

Використання методів ерозійної розмірної обробки для формоутворення трансверсальних кріпильних елементів з'єднаннях “метал-композит”

I.M. Тараненко¹

Received: 8 October 2022 / Accepted: 14 November 2022

Анотація. При проектуванні високонавантажених агрегатів інженерних об'єктів, особливо таких як виробни аерокосмічної техніки, постає проблема створення надійних з'єднань між металевими та композитними деталями, що мають наперед задану міцність та здатність виконувати покладені на них функції.

У якості мети дослідження обрано розробку та обґрунтування вибору конструктивно-технологічних рішень з'єднань “метал-композит” за допомогою трансверсальних кріпильних елементів.

У якості об'єкта дослідження розглядаються можливі конструктивно-технологічні рішення з'єднань “метал-композит”, що використовують трансверсальні кріпильні елементи, які впроваджуються у композит та закріплюються або виготовляються на поверхні металевої деталі. Розглянуто три типи кріпильних мікроелементів – пірамідальні монолітні, циліндричні та листові, а також різні технології їх формоутворення.

Для цих трьох типів мікроштифтів було оцінено масу типової пласкої деталі з мікроштифтами при зафіксованій несучій здатності метало-композитного з'єднання.

У якості результатів дослідження отримано такі кількісні показники технологічності як трудомісткість виготовлення кріпильних елементів та витрати енергії при їх формоутворенні.

Запропоновано підхід щодо порівняння методів формоутворення кріпильних мікроелементів на основі аналізу відповідних кількісних питомих показників трудомісткості їх виготовлення та енерговитрат. Порівняно кількісні показники процесів виготовлення мікроштифтів з алюмінієвих, титанових сплавів та нержавіючої сталі.

Відмінною рисою запропонованої моделі аналізу є врахування як основних та допоміжних операцій, що впливають на трудомісткість та тривалість процесу виготовлення. Процес класичного фрезерування за допомогою циліндричних та дискових фрез порівняно з досить продуктивними сучасними методами електроерозійного різання дротом.

У якості висновків сформульовано рекомендації щодо використання форми, типу та схеми розташування мікроштифтів та конкретного техпроцесу їх виготовлення при обраному матеріалі.

Ключові слова: трансверсальні кріпильні елементи, з'єднання “метал-композит”, мікроштифти, електроерозійна розмірна обробка, трудомісткість, енерговитрати.

Вступ

З'єднання металевої частини деталі (вузла) з її продовженням з композитного матеріалу (КМ) є складною задачею через відмінність властивостей з'єднувальних частин. Відомо велике різноманіття типів з'єднань “метал-композит”, що забезпечують високий рівень несучої здатності, надійності та пристосованості до різних методів виготовлення композитних деталей при мінімальній масі з'єднання [1–5]. За схемою передачі навантаження через з'єднання розподіляють схеми з поздовжніми та трансверсальними зв'язками. В даній роботі розглядаються з'єднання з трансверсальними зв'язками, що реалізуються за рахунок трансверсальними елементів для з'єднання пласких або слабо вигнутих деталей з волокнистих КМ або точкових з'єднань метал + композит.

Традиційні механічні з'єднання (болтові, заклепові) або клейові не в повній мірі відповідають техніч-

✉ I. M. Тараненко
igor.taranenko@khai.edu

¹ Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського “ХАІ”, Харків, Україна

ним вимогам за надійністю, масовим показником, технологічністю та інших.

В цих рішеннях запропоновано виконувати трансверсальні кріпильні зв'язки монолітними (що виготовлені з тіла металевої закінцівки) або у вигляді проміжних елементів, як скріплюються з металевими або композитними частинами деталі [1–10] (рис. 1).

