

Канд. техн. наук І. М. Тараненко

МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ТЕХНІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА З'ЄДНАНЬ «МЕТАЛ+КОМПОЗИТ»

У сучасних конструкціях авіаційно-космічної техніки широко використовують деталі, панелі та складані одиниці із композиційних матеріалів. Їх з'єднання з металевими закінцівками є досить складним завданням. Відомі способи з'єднань за допомогою болтів, заклепок і клейові з'єднання не задовольняють вимоги з ряду причин, пов'язаних з обмеженнями за масою, розмірами з'єднань, їхньої надійності та технологічності. У світовій практиці відомо багато конструктивно-технологічних рішень з'єднань «метал+композит». Серед них найбільш повно технічним вимогам відповідають метало-композитні гетерогенні з'єднання з трансверсальними кріпильними елементами. Для з'єднання різних за структурою композитних деталей з металевими закінцівками використовують монолітні (з металевою закінцівкою) кріпильні елементи, штифтові (циліндричні, конічні, пірамідальні та ін.) і листові мікроелементи. Останні кріплять до металевої закінцівки різними способами. Самі мікроелементи можуть мати різну форму в плані та поздовжньому перерізі. Залежно від напрямку та виду передаваних навантажень структура розміщення елементів на поверхні металевої закінцівки може бути різною. У таких багатofакторних умовах технічна підготовка виробництва, що охоплює конструкторську та технологічну підготовки, є складним завданням. При цьому необхідно враховувати, що цілі самого виробництва такої техніки можуть істотно відрізнятися – прототипне (одиничне) чи серійне виробництво з різними вимогами до них. Організувати таке виробництво з технічною підготовкою виробництва високої якості без моделі управління якістю процесу підготовки досить складно. У роботі запропоновано комплексну математичну модель управління якістю технічної підготовки виробництва з'єднань на основі кількісної оцінки властивостей основних процесів виготовлення. Керуваний параметром у ній є комплексний показник якості, а параметром, що управляє, є коефіцієнт вагомості групових або одиничних властивостей складових процесів. Задання коефіцієнта вагомості тієї чи іншої властивості проводять експертним чи аналітичним методом у діапазоні коефіцієнтів $0...1,0$. При цьому керований параметр змінюється в межах $0,5...3,5$. Зазначені коефіцієнти перевірено розрахунковим шляхом для різних матеріалів з'єднань і процесів формоутворення кріпильних мікроелементів. Зроблено висновки щодо достатньої ефективності управління якістю технічної підготовки виробництва з'єднань «метал+композит».

Ключові слова: композитні деталі, з'єднання з металевими закінцівками, властивості процесів, кількісна оцінка, математична модель, керувальний і керовані параметри, алгоритми управління.

Modern aerospace structures widely use parts, panels and assemblies made of composites. Connecting them to metal tips is quite a complicated problem. Known conventional methods of joints using bolts, rivets and adhesive ones do not meet the requirements for a number of reasons related to restrictions on weight, dimensions of joints, their reliability and manufacturability. In the world practice of such joints, many design and technological solutions for "metal+composite" joints are known. Among them, metal-composite heterogeneous connections with transversal fastening joints most fully meet the technical requirements. To connect composite tips of different structures with different shapes and grades of alloys of metal fittings, monolithic (with metal tips) fastening elements, pins (cylindrical, conical, pyramidal, etc.) and sheet microelements are used. The latter are attached to the metal tips in different ways. The microelements themselves can have different shapes from the top view and in longitudinal section. Depending on the direction and type of transmitted loads, the structure of the arrangement of elements on the surface of the metal tip can be different. In such multifactorial conditions, technical preparation of production, including design and technological preparation, is a complex task. It is necessary to consider that the goals of the production of such equipment may differ significantly – prototype (single piece) or mass production with different requirements for them. It is quite difficult to organize such production with technical preparation of high-quality production without a quality management model for the preparation process. The work proposes a comprehensive mathematical model for managing the quality of technical preparation for the production of joints based on a quantitative assessment of the properties of the main manufacturing processes. The controlled parameter in it is a complex quality index, and the controlling parameter is the weight factor of group or individual properties of the component processes. Setting the values of the weight coefficient of a particular property is carried out using an expert or analytical method in the range of values $0...1,0$. In this case, the controlled parameter varies within $0,5...3,5$. The indicated values are verified by calculation for different joint materials and processes of forming fastening microelements. Conclusions are drawn about the sufficient effectiveness of quality management of technical preparation for the production of metal+composite joints.

Key words: composite parts, joints with metal tips, process properties, quantitative assessment, mathematical model, control and controlled parameters, control algorithms.

