

doi: 10.32620/oikit.2026.107.05

УДК 678.067:620.9

О. О. Вамболь¹, Ф. М. Гагауз², С. М. Пургіна²,
К. П. Барахов³, П. В. Близнюк⁴

Енергоефективні підходи до виробництва полімерних композитних конструкцій

¹Національний університет "Львівська політехніка"²Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут"³Харківський національний університет

міського господарства ім. О. М. Бекетова

⁴Донецький національний технічний університет

У роботі досліджено підходи до підвищення енергоефективності процесу формування терморезистивних полімерних композитів шляхом оптимізації параметрів отверднення. Показано, що ізотермічна витримка є найбільш тривалим та енергоємним етапом технологічного циклу, а режими отверднення, які в промисловій практиці часто задаються на основі усереднених паспортних даних зв'язуючих, не завжди є раціональними з урахуванням геометрії виробу, структури композитного пакету та умов теплопередачі.

У межах дослідження проаналізовано два основні підходи до визначення оптимальних технологічних параметрів: експериментальний та онлайн-метод. Експериментальний підхід передбачає підбір режимів отверднення на основі серії випробувань для конкретної конструкції, що забезпечує досягнення регламентованих властивостей, але супроводжується значними часовими та енергетичними витратами. Онлайн-метод ґрунтується на безперервному моніторингу параметрів, які характеризують ступінь завершеності хімічних реакцій у зв'язуючому, та дозволяє адаптивно коригувати температурно-часові режими в процесі формування без проведення додаткових експериментів.

Для аналізу процесу отверднення використано загальноновизнані фізико-математичні моделі теплопровідності та кінетики полімеризації, що дозволяють прогнозувати просторово-часовий розподіл температури та ступеня перетворення в композитному пакеті. Особливу увагу приділено дослідженню напружено-деформованого стану, який формується внаслідок сумарного впливу теплових, усадкових і релаксаційних процесів. Показано, що рівень залишкових напружень може бути знижений шляхом забезпечення рівномірного температурного поля, застосування двостороннього нагрівання, оптимізації конструкції оснащення та використання релаксаційних властивостей матеріалу.

У результаті оптимізації режиму отверднення для заданої конфігурації композитного пакету тривалість ізотермічної витримки була зменшена у 1,7 рази, що забезпечило зниження енергоспоживання процесу формування з 40 до 23 кВт·год без погіршення умов формування та якості виробу. Отримані результати мають методологічний характер і можуть бути використані при розробленні енергоефективних технологій виготовлення полімерних композиційних конструкцій та створенні комп'ютерно-інтегрованих систем керування процесами формування.

Ключові слова: енергоефективність, полімерні композити, процес отверднення, оптимізація технологічного процесу, залишкові напруження, вакуум-автоклавний метод виробництва, виробництво аерокосмічної техніки.

Вступ

Полімерні композитні матеріали (ПКМ) протягом останніх десятиліть посідають провідне місце в сучасній інженерній практиці завдяки унікальному поєднанню експлуатаційних характеристик, таких як висока питома міцність, жорсткість, корозійна стійкість, довговічність та можливість цілеспрямованої модифікації структури й властивостей відповідно до вимог проектування. Їх

широке застосування особливо характерне для авіакосмічної галузі, де маса конструкції безпосередньо впливає на паливну ефективність, вантажопідйомність і загальні експлуатаційні характеристики літальних апаратів. Зараз композити становлять близько 50% об'єму конструкцій у комерційній авіації, а у військовій сфері їх частка може перевищувати 70% [1]. Такий рівень інтеграції ПКМ пояснюється не лише їхніми механічними перевагами, а й можливістю забезпечення додаткових функціональних характеристик, зокрема радіопрозорості, високої стійкості до агресивних середовищ, демпфувальних властивостей та здатності працювати у складних експлуатаційних умовах [2, 3].

Водночас подібні досягнення поки що не є типовими для інших галузей промисловості. У автомобільній, залізничній, суднобудівній, енергетичній та будівельній сферах обсяг застосування композитів зазвичай не перевищує 10–15%. Така диспропорція зумовлена комплексом причин. У низці галузей вимоги до маси конструкцій є менш критичними, ніж в авіації, тому потреба у широкому впровадженні ПКМ є обмеженою. Водночас ключовими стримувальними чинниками виступають технологічні та економічні аспекти: висока вартість сировини, значні енерговитрати на стадії формування, потреба у дорогому обладнанні (автоклави, преси, високотемпературні печі), а також трудомісткість технологічних операцій. Ці фактори часто роблять заміну традиційних металевих конструкцій композитами економічно невиправданою [4, 5].

