

Варіанти використання властивості уніфікації при виборі конструктивно-технологічних рішень з'єднань “метал+композит”

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

В статті розглянута можливість реалізації властивості уніфікації у застосуванні до варіантів конструктивно-технологічних рішень з'єднань “метал+композит”.

Підкреслено, що ця властивість є важливою для сучасної конструкції транспортної техніки при різних варіантах цілей її виробництва. Показано, що серед метало-композитних гетерогенних з'єднань можна виділити три варіанти їх реалізації: з монолітними, циліндричними та листовими трансверсальними кріпильними зв'язками.

Безпосередньо розглянуто можливість використання листових трансверсальних кріпильних елементів, що виробляються на металевих стрічках. Проаналізовано можливість використання стрічок з різних матеріалів та товщин.

Найбільш повно властивість уніфікації проявляється для етапів конструкторської, технологічної підготовки виробництва та самого виробництва. Запропоновано варіанти техпроцесів виготовлення листових кріпильних елементів на металевих стрічках методами штампування або лазерним вирізанням. Аналіз переваг та недоліків цих техпроцесів показав, що найбільш раціональним є метод штампування з відгинанням.

Запропоновано варіанти маршрутних техпроцесів формоутворення трансверсальних зв'язків на металевих закінцівках з використанням листових підсилювальних елементів.

Запропоновано варіанти обладнання, за допомогою якого можливо серійне виробництво зубців на металевих стрічках. Серед цих варіантів обладнання слід відзначити металеві штампи для штампування зубців та залучання електрогідравлічного пристрою для їх відгинання.

Приведено приклади використання конструктивно-технологічних рішень з листовими мікроелементами при виготовленні посудин високого тиску та при підсиленні місць болтових з'єднань.

Ключові слова: з'єднання “метал+композит”, конструкторська та технологічна підготовка виробництва, уніфікація техпроцесів, штампування, балони високого тиску, болтове з'єднання.

Вступ

Раціональні з'єднання “метал+композит” являють собою складну технічну задачу у різних конструкціях авіаційно-космічної техніки (АКТ) та в інших сучасних транспортних машинах. Це пов'язано з умовами їх експлуатації та виготовлення, різницею фізико-механічних властивостей [1-2].

Якість сучасних транспортних конструкцій та процесів їх виробництва визначається низкою властивостей. Но них входять функціональні властивості, властивості надійності, технологічності економічності та уніфікації. Остання проявляється у технічних рішеннях, у процесах їх прийняття, технологічних рішеннях різного характеру – техпроцесів виготовлення, технологічному оснащенні та обладнанні [3].

Використання принципу уніфікації дозволяє знизити витрати та час, що витрачаються безпосередньо на виготовлення та технологічну підготовку виробництва (ТПВ).

У даній роботі розглянуто використання цієї властивості на низці етапів ТПВ, що включають етапи конструкторської та технологічної підготовки. У цій роботі розглянута тільки одна група конструктивно-технологічних рішень (КТР) з'єднань “метал+композит” з листовими проміжними елементами, що створюють кріпильні зв'язки.

Метою

роботи є підвищення якості з'єднання “метал+композит” у сучасних конструкціях транспортних засобів шляхом цільової оптимізації ТПВ.

Поставлені задачі

передбачають:

- на основі аналізу переваг, недоліків, типу виробництва проаналізувати можливі технологічні процеси виготовлення трансверсальних зубців на металевих стрічках для створення метало-композитних з'єднань;
- запропонувати можливі маршрутні технології виготовлення трансверсальних зубців на металевих стрічках
- показати на конкретних прикладах можливість використання розглянутого конструктивно-технологічного рішення у конструкціях літальних апаратів.

Прийняті припущення

У статті прийнято припущення про те, що до складу технічної підготовки виробництва входять лише конструкторська та технологічна підготовка виробництва.

Силове навантаження у з'єднаннях “метал+композит” передається тільки волокнами арматури при схемах розтягування-стискання, а при зсуві беруть участь компоненти сполучного.

Вважається, що листові кріпильні мікроелементи сприймають компоненти навантаження, що діють вздовж площини зубця.

