технологічної підготовки виробництва з'єднань "метал + композит".

Поставлені задачі

передбачають:

- на основі системного підходу визначити актуальні властивості КТР таких з'єднань та їх кількісні параметри;
- синтезувати кваліметричну модель керування ТПВ, визначити вхідні, керувальні та вихідні параметри моделі;
- показати на прикладах структурних схем ТПВ можливість реалізації синтезованої моделі для цільової оптимізації виробництва.

Визначення на основі системного підходу актуальних властивостей КТР з'єднань, вхідних та вихідних параметрів моделі, прикладів побудови структурних схем процесу ТПВ, а також їх кваліметричного порівняння.

Прийняті припущення

Технічна підготовка виробництва умовно поділяється на декілька частин:

- конструкторську підготовку (проектування);
- технологічну підготовку виробництва;
- комплексну підготовку, до якої входять роботи, щодо планування дій виробничих ділянок, заказ, закупівля та встановлення технологічного обладнання та оснащення та інші.

В сучасних умовах, при наявності широких можливостей автоматизованого проектування конструкцій та технологічних процесів використовується конструкторсько-технологічна форма проектування з повторювально-послідовними етапами вибору фінального технологічного рішення. При цьому необхідно використовувати технологічні властивості різних варіантів конструктивних рішень для оптимізації виробництва композитних виробів.

Наступною прийнятою умовністю є найменування основного технологічного процесу виготовлення, наприклад, фрезерування МЕ. Під цією назвою вважається низка технологічних процесів та операцій без яких

неможливо одержати якісний результат. У розглянутому прикладі після формоутворення геометрії МЕ необхідно провести операції закруглення ребр МЕ, можливо термообробку металевої частини закінцівки, операції зачищення поверхні та інші.

Методи дослідження

У роботі використовуються методи системного аналізу при синтезі кваліметричної моделі управління якістю ТПВ та складання структурних схем технологічних процесів., метод кваліметричного порівняння варіантів КТР.

Систематизація властивостей якості з'єднань

У цьому дослідженні прийнята умова, що кожен властивість необхідно оцінювати визначеним показником (по можливості кількісним, або за допомогою балів).

До найбільш важливих властивостей з'єднань “метал + композит” як об'єкту кваліметричного аналізу, слід віднести наступні групові властивості:

- несучу здатність, яка включає міцнісні та деформаційні властивості;
- структурні властивості (об'ємний вміст волокон у композиті у зоні з'єднання та регулярній зоні);
- масові властивості (маса основних та додаткових елементів з'єднання);
- властивості технологічності (витрати праці та енергії за усіма операціями та техпроцесами формоутворення МЕ).

Комплексний показник властивостей кожного варіанту КТР сумується визначеним чином з групових показників.

Аналіз публікацій у розглянутій галузі

Зі світової науково-технічної літератури відомо багато рішень МКГЗ [2, 4-6, 8-13, 16-18, 20, 21, 23-25, 27]. Все різноманіття КТР можливо умовно поділити на три групи:

- з монолітними МЕ, що формоутворюються безпосередньо з матеріалу закінцівки;
- з МЕ у вигляді окремо виготовлених штифтів, що кріпляться до закінцівки;
- з МЕ у вигляді язичків, що виштамповуються з листового матеріалу, який у свою чергу закріплюється на закінцівці (рис. 1).

За формою МЕ можуть бути пірамідальними, циліндричними, конічними, клиноподібними, мати форму якоря. Структура їх розташування на поверхні закінцівки може бути рядною, шаховою, діагональною. Вибір необхідної структури визначається напрямком діючих зусиль. Радіуси закруглення ребр та вершин МЕ залежать від діаметру армувальних волокон КМ. Параметр шорсткості МЕ повинен бути нижчим за діаметр волокна у декілька разів.

Відомо багато способів формоутворення МЕ на поверхні металевої закінцівки. До їх числа входять:

- фрезерування проміжків між МЕ [1, 7-12], точіння канавок між МЕ профільованим різцем подібно до процесів нарізання різьб, але у різних напрямках гвинтової лінії;
- формоутворення на поверхні закінцівки задирок металу спеціальним інструментом [6, 7];

– формоутворення на поверхні металу виплесків металу, що утворюються під дією високоенергетичного випромінювання (лазера) [6, 7].

Деякі з цих процесів добре вивчені та використовуються на практиці. Інші знаходяться на стадії вивчення та вдосконалення. Кожен з цих методів має позитивні сторони та недоліки.

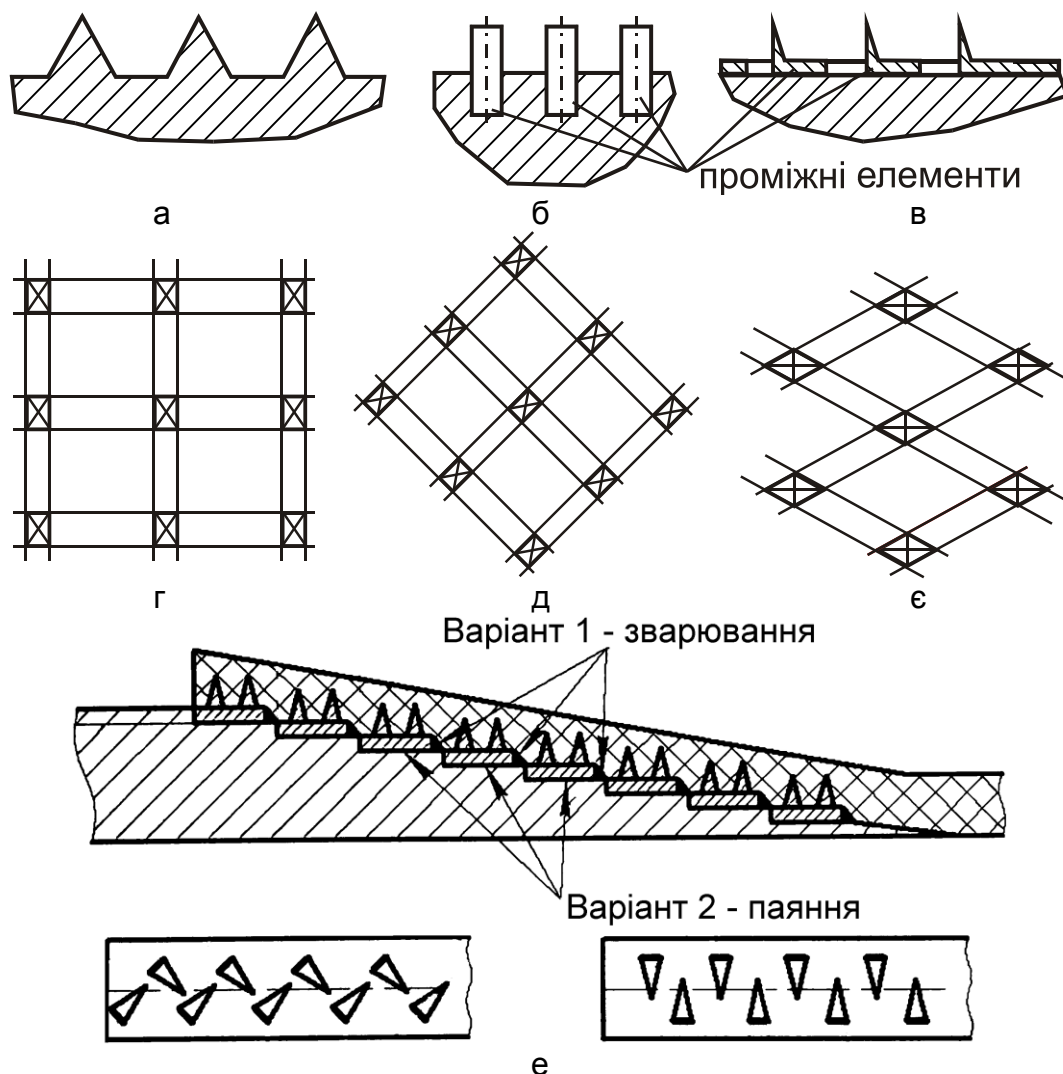


Рис. 1 Варіанти конструктивних рішень формоутворення трансверсальних зв'язків та їх розташування на поверхні металевої закінцівки:
 а – монолітні; б – циліндричні; в – листові типу “канцелярська кнопка”;
 г, д – рядна структура; е – шахова структура; е – дворядна з різною орієнтацією зубців у шаховому порядку (комбінована)

