УДК 621.7:629.78
DOI:10.62717/3083-7057-2026-1-110

Овчинникова А.К.,
Національний Аерокосмічний Університет
«Харківський Авіаційний Інститут»
ORCID 0009-0006-7614-5697
E-mail:a.k.ovchynnykova@student.khai.edu

Крицький Д.М.,
Національний Аерокосмічний Університет
«Харківський Авіаційний Інститут»
ORCID 0000-0003-4919-0194
E-mail:d.krickiy@khai.edu

КОМБІНОВАНИЙ СПОСІБ ВИРОБНИЦТВА У ВИГОТОВЛЕННІ СКЛАДНИХ УЗЛІВ АЕРОКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

Анотація. Розглянуто комбінований спосіб виробництва складних вузлів аерокосмічної техніки, що поєднує адитивні технології та механічну обробку. Описано основні технологічні етапи такого підходу та його відмінності від традиційних методів виготовлення. Наведено можливі напрями застосування комбінованих технологій у сучасному аерокосмічному машинобудуванні.
Ключові слова: аерокосмічна техніка; комбіноване виробництво; адитивні технології; механічна обробка; складні вузли.

A. Ovchynnykova,
National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»
ORCID 0009-0006-7614-5697
E-mail:a.k.ovchynnykova@student.khai.edu

D. Krytskyi,
National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»
ORCID 0000-0003-4919-0194
E-mail:d.krickiy@khai.edu

COMBINED METHOD OF MANUFACTURING IN THE PRODUCTION OF COMPLEX AEROSPACE TECHNOLOGY ASSEMBLIES

Annotation. A combined method for manufacturing complex aerospace technology components, combining additive technologies and mechanical processing, is considered. The main technological stages of this approach and its differences from traditional manufacturing methods are described. Possible areas of application for combined technologies in modern aerospace engineering are presented.

Keywords: aerospace technology; combined production; additive technologies; mechanical processing; complex assemblies.

Комбінований спосіб виробництва у виготовленні вузлів аерокосмічної техніки дозволяє поєднати переваги різних технологічних підходів і компенсувати їхні обмеження. Його застосування сприяє зменшенню маси конструкцій, скороченню кількості складальних елементів, розширенню конструкторських можливостей та спрощенню та прискоренню процесу виготовлення вузлів для складання БПЛА та іншої аерокосмічної техніки. Такий підхід є особливо ефективним для виробів зі складною геометрією та підвищеними вимогами до точності й надійності.

Для аерокосмічної галузі комбіноване виробництво є стратегічно важливим, оскільки дозволяє створювати складні вузли з оптимізованими малогабаритними характеристиками при збереженні високої механічної міцності та точності. Інтеграція функціональних елементів у межах одного вузла зменшує кількість з'єднань, що підвищує надійність конструкцій в умовах вібраційних і термічних навантажень, характерних для аерокосмічної експлуатації. Оцінка напружено-деформованого стану вузлів аерокосмічної техніки передбачається шляхом чисельного моделювання методом скінченних елементів з урахуванням вібраційних навантажень, характерних для аерокосмічної експлуатації [6]. Особлива увага приділяється зонам кріплення та стику деталей, які в традиційних конструкціях є потенційними концентраторами напружень. Крім того, скорочення кількості деталей і технологічних операцій позитивно впливає на строки виготовлення та виробничу гнучкість.

Адитивне виробництво має низку переваг, серед яких можливість формування складних просторових форм, внутрішніх каналів і топологічно оптимізованих структур, а також зменшення кількості деталей у складі вузла безпілотного апарату [1]. Водночас адитивні технології характеризуються обмеженою точністю, підвищеною шорсткістю поверхонь і нестабільністю геометричних параметрів, що ускладнює їх використання для відповідальних посадкових і контактних поверхонь. Традиційне виробництво, зокрема механічна обробка, забезпечує високу геометричну точність, дотримання жорстких допусків і необхідну якість поверхонь, однак має обмеження щодо виготовлення складних форм, внутрішніх порожнин та інтегрованих елементів і часто супроводжується значними матеріальними втратами [2].

Поєднання адитивного та традиційного виробництва дозволяє раціонально розподілити технологічні функції між етапами виготовлення космічних апаратів. Адитивні технології доцільно застосовувати на початкових етапах для формування заготовок або окремих функціональних елементів складної геометрії. Традиційна механічна обробка використовується на наступних етапах для досягнення необхідних допусків, забезпечення геометричної точності, якості контактних поверхонь і остаточного доопрацювання вузлів [4]. Такий підхід забезпечує оптимальне

поєднання конструктивної складності та експлуатаційних характеристик безпілотних апаратів [3].

Комбінований спосіб виробництва може бути застосований при виготовленні корпусних елементів, кронштейнів, силових і теплообмінних вузлів, елементів систем охолодження та кріплення аерокосмічної техніки. Його використання відкриває перспективи підвищення ефективності виробництва, зниження маси виробів і розширення можливостей сучасного аерокосмічного машинобудування [5].

Дослід спрямований на оцінку впливу комбінованого способу виробництва на надійність вузлів аерокосмічної техніки в умовах вібраційних навантажень. У межах роботи передбачається порівняння двох конструктивно подібних варіантів вузла: традиційного збірного, виготовленого з окремих деталей із застосуванням механічних з'єднань, та комбінованого, у якому основні елементи інтегровані в єдину конструкцію шляхом адитивного виготовлення з подальшою механічною обробкою функціональних поверхонь.

За результатами проведеного досліду встановлено, що комбінований варіант вузла характеризується більш рівномірним розподілом напружень і зниженням їх пікових значень за рахунок зменшення кількості з'єднань та інтеграції функціональних елементів. Отримані результати підтверджують доцільність застосування комбінованого виробництва для підвищення надійності та довговічності складних вузлів аерокосмічної техніки.

Бібліографічні посилання

1. Dhanesh G. Mohan, Saiyathibrahim A., Gopi S., Vijaykumar S. Jatti, Kumar S., Murali Krishnan R. Additive manufacturing for space applications: a review of materials, methods, and future frontiers. 2025. China Welding. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cwe.2025.100010
2. Peron M., Agnusdei L., Miglietta P. P., Agnusdei G. P., Finco S., A. Del Prete Additive vs conventional manufacturing for producing complex systems: A decision support system and the impact of electricity prices and raw materials availability. 2024. Computers & Industrial Engineering. Volume 194. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110406
3. Ben Said L., Ayadi B., Alharbi S., Dammak F. Recent Advances in Additive Manufacturing: A Review of Current Developments and Future Directions. 2025. Machines 13. no. 9:813. стор. 21-22. DOI: https://doi.org/10.3390/machines13090813
4. Liao Z., Schoop J. M., Saelzer J., Bergmann B., Priarone P. C., Splettstößer A., Bedekar V. M., Zanger F., Kaynak Y. Review of current best-practices in machinability evaluation and understanding for improving machining performance. 2024. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, volume 50, pg. 151-184. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.02.008
5. Freitas B., Richhariya V., Silva M., Vaz A., Lopes S. F., Carvalho Ó. A Review of Hybrid Manufacturing: Integrating Subtractive and Additive

Manufacturing. 2025. Materials 18, no. 18: 4249, стор. 24 - 26 DOI: https://doi.org/10.3390/ma18184249

6. Mane S. Review Study on Finite Element Analysis Method Used for Aerospace Structure Applications. 2023. International Journal of New Media Studies, volume 10, 8-13. стор. 9-10.