DOI https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-24
УДК 629.7.023.2:658.5

Ю. Б. Юніс, канд. техн. наук ORCID: 0000-0002-5693-6954
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
e-mail: docbasheer01@gmail.com

ФІНАНСОВА ДОЦІЛЬНІСТЬ, ЕКОЛОГІЧНИЙ ВПЛИВ ТА ВИБІР ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ВОЛОКНИСТО-АРМОВАНИХ АЕРОКОСМІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Анотація. Незважаючи на добре задокументовані структурні переваги армованих волокном полімерних композитів в аерокосмічній галузі, їх фінансові та екологічні характеристики нині привертають дедалі більшу увагу авіакомпаній, регуляторів і ринків капіталу. У статті досліджуються конструкції з ВПВУ (вуглецево-волокнистого полімерного з'єднувача) та СВВУ (скловолокнистого полімерного з'єднувача) за трьома взаємопов'язаними напрямами: загальна вартість життєвого циклу, екологічне навантаження та ефективність виробничого процесу. Порівняльний аналіз витрат за 20-річним операційним горизонтом демонструє, що підвищені початкові витрати на ВПВУ – на закупівлю матеріалів і виробництво – повністю відшкодовуються завдяки економії палива внаслідок зменшення структурної маси, як правило, впродовж двох–п'яти років авіаексплуатації. З екологічного боку виробництво ВПВУ несе значне вбудоване енергетичне навантаження (близько 2 800 МДж на компонент), яке компенсується через дев'ять років служби. Неможливість утилізації вуглецевого волокна з термореактивних конструкцій ВПВУ наприкінці строку служби визначена як ключова невирішена проблема сталого розвитку. Структурована оцінка трьох виробничих процесів – ручного укладання, автоматичного укладання волокна (АУВ) та трансферного формування смоли (ТФС) – за шістьма критеріями надає практичні рекомендації щодо вибору процесу залежно від обсягу виробництва та геометричної складності.

Ключові слова: аналіз вартості життєвого циклу, екологічна оцінка ВПВУ, вуглецевий слід, автоматичне укладання волокна, трансферне формування смоли, багатоцільова оптимізація, утилізація наприкінці строку служби, аерокосмічні композити.

Постановка проблеми. Протягом більшої частини історії комерційної авіації основним обґрунтуванням застосування композиційних матеріалів у первинній конструкції літаків слугував єдиний критерій – структурні характеристики на одиницю маси. Аерокосмічна промисловість завжди прагнула до зменшення маси конструкцій, оскільки кожен заощаджений кілограм безпосередньо скорочує витрату палива протягом сотень тисяч льотних годин. Проте комерційне та регуляторне середовище, в якому нині проєктуються, виготовляються і експлуатуються літаки, суттєво ускладнилося.

Авіакомпанії стикаються з волатильністю цін на паливо, розширенням систем вуглецевого ціноутворення та посиленою увагою зацікавлених сторін до сукупного екологічного впливу їхнього флоту. Виробники оригінального обладнання зазнають тиску з боку таких механізмів, як CORSIA та Європейський зелений курс, щодо необхідності підтверджувати скорочення викидів вуглецю протягом усього життєвого циклу, а не лише операційні показники витрати палива. Таким чином, обґрунтування будь-якого застосування конструкційних композитів більше не може спиратися виключно на показники економії маси: воно вимагає суворого повноланцюгового аналізу, що охоплює фінансові витрати, вбудовану енергію та долю матеріалів після закінчення строку служби – від першого виробництва волокна до остаточної утилізації.

Аналіз останніх досліджень. Питання повного оцінювання вартості життєвого циклу композиційних матеріалів у аерокосмічній галузі розглядалися в низці фундаментальних публікацій.