Умовно припускається, що при впровадженні мікроелементів до вологого пакету композиту або при його обпресуванні руйнування волокон не трапляється. Волокна у незначної мірі можуть бути пошкоджені мікронерівностями на ребрах зубців.

Методи дослідження

Використано метод структурно-економічного та структурно-функціонального аналізу при виборі варіантів техпроцесів формування трансверсальних зв'язків. При виборі варіантів схем штампів для надрізання та відгинання мікроелементів використовувався метод аналогій.

Аналіз публікацій у розглянутій галузі

Як показано у роботі Я. С. Карпова [1], найбільш роботоспроможними є об'ємні типи з'єднань “метал+композит”. До них відносяться метало-композитні гетерогенні з'єднання (МКГЗ) з трансверсальними кріпильними зв'язками. У цілому, різновиди таких КТР можна звести до наступного вигляду (рис. 1). На металевій закінцівці деталі формуються спрямовані у трансверсальному напрямку виступи у вигляді пірамід (рис. 1, а), штифтів (рис. 1, б) або зубців на тонкій металевій пластині (стрічці), яка являє собою проміжний елемент з'єднання металевої та композитної деталі. Цей

елемент закріплюється до металевої закінцівки традиційними методами – зварюванням, паянням або за допомогою болтового з'єднання. При складанні просочений сполучним композит нанизується на елементи, що виступають. Потім композит обтискається по цим елементам та увесь пакет суцільно полімеризується. Форма, розміри та структура розташування трансверсальних елементів можуть бути різними. Ці параметри визначаються при проектуванні з'єднання. Варіанти технології їх формоутворення та з'єднання з поверхнею металевої закінцівки є предметом багаточисельних досліджень.

У масштабних оглядах технологій формоутворення таких мікроелементів (МЕ) приведено різні схеми їх виготовлення на поверхні металевої закінцівки (рис. 1, а, б). Але листові кріпильні МЕ практично розглядаються дуже рідко. Можливість їх практичної реалізації у загальному вигляді розглянута у роботах [1, 4-6].

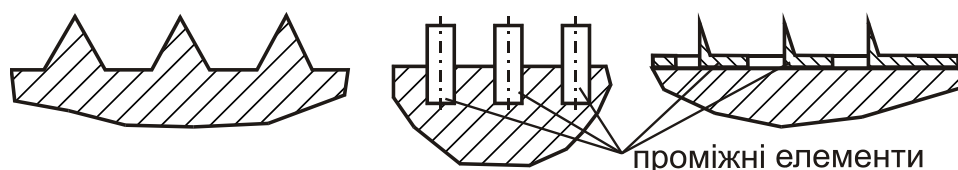


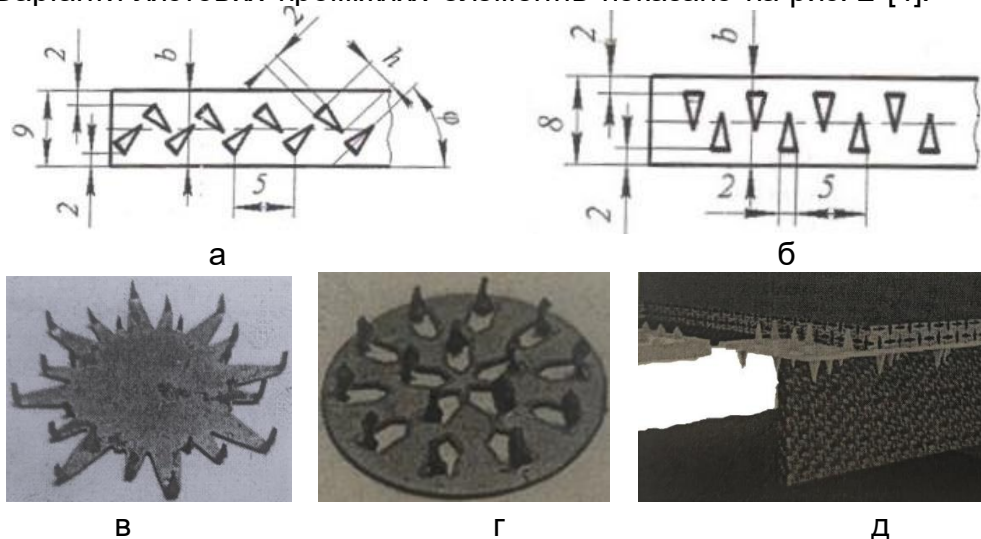
Рис. 1. Варіанти реалізації МКГС у вигляді монолітних (а), циліндричних (штифтових) (б) та листових (в) мікроелементів

