

Альтернативні технології композитних високонавантажених авіаконструкцій: якісний метод прийняття багатокритеріальних рішень. II частина. Моделювання в багатокритеріальній оцінці альтернатив

В.Ф. Забашта

Received: 26 July 2022 / Accepted: 1 October 2022

Анотація: Друга частина статті виходить з відправних положень в задачі прийняття рішень (ЗПР), зазначених на першому етапі досліджень [1, п. 2.]. Тут продовжено зіставлення за перевагуванням (ефективністю) альтернативних автоклавних та безавтоклавних технологій виготовлення вуглепластикових авіаконструкцій (АК) типу високонавантажених стрингерних панелей кесона крила (ВСП) магістральних літаків B787, A350, MC-1, CSeries. За методологічну основу взяті головні положення теорії прийняття рішень та системно-процесний підхід з залученням результатів практики. З початку представлені: схема оцінювання відносної якості об'єктів технологічного процесу; концептуальна модель предметної області прийняття рішень (ПОПР) блокового типу та її базис; склад критеріїв вибору та показників. Виходячи з вище приведеного та з залученням положень автономних динамічних систем (АДС) з дискретним часом, а також теорії параболі (квадратична функція), приведена формалізована модель системно згрупованих процесів при оцінюванні альтернатив. На цій основі продовжено дослідження суттєвих відмінностей альтернатив з інтерпретацією ідей топології (групи гомології) для підтримки прийняття в подальшому обґрунтованого заключного рішення, як мета моделювання цієї окремої сторони функціонування технічної системи.

Ключові слова: альтернативні технологічні процеси (АТП), ВСП, композити (ПКМ), препрег, інфузія, ПОПР, ієрархічна структура, АДС, інтерпретація, параболола, аттрактор, тор.

1. Вступ

В царині машинобудування часто виникає задача оптимального вибору, тобто вибору об'єкта з максимальною кількісною і/або якісною оцінкою з деякого наявного набору досліджувальних об'єктів. В представленому конкретному випадку це якість, в першу чергу, конструктивно – технологічних рішень (КТР) та відповідно технологічна система (ТС) різнопланових процесів виготовлення та ремонту альтернативних АК [1–3].

Тоді важливішими стають рішення з опорою на науково-технічні дослідження, концептуальне та формалізоване моделювання [3, 9–11, 28–35]. Але часто

такі моделі створюються інваріантно, без врахування практики. В статті об'єктом моделювання є важкоформульовані технологічно – оцінювальні процеси (МТП – об'єкти). З позицій системно – процесного підходу [3], визначені в [1] АТП – це динамічні системи (ТПДС) у виробничому середовищі композиційних АК. Предметом моделювання в цій загальній моделі є етапи ТП та зв'язки між ними. В статті залучено модель динамічної системи, що надає об'єкт у вигляді алгоритмізованої послідовності ТП (дій), яка дозволяє при їх оцінюванні отримати необхідні дані. Тобто йдеться про модель, як засіб осмислення “технологічної дійсності” у напрямку підтримки прийняття рішень.

В статті йдеться про високовідповідальні, водночас, високонавантажені АК типу панелей кесона крила магістральних літаків в препрегово-автоклавних та альтернативних преформово-інфузійних технологіях. Причому, стратегія виробництва ВСП літака MC-21 націлена на досягнення значної переваги за витратами. Тому тут важливу роль відіграє аналіз джерел переваг, водночас, з рівнем досягаємої якості, як ВСП так і се-

✉ В. Ф. Забашта
zabashtaeugeniy@gmail.com

¹ АТ “Український науково-дослідний інститут авіаційної технології” (УкрНДІАТ), Київ, Україна

рійної технології її виготовлення панелі. Тут важливими (ключовими) та, пов'язаних між собою, ознаками групувань композитних АК є: рівень навантаженості та відповідальності, об'єм (вміст) армуючого наповнювача в ПКМ та рекомендована технологія виготовлення. Тут, наприклад, йдеться про комплексний показник – якості пропресування (ПрП) конструкційних ПКМ. В попередній публікації [1] в розрізі загальної мети були вислідені необхідні підготовчі етапи зазначеній вище проблемі. При цьому, при невеликій об'ємності варіантів альтернатив V вибір кращого рішення $\max v^i \in V, i = 1, 2, 3$ може бути здійснений на відмінних схемах попарного порівняння альтернатив $v^1, v^2 \in V$ [5–9].

Необхідно зазначити, що наука про вибір найкращого варіанта рішення, як самостійна дисципліна, що саме виокремилась з “теорії дослідження операцій” склалася порівняно недавно – на початку 1960-х років [3, 8]. Тоді ж було сформульовану головну мету цієї теорії – раціоналізувати процес прийняття рішень, де як перший крок, наприклад, структуризація дає змогу апроксимувати первісну слабоструктуровану проблему¹.

В рамках МТП – об'єкта представлено (р. 3) сконцентровану структурно-функціональну концепцію моделі технологічно процесної предметної області ПОПР[1]. Також представлено спрощену формалізовану систему складних ТП² у вигляді динамічної моделі [3, 5–8, 34–36]. Взагалі, при моделюванні процесів залучають, як неавтономні динамічні системи $dx/dt = f(t; x)$, так і автономні (АДС) виду $dx/dt = f(x)$, де час як незалежну змінну, в явному вигляді в них не включено. Тобто йдеться про створення моделі типу АДС, як основи адаптованого представлення різнопланових ТП на основі ПОПР³ (р. 4). Йдеться про абстрактну математичну модель з позначенням ТПДС макрорівня[3],

¹Згідно [7] структуровані (добреструктуровані) задачі відносяться до предмета дослідження операцій, слабоструктуровані – до компетенції прийняття рішень, неструктуровані – до штучного інтелекту.

²В статті, при порівняльному дослідженні альтернатив спрощений образ ТС відрізняється від системи оригінала, тим що відображає тільки домінуючі складні об'єкти, елементи та конструктивно-технологічні і / або експлуатаційні чинники, що саме відзначають основну лінію функціонування реальної системи.

³В теорії прийняття рішень процесів, наприклад економічних, підрозділяють на статичні та динамічні, при цьому в них в загальному багато в чому творчу функцію виконує ПОПР [3].

⁴Згідно [3], завдяки застосуванню вуглепластику, кінцевим експлуатантом лайнера А350: тепер не прийдеться побоюватися корозії чи втомних пошкоджень металу.

⁵Щодо вартості конструкційного вуглепластику, та згідно [12] кілограм дюралю для літака коштує 3 дол., а кілограм вуглепластика з якого виготовлялось крило та фюзеляж В 787 – порядку 400 дол. (Певно, мається на увазі 2005–2007 рр.).

як модель першого порядку. Вона включає тільки одну незалежну перемінну – координату x .

В статті стан АДС – це інтегральний многовид, званий фазовим простором станів, де головна еволюція цієї системи умовно представлена, як рух зображуючої точки в цьому просторі. Плоска крива другого порядку, що в загальному описується цією точкою, становить фазову траєкторію. Вона складена з набору зображуючих точок при послідовних домінуючих етапах розвитку в неявних часових інтервалах дослідження для кожної із конкуруючих альтернатив. В подальшому (рр. 4, 5) це питання деталізується.

Вагова ефективність АК – головний фактор при застосуванні композитів

Найбільш важливим із груп якості для магістральних літаків є функціональні показники придатності (призначення) та надійності, в тому числі забезпечення якості та надійності продукції при її виробництві. Одним із найважливіших напрямків підвищення ефективності літального апарату (ЛА) є його вагова досконалість, особливо вагова досконалість конструкції планера. Так, серед ЛА основними вимогами, що ставляться саме до літака є його вагова досконалість та ресурс конструкції. Тому, по-перше, при визначенні вихідних даних для розрахунку літака на міцність, проводиться ваговий аналіз ефективності ЛА і рівня вагової досконалості конструкції.

Тому актуальність цієї задачі не тільки зберігається, але й зростає в сучасних умовах конкурентного авіаційного ринку, оскільки навіть незначне зниження маси багатотонного ЛА дозволяє покращити його техніко-економічні переваги, в тому числі в підвищенні корисного навантаження, збільшення висотної межі та дальності польоту, зниженню витрат палива та інше (так званий каскадний ефект). Високий ваговий ефект при застосуванні конструкційних ПКМ потенційно можливий, оскільки їх основними достоїнствами є:

- високі питомі статичні міцність та жорсткість;
- хороша питома втомна міцність;
- низька відносна маса.

Крім того, ПКМ додатково характеризується стійкістю до корозії та високою довготривалістю⁴. З огляду на високі характеристики вуглепластиків вищих ґатунків, і водночас, з урахуванням їх дуже значної вартості в порівнянні з алюмінієм⁵, композити спочатку вважали можливим застосовувати у високовідповідальних високонавантажених АК, як шлях до підвищення, найперше, вагової досконалості силової конструкції планера.

Наприклад, теоретично використання ПКМ в панелях кесона крила веде до зниження маси на 15% [12]. Досягнення цього рівня поряд з високою надійністю постає, як довгострокова стратегічна мета подальших досліджень[1, 3, 12, 17], бо за оцінками експертів

[3, 12, 16–18] застосування ПКМ в конструкціях відомих літаків⁶ B787 і A 350 XWB не привело до первісного зменшення їх маси⁷ і головна причина в тому, що тоді в авіабудуванні не було достатніх знань для проектування АК.

Відомо [12, 13], що при проектуванні конструкцій з алюмінію коефіцієнт безпеки (запас міцності) за раз не перевищує 1,5, а при проектуванні конструкції з вуглепластику цей запас нерідко досягає 5 і навіть 7 [12]. Практика показує, що важливим напрямком зниження маси конструкції планера літака пов'язане з вибором (розробкою) принципово нових (“прокомпонентних”) конструктивно-силових схем (КСС), конструктивно-технологічних рішень (КТР) та ТП з урахуванням специфіки ПКМ [1, 17]. Найперше, це відбувається за рахунок ефективного використання потенційних можливостей ПКМ (водночас зі зменшенням пористості ПКМ [2–4, 22–27 а ін.]), збільшенню ступені залучення матеріалу всієї конструкції в силову роботу, максимального використання побудованої висоти панелі, а також ТП серійного виробництва панелей з характеристиками високої усталеності та точності. Більші результати досягнення цих напрямках дають перевагу в оцінці якості порівнюваних альтернатив.

Концептуальна та формалізована модель

В статті (рр. 3, 4, 5) залучені методи поступової (ступеневої) формалізації моделі [3]. На початок, для порівняння, зазначається, що для найбільш розповсюджених детермінованих (сильно-структурованих) проблем, математична модель ситуації прийняття рішень при багатьох критеріях згідно [3, 6, 10, 34] включає три

елементи: множину варіантів V , векторний критерій K , відношення превалювання та індиферентності, на думку експерта або ж дицидента [7].

Так, на множині критеріїв K на основі інформації визначають відношення порівняльності критеріїв, наприклад за важливістю i /або корисністю та ін. (типу “Критерій k_i важливіший, або ж більш корисніший критерія k_j ”). Деталізація щодо детермінованих проблем, наприклад виявлення найбільш успішного студента в учбовій групі (5–7 осіб) з оцінками по традиційним навчальним предметам. Такого типу ЗПР називають детермінованими. Тут кожна альтернатива приводить до єдиного вислідку (кінцевого результату). Кардинально інша справа, коли йдеться щодо прийняття рішень складних багатооб'єктних керованих технологічних систем виготовлення крупногабаритних композитних АК.