Композитні матеріали широко використовують у сучасних конструкціях аерокосмічної техніки. Існує проблема з'єднання металевих закінцівок з композитними деталями при виконанні вимоги мінімізації маси виробу й часу виготовлення та реалізації високої якості. Традиційні методи з'єднання (болтові, заклепкові, клейові) не завжди відповідають вимогам за масою, розмірами та надійністю.

Принципово проблему вирішено [1–3] шляхом використання метало-композитних гетерогенних зв'язків (МКГЗ) з трансверсальними кріпильними елементами. Запропоновано велику кількість конструктивно-технологічних рішень (КТР) подібних з'єднань. Безпосередньо виготовлення з'єднань потребує використання багатьох технологічних процесів перетворення форм і поверхонь складної геометрії та високої їх якості. При цьому використовують матеріали закінцівок з різними технологічними властивостями.

Перед виробництвом авіаційно-космічних конструкцій можуть стояти дуже різні цілі: забезпечення максимальної несучої спроможності, мінімізація витрат усіх видів ресурсів, у тому числі часу на технічну підготовку виробництва (ТПВ). Вирішувати завдання цільової оптимізації виробництва дуже важко без математичного моделювання процесів.

Метою роботи є синтез математичної моделі управління якістю технічної підготовки виробництва з'єднань «метал+композит».

Завданням дослідження є створення математичної моделі управління процесами ТПВ, яка дозволяє використовувати її для різних типів КТР з'єднань і для різних цілей виробництва.

Методи дослідження. Використовують системно-функціональний, системно-вартісний методи, кваліметричний метод розрахунку кількісних показників властивостей усіх рівнів, метод перебору варіантів.

Прийняті припущення. Зі всього життєвого циклу продукції розглянуто тільки підготовчий етап – ТПВ. Умовно вважається, що вона складається з двох підетапів: конструкторської та технологічної підготовок. Решта підетапів не розглядається. Відповідно до цього враховують витрати тільки на розглянутих підетапах.

З усього комплексу властивостей, які присутні у технічній підготовці, розглядають тільки властивості, що в першу чергу впливають на досягнення цілі виробництва.

Технічні схеми, які розглядають у роботі. З усього ряду технічних рішень МКГЗ з трансверсальними кріпильними елементами розглядають три типи: з монолітними мікроелементами (МЕ), циліндричними, листовими МЕ (рис. 1) [1–5].

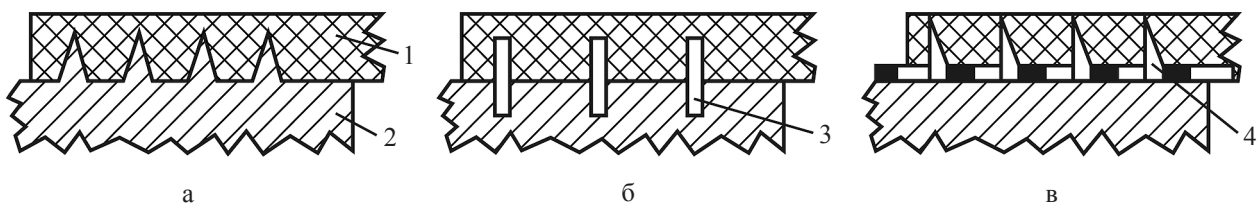


Рис. 1. Схеми розміщення трансверсальних кріпильних МЕ у з'єднаннях монолітних (а); циліндричних (б); листових (в) «метал+композит»:

1 – композитна деталь; 2 – металева з'єднувальна закінцівка;
3 – штифт; 4 – листовий проміжний елемент з відігнутими зубцями

У з'єднанні металева закінцівка передає потік зусиль за рахунок МЕ до композитної деталі. Штифти 3 можуть з'єднуватися з металевою закінцівкою зварюванням або посадкою з натягом у отвори в металевій закінцівці. Можливо нарощування штифтів шляхом адитивних технологій. Проміжний листовий елемент 4 з попередньо відігнутим зубцем з'єднується із закінцівкою зварюванням/паянням. Після впровадження зубців

у вологий композит проводять суцільну полімеризацію всього з'єднання.

При ТПВ необхідно обрати оптимальне рішення відповідно до цілей виробництва. Параметром оптимізації є комплексний показник $K_{\text{комп}}$ якості властивостей ланцюжка процесів, які дозволяють реалізувати визначене КТР з його технологічними вимогами:

$$K_{\text{комп}} \rightarrow \max.$$



Рис. 2. Склад технологічних процесів виготовлення різних варіантів КТР

Послідовність дій при ТПВ і склад технологічних процесів виготовлення різних варіантів КТР показано на рис. 2.