Y. S. Song, J. R. Youn та T. G. Gutowski [2] провели детальний аналіз енергії життєвого циклу армованих волокном композитів, встановивши базові показники для порівняння з металевими альтернативами. M. K. Hagnell та M. Åkermo [3] дослідили економічну ефективність і масову ефективність композитних та алюмінієвих конструкцій, показавши, що довгостроковий підхід змінює початкові висновки про перевагу металів. Проблематику переробки вуглецевих волокон у конструкційних застосуваннях системно висвітлено в роботах S. Pimenta та S. T. Pinho [1], а також R. A. Witik зі співавторами [5], які описали технологічні обмеження методів піролізу та сольволізу. S. Das [6] здійснив комплексну оцінку життєвого циклу полімерних композитів, армованих вуглецевим волокном. Стратегічний контекст сталого розвитку окреслено в «Плані дій щодо циркулярної економіки» Європейської комісії [7] та методологічному звіті ATI FlyZero [8]. R. E. Murray зі співавторами [10] дослідили можливості низьковитратного вуглецевого волокна з біомаси. Попри значну кількість досліджень з окремих аспектів, інтегрований підхід, що одночасно охоплює фінансовий, екологічний і технологічний виміри з використанням багатоцільової оптимізації, залишається не досить розробленим у науковій літературі, що й зумовлює актуальність цього дослідження.

Формулювання цілей статті. Метою цієї статті є комплексна оцінка волокнисто-армованих аерокосмічних конструкцій ВПВУ та СВВУ за трьома взаємопов'язаними вимірами: повна фінансова вартість життєвого циклу порівняно з металевими конструкціями протягом репрезентативного терміну служби; екологічний профіль життєвого циклу з урахуванням як виробничих енергетичних витрат, так і операційних gains ефективності, які їх поступово компенсують; порівняльні можливості трьох виробничих процесів. Ці виміри інтегруються в рамках багатоцільової оптимізації за методом Парето для формального картографування простору компромісів для конструктора, який прагне одночасно балансувати між механічними характеристиками, вартістю та вуглецевим впливом.

Основна частина. **Аналіз вартості життєвого циклу: повна фінансова картина. Чому просте порівняння вартості закупівлі вводить в оману.** Порівняння вартості закупівлі за кілограм ВПВУ авіаційного класу (зазвичай 30–90 USD/кг залежно від специфікації та ринкової кон'юнктури) з вартістю алюмінієвого сплаву близько 2–5 USD/кг видається переконливим аргументом проти використання композитів. Однак таке порівняння надзвичайно неповне: воно враховує лише витрати на сировину в момент закупівлі, ігноруючи всі фінансові наслідки після введення літака в комерційну експлуатацію. За 20-річний строк служби у разі типового завантаження авіакомпанії структурна перевага ВПВУ у масі над алюмінієм генерує сукупну економію палива, яка у рази перевищує різницю у вартості матеріалів.

На рис. 1 подано розбивку вартості життєвого циклу для ВПВУ, СВВУ та алюмінію за репрезентативним 20-річним операційним горизонтом із використанням нормалізованих індексів вартості. Аналіз розкладає загальні витрати за 4 складниками: закупівля сировини, виготовлення та складання, технічне обслуговування протягом 20 років, а також фінансовий кредит від економії палива, зумовленої зменшенням структурної маси (рис. 1).

Результат, наведений у табл. 1, зазвичай дивує інженерів, які вперше знайомляться з аналізом вартості життєвого циклу: попри те, що сировина ВПВУ коштує більш ніж у чотири рази дорожче за алюміній за кілограм, конструкція з ВПВУ забезпечує сукупну вартість ЖЦ менш ніж удвічі нижчу порівняно з алюмінієм. Рядок економії палива є вирішальним чинником: сучасний вузькофюзеляжний авіалайнер нараховує 3 500–4 500 льотних годин на рік; скорочення структурної маси навіть на кілька сотень кілограмів через використання композитів дає за поточними цінами на авіаційне паливо суттєву щорічну економію на одне повітряне судно. Накопичена за 20 років ця економія впевнено перевищує комбіновану надбавку ВПВУ над алюмінієм за матеріалами, виготовленням та технічним обслуговуванням.

