

Альтернативні технології композитних високонавантажених авіаконструкцій: якісний метод прийняття багатокритеріальних рішень I частина. Початкові етапи в задачі прийняття

Д.С. Ківа¹ • В.Ф. Забашта²

Received: 01 April 2021 / Accepted: 25 October 2021

Анотація. Зіставлення за ефективністю (суттєвістю, корисністю) на основі якісного методу прийняття рішень, автоклавних і безавтоклавних технологій виготовлення вуглепластикових авіаконструкцій (АК) типу панелей крила магістральних літаків B787, A350, MC-21, CSeries.

Визначені відмінності та переваги в серійному виробництві препрегово – автоклавних та інфузійних (VARTM) технологічних процесів (ТП). Порівняння проведено на достатній презентаційній базі критеріїв двох рівнів з застосуванням комбінаторного та декомпозиційного методів дослідження. Кожен варіант ТП характеризується оцінками по критеріям вибору, бальні числа яких складають вектор, а в загальному складі визначають векторну оцінку варіанта ТП. Тут зазначені якісні важливості критеріїв, в тому числі і на основі суджень спеціалістів, як прототип, щодо думки особи, що приймає рішення (ЛПР). Показано, що кожен варіант має свої межі порівняльності та практичного застосування.

Ключові слова: технологічні системи, кесон крила, стрингерна панель, ПКМ, альтернативи, препрег, інфузія, критерії, превалювання, векторна оцінка.

Вступ

В статті йдеться про вирішення складної задачі порівняння за ключовими техніко-виробничими напрямками конкурентоспроможних виробів альтернативних процесів (АТП) в розрізі проблематики їх якісно-бального співозцінювання. В статті розглядається три варіанти АТП з позначеннями буквою V та з верхніми цифровими позначеннями відповідно 1, 2, 3, тоді: $V = \{v^1, v^2, v^3\}$. В дужках v^1 – препрегово-автоклавний (B787, A350) тобто, перший варіант (традиційна технологія); v^2 – преформово-інфузійний альтернативно-інноваційний процес (MC-21), як головний альтернативний варіант (відсутні препреги та автоклавне формування); а також проміжний між цими двома-преформово-автоклавний, тобто третій варіант v^3 (CSeries). Також широко поширене позначення варіантів АТП буквою A , тобто $A = \{A^1, A^2, A^3\}$. Перший чи другий

спосіб позначення варіантів будуть залучатися по зручності “за місцем”. Питанню зіставлення за ефективністю автоклавних і безавтоклавних ТП присвячена помітна кількість робіт [1–8].

Але більшість з них мають несистемний уривчастий (нечіткий) характер, некоректні порівняння, недостатнє обґрунтування посилок та висновків і часто на тлі особистих уподобань авторів цих робіт.

В розрізі вищевказаного, червоною ниткою крізь статтю проходить тема вибору превалюючого варіанта АТП при зіставленні в серійному виробництві традиційних і навіть базових (з 70-х років авіабудування) препрегово-автоклавних і новітнього штибу преформово-інфузійних технологій з різноспрямованими перевагами між ними.

В сучасних умовах вироблення рішень на основі досвіду, знань та інтуїції в ряді випадків вже недостатньо. Тому з'явилися нові прикладні напрямки та дисципліни: дослідження операцій, теорія прийняття рішень, системний аналіз, водночас, часто з ефективним використанням інформаційно-обчислювальної техніки.

Але у випадку винятково складної проблеми, її новизні, недостатньої наявної інформації, неможливості математичної формалізації рішення, приходиться звертатись до рекомендацій спеціалістів (експертів).

✉ V. F. Zabashta
mimi@kpi.ua

¹ Національна академія наук України, ЗАТ “Азербайджанські авіалінії”, (AZAL), м. Баку, Азербайджан

² АТ “Український науково-дослідний інститут авіаційної технології” (УкрНДІАТ), м. Київ, Україна

Таким чином, в статті йдеться про задачу прийняття рішень (ЗПР) для визначення превалюючого варіанта серед АТП виготовлення вуглепластикових авіаконструкцій (АК), а саме високонавантажених стрингерних панелей (ВСП) кесона крила магістральних літаків [1–9]. Тобто ЗПР визначається відношенням переваги. Таким чином, основною характеристикою цілі є пов'язана з нею перевага на множині можливих альтернатив. Йдеться про якісний метод оцінки, коли можна сказати, що є краще, а що гірше. Кожен варіант АТП являє собою технологічну систему різнопланових процесів (ТСРП), яка є складною провідною (активною) частиною сумісної конструктивно-технологічної системи (СКТС). Водночас, проектування та функціонування складних систем неможливо без врахування їх багатоаспектної якості, насамперед, надійності АК та ТП [11–13]. А тут лише зазначимо, що ці технологічні системи (ТС) є багатостадійними, де кожна стадія відзначається своєю якістю та надійністю.

Тобто стаття присвячена актуальній проблемі сучасного авіабудування – розширеного застосування високоефективних полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) у відповідальних АК [9, 10 та ін.].

Щодо сучасних загальних організаційно-виробничих питань, то зазначене ТСРП виконується у спеціально пристосованому виробничому підрозділі. Вказана ТСРП визначається сукупністю проміжних ціле-направлено пов'язаних між собою часткових (тільки один вид обробки) багатоопераційних техпроцесів (ЧТП), що виконується на відповідних ділянках корпусної структури і забезпечують виготовлення ПКМ та проміжних продуктів готового виробу, наприклад, зв'язуючого, препрегів чи преформ, сирової заготовки панелі та ін. [4, 5].