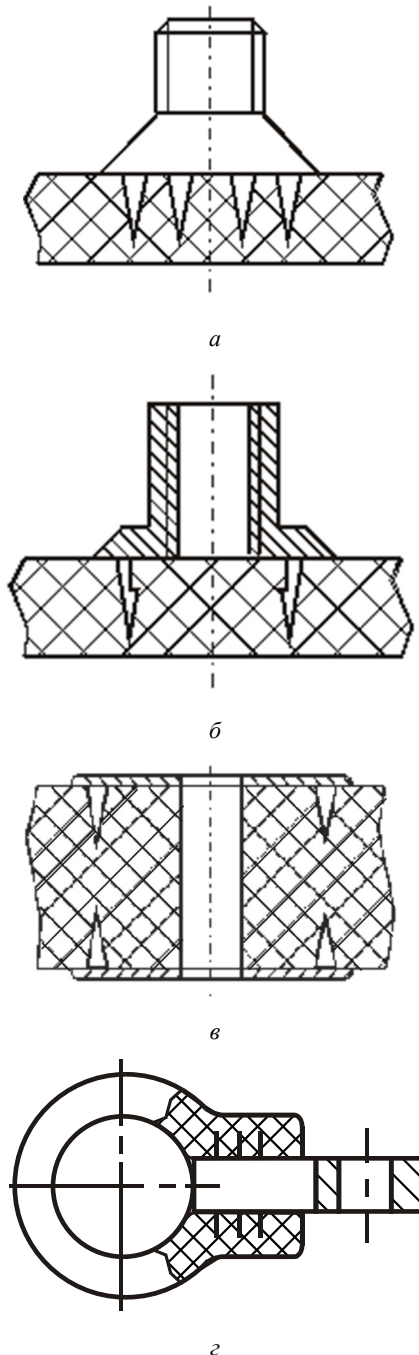


Рис. 1. Варіанти точкових з'єднань елементів: *a* – анкерний болт; *b* – анкерна гайка; *в* – підсилена шайба; *г* – вузол рухомого з'єднання

Конструктивно-технологічні рішення (КТР) таких з'єднань відрізняються своїми властивостями. До

їх числа можна віднести несучу здатність, надійність, технологічність конструкції, у тому числі можливість складання-розбирання з'єднання, та низка інших властивостей. Більшість цих властивостей є комплексними, тобто такими, що визначаються декількома властивостями більш низького рівня.

Обґрунтовано обирати при проектуванні тип з'єднання, що відповідає технічним вимогам (ТВ) до всієї конструкції виробу, слід з використанням методів кваліметрії, тобто кількісної оцінки рівня тих чи інших властивостей.

В даній роботі наведено ряд прикладів кваліметричного оцінювання властивостей деяких КТР на основі мікроштифтів. Метою даної роботи є оцінка можливості та інформативної ємності результатів комплексного кваліметричного аналізу КТР мікроштифтових з'єднань “метал-композит”.

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

У світовій літературі наведено велике різноманіття КТР з'єднань волокнистих КМ між собою та з металевими закінцівками та [1–10]. Їх різноманіття можна звести до декількох типів (рис. 2):

- трансверсальні зв'язки створено конструктивно з матеріалу закінцівки (монолітний зв'язок) (рис. 2, *a*);
- зв'язок, що створено за рахунок проміжних елементів (штифтів), які закріплено на металевій закінцівці (рис. 2, *b*);
- зв'язки, що створено з листових елементів, що утримують несучі листові штифти (язички), які закріплено на металевій закінцівці (рис. 2, *в*).

Ці схеми, у першу чергу, відрізняються методами їх утворення та несучою здатністю на зріз та зминання. Формоутворення монолітних елементів можливо декількома способами – фрезеруванням [1, 2, 3, 5, 6, 7, 10], точінням [1, 2, 3, 7], струганням [1–3, 7] або методами електро-ерозійної розмірної обробки (ЕРО) [1–3]. Також обговорюється можливість використання 3D-технологій. Встановлення та закріплення окремих штифтів можливо за допомогою зварювання, запресуванням до попередньо виконаних отворів у металевій закінцівці або утворення штифтів за допомогою 3D адитивних технологій. Створення трансверсальних зв'язків за допомогою листових проміжних елементів здійснюється попереднім штампуванням зубців на листових пластинах чи стрічках відповідних розмірів. Наступний етап – це закріплення цих проміжних елементів з зубцями на металевій закінцівці за допомогою зварювання або механічного з'єднання.

Вибір цих варіантів у багатьох випадках визначається матеріалом металевої закінцівки. Тверді, в'язкі або ті, що мають малу міцність метали складно обробляються різанням.

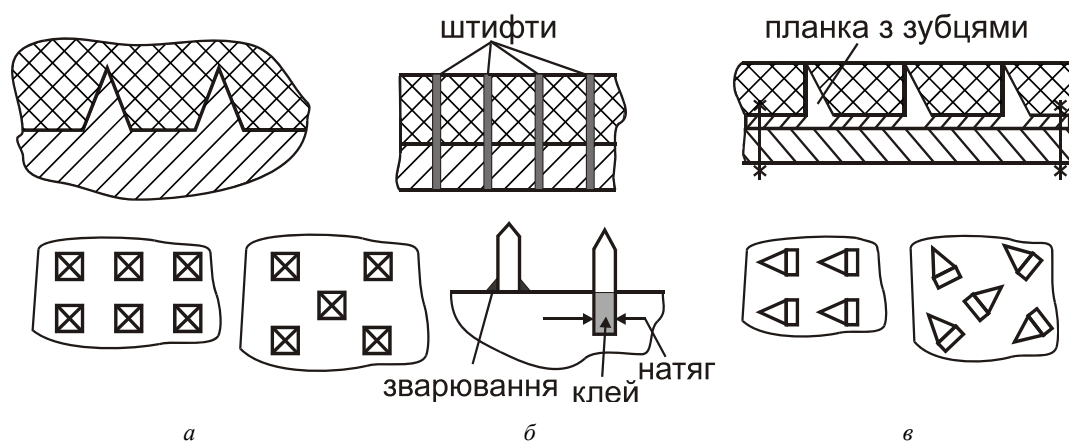


Рис. 2. Принципова схема утворення трансверсальних зв'язків та варіанти їх розташування: а – монолітні; б – штифтові; в – листові