Протягом останніх років проблема зниження вартості виготовлення ПКМ стала об'єктом інтенсивних досліджень [6]. Накопичені наукові дані свідчать, що застосовувані підходи можна умовно поділити на дві основні групи: прямі та непрямі методи. Прямі методи спрямовані на зменшення енергоспоживання через оптимізацію технологічних режимів – скорочення тривалості виготовлення, точне керування температурою та тиском під час отверднення, спрощення технологічних етапів. Непрямі методи зорієнтовані на підвищення технологічності та якості продукції, зменшення ймовірності виникнення дефектів, удосконалення цифрових процедур проектування та моделювання, що у підсумку знижує витрати на доведення продукції, контроль і ремонт [7].

Серед усіх етапів виготовлення термореактивних композитів найбільш енергоємним є процес отверднення [8–10]. Саме він визначає тривалість технологічного циклу та обсяг енергетичних витрат. Автоклавні технології, які забезпечують найвищу якість продукції, характеризуються особливо великим енергоспоживанням і тривалими циклами переробки [10]. Таким чином, оптимізація процесу отверднення є одним із ключових чинників зменшення собівартості виготовлення ПКМ та підвищення їхньої конкурентоспроможності на світовому ринку.

У межах даного дослідження проаналізовано чотири ключові напрями зниження витрат на стадії формування (див рис. 1):

- використання нових матричних матеріалів, що не потребують високих температур і тиску, водночас забезпечуючи рівень механічних властивостей, сумірний або вищий за традиційні;
- розроблення та впровадження удосконалених алгоритмів проектування, які дають змогу зменшити кількість дефектів, підвищити точність моделювання та оптимізувати структуру конструкцій;
- заміна енергоємних методів отверднення більш економічними технологіями, такими як інфузійні процеси (RTM / VARTM), низькотемпературне пресове отверднення або 3D-друк (див. табл. 1);

• оптимізація температурно-часових режимів, тиску та швидкостей нагрівання й охолодження, а також інтеграція цифрових систем моніторингу та керування технологічними параметрами (див. рис. 1).

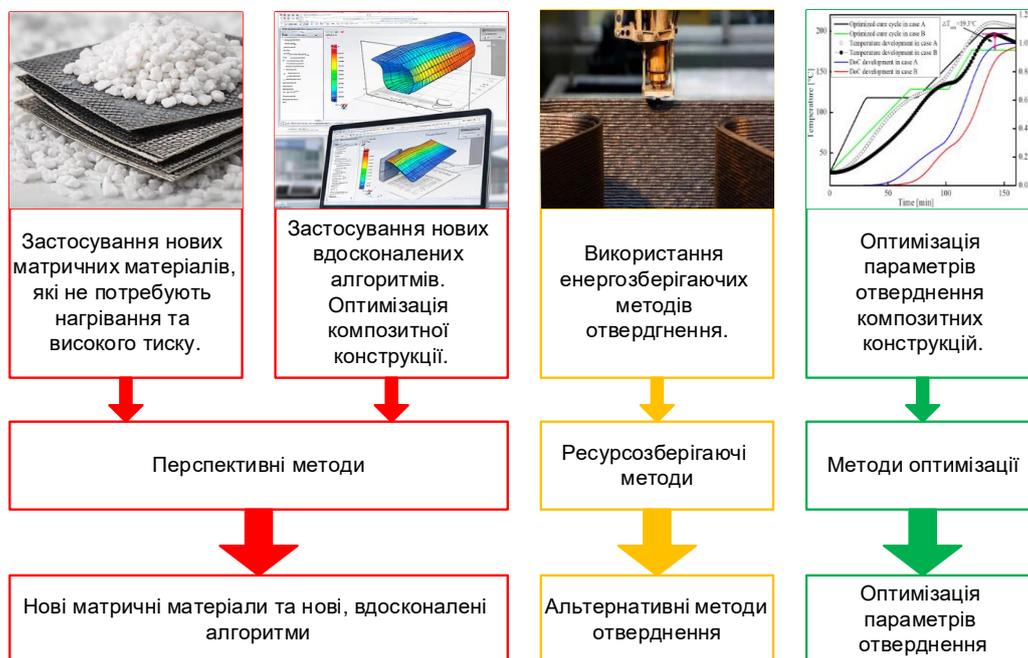


Рис. 1 Напрями зниження виробничих витрат

Перші два напрями пов'язані з розвитком хімічних та технологічних інновацій, які поступово формують передумови для зменшення вартості виробництва, особливо в автомобільній та залізничній галузях. Одним із перспективних рішень є застосування термопластичних матриць, що забезпечують можливість вторинної переробки, зниження витрат та підвищення технологічної гнучкості.