Таким чином, вказані складні та відповідальні АТП належать до так званого інтегрованого типу і утворюються з часткових, пов'язаних між собою ЧТП, а саме виготовлення, процесів випробувань і контролю та ін. [11–13].

Типи зв'язку між альтернативами та результатом розв'язки ЗПР широко представлені в літературі [14, 17 та ін.]. Найбільш розповсюджений серед них це найпростіший тип зв'язку – детермінований. Із викладеного та із подальших матеріалів слідує, що зазначена вище ЗПР є складною, оскільки задача прийняття рішень відбувається в умовах стохастичності, коли кожна альтернатива може привести до одного із декількох можливих результатів, кожний з яких має окреслену можливість появи. Іншими словами, йдеться про вплив на прийняття рішень таких чинників, як ризик, особиста впевненість та невизначеність по ряду факторів. Водночас, матеріально-витратна ефективність ТП не повинна бути отримана за рахунок зниження якості виробу.

В загальному, в статті вибір превалюючих АТП базується на основі методу порівняльного дослідження і на таких основоположних принципах: системності,

суттєвості (деталізоване розкриття щодо поставленої цілі основної суті об'єктів), ефективності та результативності. Таким чином, йдеться про задачу порівняння оцінки альтернатив в технології ПКМ.

Складні практичні задачі прийняття рішень порівняльних ТП виготовлення композитних виробів авіаційної техніки (АТ) є багатокритеріальними. Дію прийнятих рішень доводиться оцінювати за допомогою не одного, а чисельної кількості критеріїв (показників суттєвості, корисності, ефективності та результативності, якості, цільових функцій).

Мета статті

Започаткувати інструментарій оцінки та визначити переважальний серед варіантів АТП:

– за виробничо технологічною ефективністю (результативність);

– націленістю на одержання високонадійних ПКМ при виготовленні в серійному виробництві композиційних панелей кесона літакових крил (КЛК) з залученням якісного методу прийняття рішень [14];

– ув'язки оптимальним чином важливих чинників, що впливають на вибір домінуючого варіанту з представленням, як результат, векторної оцінки і висновку, щодо переваг того чи іншого варіанту ТП при зазначених вище передумовах оцінки.

Відправні положення та обмежуючі чинники в задачі прийняття рішень

За об'єкт порівнюваного оціночного дослідження, як і в роботах [1–4] прийнята вуглепластикована носійна панель кесона крила середньомагістрального літака зі злітною масою $m_c = 6500 \dots 6700$ кг типу МС-21 [4, 5]. Габаритні розміри панелі 3000×18000 мм, приведена товщина на рівні 15 мм, тобто, йдеться про товстінний композитний виріб (рис. 1–2)

Для спрощення, в статті при оцінці АТП виготовлення ВСП реалізується принцип забезпечення безпеки авіаконструкцій за умов її міцності у вигляді безпекового ресурсу. Як відомо [18], ця концепція означає, що така конструкція спроектована на ресурс за умов опору втомності, а саме до виникнення втомного пошкодження (safe life). Тобто, в аспекті безпекового ресурсу це означає, що при деградації конструкції в процесі експлуатаційного напруження, її міцнісні властивості не повинні бути нижче допустимого рівня.

Крім цього, для таких конструкцій пред'являються також вимоги підвищеної живучості.

Як відомо [19], традиційна ідеологія коефіцієнтів запасу (коефіцієнтів безпеки по статичній міцності та коефіцієнтів надійності по довговічності) введені в Норми льотної придатності повітряних суден для страхування від невиявлених на етапі сертифікаційних випро-

бувань недоліків потенційно знижуючих міцність і ресурс конструкцій на ін.

Зазначається, що при відсутності інших вказівок, коефіцієнт безпеки приймається рівним 1,5. Водночас, йдеться про спеціальні додаткові коефіцієнти безпеки. Вони множаться на приведений вище коефіцієнт [20]. Щодо композитних авіаконструкцій, то це, в першу чергу, стосується ПКМ та технологій виготовлення виробів, а також вплив на них зовнішніх умов при експлуатації.

Наприклад, [8] можливий розкид механічних властивостей приймається в межах 10% від середніх значень, а також зниження граничних значень в результаті дії кліматичних умов (до 20%), враховуються введенням додаткового коефіцієнта безпеки K_d при розрахунках реальних запасів міцності: $K_d = 1,1 \times 1,2 = 1,32$.

Вище приведені дані зручно представити у вигляді запису: $f = fp \times K_d$, де за наявності двох множників f -коефіцієнт безпеки, fp - так названий нами, регулярний коефіцієнт безпеки ($fp = 1,5$). Тоді, для приведених вище значень має місце $f = 2,0$.

Критикуючи вказану вище ідеологію (коефіцієнтів запасу) для ПКМ, то в [19] зазначається про пряме зростання на сьогодні коефіцієнтів запасу міцності. Так, для більшості виробів із ПКМ цей показник в 2–4 рази більший, ніж для аналогічних металевих конструкцій, що веде до беззмістовності проектування та виготовлення подібних виробів, тобто, тут необхідний другий підхід, але в [19] це не конкретизується, йдеться лише про можливість таких підходів у подальших розробках. Тому, в статті при порівнянні АТП використовується традиційний підхід.