Але з іншого боку, монолітні штифти мають більшу несучу спроможність та відрізняються більшою складністю заглиблення до тканих волокнистих матеріалів.

Вибір відомих варіантів КТР для аналізу їх властивостей та оптимізації можливо попередньо обмежити загальними висновками.

Вибір варіантів КТР та їх загальне порівняння

В основі вибору знаходиться загальне призначення з'єднання, схема та величина зусиль, що діють на з'єднання. Розглядаючи точкові з'єднання “метал + композит” можна припускати, що на кріпильні зв'язки та оточуючий їх композит діють сили, які зрізають МЕ, композит зминається твердим МЕ та розшаровується під дією відриваючих зусиль. Рівень відриваючих зусиль може бути досить великим (~ 1...3 кН/мм). Це передбачає використання монолітних МЕ, що виконані з високоміцних матеріалів. Варіанти використання циліндричних та листових МЕ не є бажаними.

Але високоміцні матеріали важко піддаються механічній обробці різанням та, тим більш, в ажурних конструкціях. Під час механічної обробки різанням до різального інструменту прикладені великі сили різання. При формоутворенні гострих вершин МЕ вони призводять до згинання вершин (незворотної пластичної деформації) та інтенсивного нагрівання матеріалу. Тому при такій обробці необхідно встановлювати щадні режими різання (глибину різання та подачу), які різко підвищують тривалість виготовлення.

Масові характеристики варіантів мікроштифтів

Для порівняння масових характеристик обирається стандартна площадка металеві закінцівки розміром 100 × 50 мм, яка оштифтована у відповідності до

трьох вищеназваних варіантів. На площадці сформовано монолітні пірамідальні штифти з перерізом основи 2 × 2 мм та висотою ~5,8 мм. При цьому кут загострення вершини 20...30°. Кількість штифтів на площадці ~ 72 штуки.

При тій самій же несучій здатності на “зріз” кількість циліндричних штифтів діаметром 1,0 мм дорівнює 86 штук, а листових зубців 80 штук.

Порівняння мас мікроштифтів показує, що при масі варіанту з монолітними штифтами, яку прийнято за 100 %, маса циліндричних штифтів складає 84 %, а листових – 92 %.

Таким чином, за масовими характеристиками пріоритетною є така послідовність: циліндричні, листові, монолітні мікроштифти. Особливо яскраво це виявляється при використанні проміжних елементів з титанових сплавів.

Порівняння несучої здатності варіантів мікроштифтів

Несуча здатність з'єднання є однією з функціональних властивостей. Порівняння різних КТР за цією властивістю (показником) виконано для однакових умов зрізання та зминання мікроштифтів. При цьому показником несучої здатності було обрано кількість мікроштифтів, що розташовані на поверхні обраного розміру.

За методикою, що викладена у роботі [1], визначено, що несуча здатність забезпечується 72 мікроштифтами пірамідальної форми з основою 2 × 2 мм, кутом при вершині 20° (висотою 5,8 мм), що розташовані з кроком 8 мм; 86 циліндричними штифтами діаметром 1,0 мм та 72...84 листовими штифтами (в залежності від орієнтації їх пласкої поверхні відносно напрямку навантаження та товщини проміжного елемента). Розташування мікроштифтів – прямокутне. Ці значення кількості мікроштифтів було використано у подальших розрахунках трудомісткості та енерговитрат.

Порівняння показників технологічності варіантів мікроштифтів

До складу комплексної властивості “технологічність КТР” було включено наступні складові:

- кількість технологічних операцій, що необхідні для утворення мікроштифтів на металевій закінцівці;
- час, необхідний для формування мікроштифтів на стандартній ділянці поверхні;
- енерговитрати, що необхідні для формування мікроштифтів;
- кількість універсального обладнання у відсотках, від усього обладнання, що використовується;
- заглиблення мікроштифтів до волокнистого армувального матеріалу, що вимірюється у одиницях сили, необхідної для повної укладки. Для варіантів намотки КМ тонкими нитками, джгутами та наплення неорієнтованого КМ показник дорівнює нулю.