Формоутворення трансверсальних зв'язків на поверхні закінцівки можливо шляхом встановлення та закріплення на ній деяких проміжних елементів у вигляді циліндричних загострених штифтів або виступів іншої форми, що направлені по нормалі до поверхні. Для реалізації такого КТР (Z-pins) розглядаються варіанти: встановлення попередньо виготовлених штифтів (з дроту або висадкою), які потім прикріплюються зварюванням (лазерним або електричним) [1, 5, 6, 7] або за допомогою клею у попередньо виготовлені отвори. Крім металевих, у якості трансверсальних елементів деякими

дослідниками запропоновано використовувати різні матеріали та їх похідні (суміші), що наносяться на поверхню інжекційним витисканням [7] та за допомогою 3D-технологій [6].

Запропоновані також способи петльового закріплення армувального матеріалу за спеціальні штифти та скоби, що попередньо закріплюються на поверхні закінцівки [8].

Розглянуто варіанти виконання проміжних елементів з листових стрічок або пластин з вирубаними за відігнутими язичками у вигляді канцелярської кнопки [1, 5]. Листові проміжні елементи кріпляться до поверхні закінцівки зварюванням або болтами (заклепками).

Характерні приклади порівняння варіантів формоутворення кріпильних елементів приведено у [3-6, 7, 10, 12, 13, 17]. Такого роду порівняння використовують виключно як якісну оцінку властивостей запропонованих рішень. У якості порівнюваних властивостей обрано ті, що не завжди є актуальними для управління якістю, також не оцінюється сукупність техпроцесів, які супроводжують реалізацію КТР. Для більш коректного оцінювання необхідно використовувати кваліметричний метод порівняння.

Подальше у якості прикладу порівняння було обрано виготовлення пірамідальних монолітних, циліндричних та листових МЕ.

Метод кваліметричного порівняння

В основі такого методу лежить використання таких положень [34-38]:

- будь-яка властивість процесу може бути оцінена кількісним показником;
- сукупність властивостей процесу зручно зобразити у вигляді дерева властивостей, в якому виділяються найпростіші властивості, які неможливо (або нераціонально) розкласти на ще більш прості властивості. Такі властивості мають назву одиничних. Більш складні властивості, що об'єднують декілька одиничних властивостей, називають груповими. Комплексна (інтегральна) властивість процесу об'єднує групові властивості. Комплексний показник властивостей є фактично показником якості процесу;

- виконувати операції об'єднання показників властивостей зручно, коли показники представлені у відносній формі. При цьому значення будь-якого показника повинно знаходитись у діапазоні 0...1,0.

Відносний одиничний показник якості властивості K_i є відношенням різниці між фактичним показником властивості Q та його мінімально можливим значенням Q_{\min} до різниці між максимальним значенням показника Q_{\max} та його мінімальним значенням, тобто

$$K_i = \frac{Q - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}}.$$

Можливі значення цього дробу визначають діапазон значень показників розглянутої властивості.

Груповий показник j -ї властивості дорівнює сумі одиничних показників

$$K_j = \varphi(K_i \cdot g_i \cdot K_{\text{эф}})$$

де φ – функція згортки (підсумовування);

g_i – коефіцієнт вагомості i -ї властивості, $\sum_{i=1}^n g_i = 1, 0$;

K_{ef} – коефіцієнт збереження ефективності, що залежить, в основному, від часу (тривалості) проявлення властивостей.

Комплексний показник властивостей визначається за такою ж формулою, але з включенням до неї групових показників K_j та відповідних показників вагомості.

У практиці технологічних розрахунків частіше для аналізу залучається 3...5 більш важливих показників. У якості функції згортки використовується формула для середньо-арифметичного, середньо-геометричного та середньо-зваженого значення.

Тобто, ці залежності та умови являють собою основну частину кваліметричної моделі управління якістю технологічного процесу складання з'єднання. У доповнення до цієї частини використовуються залежності технологічних розрахунків трудомісткості усіх операцій, витрати енергії в усіх операціях та трудомісткість підготовки технологічного оснащення.

Вхідними параметрами у розглянутій моделі є варіанти КТР з'єднань. Керованими параметрами є коефіцієнти вагомості. За допомогою них реалізуються цілі конкретного виробництва (прототипне, серійне, масове та інші). Вихідним параметром можна вважати комплексний показник властивості процесу, що вказує, яке з КТР та який матеріал закінцівки є раціональними для заданих умов виробництва.

У якості прикладу розглянемо вибір варіанту формоутворення монолітних пірамідальних МЕ. Структурна схема такого процесу показана на рис. 2.

Формоутворення таких МЕ на поверхні металевої закінцівки з'єднання "метал + композит" можливо методом фрезерування, точіння та різними способами електро-ерозійної розмірної обробки (ЕРО). Кожен з цих методів можна використовувати по різному:

- фрезерувати канавки між МЕ дисковою або циліндричною профільованими фрезами;
- точінням (на закінцівках, що мають вісесиметричну форму) різцем за декілька проходів у двох напрямках;
- при ЕРО можливо використання суцільного профільованого електрода, вирізанням металу з канавок рухомим дротом, а також анодно-механічним різанням.

Всі ці процеси відрізняються один від одного різними значенням показників технологічності.

Закруглення ребр пірамідальних МЕ та зачищення їх поверхні проводиться також декількома способами, після яких обов'язково виконують операції забезпечення промислової чистоти.

Слід відзначити, що при розрахунку технологічних параметрів різних процесів формоутворення МЕ необхідно брати до уваги особливості взаємодії інструмента з оброблюваною поверхнею. Так при визначенні режимів фрезерування та точіння обов'язково слід враховувати ажурність (малу жорсткість) конструкції та обирати подачу та глибину різання з умов обмеження пластичної деформації вершин МЕ [30-33]. Це важлива умова, що визначає трудомісткість процесу різання у порівнянні з ЕРО МЕ. Ця умова може впливати на необхідність проведення термічної обробки після різання для зняття остаточних напружень.