Як правило, дійсна міцність конструкції виявляється нижче тої, яка може бути без врахування її специфіки по стандартним механічним характеристикам матеріалу. Причинами, що викликають це розрізнення, є особливості форми конструкції і пов'язані з нею різні чинники. Зокрема, неоднорідність напруженого стану, та концентрації напружень; різниця абсолютних розмірів зразка-свідка від розмірів конструкції (деталі), тобто, наявність в конструкції неспівпадаючих зі зразком-свідком недосконалостей (дефектів), технологічних або експлуатаційних залишкових напружень чи інших їх розподілень в порівнянні зі зразком; розрізнення в жорсткості, що призводить до різних рівнів запасу пружної енергії деталей і зразка-свідка, різні стани їх поверхонь, зміна властивостей матеріалу в процесі експлуатації та ін.

Таким чином, переважно механічні характеристики, що одержані на зразках-свідках є лише першим кроком в оцінці якості та надійності виготовлених, особливо крупногабаритних композитних АК. Останні повинні відповідати стандартам якості, які наприклад, діють на ГП "Антонов". Взагалі ж мова йде про наявність показників якості, надійності та ресурсу виробу

на основі стандартів. В першу чергу, щодо високого рівня конструкцій та технологічної підготовки виробництва.

Основні принципи в порівнювальних дослідженнях – системності (в т. ч. повноти, суттєвості, корисності, ефективності та результативності).

За основу приймаються якісні методи прийняття рішень з включенням положень теорії очікування [19]. Водночас, тут першорядними є показники якості ВСП, передусім, як базові, їх найкращі та стабільні значення, тобто вони є більш базовими критеріями в оцінці альтернатив в сполученнях з економічними критеріями.

В цілому, досліджувана проблема відноситься до слабо структурованих, насамперед, внаслідок її значної складності та відсутності повної достовірної інформації по ряду важливих позицій щодо АТП.

Порівнювальні панелі та вибіркві класифікаційні ознаки композитних конструкцій

Фактор конструкційних матеріалів

Важливими (ключовими) та, пов'язаних між собою, ознаками групувань композитних АК є: рівень навантаженості та відповідальності, об'єм (вміст ϕ) армуючого наповнювача в ПКМ та рекомендована технологія виготовлення. Тут, наприклад, йдеться про комплексний показник – пропресування (ПрП) конструкційних ПКМ, що складається із суми його показників і який можна поділити на чотири категорії по рівню силового стиску сирової заготовки: мінімальний, послаблений, нормальний (базовий) та високосиловий. Наприклад, в [9] відповідно цим категоріям виділені в послідовності чотири групування конструкцій:

- невідповідальні ($\phi \sim (30-45)$ об. %, контактне формування);
- слабонавантажені ($\phi \sim (45-55)$ об. %, вакуумне формування);
- відповідальні ($\phi \sim (55-65)$ об. %, автоклавне формування, а також терморозширювана гума, формування в прес-камерах);
- високонавантажені ($\phi \sim (65-75)$ об. %, формування (пресування) при підвищеному тиску в авто- та гідроклавах, а також в прес-камерах).

Але більш поширене розділення композиційних АК на три групування з однією ознакою "навантаженість" [9, 25], а саме:

- низьконавантажені (наприклад, панелі інтер'єру);
- середньонавантажені (наприклад, панелі оперіння);
- високонавантажені (наприклад, панелі крила).

Вуглепластикові високонавантажені стрингерні панелі (ВСП)

Основною силовою частиною крила літака є кесон, а в ньому головні силові елементи консолей скла дають панелі. Вони, як правило, містять відформовані

заодно (в збірно-сирій формі) багат шарові анізотропні товстостінні обшивки та підкріплюючий набір масивних стрингерів, утворюючи монолітну конструкцію, яка сприймає більшу частину згинального моменту [1, 7].

Нижче стисло йдеться про основні типи форм перерізу стрингерів, ефективність приєднання до обшивки та спільної роботи при навантаженні. Відмічаються відкриті та більш ефективні закриті профілі (Ω – подібні та ін.). Останні разом з обшивкою утворюють замкнутий в перерізі контур, забезпечуючи більш високі критичні напруження, чим рівні за площею перерізу у інших типів. Водночас, як правило, стрингери з замкнутим контуром поперечного перерізу не встановлюють на нижній поверхні кесон-баків для запобігання накопиченню палива в замкнутому об'ємі [7].

Панелі кесонів літаків МС-21 (рис. 1–2) та А-350 мають I-подібні стрингери на основі приєднання до обшивки прямокутних профілів рівнополічного таврового перерізу типу металевих профілів за ГОСТ 13622-96. Як відомо, вага металевих стрингерів варіюється в залежності від конструкції і складає біля 12% від ваги кесона. Логічно припускати, що і для композитних ВСП, цей показник суттєво не зміниться.