Вихідною інформацією для проведення ТПВ є: склад матеріалів з'єднання, його геометрія (пласке з'єднання, з'єднання вісесиметричних оболонок, з'єднання просторових оболонок довільної форми) та цілі виробництва. Цілі виробництва можуть бути різними: максимальна продуктивність, мінімальні терміни підготовки виробництва, мінімальні витрати енергії та ресурсів, максимальне використання існуючого обладнання та ін.

Важливим етапом ТПВ є відбір властивостей КТР, які забезпечують досягнення поставленої мети. З відомого переліку властивостей, які є пріоритетними для технічних пристроїв [2, 3], у використанні у виробі АКТ можливо виділити декілька груп властивостей (таблиця).

Група властивостей «несуча здатність» містить властивості міцності, деформативності, мікроструктури та властивості ваги

(маси) зі своїми відповідними показниками властивостей, які забезпечуються розмірами КТР. Групова властивість «надійність» містить властивості безвідмовності, довговічності, збереженості та ремонтпридатності (показники цих властивостей до таблиці не включено). Група властивостей «технологічності» містить показники трудомісткості виготовлення та ТПВ. Оцінка показника властивості «економічності» складається з показників питомих витрат ресурсів та відносної складності (вартості) обладнання.

Показники уніфікації визначаються кількістю використовуваних елементів конструкції КТР та уніфікованого технологічного оснащення. Показники спеціальних властивостей визначаються призначенням виробу (радіопрозорість, електропровідність та ін.).

Конкретні значення показників властивостей технологічності й економічності оцінювали за операціями ланцюжка техпроцесів формоутворення МЕ.

Таким чином, при управлінні ТПВ для оптимізації цього процесу необхідно оцінювати комплексний показник якості для різних варіантів КТР та за багатьма варіантами техпроцесів формоутворення МЕ. Потім методом послідовних наближень відповідно до цілей проекту приймають остаточне рішення. Цей процес досить трудомісткий.

Більш перспективним є процес комп'ютерного моделювання пошуку оптимального рішення за допомогою комплексної математичної моделі управління якістю. При її використанні оптимальність усього процесу досягається шляхом задавання найкращого з відомих показників одиничних властивостей та наступного формування комплексного показника.

Найбільш простим засобом забезпечення комплексності може вважатися положення кваліметрії [6–8].

Положення кваліметрії (стисло)

Кожна i -та властивість об'єкта може бути оцінена кількісно розмірним показником властивості Q_i . При цьому необхідно визначити найкраще значення подібної властивості (еталонне) Q_i^{et} та найгірше значення цієї властивості (бракувальне) Q_i^{br} . Тоді відносний безрозмірний показник i -тої властивості визначають у вигляді нормувальної функції $K_i = (Q_i - Q_i^{br}) / (Q_i^{et} - Q_i^{br})$ або за відсутності Q_i^{br} – за формулою $K_i = Q_i / Q_i^{et}$.

Дерево основних проектних властивостей інтегральних з'єднань

Комплексна проектна властивість	Групові показники		Одиничні показники	
	Несуча здатність	Міцнісні		→ $\sigma_{зсуб} m_{зсуб}^{\sigma}$ → $\sigma_{змін} m_{змін}^{\sigma}$ → $\sigma_{відр} m_{відр}^{\sigma}$ →
Деформаційні			→ $\varepsilon_{зсуб} m_{зсуб}^{\varepsilon}$ → $\varepsilon_{змін} m_{змін}^{\varepsilon}$ → $\varepsilon_{відр} m_{відр}^{\varepsilon}$ →	
Мікроструктурні			→ об'ємна густина армувального матеріалу → порушення геометрії структури	
Масова характеристика			Відношення маси металеві частини до маси всього з'єднання	
Надійність	Безвідмовність Довговічність → втомна міцність Збереженість Ремонтопридатність			
Технологічність	Трудомісткості виготовлення Тривалості ТПВ, $\bar{T}_{тпв}$		} Питомі значення на одиницю площини	
Економічність	Питомі витрати ресурсів		→ енергії → допоміжних матеріалів → виробничих площ	
	Відносна складність обладнання			
Універсальність				
Спеціальні	Радіопрозорість Електропровідність Теплові властивості Стійкість до іонізуючого випромінювання			
Ергономічні властивості	–			
Екологічні властивості	–			

Примітка: Тут символ m з відповідними індексами є ідентифікаційним показником властивості.