Такі ТП при оцінці характеризуються помітно слабшими детермінованими умовами і практично відносяться до слабоструктурованих проблем. Тому тут першочергово приймається, що саме квінтесенцією прийняття рішень є вислідковування впливів (зв'язків) для пошуку сконцентровано – презентативної ПОПР. Тут згідно системного принципу доцільно реалізувати ієрархічну побудову та опорядкувати її складові за важливістю. В результаті (р. 3, табл. 2) представлена концептуальна об'єктно – процесна індуктивного типу⁸ блокова ПОПР і її базис, а також ототожнений з нею численний склад критеріїв вибору в напрямку технологічної зрілості серійного виробництва. Далі, виходячи з концептуальної моделі ПОПР, тут в якості математичної абстракції (процесів) залучена багатооб'єктна дискретна ТПДС (р. 4) ієрархічної структури (р. 5) з типом зв'язку “один до багатьох”⁹. Найближчим простим варіантом аттрактора в базові ТПДС є притягаюча нерухома точка¹⁰. ТПДС дозволяє описувати та вивчати еволюцію початкового стану (р. 2 “зв'язуюче” ПКМ) та процесів виготовлення панелей, а також їх оцінки в цілому. При формалізації процесів порівнювальних альтернативних варіантів залучена, як головна, квадратична функція - парабола. Подальший розвиток та формалізація ТПДС подано в (р. 5) статті. Тут також йдеться про так званий “технолого – топологічний підхід” на основі такого загального положення при дослідженні ТС, що в такій системі об'єднання чи перетин будь – якої кількості підмножин належить цій системі, а також з виокремленням топологічних принципів, які визначають напрями дослідження ТП.

Мета статті

Продовженням першої частини є розробка та дослідження трьох опорних складових зазначеної вище проблемної ситуації в задачі прийняття рішень, а саме: – обґрунтувати з врахуванням якості рішень¹¹ та оцінити між собою в загальному вигляді препрегові та інфузійні зв'язуючі (матриці) ПКМ, як перший об'єкт

⁶Перший комерційний рейс літака B787 стався 26.10.2011 р. В квітні 2021 р. число вироблених літаків перевищило 1000 штук. Перший комерційний рейс літака A350xwb відбувся 15.01.2015р. За станом на січень 2020р. Airbus одержав замовлення на поставку 913 літаків [3].

⁷Згідно ЦАГІ, вага цих літаків залишилася такою, наче вони були зроблені з металу.

⁸Якість індуктивної моделі визначається тим, наскільки, з одного боку, вдалося спростити ситуацію прийняття рішень в багатооб'єктному середовищі, а з другого - наскільки презентативно (вірно) в ПОПР відображені основні властивості моделюємої ситуації.

⁹Згідно принципу ієрархічного представлення моделі слідує, що вони мають кілька рівнів вкладеності.

¹⁰Елемент a множини A називають нерухомою точкою відображення $f: A \rightarrow A$, якщо $f(a) = a$ [3, 34–36].

¹¹Йдеться про якість розроблених рішень, що залежить від рівня відповідності вимогам, які до них ставляться, зокрема такими, як: оптимальність, своєчасність, цілеспрямованість, комплексність, науково – технічна обґрунтованість, об'єктивність.

в порівнювальних альтернативних варіантах з залученням критеріальної мови бінарних відношень¹², керуючись критерієм відносної важливості таких задач, як виготовлення АТ найвищої значущості, високої міцності та максимальним рівнем носійної спроможності.

– розробити концептуальну модель ПОПР з визначенням в ній структурні та оціночні аспекти за презентативною кількістю та сутністю вмісту укрупнених блоків (БПО) з виділенням її бази (в тому числі за допомогою функції вибору), а також несуперечливу систему оцінювальних критеріїв у вигляді ототожнено - наслідкового зв'язку з ПОПР.

– на основі ПОПР розробити з графічним представленням формалізовану базову модель (основи) процесів виготовлення та оцінювання АТП, яка зосереджена в загальному на технологічному аспекті окреслення їх динаміки з відображенням істотних сторін об'єкта, причім, принцип її вихідної побудови дозволяє, розширювати область цього представлення з можливістю залучення основних положень, побудов та глибинних зв'язків абстрактних теорій (р.р. 4, 5).

2. Чинники зв'язуючого ПКМ в оцінці альтернатив (матеріально – технологічна якість вихідного компонента ТП)

Зв'язуюче ПКМ, згідно рис. 1 є першим об'єктом в лінійно структурованому наборі виділених об'єктів ПОПР (п. 3, табл. 2). Інші об'єкти плануються деталізовано представити у наступних публікаціях. Всі вони (їх кількість, функції, суттєві міжоб'єктні зв'язки) і визначають сутність ПОПР. За кордоном, в основному використовуються безрозчинні зв'язуючі з більшою ніж розчинні експлуатаційною живучістю виробів [3, 27]. Адаже в процесі експлуатації авіаційної техніки відбу-

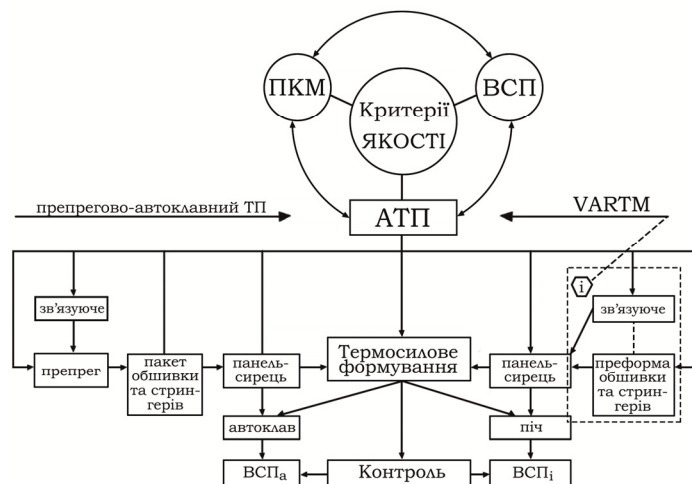


Рис. 1. Технологічна схема етапного оцінювання відносної якості порівнюваних АТП (етап i- інфузія)

ваються помітні зміни її технічного стану, обумовленого впливом зовнішнього середовища і режимів навантаження. Тому до основних критеріїв оцінки якості ПКМ, як конструкційних матеріалів належать параметри опору силовим навантаженням, а також зовнішнього впливу.

Застосування зв'язуючих (матриць) для ПКМ – важлива проблема, оскільки помітна чисельність властивостей композитів, як характеристика їх якості, багато в чому визначаються ним. В першу чергу, саме ця структурна фаза створює монолітний ПКМ, перерозподіляючи напруження між волокнами. Водночас, матриця перешкоджає: росту тріщин за рахунок відносної пластичності чи місцевого відшарування від волокон та ін. [3, 18, 26, 27]. Наскільки реалізуються високі механічні властивості вуглеволокон в ПКМ, залежить від таких багаточисельних властивостей зв'язуючого: міцність, жорсткість, в'язкість при руйнуванні, експлуатаційна живучість (ударні в'язкість та міцність¹³, вода – та атмосферостійкість), трансверсальна (поперек волокон) міцність. Тобто взагалі високі механічні властивості композитів рішучим чином визначаються полімерною матрицею і властивостями границі розділу фаз [3, 18, 26, 27], що підвищує ступінь носійної здатності АК і свідчить про високу потенційну (очікувану) корисність зв'язуючого.

Високоважливим, а іноді і вирішальним є технологічні властивості та особливості, а саме: час, кінетика ствердіння, рівень в'язкості зв'язуючого та тиску при формуванні, які сильно пов'язані з рівнем пористості ПКМ [3, 18, 23–25], змочуваність армуючого матеріалу, усадка та інше. Так, до особливостей вакуум - інфузійних ТП слід віднести низьку в'язкість зв'язуючого, а також низький тиск та високу температуру при формуванні АК. Процес ствердіння в печі може йти протягом 20 годин (?) при температурі 170–180° С [3].

¹²Наприклад в [6] зазначається, що квазіпорядок – це відношення, яке є водночас рефлексивним і транзитивним. Таке відношення виникає у випадку порівняння декількох альтернатив за векторним критерієм якості. Саме зв'язуюче ПКМ є першою компонентою у векторному критерії якості порівнювальних варіантів альтернатив (прим. авт.).

¹³Йдеться про властивості ПКМ перпендикулярному напрямку до площини армування, а саме ударостійкості, зовнішнього носійного шару, а також тріщиностійкості при поперкових шарів до розвитку тріщин розруйнування міжшаровому просторі під дією нормальних та тангенціальних навантажень, що виникають в процесі експлуатації виробу [3, 26].

Переваги та недоліки порівнюваних зв'язуючих

В статті розглядається два види оцінюваних розчинних зв'язуючих: препрегові¹⁴ та інфузійні.

Кожному із них притаманні зазначені нижче свої характерні особливості. Аналіз зарубіжних даних по вуглепластикам виготовленим автоклавним і безавтоклавним методами [14, 15], а також результатів випробувань конструктивно – подібних елементів, проведених в ФГУП “ЦАГП” [14], показав, що найкращими міцністними характеристиками володіють елементи АК з вуглеплатистиків, одержаних препреговим автоклавним методом з використанням однонаправлених стрічок. В таких ПКМ та конструктивних елементах високонантажених АК можна досягти максимального об'ємного вмісту вуглецевого армуючого наповнювача (до 65–75 об %) при мінімальній пористості (до 1%) [15]. Станом на сьогодні традиційно високоякісних щодо ПКМ препрегово-автоклавних ТП можна віднести до еволюційних, як ті, що знаходяться на шляху постійного удосконалення та розвитку. Тут приріст продуктивності сукупної праці, як особливості еволюційності, проходить в основному при збільшенні затрат минулої праці. Водночас, виготовлені методом вакуумної інфузії ПКМ можуть мати своє застосування в середньо- і низьконавантажених АК [3, 15, 22–24].

В порівнянні з полімерними зв'язуючими, що застосовуються для виготовлення АК за препреговою технологією, зв'язуючі для безавтоклавних процесів повинні мати більш низьку в'язкість для повного просочення волокнистого наповнювача на протязі виробничого циклу. Порушення технологічного процесу може привести до утворення сухих, або майже сухих плямистих місць в великогабаритних конструкціях (дефект

типу “непроклей”, або “голодна склейка шарів композиту”). Низьков'язкі зв'язуючі характеризуються більш високою крихкістю та напруженнями в отверділій матриці, що понижує рівень фізико-механічних характеристик і тим самим впливаючи в тій чи іншій мірі на міцність і носійну здатність АК [3, 15], що говорить про перевагу в цьому питанні препрегово-автоклавної технології.

Всі вони залежать від властивостей інфузійного зв'язуючого (в'язкості, реокінетики, стабільності, технологічних властивостей і усталеності ТП та ін.) швидкісних характеристик потоку зв'язуючого, а також від температурно – часових параметрів формування¹⁵. Наприклад, для одержання довгомірних виробів (довжиною до 10 м [18]), зв'язуючі повинні мати достатньо низьку в'язкість (в діапазоні 0,10–0,30 Па·с) з верхньою межею біля 0,50 Па·с [3, 15].

Одним із основних дефектів, що значно впливають на величину міцності та інших характеристик конструкційних композитних АК є пористість ПКМ. І тому вирішення цієї проблеми, в першу чергу, зосереджено на вуглекомполитах [3, 15, 21–26]. Однак, на сьогодні відсутня послідовна теорія, яка пов'язує константи механічних характеристик конструкційних ПКМ з кількістю, формою та характером розосередження дефектів і, передусім пористості по площині та товщині крупногабаритних носійних панелей. Невелика пористість (менше 1%) навіть і при суттєвому завищеному значенню коефіцієнта безпеки (що має місце на сьогодні [1]) має бути досягнута ТП у всіх відповідальних високонантажених АК, поскільки їх роботоспроможність впливає на льотну придатність машин і в нашому випадку це магістральні літаки¹⁶. Останнє, найперше, це стосується новітньої вакуум-інфузійної технології (VARTM) [1–3, 14, 15, 21–27]¹⁷, поскільки на сьогодні ця норма не досягнута, маючи 1,5–5 % [3, 21 та ін.].