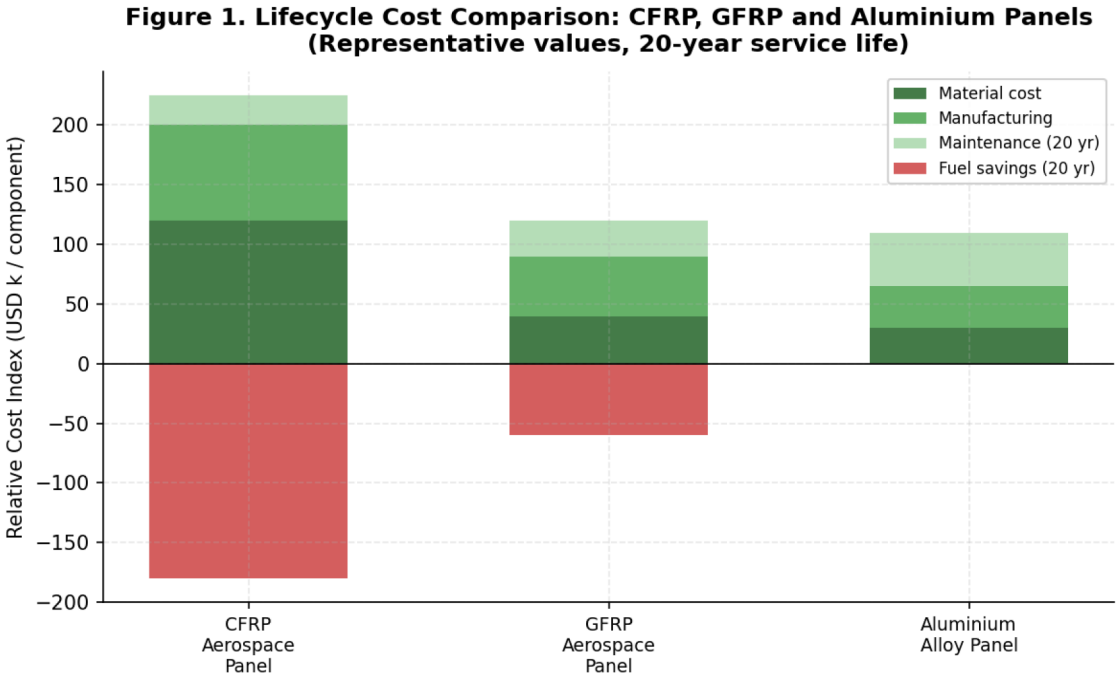

Рис. 1. Розбивка вартості життєвого циклу для ВПВУ, СВВУ та алюмінієвих аерокосмічних панелей за 20-річним операційним горизонтом (нормалізовані індексні значення). Кредит від економії палива (показаний як від'ємний стовпець) є визначальним чинником для ВПВУ, що перекриває підвищені витрати на матеріали та виробництво

Таблиця 1

Індекс вартості життєвого циклу за матеріалом і компонентом витрат
(алюміній = 100 за базовим рівнем)

Компонент витрат	ВПВУ	СВВУ	Алюміній	Одиниці
Закупівля сировини	120	40	30	Індекс
Виготовлення та складання	80	50	35	Індекс
Технічне обслуговування (20 р.)	25	30	45	Індекс
Економія палива (20 р.)	−180	−60	0	Індекс
Загальна вартість ЖЦ	45	60	110	Індекс

Строки окупності та аналіз чутливості. Точка окупності – рік, коли накопичена економія палива дорівнює накопиченій вартісній надбавці ВПВУ над алюмінієм, є ключовою змінною в економіці авіаційних програм. Для основних конструктивних компонентів на вузькофюзеляжних платформах з високим завантаженням ця межа зазвичай досягається впродовж двох–п'яти років після введення в експлуатацію залежно від компонента, величини досягнутої економії маси та поточного рівня цін на паливо. СВВУ займає окрему позицію: вартість матеріалів і виробництва значно нижча, ніж для ВПВУ, однак і зменшення маси порівняно з алюмінієм менше, що призводить до пропорційно скромнішого паливного кредиту.