Розглянемо склад основних технологічних операцій, необхідних для формування мікроштифтів різних варіантів.

Пірамідальні монолітні мікроштифти:

1. Попередня термообробка.
2. Формування мікроштифтів процесами різання (фрезерування, точіння та інші методи) з мінімальним силовим навантаженням на мікроштифти (багатопрхідна обробка за декількома напрямками).
3. Притуплення ребер.
4. Кінцева термообробка.

Циліндричні мікроштифти:

1. Виготовлення мікроштифтів.
2. Кріплення мікроштифтів до закінцівок.
3. Термообробка (за необхідності).

Листові мікроштифти:

1. Штампування стрічок, пластин з зубцями.
2. Зачищення задирок.
3. Кріплення ділянок стрічок (пластин) до закінцівок.

Операції забезпечення промислової чистоти однакові для всіх варіантів.

Аналіз складу основних операцій виготовлення мікроштифтів дозволяє зробити висновок, що технологічних операцій, необхідних для формування монолітних мікроштифтів більше, ніж для інших КТР оштрифтування поверхонь закінцівок. Тому пріоритетна послідовність властивості “кількість технологічних операцій” може бути записана таким чином: циліндричні, листові та потім монолітні мікроштифти.

Наступною властивістю, що може бути використана для порівняння, є час, необхідний для формування мікроштифтів на поверхні металевої закінцівки. Для нього далі прийнято позначення T – трудомісткість. Розрахунок значення цієї властивості було проведено за допомогою загально-технологічних довідників при наступних умовах:

- режими різання при фрезеруванні обиралися

м’якими для запобігання вигинання вершини пірамідальних мікроштифтів під дією сил різання, а також для зменшення розміру задирок на ребрах мікроштифтів;

- виконання профілю канавок між мікроштифтами здійснюється за декілька проходів.

Другим показником рівня технологічності обрано значення енерговитрат (E), необхідних для формування оштрифтованої поверхні закінцівки.

Шорсткість поверхні, що реалізується при виготовленні штифтів, для більшості методів є приблизно однаковою, за виключенням обробки різанням. Але ця властивість оцінюється у іншій групі властивостей.

Але формування монолітних штифтів можливо фрезеруванням канавок між штифтами дисковими та кінцевими фрезами, точінням за спіральною траєкторією з двома різними кутами нахилу спіралі, електроерозійною розмірною обробкою (ЕРО) та анодно-механічним різанням. Нарощування мікроштифтів на поверхні закінцівки різними методами через їх особливості у даній роботі не розглядалося.

У зв’язку з суттєвою залежністю показників властивостей техпроцесів від технологічних характеристик матеріалів, що обробляються, для порівняння обрано три групи матеріалів:

- алюмінієві сплави (позначення Al);
- нержавіючі сталі (позначення Fe-Cr-Ni);
- титанові сплави (позначення Ti).

Попередньо для порівняння розглянемо приклад формування мікроштифтів дисковими та кінцевими фрезами. Вони спрофільовані за формою канавки між мікроштифтами.

Результати розрахунку обраних показників T та E для типової ділянки оштрифтованої поверхні наведено у табл. 1.

Як можна бачити з наведених даних, енерговитрати при фрезеруванні торцевими фрезами вище ніж дисковими, але також вище і продуктивність.

Непривабливими характеристиками фрезерування є висока шорсткість обробленої поверхні, наявність задирок та підвищена маса заготовки, що необхідна для виходу фрези.

Для зниження вірогідності руйнування волокон армувального матеріалу від взаємодії з гострими вершинами або задирками, параметр шорсткості повинен бути на порядок менше діаметру волокон (0,1...0,3 мм). Цій вимозі відповідає процес ЕРО.

В даному випадку розглядаються: ЕРО суцільним профільованим інструментом, анодно-механічне різання непрофільованим електроінструментом та вирізання профілю канавки рухомим дротом на станках з координатним столом.

Об’єктивне порівняння показників трудомісткості T та E слід проводити для обробки різними методами оштрифтування поверхні обраних розмірів (100 × 50 мм). Результати такого порівняння показано на рис. 3 та табл. 1.