Між тим, використання КТР з листовими МЕ у низці конструкцій є переважним:

- воно має меншу масу у порівнянні з іншими варіантами КТР;
- такі проміжні елементи можливо використовувати при з'єднанні важкооброблюваних матеріалів;
- вони більш придатні при реалізації властивості уніфікації.

Такі МЕ можуть виготовлятися на вузьких та широких металевих стрічках, пластинах визначеного розміру та круглих плоских деталях. З вузьких стрічок можливо формувати необхідне поле з МЕЮ що мають різний крок розташування, орієнтацію площин МЕ та інше.

Варіанти листових проміжних елементів показано на рис. 2 [4].



а, б – варіанти розташування зубців на стрічці; в, г – металеві прокладки у вигляді шайби; д – 3-D модель виконання з'єднання композитних деталей

Рис. 2. Приклади використання трансверсальних елементів

Виготовлення листових проміжних елементів є раціональним за кількома схемами. Для прикладу, на рис. 3 показано варіанти маршрутних технологій формоутворення трансверсальних зв'язків з листовими МЕ.

Найчастіше у якості заготовок для виготовлення проміжних елементів використовують стрічки товщиною 0,2...0,5 мм (рідше 1,0 мм) з нержавіючих сталей або титанових сплавів. Ширина стрічок може мінятися у широких межах у залежності від необхідної кількості рядів листових МЕ. Радіус закруглення у вершини зубця повинен дорівнювати 0,1...0,3 мм.



Рис. 3. Варіанти маршрутних техпроцесів формоутворення трансверсальних зв'язків на металевих закінцівках з використанням листових підсилювальних елементів

Виготовлення стрічок з зубцями здійснюється за дві операції – надрізання бокових сторін та відгинання зубця на кут 90°. Розглядаються два варіанти надрізання – у штампі або пропалювання лазерним променем [9].

Можливо допустити виникнення труднощів при реалізації таких операцій. При механічному надрізанні тонкого та міцного матеріалу (нержавіюча сталь та титанові сплави) з використанням пуансона та матриці різальні крайки цих

інструментів будуть інтенсивно зношуватися у зонах різання близьких до вершини зубця. При використанні еластичного пуансону на вершині зубця будуть створюватися великі задирки. При лазерному різанні неможливо отримати радіуси закруглення вершини менш ніж товщина стрічки.

Мала товщина стрічок визиває необхідність використання безпроміжкових штампів для надрізання зубців. Це, у свою чергу, обумовлює використання оптичних шліфувальних верстатів для обробки різальних крайок штампів.

Малі радіуси закруглення вершини зубця не спрощують виготовлення штампів. У якості прикладу, на рис. 4 приведено ескіз конструкції матричної порожнини для надрізання зубців на стрічках з штампованих сплавів. У цьому випадку матриця повинна бути використана з двох секцій для чіткого оформлення вершини зубців. Різальні крайки секційних вставок повинні бути виготовлені з твердого сплаву для зменшення шорсткості надрізаних крайок. Крайка матриці, коло якої виконується згинання, повинна мати радіус закруглення $3 \dots 5$ товщин стрічки.