Для зіставлення за відносною важливістю (вагомністю) кожної властивості, що входить до «дерева властивостей», використовують безрозмірний коефіцієнт вагомості g_i за умови $0 \leq g_i \leq 1$. Як правило, беруть, що $\sum_{i=1}^n g_i = 1$. Коефіцієнти вагомості властивостей визначають за допомогою різновидів експертного й аналітичного методів.

Комплексний показник якості об'єкта визначають за формулою

$$K^{\text{комп}} = \varphi(K_i; g_i; K_{\text{эф}}),$$

де φ – функція згортки (середнє арифметичне, середнє геометричне, середньозважене та ін.); $K_{\text{эф}}$ – коефіцієнт збереження ефективності.

За допомогою такого математичного апарату можна оцінювати якість процесів.

Модель управління якістю ТПВ з'єднань «метал+композит»

Для оптимізації процесу підготовки, автоматизації виконання процедур необхідно синтезувати математичну модель управління якістю процесу. Тут прийнято, що оптимальному процесу (відповідно до обраної цілі) відповідає найвища якість.

У такій моделі слід визначати керувальні параметри однозначно й обрати такі, що

істотним чином впливають на вихідні параметри. Цим вимогам відповідає кваліметрична модель.

Для оцінки ефективності управління якістю шляхом керувального параметра, яким є коефіцієнт вагомості g_i порівнюємо процеси формоутворення МЕ на плоских закінцівках розміром 100x50 мм з 50 кріпильними елементами для матеріалів Al-сплав, сталь Fe-Cr-Ni та Ti-сплаву [9]:

П1 – стикове зварювання циліндричних МЕ;

П2 – встановлення циліндричних МЕ у отвори з натягом;

П3 – фрезерування монолітних МЕ торцевими фрезами;

П4 – електроерозійне вирізання монолітних МЕ;

П5 – формоутворення листових МЕ надрізанням і згинанням у штампі.

Порівняння проводили за двома параметрами: трудомісткість формоутворення та витрати енергії на формоутворення.

Конкретні параметри режимів різання, зварювання, штампування та інше обирали за машинобудівними довідниками для технологів [10–12].

Діаграму значень комплексного показника якості $K^{\text{комп}}$ залежно від трьох варіантів поєднання керувального параметра для розглянутих процесів і закінцівки з нержавіючої сталі подано на рис. 3.

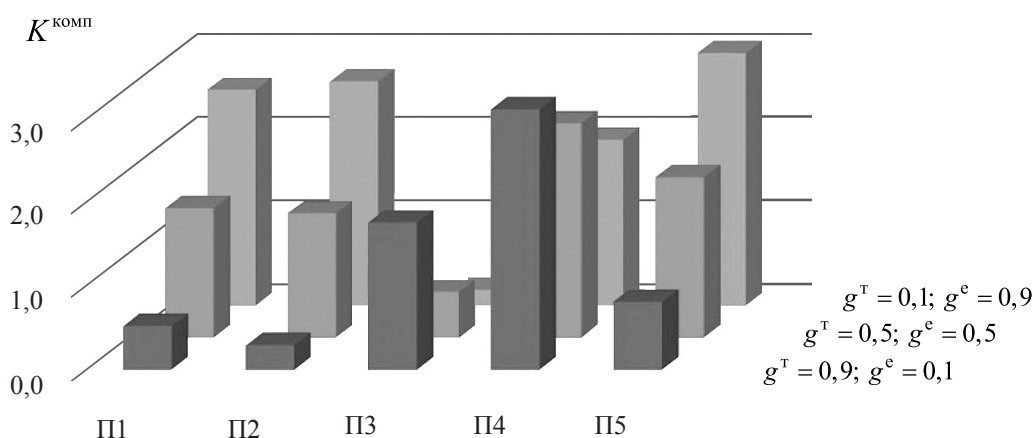


Рис. 3. Залежність комплексного показника якості $K^{\text{комп}}$ від типу технологічного процесу виготовлення мікроштифтів та співвідношення коефіцієнтів g^T та g^c (розрахунок проведено для випадку використання нержавіючої сталі):

коефіцієнти g^T та g^c означають коефіцієнти вагомості для розрахунку показника технологічності й економічності відповідно

Як видно з діаграми, діапазон зміни $K^{\text{комп}}$ знаходиться у межах 0,5...3,5 при діапазоні зміни $g_i = 0,1...0,9$. Такий діапазон управління параметром оптимізації при відомому діапазоні зміни параметра управління є досить задовільним.