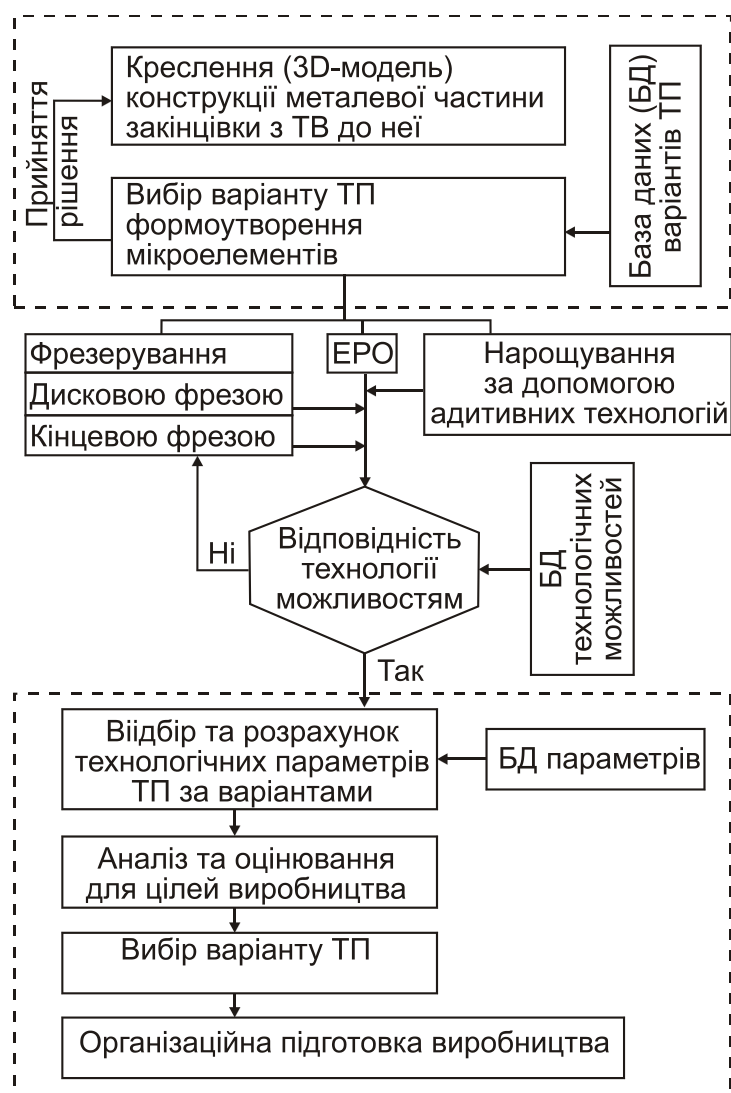


Рис. 2 Загальна структура ТПВ формоутворення мікроелементів на металевій закінцівці з'єднання. Пунктиром показано загальну частину структури ТПВ для усіх варіантів конструкцій мікроелементів

Для першого прикладу можливості реалізації синтезованої кваліметричної моделі порівняння було розраховано трудомісткість та енерговитрати фрезерування МЕ на умовній пластині розміром 100x50 мм, виконаної з:

- алюмінієвого сплаву з високими показниками оброблюваності різанням;
- нержавіючої сталі типу 12X18H10T;
- титанового сплаву з низькими показниками оброблюваності різанням.

У розрахованому прикладі вважалась однаковою несуча здатність ошліфтованих пластин з різних матеріалів. Їх різні механічні властивості вимагають різної кількості необхідних МЕ і, як слідство, різної довжини (площі) оброблюваної поверхні. Результати порівняння показано на рис. 3.

Як можна побачити з наведених залежностей, питома продуктивність обробки циліндричною фасонною фрезою значно вище ніж дисковою. Тому обробка таким інструментом часто використовується на станках з ЧПУ. Але витрати енергії при обробці дисковими фрезами з усіх матеріалів практично втричі менші. Ще однією перевагою дискових фрез є можливість налаштування

фрезерного станка набором з декількох фрез для одночасної обробки декількох довгих канавок між МЕ. У цьому випадку вплив довжини врізання та перебігу на продуктивність різко зменшується.

При необхідності суттєвого скорочення витрат енергії на обробку краще використовувати дискові фрези, але з урахуванням більш низької продуктивності.

Таким чином, просте порівняння показників технологічності дозволяє кількісно обґрунтувати вибір варіанту техпроцесу.

Подібне порівняння можна провести при дослідженні процесу формоутворення закінцівки з циліндричними МЕ. Структурна схема такого формоутворення показана на рис. 4.

Такий процес об'єднує декілька варіантів процесів нижчого рівня: виробництво проміжних елементів за декількома методами, складання та закріплення штифтів на поверхні закінцівки.

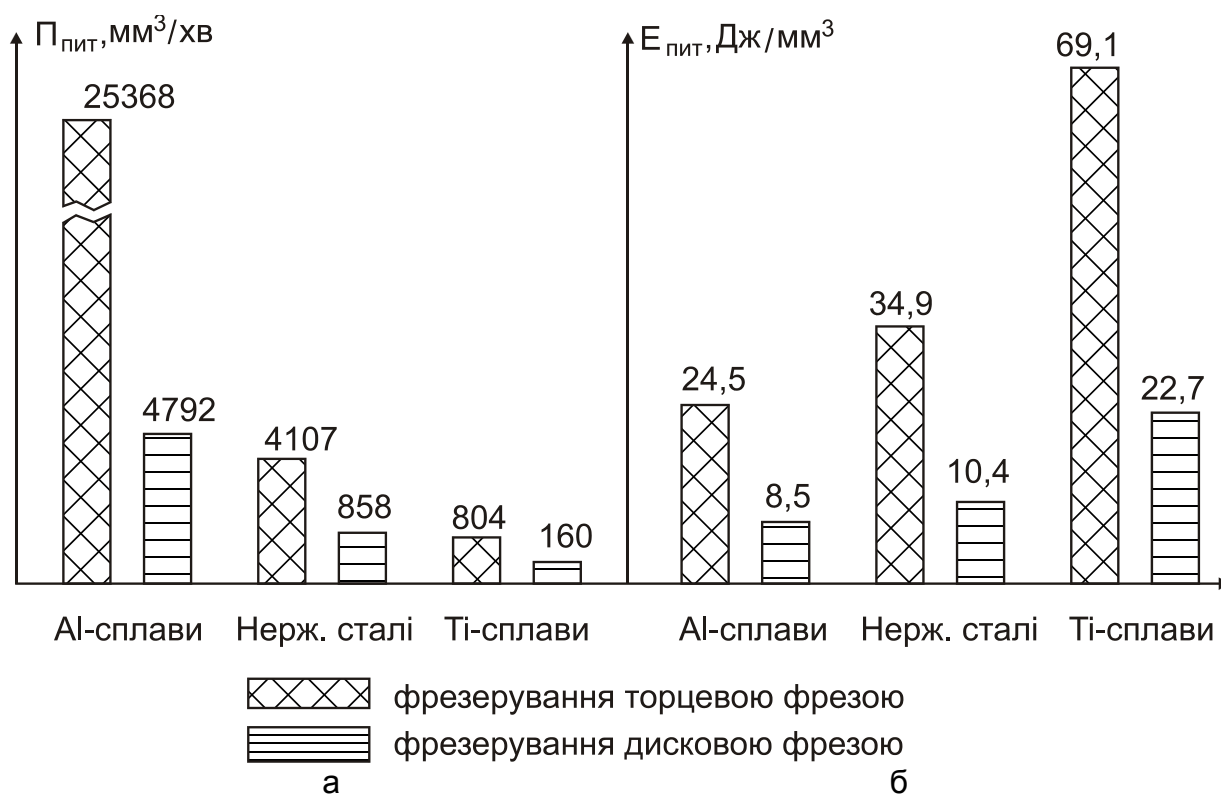


Рис. 3 Порівняння питомої продуктивності $\Pi_{\text{пит}}$ (а) та витрат енергії $E_{\text{пит}}$ (б) при фрезеруванні торцевою та дисковою фрезами МЕ з різних матеріалів на умовній поверхні 100x50 мм. Розміри МЕ: основа – 2x2 мм, кут при вершині 20°, крок розташування 8 мм

Для оцінки якості можливих варіантів трудомісткості та витрат енергії, а також їх особливості (за необхідністю) підсумовуються та порівнюються результати розрахунку. Ці результати зручно подати у відносному вигляді на комплект МЕ. Під комплектом розуміється кількість МЕ, необхідних для забезпечення тієї ж самої несучої здатності, як для випадку монолітних МЕ, розташованих на тій же площі. Вихідні дані для технологічних розрахунків отримують з довідникової бази даних [30-33].