Екологічна оцінка життєвого циклу. Енергетичне навантаження на етапі виробництва. Екологічні переваги композитів в аерокосмічній галузі ускладнюються структурною асиметрією: екологічні виграші від їхнього використання – скорочення витрати палива та відповідних викидів – накопичуються поступово впродовж років служби, тоді як екологічні витрати – вбудована енергія та вуглець на виробничому етапі – несуться авансом. Виробництво вуглецевого волокна є домінуючим чинником екологічного навантаження виробничого етапу. Перетворення поліакрилонітрильного прекурсора на безперервне армуюче волокно через

окисну стабілізацію та карбонізацію за високої температури споживає від 183 до 286 МДж на кілограм волокна залежно від сорту і конфігурації процесу. З урахуванням інфузії смоли, енергії консолідації та контролю якості загальна вбудована енергія аерокосмічного компонента з ВПВУ досягає приблизно 2 500–3 000 МДж на одиницю виробу. Для порівняння виготовлення еквівалентного компонента з алюмінієвого сплаву з первинного виплавлення потребує приблизно 1 200–1 600 МДж.

Незважаючи на вищу вартість виробничої енергії, ВПВУ досягає паритету енергії ЖЦ з алюмінієм приблизно через дев'ять років авіаексплуатації і після цього накопичує зростаючу чисту енергетичну перевагу. Наприкінці 20-річного терміну служби сукупна перевага ВПВУ над алюмінієм є значною і підтверджує екологічне обґрунтування для використання композитів (рис. 2).

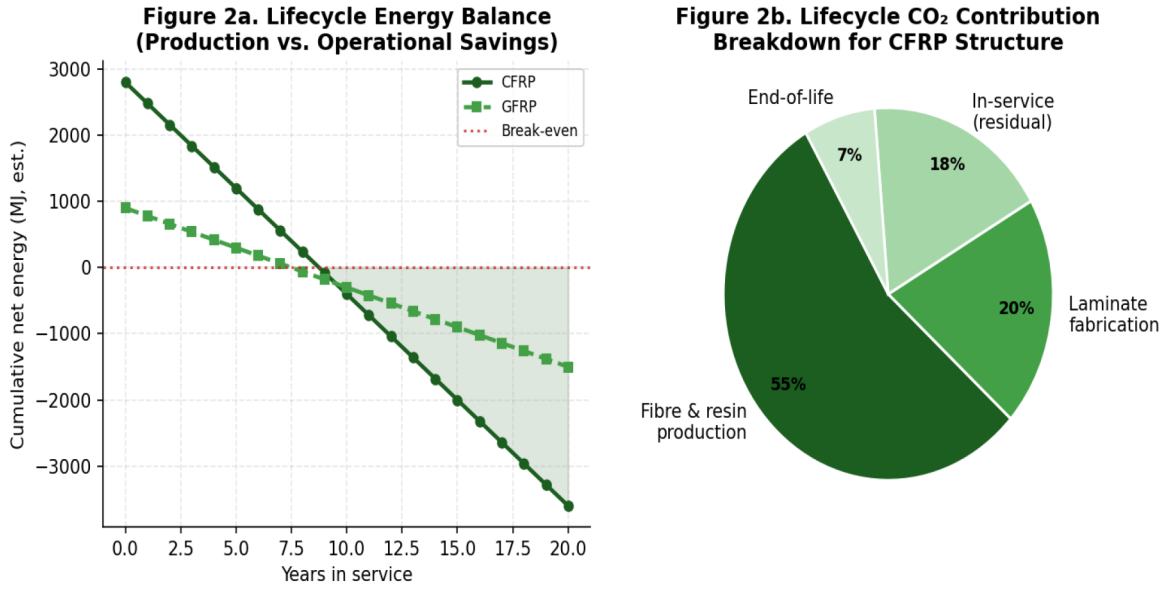

Рис. 2. Зліва: кумулятивний енергетичний баланс для ВПВУ та СВВУ стосовно базового рівня алюмінію. Операційна економія енергії поступово компенсує виробничі витрати, досягаючи беззбитковості приблизно через дев'ять років для ВПВУ. Справа: розподіл викидів CO_2 за фазами ЖЦ для репрезентативного аерокосмічного компонента з ВПВУ

Кінець строку служби: невирішена проблема сталого розвитку. Сучасні конструкції з термореактивного ВПВУ є практично невідновними після закінчення терміну служби в будь-якому економічно значущому сенсі. Зшита епоксидна мережа не піддається тепловій переробці, а два основні методи відновлення волокна – піроліз і сольволіз – або порушують поверхневу цілісність відновленого волокна зі зниженням його механічних властивостей, або вимагають витрат енергії та хімічних речовин, що непропорційні вартості отриманого матеріалу. Практичний наслідок полягає в тому, що більшість відпрацьованих композитних конструкцій подрібнюється та відправляється на сміттєзвалище.