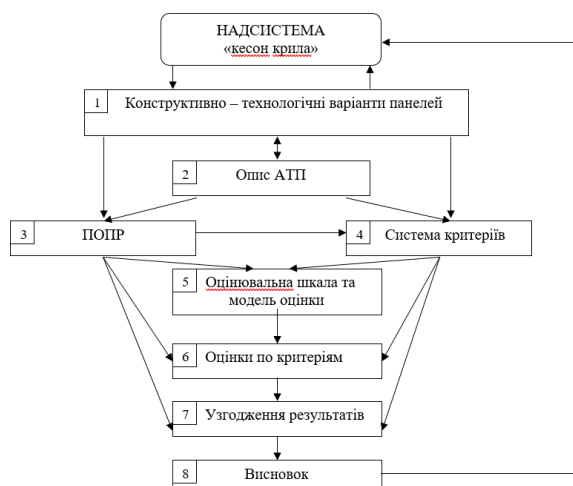


Рис. 1. Схема основних тематичних блоків в процесі прийняття рішення. ПОПР – предметна область прийняття рішення



Рис. 2. Схема основних позицій нормативно-інформаційної підтримки прийняття рішень. ЗПР-задача прийняття рішення

В порівнювальних типах літаків з'єднання зазначених компонентів ВСП має адгезивний характер. Це практично метод приформування, тобто одночасне затвердіння та склеювання з'єднувальних елементів. Важливими особливостями ВСП є такі два положення [27]:

- структура ПКМ обшивки залежить від матеріалу і кількості стрингерів та площі поперечного перерізу, тобто роздільна їх оптимізація неможлива;
- при проектуванні панелей КЛК застосування ребер з великою висотою зменшує їх ефективність на загальний згин крила і потребує збільшення їх площі. Останнє положення враховане в КТР.

При виготовленні композитних елементів використовується метод вакуумної інфузії з роботизованою викладкою сухого вуглецевого наповнювача. Наприклад, стрингери і обшивки панелі викладаються із вугленарповнювача окремо, але наповнюються зв'язуючим на спеціальній оснастці спільно.

По даним ЗАТ “Аерокомпозит” при інфузійній технології трудомісткість робіт до 13%, а енерговитрати до 30% менші, ніж у традиційній автоклавній технології.

Композитна багатостінна тришарова панель

Запропонована в [1] нова КСС у вигляді багатостінної тришарової панелі (БТП) з чисельним набором тонкостінних ребер (внутрішні стрингери) має такі переваги перед ВСП:

- збільшення жорсткості панелі. Це забезпечує менші деформації та скривлення заданого контура крила під навантаженням і більш стабільну аеродинамічну якість крила;
- підвищення живучості панелі;
- значно більш рівномірний розподіл силового матеріалу, уникнувши цим значного перепаду жорсткостей в парі “стрингер-обшивка” і цим зменшивши рівень внутрішніх напружень;
- практично уникнення негативного впливу старіння та деградації адгезійного шару в з'єднанні “стрингер-обшивка” (як це має місце у ВСПі), на носійну здатність крила при довгостроковій експлуатації літака;
- помітне зниження кількості нервюр з оптимізацією їх розставлення по розмаху крила, що дозволить більш повно використати його внутрішній об'єм;
- збільшення рівня термоізоляційних властивостей щодо фактора нагріву панелей. Як відомо, тришарові панелі характеризуються хорошою термоізоляцією.

Передоціночні концептуальні положення та аспекти системи прийняття рішень

Складові конкурентоспроможності панелей в надсистемі “магістральні літаки”.

В статті також йдеться про технологічну ефективність і навіть конструктивно-технологічну конкурентоспроможність (КТКС) при виготовленні кесона крила

сучасних магістральних літаків, в конструкціях яких вперше в авіабудуванні, верхні та нижні високонавантажнені стрингерні ВСПа чи ВСПі виконані із вуглепластика в різних варіантах ТП. Водночас, в [1, 27 та ін.] показано, що багаточисельні спроби помітно чи якимось знизити вагу панелей, що як відомо, практично виготовлені на зразок металевих конструкцій, поки не увінчалися успіхом. Тут можуть бути застосовані більш ефективні інші КТР [1].

Як відомо, КТКС завжди пов'язана з якістю та надійністю продукції і ТП. В статті якість авіаційної продукції – це сукупність суттєвих властивостей, оцінюваних системою техніко-економічних показників. Якість авіаційних АК формується в процесі їх створення (розробка та виробництво) і зберігається на решті стадій життєвого циклу літака, передусім, на стадії його експлуатації, заради якої і створюється ця продукція.

ВСП належить до інновативної продукції, яка характеризується для покупця новизною в літаку, відрізняючи його оригінальністю (ексклюзивністю) від інших аналогічних машин, що присутні на ринку.

Щодо технічної новизни, то вирішення проблеми в напрямку композитних панелей кесона крила літака МС-21 включає двоїсту конструктивно-технологічну інновацію, а саме: суцільно формовану вуглепластикову великогабаритну конструкцію та застосування для виготовлення цієї вкрай відповідальної силової конструкції, але ще маловживаної (недостатньо дослідженої) в авіабудуванні преформовано-інфузійно-пічної технології.

Важливою складовою КТКС є ціна використання (експлуатації) літака. В це поняття входить зазначена ціна придбання машини та особливо ціна її експлуатації, яка залежить від якості конструкції машини і ціни її технічного обслуговування. Ціна використання звичайно набагато вища продажної ціни, яка за строк служби магістрального літака складає наприклад для літаків ГП “Антонов” до 30% (Взагалі зміна витрат на якість відома як “правило 10-кратних витрат”).

Тому найбільш конкурентоспроможним є літак, у якого саме мінімальна ціна використання за весь термін його експлуатації. Цей термін для магістральних літаків з забезпеченням регламентної якості АК сягає навіть 30...40 років.