Поява пористості пов'язана з наявністю у зв'язуючого великої кількості розчинників чи вологи з – за неправильних режимів термообробки (велика швидкість нагрівання, низький тиск), а також з утворенням повітряних пузирців, що виникають на етапі просочення армуючих матеріалів при інфузійному способі формоутворенні виробу. Пори справляють негативний вплив на опір деформаціям зсуву в ПКМ і в меншій мірі опір, які зумовлені розтягом та згином напруженням [24].

Але ясно, що ці показники в певній мірі також залежать від використовуємих матеріалів та схем укладання вуглестрічок.

Пористість також погіршує характеристики матриці, особливо термореактивної. Так, згідно [24] пористість в 1 % зменшує її міцність до 15 %, а втомну довговічність до 50 %. Для запобігання значної пористості, наприклад, при виготовленні товстостінних композитних конструкцій іноді в структуру пакета препре-

¹⁴Одержання препрегів здійснюється в автоматизованому спостережному процесі методом просочення армуючого наповнювача в смолах [3, 19, 20]. Цей напівфабрикат ПКМ стабілізуючим чинником чи просто стабілізатором структури композита в АК при спільному їх виготовленні.

¹⁵Детальніше тут під дією в закритій формі вакуумного розрідження реалізується просочення армуючого каркасу з утворенням панелі - сирця шляхом прогонки зв'язуючого (силовий потік) через сухий пакетовий каркас (з малої тинини зі слабкими поперечним зв'язками вуглеволокон преформа) без можливості спостереження за наявним станом подінь рухливого зв'язуючого.

¹⁶В будівництві використовується коефіцієнт надійності за відповідальністю (коефіцієнт відповідальності) ДБН В.І.2 – 14, 2009, 2018. Це коефіцієнт, що враховує конструкції та клас наслідків (відповідальності) об'єкта, а також можливі наслідки відмови.

¹⁷Прийнято, що пора (мікродефект) має розмір менше 100 мкм, а повітряне включення типу раковина, як макродефект і більш ніж 100 мкм [23].

гів вводять сухі шари тканини, чередуючи її з декількома шарами препрега, в залежності від початкового вибору зв'язуючих в препрезі та необхідного вмісту зв'язуючого в готовому виборі. Такі шари, являючись хорошими дренажними матеріалами, забезпечують відходження зв'язуючих з ближніх шарів препрега та уберають надлишки шарів з них [24]. Але такий метод є успішним в проблемі усунення пористості при вакуумно-автоклавній технології і не може бути здійснений при інфузійній технології

Мала стійкість вуглекомполімерів щодо механічного удару (по поверхні несучої обшивки), понижує область їх можливого застосування [3, 27]. Стандартний спосіб збільшення тріщиностійкості ПКМ може бути досягнутий тоді, коли концентрація термопластичного полімера перевищує 20 % (за масою). Однак, в цьому випадку в'язкість зв'язуючого стає вкрай високою, що робить даний спосіб непридатним для використання композитних ПКМ методом інфузії [3].

Щодо особливостей препрегових зв'язуючих, особливо липкості, яку описують її, як основну в'язкісно-технологічну властивість препрега, характеризуючи якість адгезії (рівень підсушеності). На сьогодні широко використовують два автоматизованих процеси для викладки односпрямованих препрегів - автоматизована викладка стрічок ATL (Automated Tape Laying) та автоматизована викладка волокон AFP (Automated Fiber Placement). Особливість процесу ATL в тому числі його безперервність, багато в чому залежить саме від липкості препрега.

Якщо у препрега відсутня необхідна липкість, то, або вийшов термін придатності, або частково пройшло отвердіння матеріалу, що робить його не придатним для подальшого використання. Тому тут необхідний постійний контроль та підрегулювання липкості препрега.

Взагалі, автоматизація процесів виготовлення та розкрою препрегів також, наприклад застосовується і у виробництві кіля та стабілізатора літака МС-21, що дозволило суттєво підвищити економічну ефективність виготовлення виробів при забезпеченні високого рівня фізико-механічних властивостей та їх стабільне повторення від виробу до виробу [3, 20]. Таким чином, по багатьом основним механічним характеристикам міцності, по ударо-і тріщиностійкості (в'язкість руйнування) конструктивні ПКМ на основі препрегових зв'язуючих (автоклавне формування) в тій чи іншій мірі перевищують аналогічні характеристики ПКМ на основі інфузійних зв'язуючих (вакуумне формування)

¹⁸ В шкалі відношень значення від 1 до 9, оскільки такої кількості відповідає психологічна межа 7 ± 2 предмети для одночасного порівняння. Водночас, якщо важко розрізнити, скільки існує проміжних градацій – можна застосувати шкалу із меншою кількістю градацій. Наприклад, порядкову п'ятибальну шкалу з кроком 1.

[1–4, 14, 15, 21–27]. Останнє в процесі довготривалої експлуатації АК може негативно вплинути на рівень міцності та рівень їх несучої зданості, що необхідно враховувати. І, нарешті, тут йдеться без визначення величини витрат, так як для порівнювальних альтернатив ці витрати (в загальній сумі всіх витрат) є доволі близькими.

Для оцінювання ступеня переваг на множині альтернатив застосовують різноманітні шкали вимірювання, кожні з яких властиві свої допустимі перетворення. Метризовані бінарні відношення дають змогу брати до уваги ступінь переваги для кожної пари альтернатив, тобто бути точнішими ніж звичайні бінарні відношення враховуючи силу переваги. Тут широко застосована фундаментальна шкала ранжування Т. Сааті для критеріїв і альтернатив (табл. 1) [3, 6, 8]. Бінарні порівняння робляться оцінками в межах від 1 до 9, де основним припущенням для порівняння альтернатив є: якщо наприклад атрибут А абсолютно важливіший (абсолютна перевага) за атрибут В і оцінюється на 9, то В має бути абсолютно менше важливим, ніж А і оцінюється як $1/9^{18}$.

Як перше наближення, можна вважати, що сила переваги препрегового зв'язуючого за показниками (параметрами) пористості та в'язкості (табл. 1 та табл. 2), як характеристики функції знаходиться на рівні 4–4,5 одиниць (тобто ближче до 5 за шкалою Сааті). Йдеться про попередню в цілісному підході (перше наближення) оцінку, поскільки в кінцевому результаті (всі об'єкти) враховуються, в т.ч. тісні зв'язки зв'язуючого, як частини цілого, з іншими етапами процесу, а також місце об'єкта в такій загально – принциповій сутності: *“рівень відносної якості панелі та ТП – рівень витрат та можливих ризиків”*.

Таблиця 1. Шкала ранжування для критеріїв альтернатив

Важливість	Визначення Однакова	Роз'яснення
1	Однакова важливість	Два фактори спричиняють однаковий вплив на мету
3	Трохи важливіший	Досвід і оцінювання – показують невелику перевагу одного над іншим
5	Більш важливіший	Досвід і оцінювання – показують сильну перевагу одного над іншим
7	Набагато важливіший	Досвід і оцінювання – показують значну перевагу одного над іншим. Його важливість демонструється на практиці
9	Абсолютно важливіший	Очевидна перевага одного над іншим
2,4, 6,8	Середні значення	Коли потрібен компроміс

Таблиця 2. Предметна область прийняття рішень та склад критеріїв оцінки альтернатив (серійне виробництво ВСП)

Предметні об'єкти: декомпозиція по блокам і їх деталізація		Оціночні критерії
Тип	НАЙМЕНУВАННЯ	
1	2	3
ПФ-1	Блок 1. Полімерні зв'язуючі та матриці ПКМ виробу	K ₁
	Рівень пористості. Вплив на характеристики ВСП*	K ₁₁
	Рівень в'язкості. Вплив на тріщиностійкість	K ₁₂
ПФ-2	Блок 2. Напівфабрикати (преформа, препрег)	K ₂
	Обладнання та виробничі умови	K ₂₁
	Вплив на отримання високонадійного ПКМ	K ₂₂
	Виробнича тривалість АТП*	K ₂₃
ВС-1	Блок 3. Сформування "сирої" заготовки панелі: а) стрингерний набір, б) обшивка	K ₃
	Вірогідність утворення "голодної" спайки шарів ПКМ*	K ₃₁
	Однорідність структурної організації компонентів "сирої" волоконної заготовки	K ₃₂
	Рівень усталеності ТП. Налагодження і піднастроювання ТП	K ₃₃
	Рівень повноти контролю ЧТП	K ₃₄
	Виробнича тривалість ЧТП*	K ₃₅
ВС-2	Блок 4. Термосилове формування заготовки панелі	K ₄
	Тиск при отвердінні. Вплив на якість пропресування ПКМ	K ₄₁
	Ефективність складу технологічних параметрів в управлінні якістю формуючого виробу	K ₄₂
	Відносна виробнича тривалість ЧТП*	K ₄₃
ВС-3	Блок 5. Відносна якість продукції	K ₅
ВС-3	Блок 5. Відносна якість продукції	K ₅
	Рівень фізико - механічних характеристик (ФМХ)	K ₅₁
	Розкид значень ФМХ. * Рівень рівноцінності ФМХ по всьому (\ об'єму (площині та товщині) виробу	K ₅₂
	Водо – і атмосферостійкість ПКМ**	K ₅₃
	Стабільність геометричних розмірів	K ₅₄
ПС-1	Блок 6. Основні відносні виробничі витрати	K ₆

Продовження табл. 2

1	2	3
	Вартість обладнання*	K ₆₁
	Вартість оснащення*	K ₆₂
	Енерговитрати	K ₆₃
ПС-2	Блок 7. Рівень довіри до серійного виробництва	K ₇
	Рівень технологічної зрілості	K ₇₁
	Наявність можливих невизначеностей (ризиків)	K ₇₂

*Для показників об'єктів та процесів з трендом: "чим менше цей показник, тим краще" (наприклад для K₁₂ це більш монолітний ПКМ).

**Низьке водопоглинання, слабка зміна властивостей при вологопоглинанні.

3. Предметна область порівнюваних альтернативних ТП виготовлення композитних панелей (концептуальна модель)

Як відомо, в прийнятті рішень мають місце різні ситуації, при яких виникають проблеми, одна з них це ситуація нових можливостей, яка породжена науково-технічним прогресом та новітніми інноваціями і серед них, альтернативна технологія VARTM. Для кращого розуміння вихідних положень визначених в статті технологічно процесної ПОПР, на рис. 1 представлена технологічна схема етапного оцінювання відносної якості об'єктів порівнюваних АТП. Йдеться про сукупність проміжних, ціленаправлено пов'язаних між собою, часткових багатоопераційних процесів (ЧТП), що виконуються на відповідних ділянках корпусної структури і забезпечують виготовлення ПКМ і самого виробу (панелі) на основі проміжних продуктів в такій послідовності: зв'язуючі, напівфабрикати, панель – сирець (так зване матеріально-технологічне забезпечення).

Тобто тут йдеться про незатверджені ("сирі" об'єкти ПОПР). Вони в подальшому (п. 4) на графіку квадратної функції (рис. 2) представлені у виділеній лівій частині (зоні). Причому, що важливо, на практиці загальна довжина кроку часу між порівнюваними процесами, включаючи час виконання самої ТП і час переходу до наступної ТП, може сильно варіюватись по різним причинам, тому в статті йдеться лише як просто дискретні порівнювані АТП. В статті предметна область, як загально визначено – це частина реального світу, що розглядається в межах певного контексту. Під цим тут розуміється вивчення та дослідження інформаційних потреб системи технологічного виробництва ефективних композитних АК. Ясно, що одним із перспективних напрямків є дослідження та визначення превалюючих технологій з залученням основних положень теорії прийняття рішень, говорячи тут, в першу

чергу, в розрізі концептуальної моделі з оглядом на технологічну якість альтернатив в серійному виробництві.