Дві технологічні траєкторії пропонують правдоподібні шляхи до більш циркулярного ЖЦ композитів. Термопластичні матричні композити – з матрицями PEEK, PPS або PEKK, що можуть плавитися та переформовуватися, вже використовуються у вторинних аероструктурах і забезпечують справжню переробку наприкінці строку служби. Друга траєкторія передбачає матеріали-прекурсори біологічного походження для вуглецевого волокна: лігнінові та целюлозні вуглецеві волокна були продемонстровані на рівні лабораторних і пілотних установок.

Вибір виробничого процесу. Ландшафт виробництва аерокосмічних композитів. Механічні характеристики готового композитного компонента та вартість його виробництва визна-

чаються не лише специфікацією матеріалу, а й технологічним маршрутом, що використовується для перетворення сировини на сертифіковану несучу конструкцію. Три процеси охоплюють більшість аерокосмічного виробництва композитів і разом перекривають весь діапазон обсягів виробництва, геометрії деталей і вимог до якості: ручне укладання, автоматичне укладання волокна (АУВ) та трансферне формування смоли (ТФС). На рис. 3 порівнюються ці три процеси за шістьма критеріями ефективності.

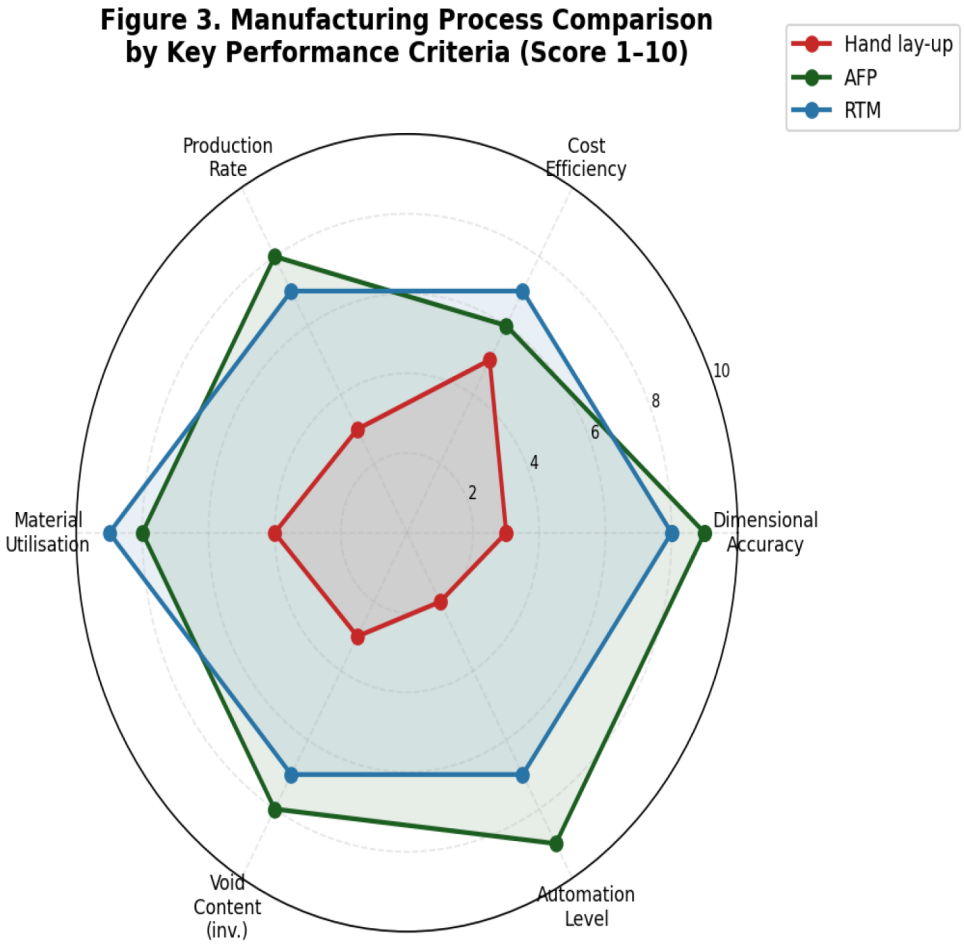

Рис. 3. Радарна діаграма порівняння ручного укладання, АУВ та ТФС за шістьма критеріями ефективності виробничого процесу (за шкалою від 1 до 10). АУВ отримує найвищі оцінки за рівнем автоматизації та темпом виробництва; ТФС лідирує за ефективністю використання матеріалів і точністю розмірів

Таблиця 2

Оцінки ефективності виробничих процесів (1 = погано, 10 = відмінно)

Критерій ефективності	Ручне укладання	АУВ	ТФС
Точність розмірів	3	9	8
Економічна ефективність	5	6	7
Темп виробництва	3	8	7
Використання матеріалів	4	8	9
Контроль пористості	3	8	7
Рівень автоматизації	2	9	7

Профіль характеристик ручного укладання відображає його фундаментальну залежність від кваліфікованої ручної праці. Для прототипів, одиничних компонентів або ремонтних нашарувань ручне укладання залишається єдиним практично доступним маршрутом. За темпів виробництва, що перевищують кілька компонентів на тиждень, його технічні та економічні обмеження стають критичними.