Задачі прийняття рішень

Як відомо [29], ЗПР полягає у формуванні множини можливих варіантів, що забезпечують вирішення проблемної ситуації та виділення серед цих варіантів привабливого серед представлених для розгляду складних (багатооб'єктних) альтернативних процесів (АТП). За цих та вище викладених викладених умов та особистостей АТП можна говорити про системну задачу підвищеної складності. Формально зазначену задачу прийняття рішень D , як складову частину концептуальної моделі прийняття рішень, можна на основі [29] записати в наступному узагальненому вигляді:

$$D = (F, A, X, Z, G, P),$$

де: F – формулювання задачі прийняття рішень (Вступ); A – сукупність альтернатив, з яких проводиться вибір (Вступ); X – предметна область прийняття рішень (ПОПР) блочного типу та пов'язані з нею критерії вибору (ч. II); Z – сукупність ознак (альтернатив параметрів), по-перше, презентативних варіантів АТП та їх відмінні особливості. По-друге, це суб'єктивні оцінки, що даються по відібраним критеріям; G – сукупність умов, обмежуючих допустимі варіанти рішень задачі. P – оцінка ефективності альтернатив (найперше за умов якості) та визначення превалюючої з них.

В статті йдеться про три основних класи Z -чинників, що саме впливають на визначення ознак при оцінюванні АТП, насамперед, в напрямках їх якості та надійності. Це технологічні процеси ТСРП та ЧТП; ПКМ та ВСП – об'єкти. Тут умовно ПКМ вилучені зі складу КТР, адже цей матеріал і конструкція з нього згідно фундаментальній властивості ПКМ [30] виготовляється одночасно.

Було зазначено, що ВСПа/ВСПі – це ті вуглепластикові панелі, що за конструктивно-технологічними рішеннями (КТР) виготовлені відповідно по автоклавним та інфузійним технологіям.

Щодо ПОРП, то вона повинна бути створена, як мінімальна, достатня (адекватна) сукупність, пов'язаних між собою, у напрямках параметрів, властивостей, функцій ПКМ, АК і ТП, за допомогою яких досягаються поставлені вище цілі при оцінці альтернатив. Тобто ПОПР повинна бути створена і представлена максимально сконцентрованою, а саме за умов необхідності, достатності та доцільності.

Сумісно конструкторсько-технологічна система

Зазначена оцінювальна система з позначенням СКТС умовно розділена на дві різномірні, проте сумісні взаємопов'язані частини (її елементи). Це сукупність КТР, які впливають на оцінку ефективності АТП та технологічна система різнопланових процесів. Тут мають місце істотні зв'язки між складовими системами, визначаючи цим її об'єднуючі якості. На основі проектних вимог та показників КТР визначаються структура, ритм та тривалість виробничого циклу, а також рівень витрачаємих у виробництві ресурсів. В свою чергу, у зворотних зв'язках зазначається рівень досягнутих у виробництві результатів.

Відомо, що кожна система є підсистемою більш високого порядку. Йдеться про над- або зверхсистему (ЗВС), яка має свою модель поведінки, структуру, закони, ресурси та призначення (функцію) і цим обумовлює цілі і задачі та поведінку системи, наприклад типу СКТС. Тобто зміна будь-якої системи не знаходиться в ній самій і залежить від ЗВС. Тому для обумовлення (визначення) перспективи ТС необхідно поруч зі звичайним дослідженням, окреслити і розвиток її найбільш близької надсистеми.

В статті йдеться про літакову ЗВС “кесон крила магістрального літака” [1, 5] в яку входить досліджувальна технологічна система процесів (ТСРП), конструктивно-технологічна система чотирьох композитних панелей кесона крила в їх взаємодії та ін. Тут АТП виступає (функціонує), як реалізуюча система лише вхідної своєї цілі – виготовлення в різних варіантах стрингерних панелей по вимогам серійних технологій та порівняння результатів, насамперед, з базовими показниками та характеристиками, в тому числі надійності та ін. Останні були отримані при виготовленні дослідних зразків конструкцій з можливістю їх покращенням надалі вже у серійному виробництві.

При цьому, в задачі свого ціленаправленого функціонування, ВСП та ТП мають головну спільну характеристику – технічну надійність, яка визначається однією і тією ж властивістю – можливістю виготовляти продукцію в заданому об’ємі в умовах визначеного типу виробництва, зберігаючи в часі відповідні параметри її якості. В літературі особливо зазначається і це прийнято в статті, що функція ЗВС в напрямку якісних характеристик АК, має певну перевагу над ресурсами, але все-таки до певної межі, тобто з оглядом на існуючу інфраструктуру та рівень витрат.

Функціонування СКТС пов’язане з поетапною ціленаправленою послідовністю ЧТП, які по своєму складу і виокремленому технологічному функціонуванню також впливають на поведінку системи. Однак, при їх оцінці наприклад, підсистема, “механічна обробка” відсутня, бо вона практично однакова для всіх порівнюваних АТП.

Схема основних етапів в процесі прийняття рішень приведена на рис. 3. В цьому процесі для подальшого створення концептуальної моделі ПР вихідними є три етапи:

1. Опис АТП.
2. Предметна область прийняття рішень (ПОПР).
3. Несуперечлива система оцінювальних критеріїв. Вони повинні бути представлені у вигляді ототожено-наслідкового зв’язка з ПОРП.