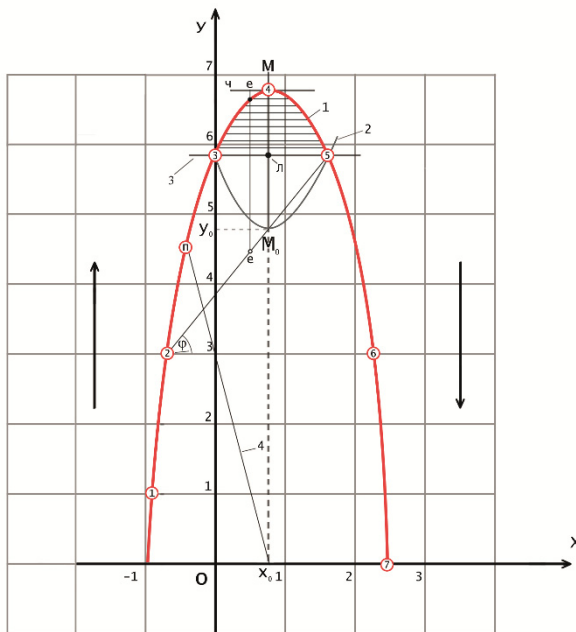


Рис. 2. Квадратичні функції:

$$1 - y = -\alpha x^2 + bx + c;$$

$$2 - y = \alpha(x - x_0)^2 + y_0;$$

Згідно [9–11], концептуальна (змістовна) модель – це структура моделюємої системи, властивості її елементів та причинно-наслідкові зв'язки, що властиві системі і суттєві для досягнення цілі моделювання. Крім цього, ця модель повинна бути побудована з урахуванням її подальшої формалізації (р.4), що спростить задачу прийняття рішень. Водночас, це модель предметної області, що складається із сукупності виділених функціонально взаємопов'язаних БПО для опису цієї області, разом з властивостями та характеристиками цих понять, в тому числі, виходячи з особливості та значимості технологічного оснащення в технології композитних АК (п. 5.1.2). БПО підрозділяється на рядові та укрупнені. Під останніми розуміється, що в даному блоці задіяне “потужне” в плані роботоспроможності оснащення. Це може бути одиночне визначальне оснащення, або чисельний набір більш простого оснащення.

Тому загалом – концептуальною основою при побудові представленої в статті предметної області є

використання порівняльного методу [3] з такими вихідними положеннями:

- між суттєво різними, задіяним у виробництві АТП, існує об'єктивна спільність – виготовлення ними композитної панелі кесона крила;

- використання методу парного порівняння (бінарні відношення) альтернатив, а саме препрегово-автоклавного і вакуум-інфузійного ТП з метою визначення їх відносної якості.

- зазначене парне порівняння здійснюється за найважливішими найсуттєвішими і, водночас, найбільш визначальними (у плані виконання конкретної задачі) ознаками.

- визначення складу предметної області включає за вибіркоким критичним підходом рішення (при інших рівних технологічних умовах), якщо основні етапні БПО в своїй сукупності достатньо повно характеризують альтернативи при їх критеріальній оцінці.

- ПОПР представлена, як презентативне та кількісно концентроване відображення (зі спрощеннями та деякими обмеженнями) відображення в рамках вихідної структури АТП і ЗПР.

Нижче представлена (з можливістю в подальшому її уточнення) таблиця 2 з багатоблоковим складом ПОПР та ототожнених з ними критеріїв. Тобто йдеться про якісне мірило превалювання виділених спільних для порівнюваних АТП семи ($m = 7$)¹⁹, тісно пов'язаних між собою, основоположних (ключових) БПО. Ці сім блоків являють собою множини з відношенням лінійного порядку і являє собою перший рівень деталізації ПОПР (корінь деревовидної структури).

Всі вони в таблиці розгорнуті в порядку послідовності конкретних об'єктів робочого (виробничого та оцінювального) функціонування і поділені на такі три типи:

ПФ – напівфабрикати (препреги, преформи, полімерні зв'язуючі та матриці ПКМ). Цей тип можна визначити, як матеріально-технологічне забезпечення: (блоки 1, 2).

БС – базисно - складовий тип. Йдеться про складові базису ПОПР – це укрупнені блоки в основному 3, 4, 5. Згідно функції вибору, кожному ЧТП базису задіяний вже всеціло зібраний панельний об'єкт (“сирий” чи відформований) і на додаток, це, серед інших, самі складніші і триваліші ЧТП. Важливою ознакою базису є те, що тут дано комплексне представлення про виготовлення, випробування та контролю саме панелей з застосуванням:

- складної високовитратної технологічної оснастки (ТО) та технологічного обладнання;

- випробувального оснащення та устаткування;

- контрольно - виміральної апаратури та устаткування. В цілому базис практично це виділене;

- репрезентативне угруповання, у вигляді графічно узагальненого образу ПОПР.

ПС – об'єкти загалом підсумкового оцінювання: в основному блоків 6, 7.

¹⁹В [35] на основі досліджень зазначається, що числа 7 і 8 є природною межею числа взаємодіючих елементів, обумовленого необхідністю погодженості.

В статті при побудові ПОПР, з оглядом на подальшу формалізацію (р. 4) також залучено поняття “аттрактор” в наступному варіанті його трактування – це фактор (навіть і незначний дієвий вплив), що має вирішальне значення у переході відкритої складної системи в новий стан [3]. У практичному застосуванні до технології машинобудування, цей варіант аттрактора розглядається в розрізі конкретних ТП та конструктивно – технологічних особливостей виробів, водночас, зважаючи на фактор одержання позитивного результату. На відміну від інших аттракторів (фізичних, економічних), має вирішальне значення у переході відкритої складної системи в новий стан [3].

У практичному застосуванні до технології машинобудування, цей варіант аттрактора розглядається в розрізі конкретних ТП та конструктивно – технологічних особливостей виробів, водночас, зважаючи на фактор одержання позитивного результату. На відміну від інших аттракторів (фізичних, економічних), тут можна говорити про так званий простий технологічний аттрактор, або простий²⁰ аттрактор ТП і, насамперед, “це усталена точка притягання” ним зазначених вище неусталених проміжних об’єктів ТП (перехідні процеси $m_1 = 3$) для кінцевого термосилового формування ВСП (рис. 1). Взагалі, йдеться про систему блоків в якій розглядається, як дві тематичні різні частини (умовно $m = 3+1+3$), що функціонують в єдиній динаміці в постійному взаємозв’язку з один одним утворюючи цілісне середовище для порівняння альтернатив. Причём, першорядною (центральною частиною), що саме визначає динаміку є набір “технологічних” блоків на “чолі” з аттрактором, а для блоків другої оцінювальної частини ($m_2=3$) характерним є підлаштування до першої і слідуванням за нею.

Таким чином, сукупність БПО відображує визначену експертом поетапну технологічно – оцінювальну послідовність при виготовленні ВСП, випробування зразків та контролю якості виробів та процесів.

Водночас, виділені БПО та відповідні до них критерії утворюють загальну оцінювальну верхову ситуацію²¹ в технологічному середовищі. Щодо презентаційної повноти складу ПОПР, то наявна особливість, яка полягає в тому, що з метою спрощення тут не був врахований важливий об’єкт етапно-виробничої спільноти АТП, однак не першорядний в поставленій задачі. Йдеться про фінішну механічну обробку стрингерної панелі після її термосилового формування (автоматизована обрізка технологічних припусків по контуру обшивки панелі і торців її елементів). В порівнюваних АТП це практично близькі по реалізації процеси,

що виконуються на спеціальному обладнанні. Наприклад, при механічній обробці панелі літака МС-21 використовується 5 – координатний фрезерний центр МТоррес [3]. Крім цього, порівнювані з визначеними ПОПР взаємопов’язаними процесами, механічна обробка має з ними слабкі зв’язки, тобто цей процес не впливає на перевагу того чи іншого АТП. Але все ж таки, якщо в ПОПР це відсутній об’єкт, то в р. 4 він побічно врахований. Також для спрощення, “сира” стрингерна панель (блок 3) представлена, як цілісний об’єкт, хоча має дві розрізнені в процесі виготовлення складові: набір стрингерів (3 а) та обшивку (3 б). При необхідності це буде досліджено при загальному оцінюванні альтернатив (табл. 2).

Очевидно, що порівнювані сутність, актуальність та ефективність кожного автономного БПО, як об’єкта вищого рівня, базується саме на техніко-виробничій ефективності сукупності, виділених при оцінці, первинних елементів (ЕПО). Тобто йдеться про різноаспектність з груповими БПО, бо елементні ЕПО існують у вигляді практично застосовуваних показників, що і утворює дворівневу ієрархічну структуру ПОПР (табл. 2) при оцінці альтернатив. Відповідно до вказаного поділу ПО, в ієрархії критеріїв виділені локальні вищого (K_i) та першого рівня (K_{ij}). До K_i – критеріїв, більш високого рівня, в ролі альтернатив виступають первинні критерії, або конкретні критерії – показники K_{ij} (наприклад, в’язкість зв’язуючого, як частковий показник).

Формально, використовуючи поняття теорії графів (дерева), критерії K_i та K_{ij} складають (кістяк, скелет) оцінюваної моделі ПОПР, де вітки дерева утворюють саме критерії вищого рівня K_i , а листя (кінцеві вузли) – критерії K_{ij} . В цій моделі вагу (довжину) кожної вітки можна інтерпретувати, як вагомість чи важливість цього критерія, а вагу вершин (листя) – як число балів за даний критерій. Тобто даний граф деревоподібної структури має визначені частини з визначеними властивостями.

Отже, ПОПР створена і визначена за умов необхідності, достатності та доцільності і є фіксованою обмежуючою областю. Вона представляє собою набір за важливістю і/або суттєвістю функціонально розрізних етапно – процесних, пов’язаних між собою блоків, які з ототожненими з ними відповідним набором критеріїв вибору мають дворівневу ієрархічну структуру.

По своїй природі, визначений симплекс блоків має інцидентну структуру. До них, наприклад, належить скінчена проективна площина, причём, часто застосовуваний при моделюванні – трикутник [3, 31, 32]. Вона має таке число точок та прямих з визначенням їх інцидентності (тобто точка лежить на прямій), що задовольняє вимогам набору обов’язкових аксіом. Причём, найменшою проективною площиною вважається трикутник Фано (7 точок та 7 прямих). Тому, при побудові ПОПР бралось до уваги обставини визначеної інцидентності в ТПДС.

²⁰При станах системи, що визначається простим аттрактором траєкторія її розвитку є передбачуваною.

²¹Тут задіяний принцип згортки інформації та критеріїв, а саме згортання, укрупнення при русі по ступенях ієрархії знизу вгору.

Таким чином, структуризація складної ПОПР є багатоскладовою процедурою, здійснюваною по блоково – ієрархічному принципу, де процес проектування членується на рівнях, на кожному з яких представлення про об'єкт порівняльної оцінки залежить від ступеню структурно – функціональної деталізації [3]. Ясно, що ПОПР має закінчений вигляд, коли згідно концептуальної моделі будуть визначені на основі показників по числовій шкалі бальні оцінки критеріїв вищого рівня ($K_1(v) \dots K_7(v)$), тобто всіх семи функціональних БПО. Ці числа, насамперед, складають вектор, який в [7] називається векторною оцінкою варіанта альтернативи.