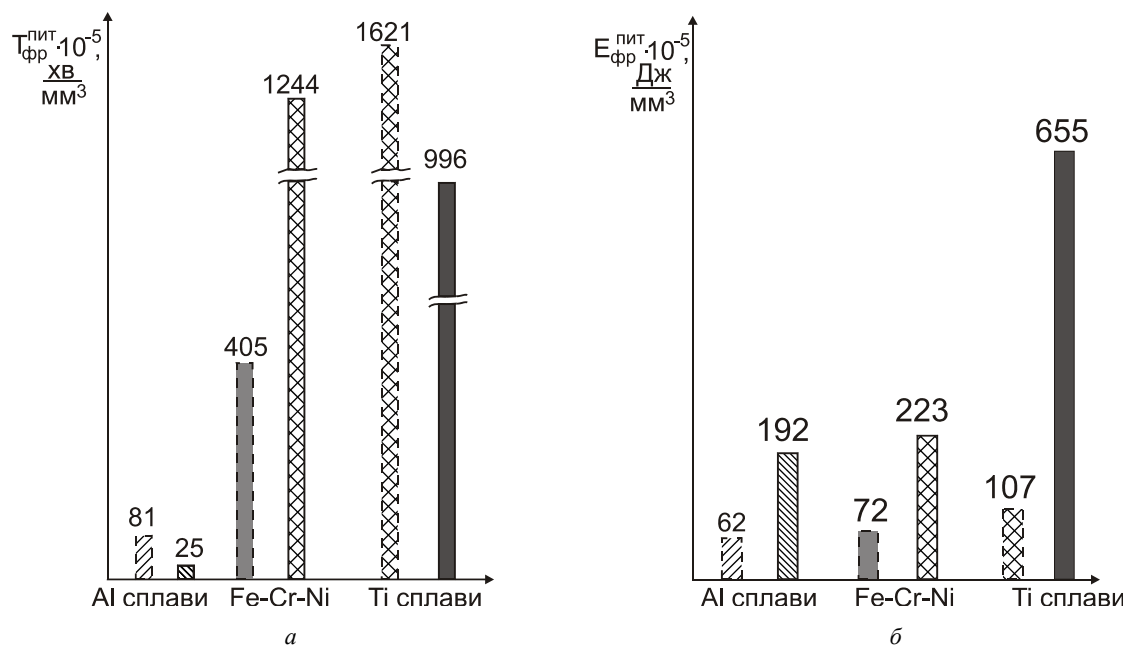


Рис. 3. Порівняння питомих показників трудомісткості фрезерування $T_{fr}^{пит}$ монолітних пірамідальних мікроштифтів з розмірами основи 2×2 мм та кутом при вершині 20° , що розташовані з шагом 8 мм на поверхні розмірами 100×50 мм та питомих енерговитрат $E_{fr}^{пит}$ для різних матеріалів. Суцільна лінія – для кінцевої фрези, пунктирна – для дискової фрези

Таблиця 1. Порівняння показників варіантів формоутворення монолітних мікроштифтів

Процеси, матеріали		Показники властивостей		
		$\Pi \cdot 10^3$, $мм^3/хв$	$E \cdot 10^5$, $Дж/мм^3$	R_z , $мм$
Фрезерування торцевою/дисковою фрезою	Al	4000/1230	192/2,0	6,3...15,0
	Fe, Cr, Ni	80/247	223/72,5	
	Ti	100/62	655/107	
ЕРО суцільним електродом інструментом	Al	20...200	–	0,32...2,5
	Fe, Cr, Ni	11...130	1620	
	Ti	8...90	315...940	
Анодно-механічне різання	Al	–	–	6,3...12,5
	Fe, Cr, Ni	2000...6000	1080...1620	
	Ti	100...2000	375...940	
ЕР різання рухомих дротом (різання за контуром) ¹		1250...3000 $мм^2/хв$,	1000...1200	0,32...2,5

Примітки:

1. $мм^2$ є площа різання; об'єм, що видаляється дорівнює $(1250...3000) \cdot d_{op}$, d_{op} – діаметр дроту.
2. Для зручності порівняння показників варіантів процесів у таблиці приведено значення продуктивності процесу Π , що дорівнює $\Pi=1/T$, T – трудомісткість процесу.

До додаткових характеристик порівнюваних процесів можна віднести:

– збільшення маси закінцівки, що обумовлена необхідністю врізання та перебігу інструменту. Такого збільшення маси немає при використанні ЕРО суцільним електродом;

– можливість отримання непласких граней на пірамідальних елементах;

– необхідність закруглення гострих ребр пірамідальних МЕ належить усім розглядаєним варіантам процесів;

– необхідність витрат на ремонт та відновлення

інструменту присутня у всіх варіантах техпроцесів, але у різному ступені;

– можливість використання уніфікованого інструменту проявляється тільки у варіанті формоутворення МЕ електроерозійним різанням рухомим дротом (див. далі).

Аналіз кількісних показників призводить до наступних висновків:

1. Продуктивність фрезерування МЕ з алюмінієвих сплавів значно більше ніж з інших сплавів. Витрати енергії при цьому невеликі, хоч і більше, ніж при фрезеруванні дисковими фрезами.