АУВ – рішення для первинних конструкцій великосерійного виробництва. Автоматичне укладання волокна докорінно змінило економіку великих основних конструктивних елементів з композитів, коли вперше було впроваджено у виробництво фюзеляжних секцій Boeing 787. Машина АУВ наносить джгути волокна з контрольованою швидкістю укладання 25–100 кг/год із точністю кута волокна до ±0,5° і може слідувати складним поверхням подвійної кривизни. Капітальні витрати на впровадження АУВ – від 5 до 15 млн євро на осередок плюс значні зусилля на програмування для кожної нової деталі – означають економічну доцільність лише для програм з великими обсягами серійного виробництва.

ТФС – точність, геометрія чистої форми та ефективність матеріалів. Трансферне формування смоли вирішує клас проблем, з якими АУВ справляється гірше: закриті перетини, геометрично складні тривимірні кронштейни та з'єднувальні елементи, а також компоненти, де контрольована якість поверхні на обох гранях є функціональною вимогою. ТФС впорскує рідку смолу під контрольованим тиском у закрите оснащення, що містить попередньо розміщену суху заготовку волокна, виготовляючи деталі з чудовою повторюваністю розмірів на обох інструментальних поверхнях та високими, рівномірними об'ємними частками волокна. Ефективність використання матеріалів є особливою перевагою: заготовки з формою, близькою до чистової, генерують мінімальні відходи обрізки.

Багатоцільова оптимізація: формальне балансування конкуруючих вимог. Коли кожен зі структурних, фінансових і екологічних аналізів попередніх розділів розглядається окремо, він вказує на чітко переважне поєднання матеріалів і процесів. На практиці проєктування авіаційних конструкцій одночасно обмежено вимогами з усіх трьох областей, і рішення, що є глобально оптимальним для однієї цільової функції, рідко досяжне в реальному багатообмеженому просторі проєктування. Багатоцільова оптимізація забезпечує строгу аналітичну основу для навігації цими конкуруючими вимогами (рис. 4).

Конфігурації, що лежать всередині хмари точок, є домінованими – існують покращені проєкти, які одночасно підвищують і структурну ефективність, і ефективність вартості ЖЦ. Три позначені конфігурації представляють практично здійсненні стратегії: первинна конструкція з ВПВУ, що максимізує структурну ефективність за найвищого індексу вартості ЖЦ; вторинна конструкція зі СВВУ, що мінімізує вартість за нижчої структурної ефективності; та гібрид ВПВУ/СВВУ у середній частині фронту Парето.

Висновки. За результатами комплексного оцінювання волокнисто-армованих аерокосмічних конструкцій з фінансового, екологічного та виробничого поглядів можна сформулювати п'ять ключових висновків.