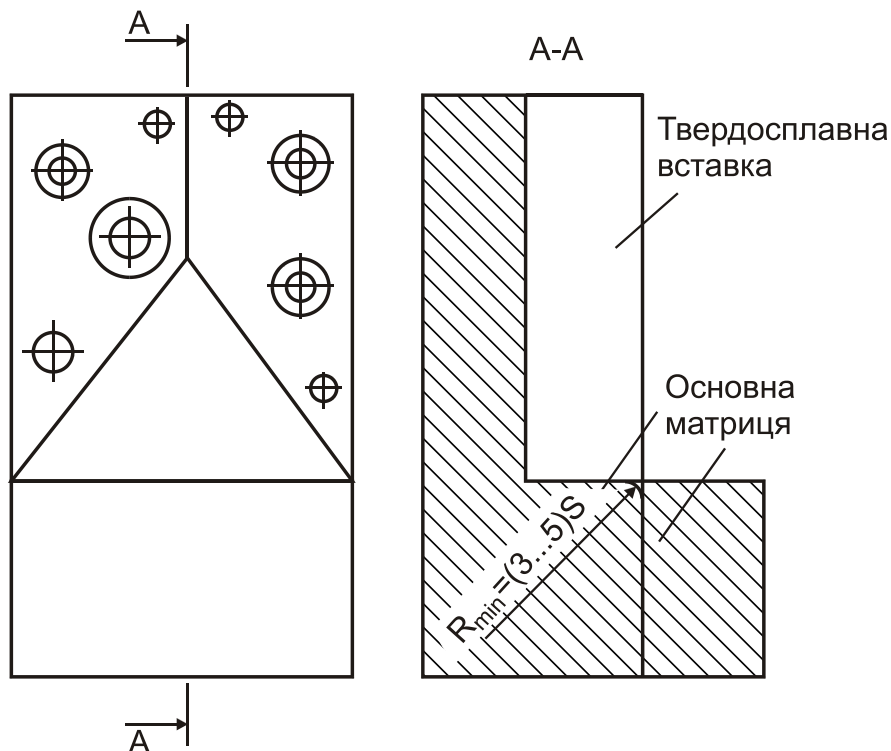


Рис. 4. Секції матриці з твердого сплаву, що охоплюються твердою загартованою обоймою за посадкою

Надрізані різальні крайки пуансону повинні мати уклін вздовж лінії різання для зменшення сил, що діють на зубець.

Відгинання надрізаного зубця на кут 90° можливо проводити за допомогою згинального пуансону у штампі з наступною позицією.

Досвід штампування у таких штампах демонструє можливість досягнення шорсткості на поверхні різання величиною $Ra=0,32 \dots 0,63$ мкм.

Форма зубців трансверсальних елементів може бути не лише клиновидною, але і гарпуноподібною та у вигляді "йоржа". Ці форми значно ускладнюють виготовлення штампів та їх вартість.

Використання лазерного надрізання дозволяє легко налаштовувати процес під будь-яку задану форму зубця шляхом змінення програми переміщення

позиціювального пристрою.

При згинанні високоміцних матеріалів у простих штампах завдяки пружинінню достатньо важко досягти кута згинання у 90° . Ця обставина посилюється тим, що для розглянутих матеріалів рекомендовані радіуси згинання досягають 4...6 товщин заготовки. Все це разом призводить до зниження жорсткості зігнутого зубця, що не є припустимим, виходячи з умов його функціонування.

Для підвищення жорсткості відігнутого зубця рекомендують використовувати високошвидкісні струмені рідини, які генеруються, наприклад, електрогідравлічним розрядом.

Запропонований технологічний процес полягає у надрізанні кутового контуру лазерним різанням та відгинанні надрізаних ділянок на кут 90° імпульсним струменем рідини з формоутворенням непласкої форми відігнутої ділянки. Схема установки для реалізації такого процесу показана на рис. 5 [10].