2. При фрезеруванні МЕ з важкооброблюваних різанням матеріалів (Ті-сплави, в'язкі нержавіючі сталі) переважна тільки ЕРО суцільним електродом або анодно-механічне різання. Значні витрати енергії у таких випадках пояснюються необхідністю руйнування усього об'єму металу. При невеликих висотах МЕ та малому кроку їх розташування такі втрати енергії є допустимими. Але при висоті МЕ більш 5...7 мм та кроку більш двох значень висоти - втрати енергії дуже відчутні. У цьому випадку бажано використання процесів ЕРО на не видалення усього простору між МЕ, а на вирізання необхідного об'єму.

3. Таким вимогам відповідають процеси електроерозійного різання рухомим дротом. До цього можна додати такі переваги процесу як універсальність інструменту та можливість отримання непласких граней пірамідальних МЕ.

Розглянемо можливості використання процесу різання рухомим дротом (рис. 4).

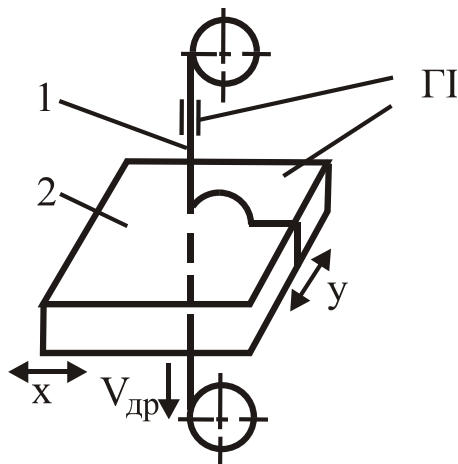


Рис. 4. Схема електроерозійного різання електродом-дротом: 1 – електрод-дріт; 2 – електрод-деталь; ГІ – генератор імпульсів

У цій схемі розрізання заготовка розміщується на координатному столі, що має можливість переміщуватися вздовж координат x та y . Електроінструментом (ЕІ) є дріт 1 (мідна або вольфрамова діаметром від 0,03 до 0,25 мм), який з визначеною швидкістю $V_{др}$ протягується відносно заготовки 2. Система приводу станка

забезпечує взаємне переміщення дрота та заготовки за визначеною траєкторією, яка задається керуючою програмою. Дріт та деталь з'єднані з генератором електричних імпульсів (ГІ). В зону взаємодії дрота та заготовки додається з визначеними витратами електроліт (вода або вуглеводні рідини). Електричні мікророзряди, що виникають між дротом та заготовкою, призводять до ерозійного руйнування заготовки. Продукти ерозії виносяться з робочої зони потоком електроліту, який стимулюється рухомим дротом.

Дротовирізні станки фірми Sodick Co. LTD (Японія) та Mitsubishi Electric Corporation (Японія) широко використовуються при виробництві годинників, різних приладів, штампів у багатьох країнах світу [15, 16].

Наявність сучасних дротовирізних електроерозійних верстатів дозволяє запропонувати наступну послідовність виготовлення анкерних болтів і гайок з трансверсальними елементами зв'язку М+КМ (рис. 5). Типова конструкція болта із трохи збільшеною в розмірах голівкою виготовляється традиційним методом обробки металів тиском. Потім, після нормалізувальної термообробки, у голівці болта розточується потрібний профіль внутрішній поверхні (рис. 5, а) він виділений жирною лінією). Після токарської обробки заготовка болта піддається зміцнювальній термообробці. Далі загартовані болти встановлюють на робочому столі верстата в бак і простір між зубцями вирізьблюється електродом-інструментом (ЕІ) за заданою траєкторією (рис. 5, б).

Після видалення вирізаного об'єму металу заготовки болтів обертають круг своєї осі на 120° та процес вирізання повторюється. Операція обертання болтів повторюється ще один раз. Після її закінчення на голівці болта залишаються 6 зубців заданої форми. Після цього голівка із зубцями піддається мінімальному зачищенню (за необхідністю) і наступній операції утворення покриття у відповідності до технічних умов.

Продуктивність видалення металу Π [$\text{мм}^3/\text{хв}$] з однієї голівки болта при виконанні одного наскрізного паза дорівнює:

$$\Pi = K d_{op} \bar{\Pi},$$

де d_{op} – діаметр дрота ЕІ, мм; $\bar{\Pi}$ – питома продуктивність верстата, обумовлена добутком середньої товщини зубця на довжину траєкторії руху ЕІ в одну хвилину, $\text{мм}^2/\text{хв}$. Вона вказується у технічних даних верстата залежно від режимів роботи; K – коефіцієнт, що враховує збільшення ширини різку відповідно діаметру ЕІ.