Якість виробів та процесів – першорядний чинник в прийнятті рішень

В розрізі інтегрованої структури АТП всі критерії оцінювання якості виробів та процесів є в початковому стані рознорідними. В статті це у повній мірі відноситься до взаємооцінювальних (співозцінювальних) практично доступних в виробництві передових альтернативних автоклавних та безавтоклавних ТП виготовлення композитних ВСП кесона крила серійних магістральних літаків (п.3). Це багатошарові композитні конструкції з великорозмірними поверхнями та значної товщини середньо- і високотемпературного затвердіння, до яких пред’являються особливо високі вимоги щодо якості виготовленої продукції та ТП. Наприклад, на практиці якість самого процесу термосилового формування ПКМ оцінюється через такі узагальнюючі поняття: об’єм наповнювача в композиті, повнота наскрізного просочення зв’язуючим багатошарового пакета та його пропресованістю, мінімальним рівнем пористості виробу та ін. Так, для повного чи істинного пропресування, як опосередкованого комплексного показника, характерні: максимальне до базового значення коефіцієнта упресовки і максимальне ущільнення в моноліт пакета сирової заготовки, високі фізико-механічні характеристики ПКМ та виробу, міжшарової міцності, а сама конструкція АК за якістю поверхні та загальним зовнішнім виглядом сприймається, як високоякісний продукт фабричного гатунку.

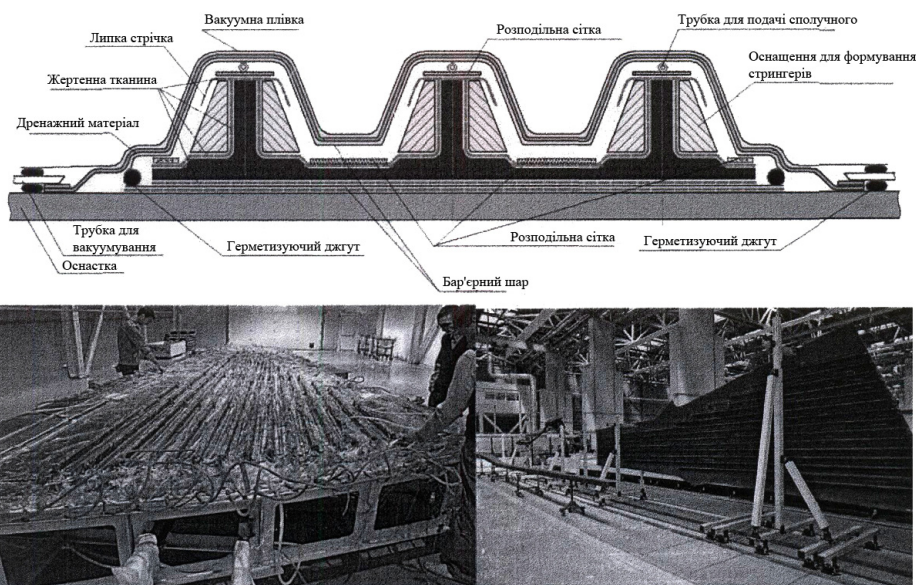


Рис. 3. Схема укладу технологічного пакету для вакуумної інфузії

Всім цим вимогам та характеристикам в повній мірі відповідає препрегово-автоклавна технологія. Водночас, в преформово-інфузійній технології на теперішній час присутня можливість виникнення ризиків, наприклад, місцевого недопросочення преформи та навіть можливе певне недопресування композитного матеріалу. Детальніше, в статті якості ВСПа та ВСПі – це сукупність їх властивостей і характеристик, що обумовлюють їх здатність відповідати встановленим вимогам до високонавантажених композитних АК. Насамперед, йдеться про показники міцності.

Практичний інтерес представляють матеріали, рівень міцності властивості яких відзначаються високою стабільністю: період експлуатації (25–30 рр.) знижується не більше чим на 10–20% [10], тобто з високою залишковою міцністю. На міцнісні властивості впливають різні чинники, а вони в свою чергу, впливають на інші показники носійної здатності АК. Наприклад, пористість та втомні тріщини приводять до зменшення міцності конструкції, визначаючи багато в чому, її міцнісну надійність і тим самим міцнісну живучість. Звичайно, узагальненою характеристикою кожного КТР є його ефективність. Ця характеристика, по-перше, містить ефект рішення, як оцінку досягнутого матеріально-технічного рівня АТП, а з іншого боку – рішення, як сукупність витрат ресурсів при реалізації варіантів АТП. В ЗПР ефект рішення складають сукупність комплексних показників якості продукції (ПКМ, напівфабрикатів, композитних АК), а також показники якості ТП.

Наостанок, в статті наведені з врахуванням при оцінці такі відправні узагальнені положення щодо якості зазначеної трійки взаємопов'язаних об'єктів: АК, ПКМ, ТС, насамперед, ТП.

Згідно [23, 32], всі показники надійності ТС, підходять до таких груп: по точності та усталеності (ТП та засобів виробництва), технологічній дисципліні, по параметрам якості продукції, а також комплексні показники. Вочевидь, терміни “якість” і “надійність” настільки тісно пов'язані в авіабудуванні, що ні одна із них практично не має сенсу. Вказане, по-перше, витікає із того основоположного факту, що ПКМ і композитний виріб виготовляються одночасно [30].

По-друге, Як відомо [23, 32], оцінка надійності технологічних систем (ТС) за параметрами якості виготовлення продукції містить:

- вибір номенклатури показників;
- визначення практичних значень показників (в порівнювальних ТС йдеться про опубліковані, чи представлені експерту дані);
- порівняння фактичних значень з потрібними чи базовими значеннями.