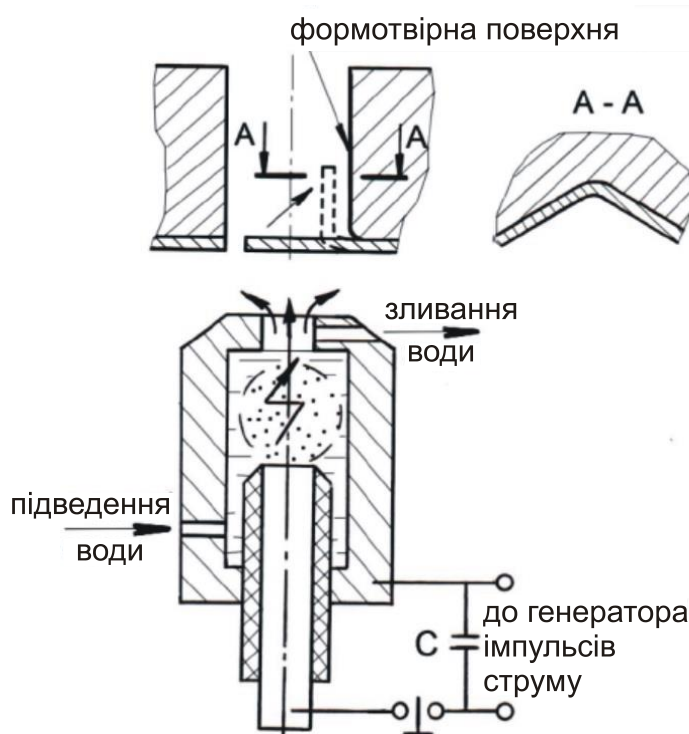


Рис. 5. Схема електрогідравлічного пристрою для згинання надрізаних ділянок на кут 90° імпульсним струменем рідини з формоутворенням неплаского перерізу відігнутої ділянки

Очевидними перевагами такого технологічного процесу є:

- зменшення кількості операцій з-за можливості виключення операцій зачищення. Лазерне надрізання забезпечує оплавлення крайки різку шириною до 0,06 мм;

- зменшення кількості необхідного оснащення;

- немає необхідності використання листоштампувального обладнання.

Недоліки процесу – необхідність обладнання для лазерного різання та обладнання для генерації імпульсних струменів рідини.

Розглянемо більш докладно та порівняємо переваги та недоліки цих двох техпроцесів.

Пристрій складається з розрядної камери, у якій знаходиться електрод з

високовольтною ізоляцією. Порожнина камери заповнена водою (періодично поновлюється). При подачі високої напруги з конденсатора С на електрод та корпус камери у її порожнині виникає електрогідролічний розряд. Від цього призводить до появи парогазового пухиря (показаний пунктиром). Він з високою швидкістю виштовхує рідину, що знаходиться над ним, до сопла камери. Ця рідина стикається з заготовкою, давить на надрізану ділянку та змушує її відгинатися з високою швидкістю. Ця ділянка, що відгинається під дією рідини, стикається з поверхнею, що задає їй форму, та деформується.

Вибір варіанту виготовлення проміжних елементів з зубцями залежить від умов конкретного виробництва.

Приклади використання уніфікованих листових кріпильних зв'язків

Для демонстрації можливостей використання уніфікованих листових кріпильних МЕ наведемо два приклади.

При виготовленні балонів високого тиску з'єднання циліндричної композитної частини балону з металевими днищами використовують нахлесткові з'єднання, що показані на рис. 6. Довжина таких з'єднань може досягати 150...180 мм.

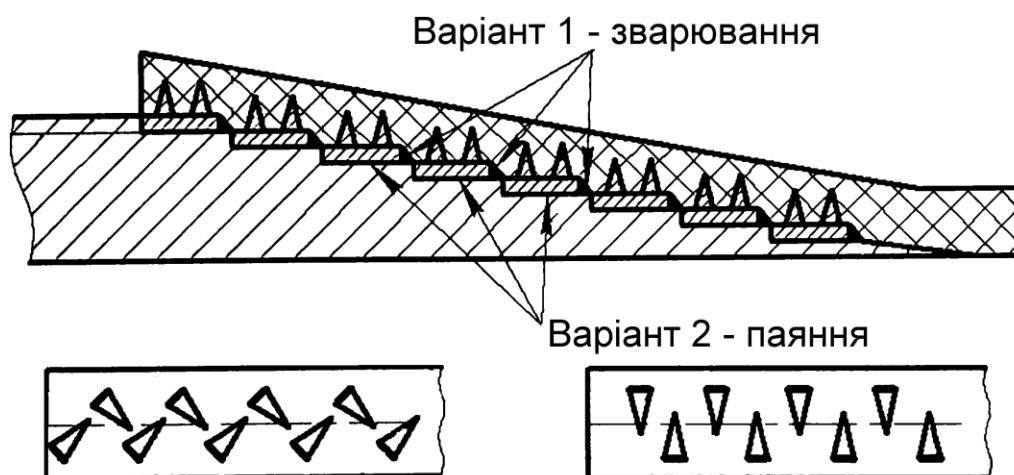


Рис. 6. Схема довгого нахлесткового з'єднання "метал+композит" з листовими трансверсальними МЕ для різних структур укладки армувального матеріалу