При використанні такої технології формоутворення зубців з'являється вимога до конструкції точкового кріпильного елемента – кількість зубців повинна бути парним для забезпечення проходу дрота.

Заключними операціями формоутворення МЕ на точкових з'єднаннях “метал + композит” повинні бути операції закруглення ребр на пірамідальних кріпильних зв'язках та забезпечення промислової чистоти.

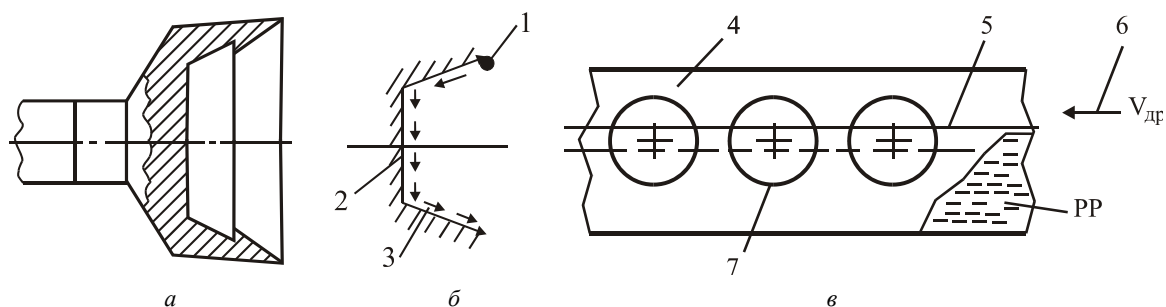


Рис. 5. Послідовність виготовлення зубців на основі анкерного болта (гайки): *a* – токарська обробка внутрішньої поверхні голівки; *б* – траєкторія руху дротового ЕІ (пунктирна лінія зі стрілками); *в* – розміщення різь оброблюваних болтів у порожнині робочої бази верстата (перше із трьох положень); $V_{др}$ – напрямок руху дроту; 1 – переріз ЕІ; 2 – тіло головки болта; 3 – траєкторія руху; 4 – контур робочого бака; 5 – дротовий електрод-інструмент (початкове положення); 6 – напрямок протягування ЕІ; 7 – контур заготовки головки болта (умовно показана обробка трьох головок); PP – робоча рідина

На рис. 6 показані експериментальні зразки болтів, гайок, шайб та закінцівок тяг, що отримані методом фрезерування. Матеріалом цих зразків є нержавіюча сталь у стані поставки (без зміцнення термообробкою). Тим не менш, трудомісткість виготовлення становила малопринятні значення для одиничних серій виробництва. Але їх функціональні можливості були задовільними при виготовленні дослідних виробів. Це поставило задачу про запропонування нової технології формоутворення зубців на торцевих поверхнях з задовільними значеннями трудомісткості, шорсткості поверхні та інших показників якості.



Рис. 6. Зовнішній вигляд анкерних болтів, гайок, окантувальних шайб та фітингів різної геометрії [1]

Висновки

1. Запропоновано методику кількісного порівняння показників властивостей трансверсальних з'єднань “метал-композит”. На прикладі порівняння властивостей трьох варіантів формоутворення мікроштифтів – монолітних, циліндричних та листових – показаний спрощений варіант реалізацію методики, що пропонується.

За результатами кількісного порівняння можливо зробити висновок, що не може бути однозначної відповіді щодо переваг того чи іншого КТР. Вибір оптимального рішення залежить від конструкції вузла з'єднання, характеру та традицій конкретного виробництва і, головне, його основної цілі.

2. Тим не менш, проведене порівняння дозволяє зробити наступні висновки:

– використання листових проміжних елементів з зубцями більше відповідає великогабаритним високонавантаженим з'єднанням “метал + композит”;

– для закінцівок з алюмінієвих сплавів слід віддавати перевагу монолітним та циліндричним мікроштифтам;

– для точкових з'єднань “метал + композит” з висотою профільованих монолітних мікроштифтів більш 5...7 мм формоутворення канавок між зубцями доцільно виконувати методами електроерозійного різання рухомих дротом.

3. Одержані кількісні показники технологічних процесів можуть вважатися недостатньо точними за причиною використання довідкових даних невідомої точності та малого розміру поверхні, що була вибрана для порівняння. Але цьому теж є відповідне пояснення.

References

- [1] Ya.S. Karpov, *Joints of articles and units made of composites*, (In Russian), Kharkiv, Nat. Aerosp. Univ. “KhAI”, 2006.
- [2] V.V. Vorobey, O.S. Sirotkin. “Joints of structures made of composites” (in Russian), Leningrad, Machine-building, 1985.