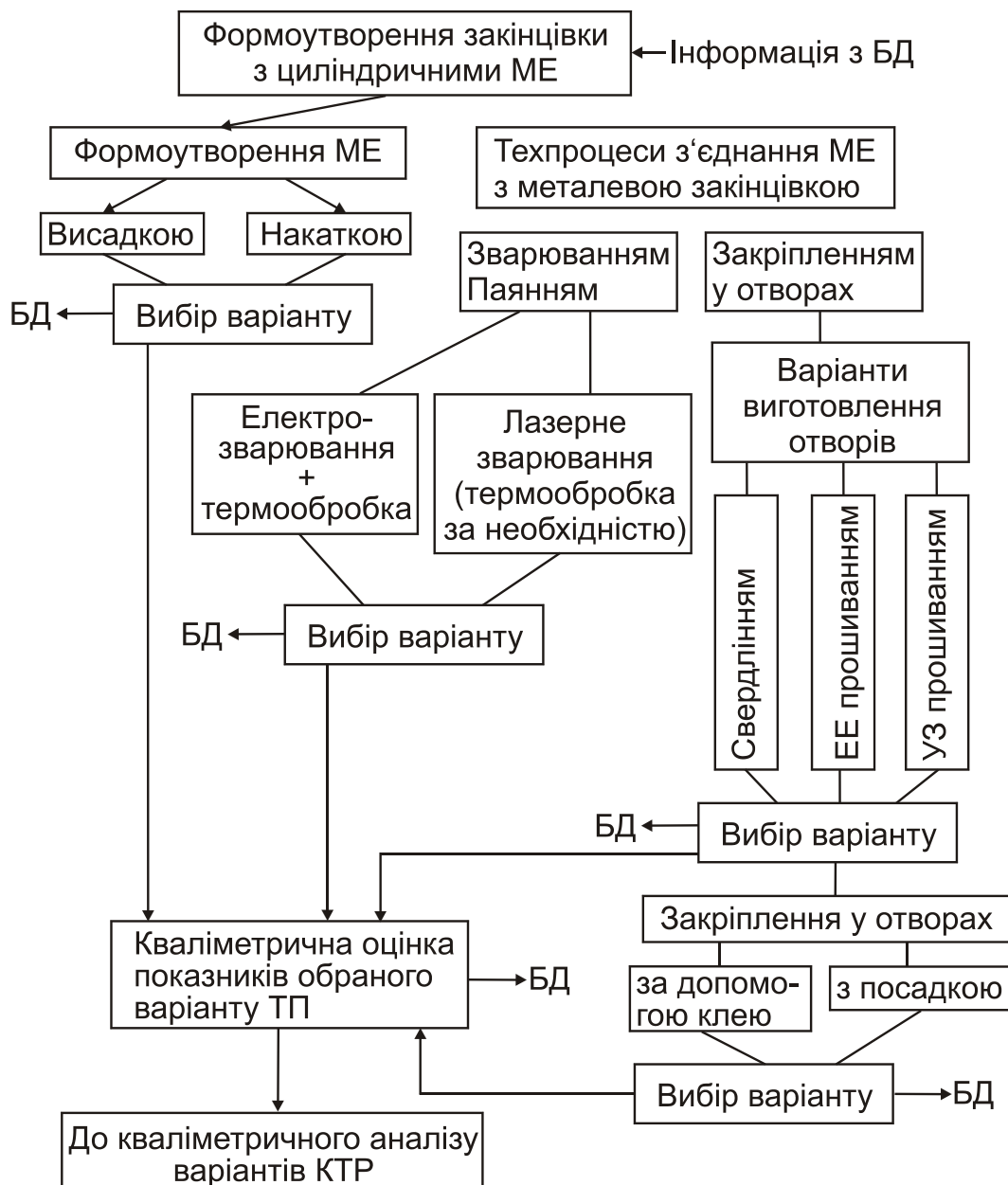


Рис. 4. Структура ТПВ при виборі варіантів ТП формоутворення циліндричних мікроелементів на металевих частинах закінцівки

Результати порівняння приведено на рис. 5. Тут порівнюються варіанти встановлення та закріплення МЕ на закінцівках з нержавіючої сталі та титанових сплавів, які мають понижені характеристики оброблюваності різанням.

У розглянутих варіантах значну перевагу мають варіанти прошивання за допомогою ЕРО, тобто прошиваються отвори та потім в них встановлюються і закріплюються МЕ.

Розглянемо приклад порівняння показників технологічності різних КТР з'єднань “метал + композит”. Для цього виберемо процеси, що реально використовуються для формоутворення трансверсальних зв'язків.

Процес 1 – встановлення на закінцівку циліндричних штифтів шляхом стикового електрозварювання.

Процес 2 – встановлення на закінцівку циліндричних штифтів за допомогою клею.

Процес 3 – формоутворення пірамідальних МЕ фрезеруванням циліндричною фрезою.

Процес 4 – формоутворення пірамідальних МЕ шляхом ЕРО.

Процес 5 – формоутворення кріпильних листових МЕ.

Технологічні параметри для них розраховувались за умови рівної несучої здатності ділянки кріпильних елементів розмірами 50x100 мм та інших відповідних умов.

При відсутності еталонних та бракувальних значень відносних показників процесів, таких як трудомісткість K_i^T та витрати енергії K_i^e (і це показник номера процесу), за базові значення приймаються їх мінімальні значення. У розрахованому випадку вони дорівнюють:

– показник $K_2^T = 38$ хв/компл (встановлення циліндричних МЕ у закінцівці з алюмінієвих сплавів);

– показник $K_3^e = 8,5$ Дж/компл (механічне формоутворення МЕ у закінцівці з алюмінієвого сплаву).