Таблиця 1

Енергоспоживання технологічних процесів формування

Метод	Енергоспоживання (кВт·год/кг)	Коментар
Вакуум-автоклавний (ВАФ)	5–12	Значне енергоспоживання через нагрів до високих температур і підтримання тиску протягом тривалого часу. Найвища енергоємність.
Без автоклавний (БО) / Термообробка в печі	1–3	Зменшення на 60–80% енергоспоживання порівняно з ВАФ.
RTM / VARTM	0,7–2,5	Нагрівається тільки оснастка та пакет КМ це призводить до суттєвого зменшення енерговитрат.
AFP/ATL (укладання + ВАФ)	6–14	Енергія автоклава домінує.
Термопресування	1–4	Ефективне для термопластів.
3D-друк (нагрів форми)	0,4–1,0	Локальне нагрівання.

Водночас заміна існуючих енергоємних методів отверднення новими підходами потребує значних капітальних інвестицій, переналаштування виробництва та адаптації технологічних процесів відповідно до нових стандартів якості й безпеки [11].

Найбільш практично досяжним напрямом є оптимізація параметрів процесу отверднення. Застосування математичного моделювання, комп'ютерної симуляції та інтелектуальних алгоритмів дозволяє зменшити тривалість формування, знизити енергоспоживання та забезпечити необхідні фізико-механічні властивості виробів без значних змін у виробничій інфраструктурі. Такі підходи не потребують дорогого переоснащення, а ефект від їх впровадження проявляється вже на початкових етапах оптимізації.

Таким чином, зниження вартості виробництва композитів залишається важливим завданням, що безпосередньо впливає на можливості їхнього широкого застосування у транспорті, машинобудуванні, енергетичній та будівельній галузях. Раціоналізація параметрів процесу отверднення – найбільш доступний та ефективний шлях досягнення цього результату. Подальший розвиток методів оптимізації сприятиме розширенню використання ПКМ у різних секторах промисловості та підвищенню їхньої конкурентоспроможності на глобальному ринку.

Метою даного дослідження є підвищення енергоефективності процесу формування ПКМ шляхом оптимізації параметрів отверднення з урахуванням теплових, хімічних і напружено-деформованих процесів, що відбуваються в композитному пакеті, а також можливостей адаптивного онлайн-контролю технологічного циклу.

1. Методи дослідження

Будь-який метод формування композитних конструкцій визначається трьома ключовими технологічними параметрами: температурою, часом і тиском (див. рис. 2). Узгоджений вибір цих параметрів визначає якість кінцевого виробу, його відповідність вимогам проектування та стабільність експлуатаційних характеристик [11].

На практиці режими отверднення найчастіше задаються відповідно до паспортних або нормативних даних на зв'язуюче. Проте такі дані орієнтовані на усереднені умови застосування та не враховують особливостей конкретного обладнання чи геометрії виробів. Унаслідок цього вироби, виготовлені з одного й того самого зв'язуючого, але з різною товщиною, масивністю або функціональним призначенням, формують за однаковими режимами, що не є оптимальним (див. рис. 2).

Під час отверднення тонкостінних панелей або оболонок з великим відношенням площі поверхні до товщини невідповідність між заданими та фактичними умовами теплопередачі може спричинити надмірне збільшення тривалості циклу, зростання енергоспоживання та ризик локального перегрівання. Навпаки, у масивних елементах існує ймовірність неповного отверднення центральних шарів через недостатній прогрів, що знижує надійність і довговічність конструкції [12] (див. рис. 3).

Важливу роль відіграють також характеристики обладнання. Умови теплопередачі в автоклаві суттєво відрізняються від умов пресового формування, що впливає на кінетику реакції.