Відомо [5], що максимальні зсувні напруження у таких з'єднаннях виникають на його краях. Тому крайні ряди кріпильних МЕ повинні встановлюватися з меншим кроком (крайні 3...5 рядів). За мірою переміщення до центру з'єднання крок встановлення рядів МЕ збільшується. У більшій мірі це визвано необхідністю максимальної маси конструкції.

Наявність уніфікованих стрічок з МЕ різної структури їх розташування на стрічці та орієнтацією відносно діючих напружень дозволяють реалізовувати з'єднання "метал+композит" з заданими функціональними властивостями та раціональними масою та трудомісткістю виготовлення. Низка виконаних конструкцій таких з'єднань демонструє, що зменшення маси може досягати 2...4%, а трудомісткості – 1...3%.

Іншим прикладом використання уніфікованих листових МЕ може служити технічний прийом підвищення стійкості точкових (болтових) з'єднань "метал+композит", навантажених зсувними/стискальними навантаженнями (рис. 7).

Відомо, що болтові з'єднання “метал+композит” мають знижену стійкість (міцність) до дії зсувних та зминальних навантажень. Це у певній мірі пояснюється невисокою твердістю КМ та руйнуванням волокон КМ при механічному виконанні отворів.

Для підвищення стійкості таких з'єднань використовують впровадження до об'єму просоченого та незаполімеризованого композиту (до ділянки розташування болтових отворів) листові шайби або пластини з зубцями, які протикають шари композиту. Після суцільної полімеризації у заданих місцях виконують отвори. Варіанти листових шайб з відігнутими зубцями показано на рис. 2.