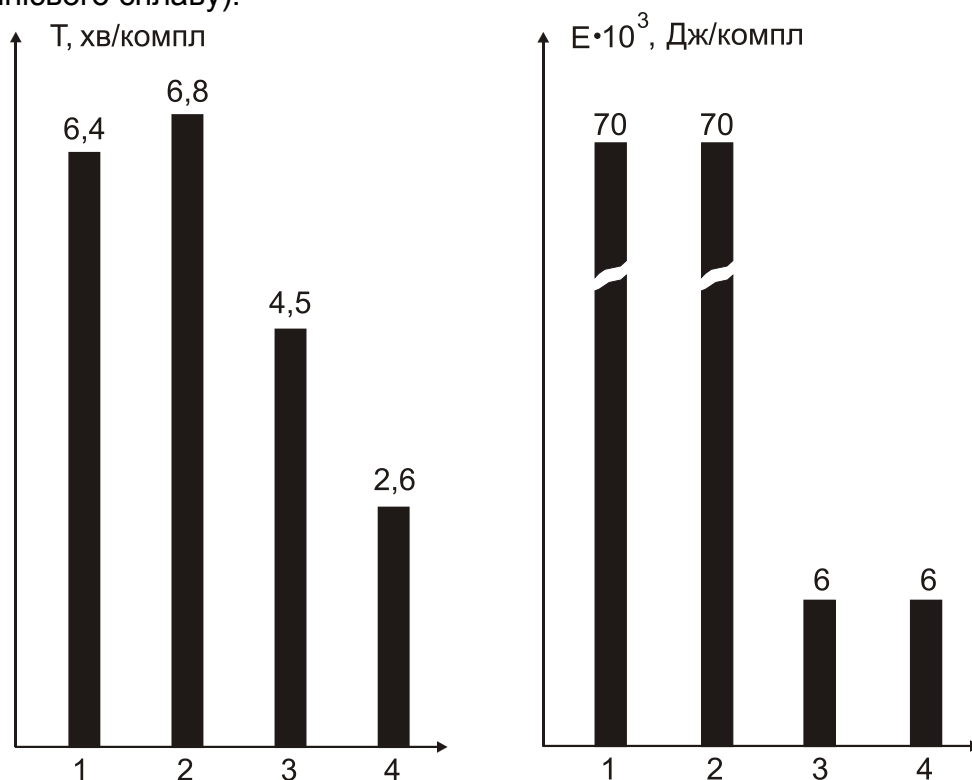


Рис. 5. Графічне порівняння трудомісткості й енерговитрат для процесів:
 1 – одержання комплекту й установка зварюванням гладких циліндричних МЕ;
 2 – одержання й установка зварюванням фасонних штифтів;
 3 – одержання й установка з натягом фасонних МЕ;
 4 – те ж встановлюванням у отвори, виконані ЕРО-прошиванням

Значення відносних показників розраховувались як відношення відповідних значень показника і-го процесу до його базового (мінімального)

значення.

Результати розрахунків, виражені за логарифмічною шкалою, показано на рис. 6 та рис. 7.

Отримані залежності характеризують розподіл пріоритетів використання різних процесів за різними показниками.

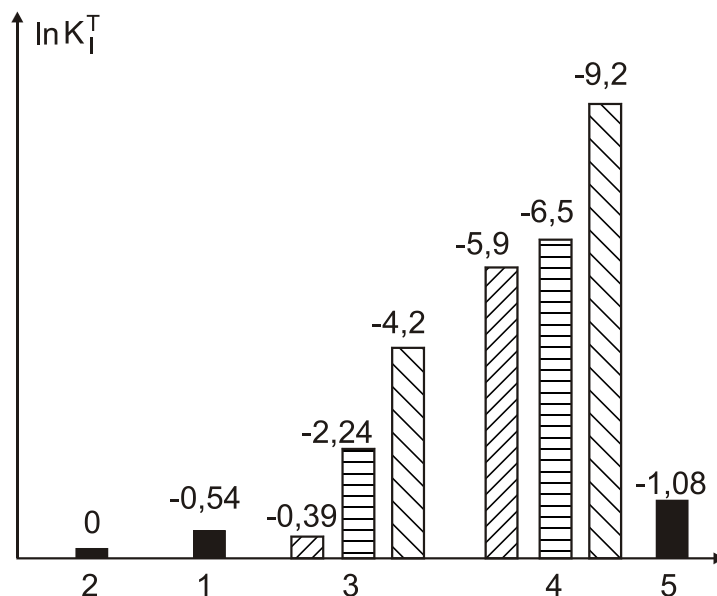


Рис. 6 Діаграма відносних часткових значень показника якості властивостей «трудомісткість процесу»:

▨ – Al-сплави; ▤ – нержавіючі сталі; ▩ – Ti-сплави; чорний – середні значення; по горизонтальній осі показані номери процесів

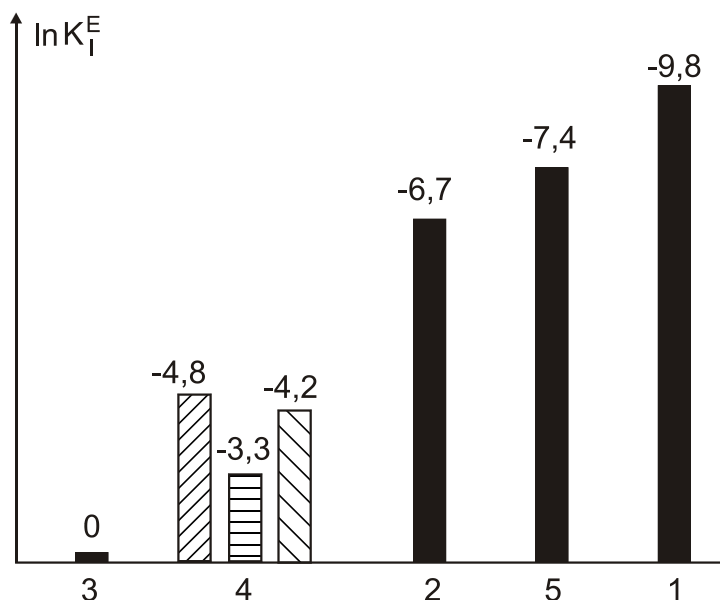


Рис. 7 Діаграма відносних часткових значень показника якості властивостей «енерговитрати процесу»:

▨ – Al-сплави; ▤ – нержавіючі сталі; ▩ – Ti-сплави; чорний – середні значення; по горизонтальній осі показані номери процесів

Комплексний (інтегральний) показник властивостей процесів для різних матеріалів закінцівки розраховується наступним чином:

$$K_i = \frac{1}{2} \cdot (g_i^T \cdot K_i^T + g_i^e \cdot K_i^e).$$

Можливість керування оптимальною якістю процесу формування трансверсальних кріпильних зв'язків у з'єднаннях "метал + композит" у залежності від декларованих цілей виробництва реалізується шляхом зміни значень коефіцієнтів вагомості. Це продемонстровано у табл. 1.

Таблиця 1

Інтегральні показники властивостей процесів

№ з/п	Показники	Варіанти процесів: №№ стовпців				
		1	2	3	4	5
1	K^Σ при $g^T=0,9, g^e=0,1$	0,70	0,34	$\frac{0.18}{1.0}$ 2.0	$\frac{-}{6.15}$ 4.3...4.4	0,85
2	K^Σ при $g^T=0,5, g^e=0,5$	2,58	1,70	$\frac{0.10}{0.56}$ 1.10	$\frac{-}{2.80}$ 3.1...3.8	1,80
3	K^Σ при $g^T=0,1, g^e=0,9$	4,38	3,00	$\frac{0.02}{0.11}$ 0.22	$\frac{-}{2.0}$ 1.95...2.17	1,70

Примітки:

1. Для процесів 1, 2, 5 записано середні значення для усіх матеріалів.

2. Для процесів 3, 4 значення записані у вигляді дробу $\frac{\text{Al-сплави}}{\text{Fe-Cr-V}}$
Ті-сплави

У таблиці приведено значення комплексного показника властивостей розглянутих процесів при суттєво різних значеннях коефіцієнтів вагомості відповідних показників.

Слід взяти до уваги, що значення показників приведено за логарифмічною шкалою, і збільшення значення показника свідчить про його далекість від відповідного показника базового варіанта, тобто більші значення показника свідчать про збільшення трудомісткості процесу й енерговитрат.