4. Макрорівнева базова модель динамічної системи

4.1. Загальне технологічне - математичне представлення

Розвитком концептуальної моделі ПОПР (р. 3) є її формалізація, а саме ТПДС (р. 1). В статті вона являє графік ходу досліджуваного технологічного процесу на рівні групових функціональних блоків (БПО) та його постадійний аналітичний вид. Разом вони представляють абстрактну вербальну багатокритеріальну модель [3, 9, 11], для якої на першому місці стоять цілі моделювання.

Вона включає зведений систематизований варіант ПОПР і спроектований варіант її формалізації на основі аналітичного виразу, тим паче, що аналітичне і імітаційне моделювання характерні саме для процесів функціонування системи [3, 5, 8, 10, 11, 34–36]. В статті йдеться про базову математичну модель (р. 4) та її деталізацію (р. 5). Детальніше, згідно класифікаційних ознак методів моделювання технічних систем [10], представлена модель відноситься до наочно дискретних аналітичних моделей з частковим відображенням об'єкта – аналога.

У вибраній формі представлення (рр. 1, 3) базової формалізованої моделі, це квадратичний (ступені 2) многочлен однієї змінної (квадратичний тричлен, квадратична функція).

Предметом дослідження зазначена функція G – ціла раціональна форма другої степені виду $f(x) = ax^2 + bx + c$, де $a \neq 0$ і $a, b, c \in R$, а її графіком є парабола (рис. 2). Тобто йдеться про формальну модель поєднану з графічним представленням. Цей вид функції G задавався із вимог схожості або близькості до практики, як для окремих так і для в певному сенсі для сукупності процесів. Тому вибір вказаної аналітичної форми представленої моделі має таке пояснення. Вона в опосередкованому часовому вимірі демонструє динамічну поведінку, пов'язаних між собою визначених процесів; має помірну кількість об'єктів дворівневої ієрархічної структури з наявним базисом ПОПР; має визначений аттрактор динамічної системи та його “зону

або басейн впливу”. В статті з оглядом на визначений аттрактор, йдеться про цільовий послідовний перехід (перетворення і/або перебудову) (рис. 1) так названого агрегатно – технологічного стану матеріалів об'єктів ТП: рідинний (зв'язуюче); м'який, податливий, напівтвердий (напівфабрикати, заготовки) у твердо – цільовий об'єкт (ВСП). Причому, тут в процесі термосилового формування відбувається низка стабілізуючих фізико-хімічних процесів, супроводжуваних переробку ПКМ [3]. Таким чином, в перехідному процесі до аттрактора має місце радикальна зміна проміжного нестабільного стану передільних об'єктів з коротким терміном життєдіяльності (в основному, на рівні місяця) до стабільного стану композитної силової авіаконструкції з високими фізико – механічними властивостями і довготривалим терміном експлуатації. Для аттрактора – це кінцевий стан ТПДС. Представлена на рис. 2 парабола (початок: -1, або |1|) побудована за алгоритмами (через п'ять основних точок в ході ТП, п. 4.4).

4.2. Особливості та передумови побудови формалізованої моделі

Порівнювані АТП є об'єктами, яким при цільовому тривалому перебігу (багатоетапному технологічному переміщенню) притаманні особливості, які мають бути постульовані в адекватній сутності формалізованої моделі, а саме:

- цільовий нарощувальний розвиток об'єктів АТП (поточна зміна стану, форми, укрупнення зі збільшенням об'єму і/або ваги з початку ТП аж до отримання кінцевого результату (y_{max}));
- збільшення складності об'єктів і /або об'єму робіт;
- як результат дії попередніх чинників, має місце уповільнення ходу ТП;
- за наявності аттрактора, бажано в графіку параболи виділити його зону (басейн, область) максимального впливу (р. 3).

Для представлення загальної картини формалізації повинні бути також визначені і враховані:

- знаки при першому коефіцієнті квадратичного рівняння та його дискримінант D . Аналіз показав, що вказана вище особливість практично враховується при $a < 0$, тобто коли парабола своїм віттям направлена до низу;
- напрямки застосування запропонованої формалізації процесів (рр. 4, 5).

У вигляді $D > 0$, парабола має дві точки $(x_1; 0)$, $(x_2; 0)$ перетинання з віссю OX . Тобто два корені, де x_1 та x_2 – абсциси першої та другої крайніх точок параболи. Ці дві точки трактуються, як початковий та кінцевий процеси ПОПР. На графіку показано, що $x_1 = -1$, а $x_2 = 2,5$. При абсолютному значенні величина загального опосередкованого часового проміжку становить 3 і, 5 і. Причому, вершина параболи M лежить посередині цього проміжку між двома коренями (абсциса x_0). Як зазначено вище, при побудові графіка вказаної квадра-

тичної функції важливу роль відіграє дискримінант: $D = b^2 - 4ac$. Взагалі, дискримінант, перший (старший) коефіцієнт a , абсциса x_0 , вершина параболі M , конструюють “каркас”, на якому базується теорія квадратичної функції [3]. В розрізі тематики статті, можна говорити про частковий формалізований об’єктно – процесний ПОПР.

Віддалена аналогія відношень (хід процесів ТПДС). Як відомо, аналогії властивостей та відношень широко використовується в процесі моделювання. Ці два види аналогій мають лише відносну різницю, тому говорячи про аналогію відношень необхідно рахуватися з тим, що обидва вони подібні, а відтак, відношення уподібнюються саме по своїм властивостям, в статті йдеться про висновок через перетворення суджень. Вище в п. 1 було зазначено про непряме (стісне) представлення незалежної змінної часу у вигляді проміжку між коренями x_1 і x_2 . Незважаючи на цю опосередкованість, тут можна в наближенні (без точних часових викладок), як віддалену аналогію з механіки про рух кульки пущеної вгору по похилій площині (рис. 3 [3]), де тангенс кута нахилу графіка її переміщення до осі ОХ чисельно дорівнює швидкості (ϑ). Причём, тут має значення вгору чи донизу по похилій площині йде переміщення кульки відносно напрямку ординати (рис. 3) [38].

При $t = t_1$ кут нахилу $90^\circ > \alpha > 0$ і $\vartheta_{1x} = \operatorname{tg}\alpha_1 > \alpha > 0$. З плином часу нахил графіка і швидкості руху зменшується і в точці відповідній вершині параболі стає рівній нулю – тут кулька на мить зупиняється. При $t = t_2$ кут нахилу $\alpha_2 < 0$ і $\vartheta_{2x} = \operatorname{tg}\alpha_2 < 0$ – кулька рухається вниз по похилій площині (вісь x направлена вгору). Права гілка (схил) параболі відповідають рівноприскореному руху: $|\alpha_3| > |\alpha_2|$ і $|\operatorname{tg}\alpha_3| > |\operatorname{tg}\alpha_2|$, тобто $|\vartheta_{3x}| > |\vartheta_{2x}|$ – швидкість росте по абсолютній величині [38].

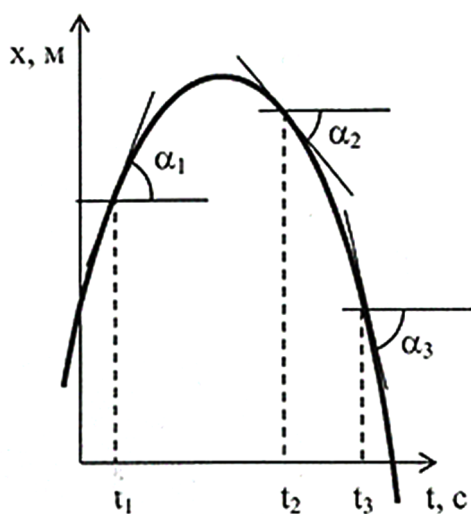


Рис. 3. Крива зміни швидкості по русі вгору по похилій площині

4.3. Числові значення параметрів (коефіцієнтів) рівняння параболі:

– $a = -2$. вибір знаку коефіцієнта $a < 0$ пов’язаний з аналогом ДС (п. 4.1), а величина a – з висотою параболі. Також йдеться про складну і важливу для оцінки дворівневу структуру об’єктів ПОПР і критеріїв вибору (п. 3);

– $b = 3$. Кількісний склад базису ПОПР;

– $c = 5$ (орієнтоване значення). Це вільний член квадратичної функції $f(x)$. В першому наближенні він трактується, як позабазова кількість об’єктів (на сьогодні приклади його практичного визначення із літератури не відомі). Тут саме береться до уваги також не врахована раніше “механічна обробка”. Тоді $m = c + b = 8$ і квадратичне рівняння параболі має вигляд: $y = -2x^2 + 3x + 5$, де $D = 49$.

4.4. Визначені (особливі) точки та прямі

При розв’язанні рівняння брались до уваги:

– раніше представлені корені рівняння;

– M – як особлива точка параболі – це її вершина, де змикаються дві віти параболі, яка є найближчою точкою до директриси. Через вершину на координатну площину проведена фокальна вісь параболі ($x_0 = 0,75$), ділячи її на ліву та праву частини. Кожна з віток відносно вершини містить по три БПО, причём, в лівій частині це проміжні “сирі” об’єкти, і, як перехідні процеси є максимальною “зоною” впливу аттрактора. В правій частині, де розташовані блоки визначення якості відформованої інтегральної панелі підсумованого оціночного характеру, з наявними зв’язками з аттрактором. Парабола має поза графіком поблизу (прилегли) рівновіддалені від точки M фіксовані елементи, яким у подальшому дане технологічне трактування. Це фокус параболі – точка F та пряма L – її директриса (рис. 4). По відношенню до точки M ординати $y_F = y_L = 1/4a$, де фокус розташований під, а директриса над нею. Із рис.2 видно, що вказаним “оточенням” фокуса є блоки 3, 4, 5 базису ПОПР.

– M – точка, як простий технологічний аттрактор точкового типу. Він відповідає вимогам сумісності з простором установлених режимів ТПДС, і, найперше, з простором перехідних процесів, направляючи їх рух і еволюцію у визначеному напрямку. Тобто це кінцевий процес (термосилове формування) перетворення (перебудови) “сирих” об’єктів в їх послідовному русі (стремлінні) до аттрактора (рис. 4). Це положення прикінцевості аттрактора має закріплення у формалізованому вигляді $f(a) = a$, тобто технологічний аттрактор – це нерухома точка M . Згідно класифікації аттракторів за ознакою “стремління” – це найбільш поширений в ТПДС “максимальний аттрактор”, до якого “все липне” [3];

– точка перетинання параболі з віссю OY ($x=0$), тобто $y = c$;

– $Ч$ – дотична пряма до вершини M .

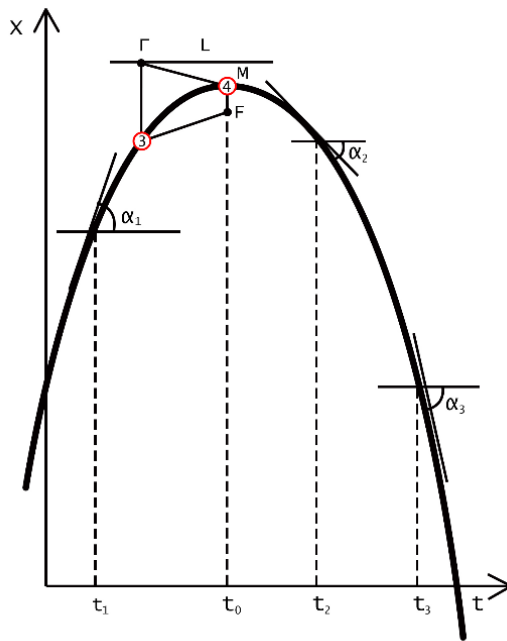


Рис. 4. Формалізована схема міжпроцентного залучення ТО (модель "усередині" моделі)

4.5. Через визначених п'ять точок, що належать першій та другій чверті координатної площини, проведена досліджувана парабола (рис. 2). Позиції на її графіку означають: 1 – головна (відправна) парабола (квадратична функція $f(x)$), де точки на її графіку (фазові перемінні) відповідають номерам блоків ПОПР (табл. 2); 2 – додаткова в ТПДС парабола щодо технологічного оснащення (п. 5.3), яка перетинає першу параболу 3 і 5. Це квадратична функція $y = a(x - x_0)^2 + y_0$ з вершиною в точці M_0 ;

3 – обмежувальна пряма базисного сектора 3, 4, 5, діаметр якого Ml співпадає з віссю параболи 1;

4 – хорда (пряма "позитивного" впливу зв'язку) між точками 2 і 5, обмежуючи нею верхню область параболи. Вона пов'язана з послідовно – наслідковою дією (впливом) препрегів. Тобто вони належать до так званої "керуючої" інтерфейсної дуги (див. кінець розділу). Для спрощення, діаметр вказаної області представлений у вузькому значенні [3].