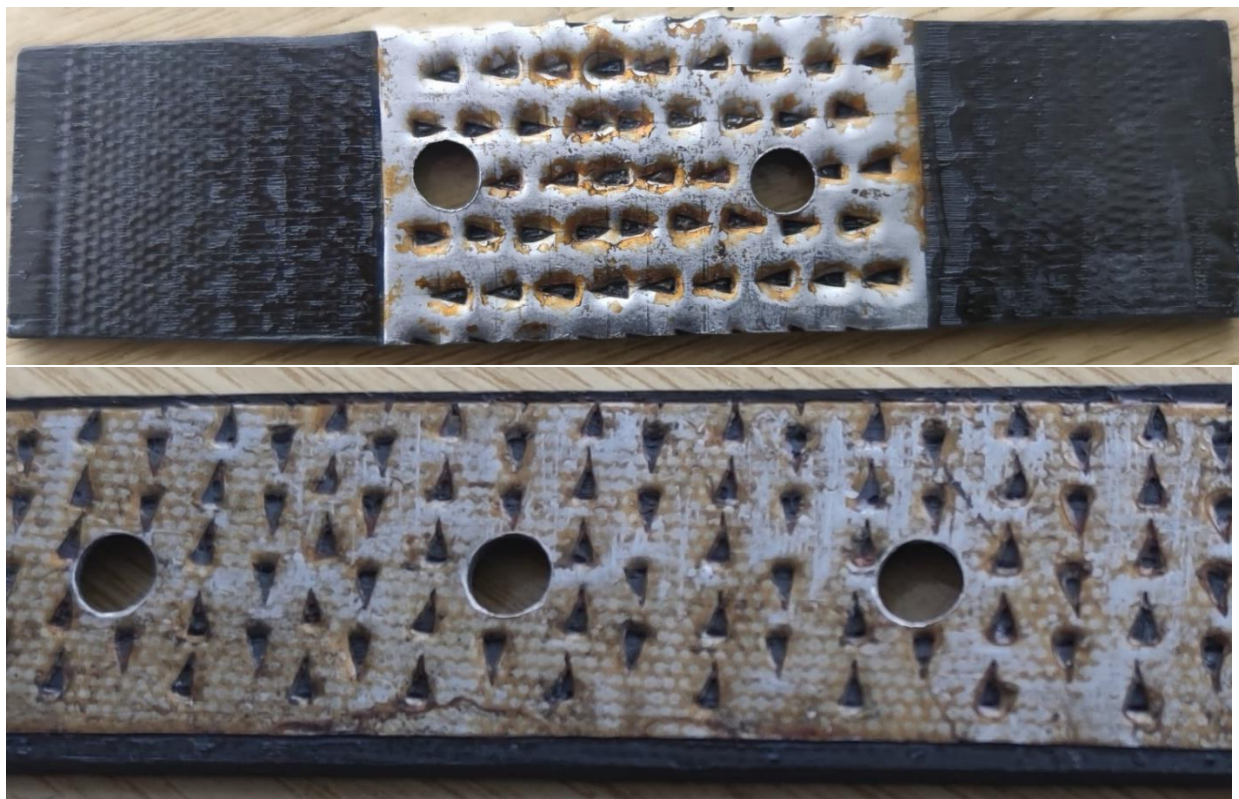


Рис. 7. Зразок для випробувань ділянок підсилення болтових з'єднань “метал+композит”

Виготовлення таких підсилювальних елементів можливо на пресах-автоматах у штампах послідовної дії. Така уніфікована штампована продукція має низьку вартість у достатньо широкому діапазоні типорозмірів.

Ступінь уніфікації технологічного та загального оснащення може бути достатньо високим, а використовуване обладнання – універсальним. Ці обставини дозволяють стверджувати, що гнучкість виробництва з'єднань “метал-композит” з листовими проміжними кріпильними елементами є достатньо високою.

Висновки

1. Аналіз техпроцесів формоутворення кріпильних трансверсальних зв'язків у метало-композитних гетерогенних з'єднаннях “метал+композит” з листовими МЕ демонструє велику можливість використання властивості

уніфікації при виборі КТР таких з'єднань. А це дозволяє знизити витрати та час на ТПВ, тобто підвищити гнучкість виробництва.

2. Особливості сучасних метало-композитних конструкцій, пов'язані з різними матеріалами, що з'єднуються та не обмежуються особливостями виготовлення листових МЕ, тобто КТР з їх використанням є більш універсальними.

3. Використання КТР з листовими МЕ дозволяють знизити масу транспортного засобу та трудомісткість його виготовлення.

Список літератури

1. Карпов, Я. С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов: монография / Я. С. Карпов / Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2006. – 359 с. ISBN 966-662-133-9.

2. Буланов, И. М. Технология ракетных аэрокосмических конструкций из композиционных материалов / И. М. Буланов, В. В. Воробей. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1989. – 257 с.

3. Тараненко, И. М. Качественная оценка унификации при изготовлении композитных секционных изделий // И. М. Тараненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Інноваційні технології та обладнання для обробки матеріалів в машинобудуванні та металургії». – Харьков : НТУ «ХПІ», 2020 – № 2 (1356). – С. 70-74. – Библиогр. : 9 назв. – ISSN 2519-2670.

4. 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.

5. Коцюба, А. А. Новые конструктивно-технологические решения соединений композитных изделий в практике ГП «Антонов» / А. А. Коцюба, А. З. Двейрин, Я. О. Головченко. – К. : «Технологические системы», № 1, 2016. – С. 19-27, ISSN 2074-0603.

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

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

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

9. Karpichev, V. Modeling of technological processes of machine-building and repair manufacture / V. Karpichev, K. Sergeev, A. Bolotina // Journal: Communication, 4/2019, Vol. 21, P. 59-62, <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.4.59-62>.

10. Тараненко, М. Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, технологические процессы: монография в 2 ч. / М. Е. Тараненко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 272 с.