По-третє, в загальних кваліфікаціях до основних критеріїв якості конструкційних матеріалів відносять

параметри надійності, ресурса та ін. Водночас, в авіабудуванні, витікаючи з втомної довговічності прийнято оцінювати композитні АК [7, 8], насамперед, за характеристиками надійності ПКМ, в тому числі:

- витривалість та опірність до малоциклової втоми;
- швидкість росту тріщини втомності;
- статична та циклічна тріщиностійкість;
- опірність корозійному розтріскуванню.

По-четверте, в роботах галузевих інститутів (ВІАМ, НІАТ, УкрНДІАТ та ін.) зазначається, що якість та надійність високоміцних та високомодульних ПКМ та композитних АК, в основному, залежать від вибору КТР та особливо від ТП та обладнання, які характеризуються по своїй складності вузькою спеціалізацією [27]. Тому забезпечення усталеного режиму роботи процесу є важливою вимогою, бо йдеться про складову задачу надійності в тому числі роботоспроможності і навіть економічності ТП. Тут експерти виходять з того положення, що наявність нечітко зазначених та/або нестационарних параметрів ТП виготовлення крупногабаритних виробів із ПКМ (масштабний фактор) приводять до того, що їх міцнісні властивості та геометричні розміри виявляються не строго детермінованими, або можуть змінюватися раз від разу та ін.

Взагалі, препрегово-автоклавні технології мають ширші можливості реалізації АК для різних складових видозмін конструктивно-силових схем КСС та КТР, найперше, включаючи великогабаритні, наприклад, тришарові панелі. Це композитні конструкції з великорозмірними поверхнями та значною товщиною двох обшивок та чисельним набором тонколистових ребер (внутрішніх стрингерів). На сьогодні така композитна інтегральна панель довжиною 18–20 м і більше може бути виготовлена практично тільки з застосуванням препрегово-автоклавної технології.

Висновки

Виконані відправні підготовчі етапи для проведення в задачі прийняття рішень якісної (векторної) оцінки виготовлення композитних панелей КЛК за базовим для відповідальних конструкцій препрегово-автоклавною ТП, (тобто з високоєфективним пропресуванням виробу) та альтернативної до нього преформово (сухий пакет) – інфузійно-пічної технології:

1. Особливості загальноокресленої проблеми в задачах прийняття рішень.
2. На основі систематизованого підходу представлені загальний опис та конструктивно-технологічна ідентифікація конкуруючих альтернатив, а також схема основних етапів в процесі прийняття рішень.
3. Визначені підходи щодо оцінювання показників якості в процесі вибору превалюючої альтернативи.
4. Зазначені відправні положення та обмежувальні чинники у задачі прийняття рішень.