5 – похила крива. Це графік першої похідної функції $y' = -4x + 3$ першої функції $y = f(x)$ з таким трактуванням. По-перше, опосередковано демонструє, що швидкість переробки об'єктів зменшується. Це зміна форми, розмірів, складу, структури ПКМ та ін. І це відбувається при нарощуванні ваги цих об'єктів. Тому, швидкість зменшується до свого мінімуму (точка $x_0 = 0,75$). По-друге, відомо [3], що досліджуєми аттрактор є притягуючою точкою при виконанні умови, $f'(x) < 1$ [3], що забезпечується.

Прикінцево, ліва (висхідна) віта параболи пов'язана зі зміною стану МТП - об'єктів до їх усталеного (технологічно-закінченого виду). Водночас, права (низхідна)

віта – це напрямок загального контролю і визначення відносної якості об'єктів та процесів її виготовлення. Деталізуючи зв'язки між блоками, тут можна говорити про зв'язок типу інтерфейсної дуги [3]. Вона відображає елемент системи, який обробляє, або ж надає інший вплив на функцію і результат даним функціональним блоком.

4.6. Інцидентна структура ТПДС

На рис. 2 структурна схема ТПДС являє собою графічне зображення математичної моделі в декартовій системі координат у вигляді послідовно з'єднаних фазових перемінних. В спрощенні, цю схему можна уявно представити, як фігуру трикутника, де точка "–1" є вихідною кутовою точкою двовимірного симплексу. Тут можна зазначити, що в структурі ТПДС має місце близька формалізована специфічність з властивостями так званих інцидентних структур, до яких, наприклад, належить проективна площина [3, 31, 32]. Тобто, йдеться про дослідження зв'язків поєднання абстракцій і практичної конкретики. Так, в технологічній адаптації (приспосованні чи перейманні) скінчена проективна площина (трикутник) – інцидентна структура, де елементи множини називається точками (блоки ПОПР) та елементи множини – пересіченими прямими (зв'язки в моделі ТПДС), між якими встановлено відношення інцидентності, що задовольняє в спрощеній постановці згідно [31] такі вимоги:

1. Дві різні точки інцидентні з однією і тільки з однією прямою;
2. Дві різні прямі інцидентні по меншій мірі з однією точкою;
3. Існує чотири точки в загальному положенні, тобто такі, що ніякі три з них не інцидентні з однією прямою точкою.

Для підтвердження відповідності в ТПДС умовам, що впливають із зазначених трьох аксіом, візьmemo три точки в їх вихідному положенні (відображенні) на рис. 2, як кутові або вершинні точки умовного трикутника, окреслюючи границю симплексу, а саме ($|1|$, 4, 7). Ці точки не інцидентні з однією прямою. Позначимо окреслену внутрішню площину цього трикутника перетинаючими між собою прямими (відрізками): $B1$ ($|1|$, 4); $B2$ (4, 7); $B3$ (7, $|1|$). В цій площинній фігурі на основі графіка рис. 2 і в рамках ЗПР розглядається сукупність геометричних об'єктів двох рядів: на рівні 12 точок і 8 прямих, тобто з'єднуючих 8 пар із цих точок. Тут виконання умов перших двох аксіом очевидна. Для підтвердження третьої аксіоми виділимо дві перетинні між собою прямі трикутника $B1$ та $B2$ з чотирма взаємопов'язаними точками на цих прямих, а саме: 2 і 3 на $B1$ та 5 і 6 на $B2$. Три із них не лежать на одній прямій, тому представлено технологічно інцидентну структуру ТПДС, як реальний об'єкт пізнання, можна розглядати, як близьку до її ідеалу (проективна площина). На цьому пункті закінчується перша фаза досліджень технологічної системи.

Далі, коротко йдеться про торичний многовид X , як приклад алгебраїчного многовиду [3, 30]. Тут проєктивну площину можна представити, як результат склейки трьох карт (копій афінних комплексних площин). Тобто йдеться про розбиття многовиду “на шматки”, що частково перекриваються [3, 30]. Розглядається варіант, де X є компактифікацією тора T^2 (як внутрішній трикутник), до якого приклеєні декілька його граничних взаємопересічних проєктивних прямих. Тому під дією тора T^2 проєктивна площа розбивається на сім орбіт: велика орбіта, тобто тор T^2 ; приклеєні до нього проєктивні прямі (взяті без точок взаємних перетинів); три нульмірні орбіти (одноточкові) перетину проєктивних прямих.

5. Шляхи розвитку та подальшої формалізації ТПДС (моделі другого порядку: деталізація і конкретика)

Йдеться про поступну конкретизацію, а саме низхідне проектування ТПДС шляхом доповнення до моделі – основи, пов’язаних з нею, формальних моделей подальших підпорядкованих рівнів деталізації з простими математичними схемами, зважаючи при цьому на принципи, а також вимоги теореми компактності (теорія моделей: наявність моделі в кожній підмножині [3]).

Вступ. Принцип множинності моделей. Модель, яка створюється, повинна відображати, насамперед, властивості ТС, які впливають на вибрані порівнювальні показники. Відповідно, при використанні будь-якої первинної конкретної моделі пізнаються лише в певному (обмеженому) обсязі складові реальності. Для повноти їх дослідження необхідно мати ряд моделей для відображення процесів з різних боків і з різним ступенем деталізації, враховуючи особливості об’єктів оцінювання.

Принцип агрегації моделей. Цей принцип тісно зближений з видами поєднання моделей та їх елементів за визначеними правилами. У застосуванні до базової моделі ТПДС йдеться про різні більш мілкі моделі та специфічні зв’язки (пп. 5.1.3, 5.3 та 5.4).

Принцип ієрархії технологічного контенту. В основі ієрархічних методів низхідного проектування моделей лежить принцип послідовної деталізації, або декомпозиції. Він полягає у поступовому розширенні і/або уточненні сутності та абстрактному опису системи, у процесі якого на кожному етапі побудови моделі (єї) задається певний рівень деталізації відображення системи [3].

Фундаментальна особливість створення та виробництва композитних АК полягає в тому, що конструкційний матеріал (переважно вугле- і склопластики) та виріб з нього виготовляється в ТП, водночас, за загальною схемою їх послідовно – етапного та зведеного

об’ємно – вагового нарощування, і найперше, це визначений конструкцією та задіяний технологією пошировий “ріст” ПКМ “в товщі” виробу (спрощений варіант цієї особливості представлений в п. 5.4, рис. 13).

З цих позицій двоїстої (подвійної) задачі йдеться про деталізоване доповнення вихідної моделі ТПДС технологічним “насищенням” шляхом дослідження складових компонент БПО та деталізація зв’язків в системі, водночас, з залученням об’єктних моделей нижчих рівнів. Причому, йдеться про бінарне відношення між парами множин (ТП₁ та ТП₂) за фактом, що більшість з них за статистикою знаходиться у відношенні перетинання. Ці чіткі посилюють дозволяють при макромоделюванні обґрунтовано доповнити характеристику компактності (комплектності) ТПДС. У відображенні реальності, множина варіантів деталізації будується, виходячи з евристичного пошуку в просторі станів ТПДС щодо розширення кількості елементів та деталізації списку функцій. Виходячи з цих посилювань, БПО розбиті на два класи (п. 5.1). Визначенні особливості складових цієї декомпозиції та підходи до їх формалізуючого представлення (п. 5.3) без залучення ПКМ. Водночас, при геометричному інтерпретаційному моделюванні (п. 5.4) - з таким залученням [28, 33]. Тут підкреслюється особливість та значення оснащення в порівнювальних альтернативах. Визначені та формалізовані представлені види зв’язків в ТПДС. Щодо технологічного обладнання, то з метою спрощення його наявність просто передбачається.

5.1. Вербальні моделі декомпозиції БПО (другий рівень ієрархії ТПДС)

5.1.1. На початковому рівні деталізації виділені два класи БПО: утворюючий цілеспрямований процес (УЦП), а саме як “фронтальна” складова з визначеними технологічними параметрами та активуюча чи направляюча до цілі, друга складова – (ТО), як основна технічна підкладка процесу і, особливо, основний технічний вузол цього комплексу (ВТО) наприклад, інфузійний центр.

5.1.2. *Особливості та значення ТО.* Фундаментальна специфіка. Зазначена вище подвійна задача у виробництві композитних АК вирішується шляхом збільшення складу ТПДС, ускладненням ТО і /або обладнання, тобто помітно обтяжуючи цим підготовку виробництва. Тут має місце доволі габаритна багатоскладова ТО і, найпоширеніше, з основою у вигляді матеріалоемної формоутворюючої матриці. Наприклад, це стосується двох послідовних базових ТП блоків 3 та 4 (рис. 2, табл. 2) і тут можна говорити про орієнтуючу функцію ТО. Таким чином, ТО – це важлива, відповідальна, і водночас, постійна високовитратна ланка у виробництві композитних АК, водночас, справляючи суттєвий, а часто і вирішальний вплив на якість продукції і навіть на здатність виконувати нею своє функціо-

нальне призначення. Тому обґрунтовано можна вважати про практично рівне подіяння (вплив) УЦП та ТО на хід та результат ТП. Цей технологічний посил у подальшому (р. 5) використовується при формалізації БПО в репрезентативній формі, головна функція якої це трансляція укладеного в неї сенсу. Причём, за певною аналогією з замкнутими множинами, можна вважати, що в замкнутому БПО відкрита множина це УЦП, а ТО – її границя. Так, формоутворююче ТО забезпечує поряд з якістю – граничну “форму” та граничні “розміри” виробу.

5.1.3. Різновидність вербальних моделей. В залежності від способу деталізації БПО, вербальні моделі дещо умовно поділені на невід’ємно – та автономно – сполучені з ТПДС. В першому випадку – це одна математична база понять і відношень, визначаючи цю спільного, як, агрегатну модель ТПДС.

Другий випадок представлений в п. 5.4 при інтерпретаційному описі уводжуваних понять та посилив щодо топологічних моделей БПО. Тобто тут формалізація практично постає, як процедура так званої зворотньої формалізації [3]. В результаті йдеться про задачу формалізації на базі різних математичних моделей, але з однаковою для них технологічною сутністю та цілеспрямованістю. Це дає підставу розглядати базову модель ТПДС в сполученні з доданою до неї топологічною моделлю, як самостійний до ТПДС об’єкт розгляду.

5.2. Види зв’язків у фазовому просторі ТПДС

За складом БПО та за характерними технологічними особливостями зв’язків ТПДС поділені в ієрархічному порядку на три взаємопов’язані групи, по – перше, починаючи з розгляду послідовної низки семи ПОПР: міжблокові (бінарні) зв’язки у другій групі; закінчуючи внутрішніми зв’язками (УЦП) та ТО в одинарному блоці у третій групі. Нижче приведена їх деталізація.

Перша група:

1.1. Перший тип. Технологічна послідовність БПО зі структурними особливостями (наприклад, наявність “скачків” в преформово – інфузійних ТП). 1.2. Другий тип. Строга (гладка) послідовність БПО. Друга група: 2.1. Перший тип – спільне для двох сусідніх блоків виробу із ПКМ або ТО.