У випадку 1 (табл. 1) для алюмінієвих сплавів при значеннях $g^T=0,9, g^e=0,1$ пріоритети процесів мають наступну послідовність: 3, 2, 1, 5. Для Ті-сплавів: 2, 1, 5, 3, 4.

При значеннях $g^T=0,1, g^e=0,9$ пріоритети наступні:

– для Al-сплавів 3, 5, 2, 1;

– для Ті-сплавів 3, 5, 4, 2, 1.

Отримані послідовності процесів для реалізації пріоритетного значення

комплексного показника властивості цілком може бути пояснений з механічної та технологічної точки зору.

Обговорення отриманих результатів

Значення показників властивості, розраховані у запропонованій послідовності, мають точність, що сумірна з показниками трудомісткості та витрат енергії при виготовленні технологічного оснащення. Тому у розрахунках відсутні дані вартості по цим показникам. Ті розрізнені дані, що існують у окремих статтях, не дозволяють скласти цілісну картину.

Тим не менш, не достатньо повне врахування всіх показників властивостей техпроцесів дозволило синтезувати кваліметричну модель оптимізації технологічної підготовки складання з'єднань "метал + композит".

Іншим недоліком запропонованого рішення можна вважати досить слабо обґрунтоване положення щодо оброблюваності різанням різних сплавів. Насправді не усі алюмінієві сплави добре обробляються різанням та не усі титанові – погано. Врахування цих особливостей суттєво може розширити обсяг статті. Теж саме стосується довідкових даних щодо вибору режимів обробки.

Висновки

Синтезована кваліметрична модель технологічної підготовки складання з'єднання "метал + композит". У цій моделі чітко визначені вхідні параметри – варіанти КТР з трансверсальними зв'язками, керовані параметри у вигляді показників (коефіцієнтів) вагомості властивостей та вихідний параметр – комплексний показник властивостей варіантів процесів.

Показані послідовності пріоритетів вибору раціональних рішень технологічної підготовки складання з'єднань в залежності від конкретного виробництва.

Запропоновано методики вибору оптимальних техпроцесів, що супроводжують основний технологічний процес.

Список літератури

1. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор) [Текст] : монография / А. В. Криворучко, В. А. Залого, В. А. Колесник и др.; под. общ. ред. проф. В. А. Залого. – Сумы : «Университетская книга», 2013. – 272 с. ISBN 978-680-694-2.
2. B. Schornstein, R. Staschko, N. Fuchs, N. Glück. Manufacturing Principles for Z-Pin Reinforced FRP Composite Laminates in the Case of Bolted Joints / Lightweight Design worldwide, Published: June 2017. – Issue 10(3), pp. 28 – 33. DOI:10.1007/s41777-017-0025-1.
3. Воробей В.В, Сироткин О.С. Соединения конструкций из композиционных материалов. - Л.: Машиностроение, 1985. – 168 с.
4. Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учеб. для вузов, М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с., ISBN 5-7038-1319-0.
5. 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.
6. 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>.

7. 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>.

8. Lang, A., Husemann, L., Herrmann, A.S. Influence of textile process parameter on joint strength for integral CFRP-aluminum transition structures. *Procedia Mater. Sci.* 2013, 2, 212–219, <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2013.02.026>.

9. M. Azizur Rahman, M. Rahman, A. Senthil Kumar, H.S. Lim, A.B.M.A. Asad. Development of micropin fabrication process using tool-based micromachining / *Int J Adv Manuf Technol*, 2006. – Vol. 27. – pp. 939 – 944. DOI 10.1007/s00170-004-2270-9.

10. Job S.; Worrall C.; Kellar E.; Vacogne C. Joining of Fibre-Reinforced Polymer Composites: A Good Practice Guide; Grazebrook Innovation: Oxford, UK, 2020.

11. Dawei, Z.; Qi, Z.; Xiaoguang, F.; Shengdun, Z. Review on joining process of carbon fiber-reinforced polymer and metal: Methods and joining process. *Rare Metal Mater. Eng.* 2018, 47, 3686–3696, [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(19\)30018-9](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(19)30018-9).

12. Pramanik, A.; Basak, A.K.; Dong, Y.; Sarker, P.K.; Uddin, M.S.; Littlefair, G.; Dixit, S.; Chattopadhyaya, S. Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys—A review. *Compos. Part. A Appl. Sci. Manuf.* 2017, 101, 1–29, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.007>.

13. Dawei, Z.; Qi, Z.; Xiaoguang, F.; Shengdun, Z. Review on joining process of carbon fiber-reinforced polymer and metal: Applications and outlook. *Rare Metal Mater. Eng.* 2019, 48, 44–54.

14. Gude, M.; Hufenbach, W.; Kupfer, R.; Freund, A.; Vogel, C. Development of novel form-locked joints for textile reinforced thermoplastics and metallic components. *J. Mater. Process. Technol.* 2015, 216, 140–145, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.007>.

15. Altmeyer, J.; Suhuddin, U.F.H.; dos Santos, J.F.; Amancio-Filho, S.T. Microstructure and mechanical performance of metal-composite hybrid joints produced by Fric Riveting. *Compos. Part. B Eng.* 2015, 81, 130–140, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.015>.

16. Matsuzaki, R.; Kanatani, T.; Todoroki, A. Multi-material additive manufacturing of polymers and metals using fused filament fabrication and electroforming. *Addit. Manuf.* 2019, 29, 100812, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100812>.

17. Manufacturing Principles for Z-Pin Reinforced FRP Composite Laminates in the Case of Bolted Joints Authors: M. Sc Benjamin Schornstein, M.Sc. Robert Staschko, Dr.-Ing. Normen Fuchs, Dipl.-Ing. (EAE) Nikolai Glück Published in: *Lightweight Design worldwide* | Issue 3/2017.

18. New Manufacturing Method of Z-Pinned Composite Laminates, April 2010, Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 10, DOI: 10.2514/6.2010-3133.

19. Коцюба, А. А. Новые конструктивно-технологические решения соединений композитных изделий в практике ГП «Антонов» [Текст] /

А. А. Коцюба, А. З. Двейрин, Я. О. Головченко. – К. : «Технологические системы», № 1, 2016. – С. 19-27, ISSN 2074-0603.

20. Тараненко, И.М. Сравнительный анализ конструктивно-технологических решений соединений металл-композит. – Авиационно-космическая техника и технология. – Научно-технический журнал. Вып. 4(139). – Х.: ХАИ, 2017, с. 40-49, ISSN 1727-7337.

21. Lee, C.-J.; Kim, B.-M.; Kang, B.-S.; Song, W.-J.; Ko, D.-C. Improvement of joinability in a hole clinching process with aluminium alloy and carbon fiber reinforced plastic using a spring die. *Compos. Struct.* 2017, 173, 58–69, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.010>.

22. Lambiase, F.; Ko, D.-C. Feasibility of mechanical clinching for joining aluminium AA6082-T6 and carbon fiber reinforced polymer sheets. *Mater. Des.* 2016, 107, 341–352, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.061>.

23. Lee, S.-H.; Lee, C.-J.; Lee, K.-H.; Lee, J.-M.; Kim, B.-M.; Ko, D.-C. Influence of tool shape on hole clinching for carbon fiber-reinforced plastic and SPRC440. *Adv. Mech. Eng.* 2014, 2014, 1–12, <https://doi.org/10.1155/2014/810864>.