По-перше, за 20-річним операційним горизонтом ВПВУ забезпечує чисту вартість ЖЦ, суттєво нижчу від алюмінієвого сплаву, незважаючи на вищі витрати на закупівлю та виробництво, з фінансовою беззбитковістю, що зазвичай настає впродовж 2–5 років авіаексплуатації.

По-друге, з екологічного боку значна вбудована виробнича енергія ВПВУ (приблизно 2 500–3 000 МДж на компонент) потребує приблизно дев'яти років операційної економії палива для амортизації стосовно базового рівня алюмінію.

По-третє, термопластичні матричні композити та вуглецеві волокна на основі біопрекурсорів є двома найбільш обґрунтованими технологічними траєкторіями в напрямі більш циркулярних ЖЦ композитів у найближчій перспективі.

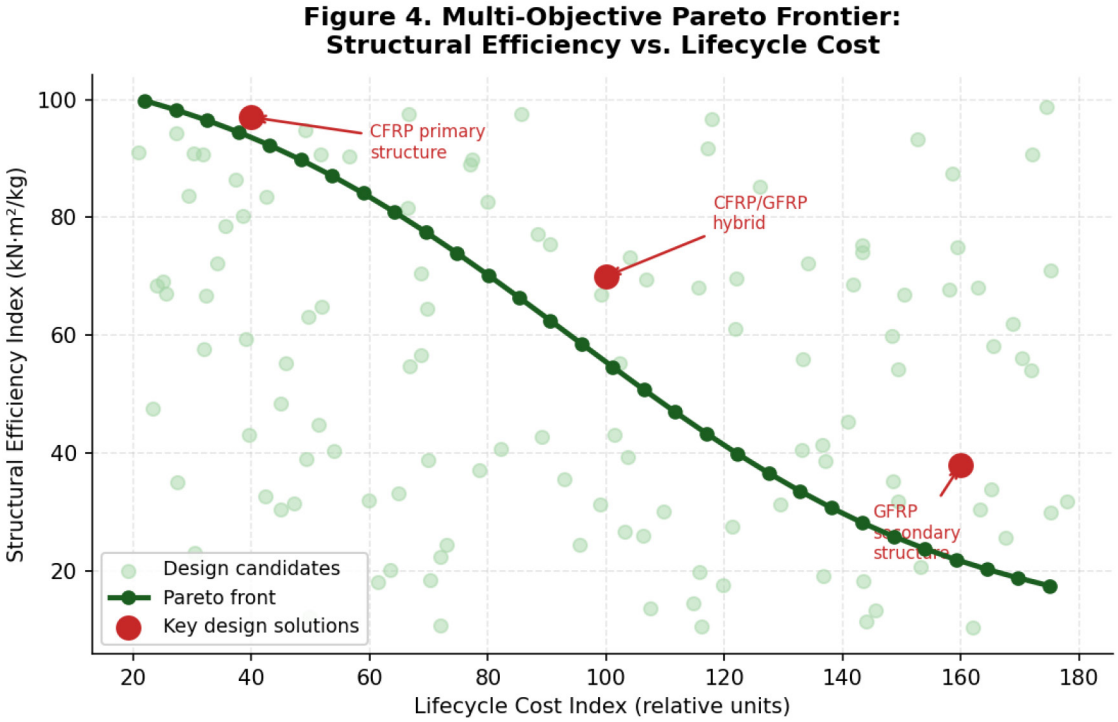

Рис. 4. Багатоцільова крива Парето для проєктування аерокосмічних панелей з композитів, що зіставляє індекс структурної ефективності з індексом вартості ЖЦ. Три репрезентативні конфігурації позначені: первинна конструкція з ВПВУ (пікова структурна ефективність), гібрид ВПВУ/СВВУ (збалансований компроміс) та вторинна конструкція із СВВУ (мінімальні витрати)

Таблиця 3

Зведена комплексна оцінка матеріалів і варіантів процесів

Вимір оцінки	ВПВУ	СВВУ	Алюміній	Кращий варіант
Структурна ефективність	★★★	★★	★	ВПВУ
Вартість закупівлі матеріалів	★	★★	★★★	Алюміній
Економія палива (20 р.)	★★★	★★	–	ВПВУ
Чиста вартість ЖЦ	★★★	★★	★	ВПВУ
Вироб. енергія (менше = краще)	★	★★	★★	Алюміній/СВВУ
Придатність до переробки	★	★	★★★	Алюміній

По-четверте, у виборі виробничого процесу АУВ і ТФС пропонують вирішальні переваги перед ручним укладанням для великосерійного виробництва первинних конструкцій; вибір між АУВ і ТФС визначається геометрією деталі та вимогами до якості поверхні.