Аналіз даних розрахунків і діаграми (див. рис. 3) говорить про те, що для умов дослідного виробництва при обліку тільки двох показників властивостей при виготовленні заготовок з алюмінієвих сплавів пріоритетним техпроцесом є фрезерування мікроштифтів торцевими фрезами. Фрезерування мікроштифтів на заготовках з титанових сплавів менш пріоритетно (за інших рівних умов). На другому місці за пріоритетом – технологічний процес утворення оштифтованих поверхонь шляхом установлення штифтів у отвори (для різних матеріалів).

Для виробництва, орієнтованого на мінімальні енерговитрати ($g^e = 0,9$), пріоритетним є процес фрезерування монолітних штифтів у всіх матеріалів, а менш пріоритетним можна вважати процес їхнього стикового зварювання. Процеси ерозійного розмірного оброблення в цьому випадку перебувають у середині послідовності пріоритетів.

Необхідно розуміти, що зроблені висновки отримані при аналізі тільки двох показників. Якщо є потреба в обліку інших властивостей процесів, наприклад, таких як можливість отримання профільованих мікроштифтів або за великих труднощів механічного оброблення застосовуваного матеріалу, необхідно використовувати експертний метод.

Висновки

Показано можливість управління якістю процесами ТПВ при використанні розробленої матмоделі управління процесом. Керувальними параметрами цієї моделі обрано коефіцієнти вагомості групових властивостей. Можна стверджувати, що залежно від поставленої мети виробництва обрані значення керувальних параметрів у діапазоні 0,1...0,9 забезпечують істотні зміни значення вихідного показника – комплексного показника якості процесу. Так, крайні значення інтегрального показника якості за логарифмічною шкалою для процесу кріплення МЕ

стиковим зварюванням дорівнюють 0,53 та 2,60, а для КТР з листовими МЕ – 0,82 та 3,04. Тобто вплив на модель обраних керувальних параметрів є достатньо ефективним.

Економічну ефективність виконаного розроблення слід оцінювати на основі комбінації методу аналогій і методу «знизу–вгору». Такий аналіз, проведений у вузькому діапазоні використовуваної авіаційної техніки й обмеженої кількості статистичних даних, свідчить про те, що при використанні розглянутих кріпильних елементів знижується «суха» маса літального апарата та вартість корисного навантаження.

На основі методу аналогій є передумови стверджувати, що оптимальне управління якістю процесами ТПВ дозволяє знизити витрати на виробництво та залучені ресурси.

Список використаної літератури

1. Karpov Ya. S. Soedineniya detalej i agregatov iz kompozicionnyh materialov. Har'kov: Nac. aerokosm. un-t im. N. E. ZHukovskogo «NAI», 2006. 359 с. ISBN 966-662-133-9.
2. Vorobej V. V., Sirotkin O. S. Soedineniya konstrukcij iz kompozicionnyh materialov. L.: Mashinostroenie, 1985. 168 p.
3. Bulanov I. M. Tekhnologiya raketnyh i aerokosmicheskikh konstrukcij iz kompozicionnyh materialov: ucheb. dlya vuzov. M.: MGTU im. N.E. Bauman, 1998. 516 p. ISBN 5-7038-1319-0.
4. 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. Vol. 59, Issue 4. P. 661–674. <https://doi.org/10.1002/pen.25022>.
5. 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, Vol. 12(8). Issue 1681. P. 1–40. <https://doi.org/10.3390/polym12081681>. <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/8/1681/htm>.
6. Azgaldov G. The ABC of Qualimetry Toolkit for measuring the immeasurable. G. Azgaldov, A. Kostin, A. 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.

7. Taranenko M. E. Kvalimetriya v listovoj shtampovke: uchebnik. Harkov: Nac. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «Hark. aviac. in-t», 2015. 133 s.

8. Ovodenko Anatolij, Ivakin Yan, Frolova Elena, Smirnova Maria. Qualimetric model for assessing the impact of the level of development of corporate information systems on the quality of aerospace instrumentation. SES-2020, E3S Web of Conferences 220, 01017 (2020). 5 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022001017>.

9. 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. P. 40–49.

10. Krivoruchko A. V. Mekhanicheskaya obrabotka kompozicionnyh materialov pri sborke letatel'nyh apparatav (analiticheskij obzor): 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.

11. Spravochnik tehnologa-mashinostroitelya. T. 1. Pod red. A. M. Dalskogo, A. G. Kosilovoj, R. K. Mesheryakova. M.: Mashinostroenie, 2003. 656 s.

12. Spravochnik tehnologa-mashinostroitelya. T. 2. Pod red. A. M. Dalskogo, A. G. Kosilovoj, R. K. Mesheryakova. M.: Mashinostroenie, 2003. 944 s.

Стаття надійшла 03.02.2024