24. Lambiase, F.; Durante, M.; di Ilio, A. Fast joining of aluminium sheets with glass fiber reinforced polymer (GFRP) by mechanical clinching. *J. Mater. Process. Technol.* 2016, 236, 241–251, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.04.030>.

25. Abibe, A.B.; Amancio-Filho, S.T.; dos Santos, J.F.; Hage, E. Development and analysis of a new joining method for polymer-metal hybrid structures. *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 2011, 24, 233–249, <https://doi.org/10.1177/0892705710381469>.

26. Buffa, G.; Bffari, 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>.

27. Tomaszewicz, J.; Czarnocki, P. Wing-to-fuselage attachment fitting for composite airframes – Experimental and finite element analysis. *Compos. Theory Pract.* 2016, 16, 61–66.

28. Graham, D.P.; Rezai, A.; Baker, D.; Smith, P.A.; Watts, J.F. A hybrid joining scheme for high strength multi-material joints. In *Proceedings of the 18th International Conference on Composite Materials, Jeju Island, South Korea, 21–26 August 2011*.

29. D.F. Heaney, ed., *Handbook of Metal Injection Molding*, Woodhead Publishing, Elsevier, Cambridge, UK; Philadelphia, PA, 2012.

30. David A. Stephenson, John S. Agapiou. *Metals cutting. Theory and practice*. Second edition. Taylor & Francis, 2006, 864 p., ISBN-10 0-8247-5888-9.

31. Bruce J. Black. *Workshop Processes, Practices and Materials*, 5th Edition, Routledge, New York, 2015, 328 p., ISBN 978-1-138-78472-7.

32. Paul K. Wright, E M Trent. *Metal Cutting*, 4th Edition, Butterworth-Heinemann, 2000, 464, ISBN 9780750670692.

33. *Материаловедение и технология материалов. В 2 ч. Часть 2 : учебник для среднего профессионального образования / Г. П. Фетисов [и др.] ; под редакцией Г. П. Фетисова. – 8-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2022. – 386 с. ISBN 978-5-534-09896-9.*

34. Тараненко, М. Е. *Квалиметрия в листовой штамповке [Текст] : учебник / М. Е. Тараненко. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2015. – 133 с.*

35. Тараненко М. Е. Квалиметрия в листовой штамповке крупногабаритных деталей / М. Е. Тараненко, И.М. Тараненко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*, сб. №4 (295), 2015, с. 60-68, ISSN 0543-5749.

36. 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.

37. Квалиметрия в машиностроении [Текст] : учеб. пособие / Р. М. Хвастунов, А. Н. Феофанов, В. М. Корнеева, Е. Г. Нахапетян. – М. : Экзамен, 2009. – 285 с.

38. Буланов, И. М. Квалиметрия транспортных средств. Методика оценки эффективности использования [Текст] / И. М. Буланов, В. В. Воробей. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 166 с.

References

1. Mekhanicheskaya obrabotka kompozicionnyh materialov pri sborke letatel'nyh apparatav (analiticheskij obzor) [Tekst] : monografiya / A. V. Krivoruchko, V. A. Zaloga, V. A. Kolesnik i dr.; pod. obshch. red. prof. V. A. Zalogi. – Sumy : «Universitetskaya kniga», 2013. – 272 p. ISBN 978-680-694-2.

2. B. Schornstein, R. Staschko, N. Fuchs, N. Glück. Manufacturing Principles for Z-Pin Reinforced FRP Composite Laminates in the Case of Bolted Joints / *Lightweight Design worldwide*, Published: June 2017. – Issue 10(3), pp. 28 – 33. DOI:10.1007/s41777-017-0025-1.

3. Vorobej V.V, Sirotkin O.S. Soedineniya konstrukcij iz kompozicionnyh materi-alov. - L.: Mashinostroenie, 1985. – 168 p.

4. Bulanov, I.M. Tekhnologiya raketnyh i aerokosmicheskikh konstrukcij iz kompozici-onnyh materialov: ucheb. dlya vuzov, M.: MGTU im. N.E. Baumana, 1998. 516 p., ISBN 5-7038-1319-0.

5. Karpov, Ya. S. Soedineniya detalej i agregatov iz kompozicionnyh materialov [Tekst] / Ya. S. Karpov / – Har'kov: Nac. aerokosm. un-t im. N. E. ZHukovskogo «NAI», 2006. – 359 с. ISBN 966-662-133-9.

6. 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>.

7. 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>.

8. Lang, A., Husemann, L., Herrmann, A.S. Influence of textile process parameter on joint strength for integral CFRP-aluminum transition structures. *Procedia Mater. Sci.* 2013, 2, 212–219, <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2013.02.026>.

9. M. Azizur Rahman, M. Rahman, A. Senthil Kumar, H.S. Lim, A.B.M.A. Asad. Development of micropin fabrication process using tool-based micromachining / *Int J Adv Manuf Technol*, 2006. – Vol. 27. – pp. 939 – 944. DOI 10.1007/s00170-004-2270-9.

10. Job, S.; Worrall, C.; Kellar, E.; Vacogne, C. Joining of Fibre-Reinforced Polymer Composites: A Good Practice Guide; Grazebrook Innovation: Oxford, UK,

2020.

11. Dawei, Z.; Qi, Z.; Xiaoguang, F.; Shengdun, Z. Review on joining process of carbon fiber-reinforced polymer and metal: Methods and joining process. *Rare Metal Mater. Eng.* 2018, 47, 3686–3696, [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(19\)30018-9](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(19)30018-9).

12. Pramanik, A.; Basak, A.K.; Dong, Y.; Sarker, P.K.; Uddin, M.S.; Littlefair, G.; Dixit, S.; Chattopadhyaya, S. Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys—A review. *Compos. Part. A Appl. Sci. Manuf.* 2017, 101, 1–29, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.007>.

13. Dawei, Z.; Qi, Z.; Xiaoguang, F.; Shengdun, Z. Review on joining process of carbon fiber-reinforced polymer and metal: Applications and outlook. *Rare Metal Mater. Eng.* 2019, 48, 44–54.

14. Gude, M.; Hufenbach, W.; Kupfer, R.; Freund, A.; Vogel, C. Development of novel form-locked joints for textile reinforced thermoplastics and metallic components. *J. Mater. Process. Technol.* 2015, 216, 140–145, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.007>.

15. Altmeyer, J.; Suhuddin, U.F.H.; dos Santos, J.F.; Amancio-Filho, S.T. Microstructure and mechanical performance of metal-composite hybrid joints produced by Friction Riveting. *Compos. Part. B Eng.* 2015, 81, 130–140, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.015>.

16. Matsuzaki, R.; Kanatani, T.; Todoroki, A. Multi-material additive manufacturing of polymers and metals using fused filament fabrication and electroforming. *Addit. Manuf.* 2019, 29, 100812, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100812>.

17. Manufacturing Principles for Z-Pin Reinforced FRP Composite Laminates in the Case of Bolted Joints Authors: M.Sc Benjamin Schornstein, M.Sc. Robert Staschko, Dr.-Ing. Normen Fuchs, Dipl.-Ing. (EAE) Nikolai Glück Published in: *Lightweight Design worldwide | Issue 3/2017*.

18. New Manufacturing Method of Z-Pinned Composite Laminates, April 2010, Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 10, DOI: 10.2514/6.2010-3133.

19. Kocyuba, A. A. Novye konstruktivno-tekhnologicheskie resheniya soedinenij kompo-zitnyh izdelij v praktike GP «Antonov» [Tekst] / A. A. Kocyuba, A. Z. Dvejrin, YA. O. Golovchenko. – K. : «Tekhnologicheskie sistemy», № 1, 2016. – pp. 19-27, ISSN 2074-0603.