References

- [1] D.S. Kiva and V.F. Zabasht, “Composite wing box of transport aircrafts (constructive and technological aspects)”, *Technological systems*, No. 3, pp. 7–28, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.29010/084.1>
- [2] Kesson kryla samoleta V787 iz polimernykh kompozitsionnykh materialov. Available: https://ru.wikipedia.org/wiki/Boeing_787_Dreamliner/
- [3] Kesson kryla samoleta A350 iz polimernykh kompozitsionnykh materialov. Available: https://ru.wikipedia.org/wiki/Airbus_A350_XWB
- [4] R. Gusarov, Chernoe krylo dlya MS-21 // 20.03.2015 Aviation Explorer. Available: <https://www.aex.ru/docs/3/2015>
- [5] G. Kryvov *et al.*, “Experiencing the technology development for high lifetime joining of the commercial aircraft airframe components of metal and polymer composite materials”, *SAE Technical Paper 2007-01-3815*, 2007. doi: 10.4271/2007-01-3815
- [6] G.A. Kryvov *et al.*, “Tekhnologii bezavtoklavnogo formovaniya konstruktssii planera samoleta iz polimernykh kompozitsionnykh materialov”, *Technological systems*, No. 5, pp. 47–70, 2009.
- [7] V.I. Grishin *et al.*, “Proektirovanie konstruktssii kryla iz kompozitsionnykh materialov”, *TVF*, No.1, pp. 20–40, 2010.
- [8] B.N. Soloshenko and Yu.I. Popov, “Kontseptual'noe proektirovanie konstruktssii kessona kryla iz kompozitsionnykh materialov srednemagistral'nogo samoleta”, *Aviatsionnaya tekhnika.*, t. 20, No. 1, pp.16–30, 2013.
- [9] S.A. Smotrova and I.D. Simonov-Emell'yanov, “Effektivnye tekhnologii formovaniya vysokonagruzhennykh aviatsionnykh konstruktssii iz polimernykh kompozitsionnykh materialov”, *Konstruktssii iz kompozitsionnykh materialov*, No. 3, pp.15–24, 2016.
- [10] E.N. Kablov, “Aviatsionnye materialovedenie v KhKhI veke. Perspektivy i zadachi”, *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*, No. 1, p. 21, 2007.
- [11] GOST 27004-85. Nadezhnost' v tezhnikе. Sistemy tekhnologicheskіe. 23p.
- [12] GOST 27202-83. Nadezhnost' v tezhnikе. Tekhnologicheskіe sistemy. Metod otsenki nadezhnosti po parametram kachestva izgotavlivaemoi produktsii. 50p.
- [13] DSTU 3021-95 Viprobuvannya i kontrol' yakosti produktsii. Termini ta viznachennya.
- [14] V.V. Podinovskii, *Vvedenie v teoriyu vazhnosti kriteriev v mnogokriterial'nykh zadachakh prinyatiya reshenii*, M.: Fizmatlit, 2007.
- [15] A.V. Lotov, P.I. Pospelova, *Mnogokriterial'nie zadachi prinyatiya resheniya*, Moscow: MAKS Press. 2008.
- [16] O.I. Kushlik-Divul's'ka, B.R. Kushlik, *Osnovi teorii priinyattya rishen'*, Kyiv, 2014. Available: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/6917>
- [17] V.M. Koval'chuk, “Osoblivosti rozv'yazannya bagatokriterial'nykh zadach priinyattya rishen' u ne chitkomu seredovishchi”, *Naukovi zapiski. Seriya “Ekonomika*. No. 14, 2010, pp. 447–456.
- [18] S.R. Ignatovich *et al.*, *Resurs i dolgovechnost' aviatsionnoi tekhniki*, Kyiv: NAU, 2015.
- [19] SPITP LNK 2017. Tekhnologicheskaya platforma “Legkie i nadezhnye konstruktssii”. Strategicheskaya programma ispol'zovaniya na 2015–2020. Moscow: 2016.
- [20] Aviatsionnye pravila. Chast' 25. Normy letnoi godnosti samoletov transportnoi kategorii, Moscow: 2014. 266 p.
- [21] V.V. Pilipenko *et al.*, “Koeffitsienty bezopasnosti i prochnost konstruktssii”, *Technical Mechanics*, No. 1, pp. 89–98, 2009.
- [22] E. Mushik and P. Myuller, *Metody prinyatiya tekhnicheskikh reshenii*, Moscow: Mir. 1990.
- [23] Yu.M. Pravikov, *Osnovy teorii nadezhnosti tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii*, Ul'yanovsk UIGTU, 2015.
- [24] V.B. Ionov, *Upravlenie riskom protsessov ispol'zovaniya kompozitsionnykh materialov*, FGUP “VIAM”, 2018, pp. 46–50.
- [25] A.S. Shirshikov *et al.*, *Otsenka nadezhnosti tekhnicheskikh sistem*, Penza. PGUAS. 2015.
- [26] GOST R. 1901 -2002. Upravlenie nadezhnost'yu. Analiz riska tekhnicheskikh sistem.
- [27] T.A. Litvinova, *Proektirovanie stringerov iz kompozitsionnykh materialov*. Available: <https://docplayer.ru/48119308-proektirovanie-stringerov>
- [28] Zadacha prinyatiya reshenii. Sistemni analiz. Available: http://systems-analysis.ru/decision_theory_model.html
- [29] D.S.Kiva and V.F.Zabashta, “O fundamental'nom svoistve polimernykh kompozitsionnykh materialov v kontekste sozdaniya i proizvodstva effektivnykh konstruktssii”, *Technological systems*, No. 3, pp.45–57, 2015.
- [30] G.P. Klimenko, Ya.V. Vasil'chenko and M.V. Shapovalov, *Yakist' i nadiinist' tekhnologichnikh sisitem*, Kramotorsk: DDMA. 2018.
- [31] *Nadezhnost' tekhnologicheskikh sistem i tekhnogennyi risk. Osnovy rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem po nadezhnosti parametrov* [Online]. Available: <http://www.obzh.ru/nad/4-5.html>

Alternative technologies of composite high-load aircraft structures: a qualitative method making multicriteria decisions First part. Initial stages in the problem of decision making

D.S. Kiva, V.F. Zabashta

Abstract. Comparison of efficiency based on the qualitative decision-making method of autoclave and non-autoclave technologies for the manufacture of carbon-fiber aircraft structures such as aircraft wing planes B787, A350, MC-21, Cseries.

The differences and advantages in the serial production of prepreg-autoclave and VARTM technological process.

The comparison was carried out on sufficient presentational basis of criteria of two levels using combinatorial and decomposition research method. Each variant of the process is characterized by evaluations according to selection criteria. Their scores are vector assessment of the criteria based on expert judgment and opinion of the decision maker. Noted that each option has own boundaries of compatibility and practical application.

Keywords: technological system; wing box; stringer panels; composite; alternatives; prepreg; criterials; infusion; preference; vector estimate.

Альтернативные технологии композитных высоконагруженных авиаконструкций: качественный метод принятия многокритериальных решений I часть. Начальные этапы в задаче принятия решений

Д.С. Кива, В.Ф. Забашта

Аннотация. Сопоставление по эффективности (существенности, полезности) на основе качественного метода принятия решений автоклавных и безавтоклавных технологий изготовления углепластиковых авиаконструкций (АК) типа панелей крыла магистральных самолетов B787, A350, MC – 21, CSeries. Определены отличия и преимущества в серийном производстве препрегово-автоклавных и инфузийных (VARTM) технологических процессов (ТП). Сравнение проведено на достаточной презентативной базе критериев двух уровней с применением комбинаторного и декомпозиционного методов исследования. Каждый вариант ТП характеризуется оценками по критериям выбора, балльные числа которых составляют вектор, а в общем составе определяют векторную оценку ТП. Тут отмечены качественные важности критериев, в том числе и на основании суждений специалистов, как прототип, относительно мнения лица принимающего решения (ЛПР), показано, что каждый вариант имеет свои границы сравнимости и практического применения.

Ключевые слова: технологические системы, кессон крыла, стрингерная панель, ПКМ, альтернативы, препрег, инфузия, критерии.превосходство, векторная оценка.