- [3] 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*, Vol. 12(8). Issue 1681, pp. 1–40, 28 July 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12081681>
- [4] B. Schornstein *et al.*, “Manufacturing Principles for Z-Pin Reinforced FRP Composite Laminates in the Case of Bolted Joints”, *Lightweight Design worldwide*, Issue 10(3), pp. 28–33, June 2017. DOI:10.1007/s41777-017-0025-1
- [5] M. Azizur Rahman *et al.*, “Development of micropin fabrication process using tool-based micromachining”, *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 27, pp. 939–944, 2006. DOI: 10.1007/s00170-004-2270-9
- [6] S. Job *et al.*, *Joining of Fibre-Reinforced Polymer Composites: A Good Practice Guide*, Grazebrook Innovation: Oxford, UK, 2020.
- [7] Z. Dawei *et al.*, “Review on joining process of carbon fiber-reinforced polymer and metal: Methods and joining process”, *Rare Metal Mater. Eng.*, 47, pp. 3686–3696, 2018. DOI: 10.1016/S1875-5372(19)30018-9
- [8] A. Pramanik *et al.*, “Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys—A review”, *Compos. Part. A Appl. Sci. Manuf.*, 101, pp. 1–29, 2017. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.06.007
- [9] Z. Dawei *et al.*, “Review on joining process of carbon fiber-reinforced polymer and metal: Applications and outlook”, *Rare Metal Mater. Eng.*, 48, pp. 44–54, 2019.
- [10] M. Gude *et al.*, “Development of novel form-locked joints for textile reinforced thermoplastics and metallic components”, *J. Mater. Process. Technol.*, 216, pp. 140–145, 2015. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.09.007
- [11] J. Altmeyer *et al.*, “Microstructure and mechanical performance of metal-composite hybrid joints produced by Fric Riveting”, *Compos. Part. B Eng.*, 81, pp. 130–140, 2015. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.06.015
- [12] R. Matsuzaki, T. Kanatani and A. Todoroki, “Multi-material additive manufacturing of polymers and metals using fused filament fabrication and electroforming”. *Addit. Manuf.*, 29, 100812, 2019. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100812
- [13] Benjamin Schornstein *et al.*, “Manufacturing Principles for Z-Pin Reinforced FRP Composite Laminates in the Case of Bolted Joints”, *Lightweight Design worldwide*, Issue 3/2017.
- [14] Ik-Hyeon Choi *et al.*, “New Manufacturing Method of Z-Pinned Composite Laminates”, in *51 st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, April 2010. DOI: 10.2514/6.2010-3133
- [15] Sodick Co. LTD. Available: https://sodick.sodicom.biz/ru/?gclid=Cj0KCQjwqPGUBhDwARIsAN-NwjV4jwGaX4yxXajbZpFZqS5bLJmyAXH_KI4kx3p4xsSDH-UvMqAX_XfoaAizFEALw_wcB
- [16] Mitsubishi Electric Corporation. Available: <https://www.sodick.co.jp>

Application of erosion dimensional treatment methods for creation transversal fasteners in “metal-composite” joints

I. Taranenko

Abstract. At design of high-loaded units of engineering objects, especially such as articles of aerospace engineering, the problem of creation of reliable joints between metal and composite articles having predefined strength and ability to fulfill given functions appears. Development and grounding of selection of structural-manufacturing solutions of “metal-composite” joints with transversal fastening elements is selected as the objective of studying.

As the object for studying possible structural-manufacturing solutions of “metal-composite” joints that use transversal fastening elements which are embedded to composite and attached to metal article or produced on its surface. Three types of fastening micro-elements are considered, i.e. pyramidal monolithic, cylindrical and sheet-formed, also different technologies of fastening elements production are considered too.

Mass of typical flat article with micro-pins at given load-carrying ability of “metal-composite joint” was estimated for above-mentioned types of micro-fasteners.

Such quantitative indexes of manufacturability as labor-intensity and energy consumption of fastening elements production were considered as results of studies.

Approach to comparison methods of fastening elements manufacturing is suggested. This approach is based on analysis of correspondent numerical specific indexes of labor-intensity and energy consumption. These indexes are compared for micro-pins which are assumed to be produced of aluminum, titanium alloys and stainless steels.

Distinctive feature of suggested model of analysis is taking into consideration both main and auxiliary technological operations, which influence significantly on manufacturing labor-intensity and duration. Process of classical milling with cylindrical and disc mills is compared with up-to-date methods of electro-erosion cutting with wire.

Recommendations for selection shape, type and arrangement scheme of micro-fasteners on article surface and exact manufacturing process of micro-pins production at given material are formulated as conclusions.

Keywords: transversal fastening elements, “metal-composite” joint, micropins, electro-erosion dimensional treatment, labor intensity, energy consumption.