References

1. Karpov, Ya. S. Soedineniya detalej i agregatov iz kompozicionnyh materialov: monografiya / Ya. S. Karpov / Harkov : Nac. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «HAI», 2006. – 359 s. ISBN 966-662-133-9.
2. Bulanov I. M. Tehnologiya raketnyh aerokosmicheskikh konstrukcij iz kompozicionnyh materialov / I. M. Bulanov, V. V. Vorobej. – M.: MGTU im. N. E. Bauman, 1989. – 257 s.
3. Taranenko I. M. Kachestvennaya ocenka unifikacii pri izgotovlenii kompozitnyh sekcionnyh izdelij // I. M. Taranenko // Visnik NTU «HPI». Seriya «Innovacionnye tehnologii i oborudovanie dlya obrabotki materialov v mashinostroenii i metallurgii». – Harkov : NTU «HPI», 2020 – № 2 (1356). – S. 70-74. – Bibliogr. : 9 nazv. – ISSN 2519-2670.
4. Taranenko I. M. Sravnitelnyj analiz konstruktivno-tehnologicheskikh reshenij soedinenij metall-kompozit. – Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya. – Nauchno-tehnicheskij zhurnal. Vyp. 4(139). – H.: HAI, 2017, C. 40-49, ISSN 1727-7337.
5. Kocyuba A. A. Novye konstruktivno-tehnologicheskie resheniya soedinenij kompozitnyh izdelij v praktike GP «Antonov» / A. A. Kocyuba, A. Z. Dvejrin, Ya. O. Golovchenko. – K. : «Tehnologicheskie sistemy», № 1, 2016. – S. 19-27, ISSN 2074-0603.
6. Galińska A. Mechanical Joining of Fibre Reinforced Polymer Composites to Metals—A Review. Part II: Riveting, Clinching, Non-Adhesive Form-Locked Joints, Pin and Loop Joining / A. Galińska, C. Galiński // Polymers. – Published 28 July 2020, Volume 12(8). – Issue 1681, P. 1 – 40; <https://doi.org/10.3390/polym12081681>. <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/8/1681/htm>.
7. Feistauer E. A review on direct assembly of through-the-thickness reinforced metal–polymer composite hybrid structures / Feistauer E. E., dos Santos J. F., Amancio-Filho S. T. // Polymer Engineering and Science, Published: April 2019. – Volume 59, Issue 4. – P. 661 – 674. <https://doi.org/10.1002/pen.25022>.
8. Schornstein B. Manufacturing Principles for Z-Pin Reinforced FRP Composite Laminates in the Case of Bolted Joints / B. Schornstein, R. Staschko, N. Fuchs, N. Glück // Lightweight Design worldwide, Published: June 2017. – Issue 10(3), P. 28 – 33. DOI:10.1007/s41777-017-0025-1.
9. Karpichev V. Modeling of technological processes of machine-building and repair manufacture / V. Karpichev, K. Sergeev, A. Bolotina // Journal: Communication, 4/2019, Vol. 21, P. 59-62, <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.4.59-62>.
10. Тараненко М. Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы: монография в 2 ч. / М. Е. Тараненко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 272 с.

Надійшла до редакції 21.12.2023, розглянута на редколегії 21.12.2023

Variants of application of unification property at selection structural-technological solutions of “metal+composite” joints

Possibility of unification property realization in application to variants of structural-technological solutions of “metal+composite” joints.

It is drawn that this property is important for up-today vehicle engineering

structures at different goals of its manufacturing. It is shown that there are three possible options can be revealed in metal-composite heterogenous joints realization: with monolithic, cylindrical and sheet transversal fastening connections.

Possibility of application sheet transversal fastening elements produced on metal strips is considered exactly. Also, possibility of implementation strips of different materials and thickness is analyzed.

The property of unification is most fully manifested at the stages of design, technological preparation of production and production itself. Variants of technological processes for manufacturing sheet fasteners on metal strips using stamping methods or laser cutting are proposed. An analysis of the advantages and disadvantages of these technical processes showed that the most rational method is stamping with bending.

Options for route technical processes for forming transversal connections on metal tips using sheet reinforcing elements are proposed.

Options for equipment are proposed, with the help of which serial production of teeth on metal strips is possible. It should be noted among these equipment options metal stamps for stamping teeth and using an electro-hydraulic device for bending them.

Examples of implementation of design and technological solutions with sheet micro-elements in the manufacture of high-pressure vessels and in the strengthening of bolted joints are given.

Key words: “metal+composite” joint, design and technological preparation of production, unification of manufacturing processes, stamping, high-pressure vessels, bolted joint.

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

About the Authors

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.