2.2. Другий тип – спільне для двох сусідніх блоків виробу із ПКМ та ТО. 2.3. Третій тип – зв’язки між двома віддаленими між собою блоками.

5.3. Агрегатні моделі ТПДС (модель “усередині” моделі)

Йдеться про додану вкладену елементарну модель в базову модель ТПДС.

Укорочений варіант. (Зв’язки 2.2 і 2.3.). З техніко – економічних позицій бажано скорочення складу ТО. Найперше, при можливості, шляхом міжпроцесного

ТО – переймання, тобто коли оснастка забезпечує функціонування декількох ТП (можливо з деякими специфічними видозмінами). Цей варіант формально представлений на рис. 2 (параболи 1 і 2). Тут при репрезентації ситуації з оснасткою, парабола 2 перетинає параболу 1 в точках 3 і 5, говорячи, по-перше, що вихідним ТО є оснащення БПО (поз. 3, панель – сирець), яке передається далі на окрему дільницю для термосилового формування (БПО, поз. 4), причём, оснащення тут переймане (точка M_0 лежить нижче точки M). По-друге, згідно посилу складові УЦП і ТО мають приблизно рівний вплив на ТП.

Розширений варіант (рис. 4). Тут для прикладу розглядається БПО в точках 3 та 4, де кожна з них при деталізації пов’язана (дві бічні прями) з двома елементами параболи 1, а саме з точкою фокусу F (УЦП) і з точкою на директрисі Γ (ТО). Взагалі, відстань від будь-якої точки, що лежить на параболі до точки фокусу F , дорівнює відстані (перпендикуляр) до директриси L , як інтерпретації початкового експлуатаційного функціонування даної оснастки в ТПДС, де якраз точка 3 з’єднана прямою з точкою фокуса F (УЦП). Водночас перпендикуляр з точки 4 на директрису не може бути опущеним, оскільки тут ТО залучено з блоку 3. Тому точка 4 з’єднана похилою прямою з точкою Γ директриси. В п. 5.4 зв’язки між блоками подані в іншій геометричній інтерпретації.

5.4. Топологічні об’єкти в технології композитних АК (вихідна геометрична інтерпретація блоків ТПДС)

Йдеться про топологічні абстрактні моделі, записані мовою гомологічної топології [3, 28–30].

5.4.1. Тори та цикли на їх поверхні. Залучені поняття. Як доповнення до базової моделі ТПДС, йдеться про формалізацію (вища аналогія – групи гомологій в топології), де одинарні БПО фігурують у вигляді дво – чи тривимірних торів з позначеннями T^2 та T^3 . Водночас, тісні зв’язки БПО – це певна аналогія так званої контактної – зв’язної суми торів [3, 28–30]. Як відомо [3, 28], тор T^2 можна представити у вигляді розбиття T , яке складається з чотирьох кліток: однієї нульмірної, однієї двовимірної та двох одновимірних (орієнтовані “меридіан та паралель” з позначеннями m та p). Їм надається технологічне трактування (п. 5.4.2), як окремим циклам на поверхні тора. Відповідно вони, а також інші цикли z_1 та z_2 , взяті разом, також є циклами. Тори T^2 з одновимірними циклами m і p представлені на рис. 5, 8, 11, 12, а повний тор T^3 з двовимірним циклом – на рис. 9. Розміри “горизонтального” перерізу тора визначається радіусом R (рис. 5), а “поперечного” перерізу – радіусом r (рис. 7). Положення кожної точки P на поверхні тора визначається двома кутами (довгота та широта точки).

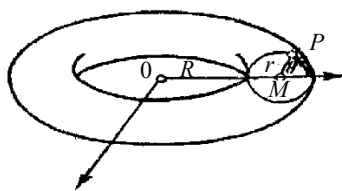


Рис. 5. Геометричні характеристики тора

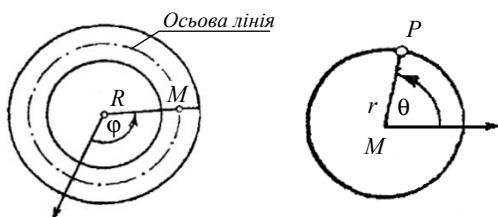


Рис. 6. та 7. Фіксація положень точки на поверхні тора: (паралель – кут ϕ ; меридіан – кут θ)

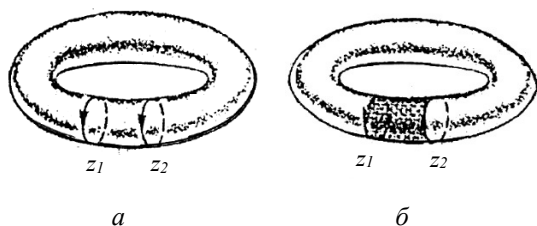


Рис. 8. Вплив орієнтації двох циклів на поверхні тора: а) необмежувальний; б) обмежувальний

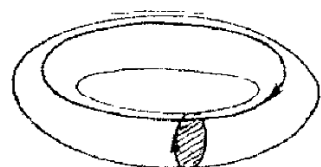


Рис. 9. Технологічні цикли на повноторії

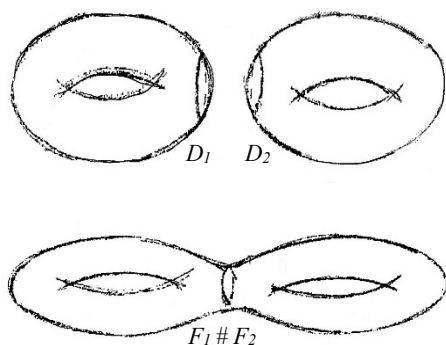


Рис. 10. Побудова зв'язкової суми двох торів (конструкції в топології)

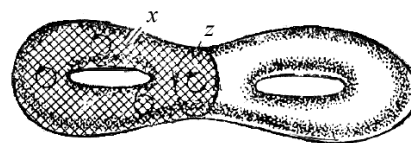


Рис. 11. Обмежена область x тора циклом z з наданням своєї орієнтації

Взагалі поняття “цикли”, “разом взяті цикли”, “зв’язана сума”; “перестроювання торів”, наприклад, системи Ліувілля [3, 32], говорить про значні потенційні можливості геометричної інтерпретації композитних АК. Так, наприклад, на 3 – поверхні мають місце вертикальне склеювання двох торів по їх паралелям (УЦП), або ж горизонтальне склеювання по загальному для них меридіану (ТО) [32 с. 163, рис. 10].

5.4.2. Формальне представлення моделей блоків ТПДС у вигляді торових поверхонь.

А. Цикли на торі. Технологічне трактування циклів виходить із двох їх основних класів: класу паралелей та класу меридіанів тора в конкретизації з двома основними класами БПО, а саме УЦП та ТО (п. 5.1). Далі, говорячи про одинарні БПО, в теорії [3, 28] цикли поділяються на такі, що обмежують деяку область, тобто є границею цієї області, наприклад, представлені на рис. 8 б; 9,11 і на такі, що ніякої області не обмежують (рис. 8 а). Так, цикл на поверхні кренделя (2-крендель) є обмежуючим (рис. 11). Таку область називають плівкою, натягнутою на цей цикл [28]. В технологіях композитних АК подібні “обмеження” може мати різнопричинне походження. Можливий приклад – обмежуючи (гальмуючи) процеси виробництва “матеріало – технологічні” властивості рідинних зв’язуючих (р. 3, [2, 3, 14, 15, 23, 28]). Це такі регламентовані показники, як рівень життєздатності, в’язкості, пористості, липкості та ін. (рис. 11, лівий тор). Щодо пари циклів z_1 та z_2 , то на рис. 8 а два меридіани z_1 та z_2 мають подібну орієнтацію і згідно теорії не є обмежуючими (як можливий варіант це може бути паралельно задіяні в загальному ціленаправлені цикли ТО та обладнання).

Водночас, на рис. 8 б на поверхні тора є заштрихована ділянка, яку обмежують разом взяті протилежно направлені цикли z_1 та $-z_2$ [28]. Область, що обмежена деяким циклом, (тобто плівка натягнута на цей цикл) може міститися в “товщі тора” (рис. 9), наприклад, повноторія T^3 . Це може бути, як варіант представлення, пов’язане з термосиловим формуванням виробу. Подальше деталізація може бути пов’язана, наприклад, з видами зчеплень циклів та ін.

Б. Пари суміжно – пов’язаних ТП. В технології композитних АК характерні пари з тісними зв’язками (п. 5.2, групи 2.1 і 2.2). Формально йдеться в припу-

щенні, що вони є перетинними, де перетином є множина зі зв'язуючими елементами і, найперше, ПКМ – об'єкти і /або оснасткового виду. В геометричній інтерпретації приклади таких пар у вигляді сполученого сумування поверхонь тора представлено на рис. 10, 11, 12 [28, 30–32]. Формально це поєднання ТП будується на основі так званої операції “зв'язуючого сумування” у двох різних варіантах. Перший представлений на рис.10 [30] та рис. 11 [28]. Тут в спрощенні має місце згідно [30] наступне: нехай D_1 – двовимірний диск, вкладений в поверхню F_1 , а D_2 – F_2 , $\varphi: \partial D_1 \rightarrow \partial D_2$ – гомеоморфізм. Під зв'язною сумою $F_1 \# F_2$ поверхні F_1 і F_2 будемо розуміти поверхню, що виходить з F_1 і F_2 після видалення з них внутрішностей у вигляді двовимірних дисків і склеювання країв отриманих дірок. У другому варіанті рис.12 [28] значиться, що подвійний тор – це компактний, зв'язний орієнтуємий двовимірний многовид в гомеоморфній сфері, в яку вклеєні дві ручки [3]. До цього варіанту можна віднести у першому наближенні процеси склеювання і /або просто адгезійного з'єднання, наприклад, “сирих” компонентів набору стрингерів 3а з обшивкою 3б, маючи об'єднуючу ТО (рис. 12). До цього варіанту також можна віднести зв'язне формування блоків 3 і 4 (п. 5.1) маючи загальну оснастку і зосередженим на ній зкомплектованими панелями із ПКМ. В загальній постановці (рис. 12) це поверхні 2 – тора (кренделя), де має місце група з чотирьох основних утворюючих циклів. Всі вони суттєво різні, тобто можна записати у вигляді зв'язної суми: $K_2 = T_1^2 \# T_2^2$, а у вигляді циклів: $\alpha_1 m_1 + \alpha_2 m_2 + \beta_1 p_1 + \beta_2 p_2$ [28].

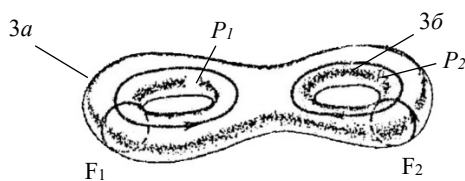


Рис. 12. Модель суміжно – процесних циклів виготовлення ВСП (етап 3: 3а – стрингери; 3б – обшивка)

Щодо системи перестроювання парних торів, то, наприклад, згідно [32] на 3 – поверхні зазначено вертикальне та горизонтальне склеювання двох торів [32], [рис. 10]. в першому випадку – по паралелі циклів УЦП), а в другому – по меридіану (цикли ТО). Спрощений вигляд (рис. 13) має місце при перестроюванні двох торів на площині [32]. Формально це відповідає прямому добутку вісімки (простий вузол) на окружність. Ця геометрична фігура в укрупнено – спрощеному варіанті може трактуватись в розрізі фундаментальної властивості ПКМ (вступ до п. 5) з умовним розосередженням виготовлення матеріалу та конструкції в єдиному процесі. Причём, зовнішній тор трактується,

як пошаровий набір ПКМ, а внутрішній – як формування виробу з нього. Міжмеридіанна середня лінія є синхронізований граничний цикл для фазових (інтегральних) траєкторій.