По-п’яте, багатоцільовий аналіз Парето підтверджує, що існують конструктивні рішення, які одночасно покращують структурну ефективність, ефективність вартості ЖЦ та екологічні показники. Підтримання актуальної кількісної моделі Парето є постійним стратегічним обов’язком для будь-якої програми розробки аерокосмічних конструкцій з композитів.

Список використаних джерел

1. Pimenta S., Pinho S. T. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste Management*. 2011. Vol. 31. No. 2. P. 378–392. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.09.019

2. Song Y. S., Youn J. R., Gutowski T. G. Life cycle energy analysis of fibre-reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2009. Vol. 40. No. 8. P. 1257–1265. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.05.020

3. Hagnell M. K., Åkermo M. The economic and weight efficiency of composite and aluminium structures in aerostructures. *Composite Structures*. 2015. Vol. 131. P. 581–592. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.06.019

4. Duflou J. R. et al. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals*. 2012. Vol. 61. No. 2. P. 587–609. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.05.002

5. Witik R. A. et al. Carbon fibre reinforced composite waste: An environmental assessment of recycling, energy recovery and landfilling. *Composites Part A*. 2013. Vol. 49. P. 89–99. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.02.009

6. Das S. Life cycle assessment of carbon fibre-reinforced polymer composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 55. No. 5. P. 421–431. DOI: 10.1007/s00170-010-3053-3

7. European Commission. Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe. COM/2020/98. Brussels, 2020. URL: https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/

8. Aerospace Technology Institute. FlyZero: Lifecycle Carbon Methodology for Next-Generation Aircraft. ATI Report FZO-CST-REP-0062. Cranfield, 2023. URL: https://www.ati.org.uk/flyzero

9. Ermanni P. Composites Technologien. ETH Zurich Lecture Notes. Zurich, 2006.

10. Murray R. E. et al. Low-cost carbon fibre from biomass-derived precursors. *Composites Science and Technology*. 2020. Vol. 200. P. 108421. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108421

Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

Yu. Yunis

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"

FINANCIAL VIABILITY, ENVIRONMENTAL IMPACT AND MANUFACTURING PROCESS SELECTION FOR FIBRE-REINFORCED AEROSPACE STRUCTURES

Summary

While the structural merits of fibre-reinforced polymer composites in aerospace have long been established, their financial and environmental credentials are now attracting equally rigorous scrutiny from airlines, regulators and capital markets. This article evaluates CFRP and GFRP aerospace structures across three interconnected dimensions: total lifecycle cost, environmental burden and manufacturing process performance. A comparative cost analysis spanning a 20-year operational horizon demonstrates that the elevated upfront expenditure associated with CFRP is comprehensively recovered through fuel savings arising from structural weight reduction, typically within two to five years of entering airline service, ultimately delivering a net cost advantage that substantially undercuts aluminium alloy alternatives. On the environmental side, CFRP production carries a substantial embedded energy cost (approaching 2 800 MJ per component) that must be progressively paid back through in-service fuel efficiency gains, with full energy break-even achieved at roughly nine years. The inability to recover high-value carbon fibre from end-of-life thermoset components at economically viable cost is identified as the central unresolved sustainability challenge, with thermoplastic matrix systems and bio-derived fibre precursors representing the most credible near-term responses. A structured evaluation of hand lay-up, automated fibre placement and resin transfer moulding against six performance criteria provides actionable process selection guidance.

Keywords: lifecycle cost modelling, CFRP sustainability, carbon footprint assessment, automated fibre placement, resin transfer moulding, multi-objective optimisation, end-of-life recovery, aerospace composites.