20. Taranenko, I.M. Sravnitel'nyj analiz konstruktivno-tekhnologicheskikh reshenij soedinenij metall-kompozit. – *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. – Nauchno-tekhnicheskij zhurnal. Vyp. 4(139). – H.: HAI, 2017, pp. 40-49, ISSN 1727-7337.

21. Lee, C.-J.; Kim, B.-M.; Kang, B.-S.; Song, W.-J.; Ko, D.-C. Improvement of joinability in a hole clinching process with aluminium alloy and carbon fiber reinforced plastic using a spring die. *Compos. Struct.* 2017, 173, 58–69, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.010>.

22. Lambiase, F.; Ko, D.-C. Feasibility of mechanical clinching for joining aluminium AA6082-T6 and carbon fiber reinforced polymer sheets. *Mater. Des.* 2016, 107, 341–352, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.061>.

23. Lee, S.-H.; Lee, C.-J.; Lee, K.-H.; Lee, J.-M.; Kim, B.-M.; Ko, D.-C. Influence of tool shape on hole clinching for carbon fiber-reinforced plastic and

- SPRC440. Adv. Mech. Eng. 2014, 2014, 1–12, <https://doi.org/10.1155/2014/810864>.
24. Lambiase, F.; Durante, M.; di Ilio, A. Fast joining of aluminium sheets with glass fiber reinforced polymer (GFRP) by mechanical clinching. J. Mater. Process. Technol. 2016, 236, 241–251, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.04.030>.
25. Abibe, A.B.; Amancio-Filho, S.T.; dos Santos, J.F.; Hage, E. Development and analysis of a new joining method for polymer-metal hybrid structures. J. Thermoplast. Compos. Mater. 2011, 24, 233–249, <https://doi.org/10.1177/0892705710381469>.
26. Buffa, G.; Bffari, 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>.
27. Tomaszewicz, J.; Czarnocki, P. Wing-to-fuselage attachment fitting for composite airframes – Experimental and finite element analysis. Compos. Theory Pract. 2016, 16, 61–66.
28. Graham, D.P.; Rezai, A.; Baker, D.; Smith, P.A.; Watts, J.F. A hybrid joining scheme for high strength multi-material joints. In Proceedings of the 18th International Conference on Composite Materials, Jeju Island, South Korea, 21–26 August 2011.
29. D.F. Heaney, ed., Handbook of Metal Injection Molding, Woodhead Publishing, Elsevier, Cambridge, UK; Philadelphia, PA, 2012.
30. David A. Stephenson, John S. Agapiou. Metals cutting. Theory and practice. Second edition. Taylor & Francis, 2006, 864 p., ISBN-10 0-8247-5888-9.
31. Bruce J. Black. Workshop Processes, Practices and Materials, 5th Edition, Routledge, New York, 2015, 328 p., ISBN 978-1-138-78472-7.
32. Paul K. Wright, E M Trent. Metal Cutting, 4th Edition, Butterworth-Heinemann, 2000, 464, ISBN 9780750670692.
33. Materialovedenie i tekhnologiya materialov. V 2 ch. CHast' 2 : uchebnik dlya srednego professional'nogo obrazovaniya / G. P. Fetisov [i dr.] ; pod redakciej G. P. Fetisova. – 8-e izd., pererab. i dop. – Moskva : Izdatel'stvo Yurajt, 2022. – 386 p. ISBN 978-5-534-09896-9.
34. Taranenko, M. E. Kvalimetriya v listovoj shtampovke [Tekst] : uchebnik / M. E. Taranenko. – Har'kov : Nac. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «Har'k. aviac. in-t », 2015. – 133 p.
35. Taranenko M.E. Kvalimetriya v listovoj shtampovke krupnogabaritnyh detalej / M. E. Taranenko, I. M. Taranenko // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost', sb. №4 (295), 2015, pp. 60-68, ISSN 0543-5749.
36. 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.
37. Kvalimetriya v mashinostroenii [Tekst] : ucheb. posobie / R. M. Hvastunov, A. N. Feofanov, V. M. Korneeva, E. G. Nahapetyan. – M. : Ekzamen, 2009. – 285 p.
38. Bulanov, I. M. Kvalimetriya transportnyh sredstv. Metodika ocenki effektivnosti ispol'zovaniya [Tekst] / I. M. Bulanov, V. V. Vorobej. – M. : Izd-vo standartov, 1990. – 166 p.

Надійшла в редакцію 13.12.2022, розглянута на редколегії 13.12.2022

Расчетно-аналитическое сравнение показателей свойств вариантов КТР трансверсальных соединений “металл + композит”

В статье актуализируются вопросы выбора вариантов для целевой оптимизации технологической подготовки производства для разных КТР реализации составления металло-композитных деталей и узлов с трансверсальными связями. Рассмотрено несколько вариантов конструктивно-технологических решений (КТР) соединений. Для исследования выбрано три типа выполнения крепежных связей – с монолитными пирамидальными, цилиндрическими и листовыми микроэлементами (МЕ).

Определены актуальные для целей выбора свойства технологических процессов формообразования крепежных элементов. К ним отнесена продолжительность изготовления связей и необходимые для этого энергозатраты.

Синтезирована квалиметрическая модель выбора технологических процессов с их оптимизацией в соответствии целевым функциям. Определены и обоснованы входные, управляемые и выходные параметры модели. Сделаны обобщенные выводы.

Ключевые слова: соединение "металл + композит", трансверсальные крепежные связи, свойства техпроцессов, квалиметрический анализ.

Analytical-computational comparison of properties indexes for variants of structural-manufacturing solutions of “metal + composite” joints

The question of selection of variants for objective optimization of manufacturing preparation of production of different structural-manufacturing solutions of metal-composite articles and units with transversal connections are actualized. Several variants of structural-manufacturing solutions (SMS) of joints are considered. Three types of fastening connections are selected for analysis, i.e. with pyramidal, cylindrical and sheet-formed micro-fasteners (MF).

Structural schemes of possible manufacturing processes of creation fastening micro-elements with different shapes are suggested. These schemes take into consideration influence of both main and auxiliary operations, which have to be taking into account at estimation of manufacturing process duration and energy consumption.

Possibility of micro-fasteners manufacturing of aluminum, titanium alloy and stainless steels is considered at comparison of numerical parameters of manufacturing processes.

Producing of micro-fasteners by means of milling with both disc and cylindrical mills, and up-to-date methods of electro-erosion treatment of materials with electrode-tool or with moving wire is analyzed as comparing parameters of different manufacturing processes.

Properties of manufacturing processes of fastening elements forming are determined as actual ones. Duration of connecting elements manufacturing and required energy resources consumption are selected as exact actual parameters,

Qualimetric model of manufacturing processes selection with consequent their optimization in accordance with goal functions is synthesized. Incoming, controllable

and outcoming parameters of the model are determined. Approach to calculation of complex quality index of micro-fasteners manufacturing is suggested. This approach is used for calculation numerical quality indexes of different manufacturing processes. General conclusions are done.

Key words: “metal + composite” joint, transversal fastening elements, properties of manufacturing processes, qualimetric analysis.

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

Taranenko Igor – Ph.D., Associate professor of department of Composite Structures and Aviation Materials, National Aerospace University “KhAI”, Ukraine, e-mail: igor.taranenko@khai.edu