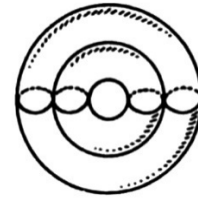


Рис. 13. Модель сумісних циклів (вісімка) спільного виготовлення ПКМ і АК

Подальша геометрична інтерпретація може бути пов'язана з топологічним відображенням тора на себе, видами зчеплень циклів та ін.

Висновки з проведеного дослідження ТС (друга публікація в комплексі статей згідно [1])

В рамках позицій системно – процесного підходу і базових принципів: послідовної процесної структури, комплектності, компактності, динамічності та ціленаправленості в цілісно – обсяжному понятті, а також за результатами практики, представлено (п. 2) сумарного типу многокомпонентна інформаційна модель забезпечення систематизованої підтримки прийняття рішень при оцінюванні альтернатив (вступ до статті та [1]) за визначеними критеріями техніко – економічної ефективності та потенціалу.

Представлені в комплексному описі структурні компоненти узагальненої інформаційної моделі за п. 1:

Вербальна модель зв'язуючих ПКМ, як важливий чинник в початково – послідовній оцінці АТП, а саме два їх основних види: препрегові та інфузійні.

Вербальна та концептуальна модель ПОПР на основі домінуючих принципів в ЗПР у вигляді функціонально завершених блоків та ототожнених з ними інтегрованих критеріїв вищого та первинного рівнів (конкретні критерії – показники).

Вербальна і базова (верхнього порядку) математична макромодель ТПДС з алгоритмізованим напрямом процесів за (п. 2.2) з залученням квадратичної функції, графіком якої є парабола. Фрагментарна структура моделі об'єднує різні самостійні цільові блоки технологічної етапно – часової організації в єдине ціле.

Пов'язані з базовою моделлю (п. 2.3) вербальні та формалізовані моделі більш низьких рівнів ієрархії в двох різних представленнях: графоаналітичному та топологічному (поверхневій моделі) з обґрунтуванням топологічної ідентифікації простору ТП (зв'язки та потоки технологічних відношень). Йдеться про деталізацію зі сходженням від абстрактного до конкретики на рівні складових ТП.

References

- [1] D.S. Kiva and V.F. Zabashta, “Alternative technologies of composite high-loaded aircraft constructions: a qualitative method of making multicriterial decisions. Part I. Initial stages in the problem of decision-making”, *Mechanics and Advanced Technologies*, Vol. 5, No. 2, pp.201–211, 2021. DOI: doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.2.245000
- [2] E.A.Veshkin *et al.*, *Opyt primeneniya vakuum – infuzionnykh tekhnologii v proizvodstve konstrukttsii iz PKM*, FGUP “VIAM”, 2018, pp.16–28.
- [3] O.N. Komissar, *Kompetentsii gosudarstvennykh nauchnykh tsentrov v Rossii v sozdanii kompozitnykh kryl'ev samoletov*, FGUP “VIAM”, 2018, pp.51–59.
- [4] P.A. Gudkov, *Metody stravnitel'nogo analiza*, Penza:PGU, 2008.
- [5] O.I. Kushlik – Divul's'ka and B.R. Kushlik, *Osnovi teorii priinyattya rishen'*, Kyiv: NTUU “KPI”, 2014. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/6917>
- [6] V.V. Podinovskii, *Vvedenie v teoriyu vazhnosti kriteriev v mnogokriterial'nykh zadachakh prinyatiya reshenii*, Moscow: Fizmatgiz, 2007.
- [7] *Kontseptual'naya model'* [Online]. Available: <https://ru.wikipedia.org/wiki>
- [8] P.M. Pavlenko, *Osnovi matematichnogo modelyuvannya sistem i protsesiv*, Kyiv: Knizhkovе vidavnistvo NAU, 2013.
- [9] V.L. Chechulin, *Metod prostranstva sostoyanii upravleniya kachestvom slozhnykh khimiko – tekhnologicheskikh protsessov*, Perm: Perm. Gos. nats. issled. un-t, 2011.
- [10] *Ugleplastiki vs aliuminiya* [Online]. Available: <https://uacrussia.livejournal.com/67193.html>
- [11] V.V. Pilipenko, E.S. Pereverzin and V.M. Fedorov, “Koeffitsienty bezopasnosti i prochnost' konstrukttsii”, *Tekhnicheskaya mekhanika*, No. 1, pp. 89–98, 2019.
- [12] S.A. Smotrova, S.M. Naumov and A.V.Smotrov, *Tekhnologiya izgotovleniya silovykh agregatov aviatsionnykh konstrukttsii iz polimernykh kompozitsionnykh materialov*, Moscow: Tekhnosfera, 2015.
- [13] S.A. Smotrova and I.D. Simonov-Emel'yanov, “Effektivnye tekhnologii formovaniya vysokonagruzhennykh aviatsionnykh konstrukttsii iz polimernykh kompozitsionnykh materialov”, *Konstrukttsii iz kompozitsionnykh materialov*, No. 3, pp. 15–24, 2016.
- [14] G.N. Zamula and K.A. Kolesnik, “Vesovaya i toplivnaya effektivnost' primeneniya kompozitsionnykh materialov v aviakonstrukttsiyakh”, *Polet*, No. 2, pp. 13–19, 2018.
- [15] S.F. Ilyushenkov and P.N. Sereduga, “Vozmozhnosti snizheniya massy elementov inter'era v sovremennykh passazhirskikh samoletov”, *Polimer.mater.: izdeliya, oborudovaniya, tekhnologiya*, pp. 32–38, 2019.
- [16] G.N. Zamula and K.A. Kolesnik, “Vesovaya i toplivnaya effektivnost' primeneniya kompozitsionnykh materialov v aviakonstrukttsiyakh”, *Polet*, No. 2, pp. 13–19, 2018.
- [17] G.N. Zamula and K.A. Kolesnik, “Sposoby povysheniya vesovoi effektivnosti primeneniya kompozitnykh materialov”, *Polet*, No. 10, pp. 12–24, 2018.
- [18] *Prepregi iz kompozitsionnykh materialov. Ugleprepregi vysokonagruzhennykh elementov konstrukttsii povyshennoi temperatury ekspluatatsii*, Katalog VIAM. Internet – izdaniya.
- [19] P.N. Timoshkov, M.N. Usachova and A.V. Khrul'kov, “Lipkost' i vozmozhnost' ispol'zovaniya prepregov dlya avtomatizirovannykh tekhnologii”, *Trudy VIAM*, No. 8 (68), pp. 38–46, 2018.
- [20] Yu.A. Gusev, O.N. Tverdov and A.A.Gromyko, *Ugleplastik na osnove svyazuyushchego s nizkoi temperaturoi otverzhdeniya i uglerodnoi ravnoprochnoi tkani*, *Trudy VIAM*, No. 6, pp. 52–60, 2017.
- [21] L.V. Chursina *et al.*, “Termoreaktivnoe svyazuyushchee i polimernye bindery dlya polimernykh kompozitsionnykh materialov, poluchaemykh metodom vakuumnoi infuzii”, *Plasticheskie massy*, No. 1-2, pp.57–64, 2018.
- [22] R.I. Kudryavtsev *et al.*, “Ispol'zovanie svyazuyushchego marki Vs3-30, pererabatyvaemogo po infuzionnoi tekhnologii, dlya izgotovleniya nizko- i srednenagruzhennykh detalei konstruktivnogo naznacheniya”, *Trudy VIAM*, No. 1, pp. 31–39, 2019. DOI: doi.org/10.21608/absb.2019.86754
- [23] *Vliyaniye poristosti v polimernykh kompozitsionnykh materialakh na osnove epoksidnoi matritsy i nepreryvnykh uglerodnykh volokon na ego fiziko – mekhanicheskie svoystva*. Dissertatsiya. Bibliofond inf. mat. 2017. Available: www.bibliofond.ru/view.aspx?id=903329
- [24] M.I. Dushin, K.I. Donetskii and R.Yu.Karavaev, “Ustanovlenie prichin obrazovaniya poristosti pri izgotovlenii PKM”, *Trudy VIAM*, No. No. 6, pp. 68–78, 2016.
- [25] M.O. Yakovlev, A.I. Gulyaev and O.A.Lashov, “Treshchinostoikost' sloistykh polimernykh kompozitsionnykh materialov”, *Trudy VIAM*, No. 4, pp. 106–114, 2016.
- [26] B.I. Yarmolenko and Yu.P. Trunin, “Treshchino – i udarostoikost' ugleplastikov na sredneprochnykh zarubezhnykh napolnityakh”, *Prochnost' aviatsionnykh konstrukttsii*, TsAGI, pp. 263–272, 2011.

- [27] V.G. Boltyanskii and V.A.Efrimovich, "Ocherk osnovnykh idei topologii (okonchanie)", *Matem. prosv.*, Vol. 6, pp. 107–138, 1961.
- [28] Kelli Dzh.A. *Obshchaya topologiya*, Moscow: Nauka Fizmatlit, 1981.
- [29] O.O. Prishlyak, *Topologiya mnogovidiv*, Kyiv: KGU, 2019.
- [30] L.A. Skornyakov, *Proektivnye ploskosti*, UMN, Vol. 6, No. 6(46), pp. 112–154, 1951. DOI: doi.org/10.1001/archopht.1951.01700020117018
- [31] A.T. Fomenko, *Naglyadnaya geometriya i topologiya: matematicheskie obrazy v real'nom mire*, Moscow: MGU, 1998.
- [32] E.A. Grebennikov, *Metod usredneniya v prakticheskikh zadachakh*, Moscow: Nauka, 1986.
- [33] T.S. Pigolkina, *Avtonomnye sistemy. Fazovye traektorii. Elementy teorii ustoychivosti*, Moscow: MFATI, 2013.
- [34] *Metodi modeliuvannia ta analogii*. [Online]. Available: <http://www.zhu.edu.ua>
- [35] T.L. Saati, *Magicheskoe chislo "sem" v prirode*, Cloud Of science, Vol. 4, No. 1, 2017.
- [36] A.R. Kamaleeva, S.Iu. Gromova and O.B. Rusakova, *Kinematika v grafikakh*, Kazan: Otechestvo, 2017.
- [37] G.Iu. Panina, *Toricheskie mnogoobrazzia. Vvedenie v algebraicheskuiu geometriiu*, 2009.

Alternative technologies of composite highly-load of aircraft structures: a qualitative method of making multicriteria decisions. Part II. Modeling in multi-criteria evaluation of alternatives

V.F. Zabashta

Abstract. The second part of the article is based on the starting points in the decision-making problem (DPR) indicated at the first stage of research [1, point 2]. Here, the comparison of alternative autoclaved and non-autoclaved technologies for the production of carbon-plastic aircraft structures (AC) of the highly loaded type is continued wing caisson stringer panels of B787, A350, MC-21, CSeries mainline aircraft. The main provisions of decision-making theory and a system-process approach with the involvement of practice results are taken as the methodological basis. From the beginning, the following are presented: a scheme for assessing the relative quality of technological process objects; a block-type conceptual model of the subject area of decision-making and its basis; composition of selection criteria and indicators. Based on the above and with the involvement of autonomous dynamic systems (ADS) with discrete time, as well as the theory of the parabola (quadratic function), a formalized model of systemically grouped processes in the evaluation of alternatives is given. On this basis, the study of the essential differences of the alternatives with the interpretation of the ideas of topology (homology groups) was continued to support the adoption of a reasoned final decision in the future, as the goal of modeling this separate side of the functioning of the technical system.

Keywords: alternative technological processes, stringer panels, composites (PCM), prepreg, infusion, hierarchical structure, ADS, interpretation, parabola, attractor, torus.