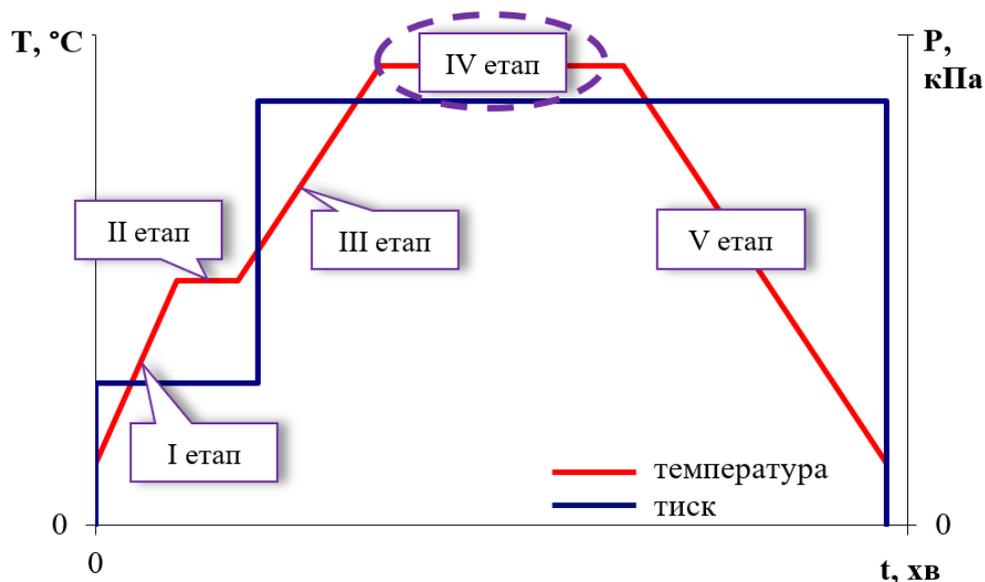


Рис. 2. Типовий режим вакуум-автоклавного методу формування

Конфігурація пакету – кількість шарів, орієнтація армувальних волокон, наявність вставок або локальних змін товщини – визначає теплопровідність матеріалу та динаміку температурного поля [13, 14]. Тому універсальні режими отверднення не забезпечують гарантованої відтворюваності властивостей у реальних умовах виробництва.

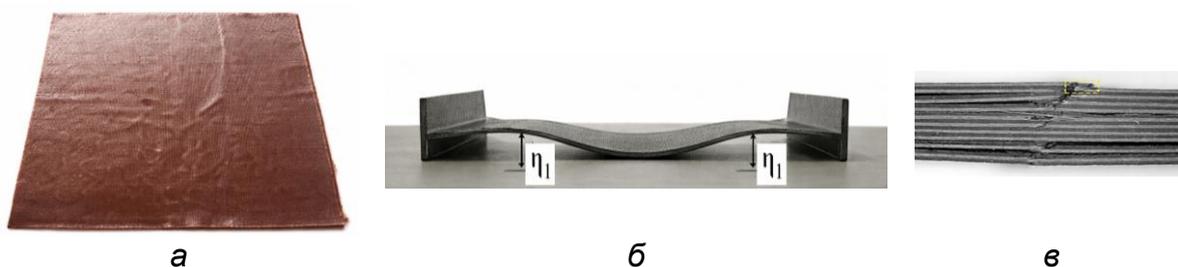


Рис. 3. Невідповідності структур після процесу вакуум-автоклавного формування: а) внутрішні порожнини, «хвилеподібна» поверхня; б) короблення конструкції; в) розшарування

З огляду на ці чинники виникає необхідність у попередньому моделюванні процесу отверднення. Такий підхід дає змогу врахувати не лише термореактивні властивості зв'язуючого, але й конструктивні особливості виробу, теплофізичні характеристики матеріалів та можливості конкретного обладнання. Математичні моделі дозволяють прогнозувати просторово-часовий розподіл температурного поля під час отверднення.

Слід підкреслити, що новизна роботи не полягає у формулюванні нової математичної моделі процесу отверднення. Навпаки, використовується загальновідома фізико-математична модель, валідована в попередніх дослідженнях [8], що забезпечує коректний опис теплових і хімічних процесів у композитному пакеті. Основний внесок роботи зосереджений на методології вибору та адаптації технологічних параметрів отверднення з урахуванням енергоефективності та напружено-деформованого стану конструкції.

На етапах I–III процесу температурний розподіл описують рівнянням теплопровідності з внутрішнім джерелом теплоти [8, 11]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(c\rho T) = \nabla(\lambda \cdot \nabla(T)) + q_0 \quad (1)$$

де c – питома теплоємність матеріалу; ρ – густина матеріалу; T – температура; λ – теплопровідність; q_0 – теплота реакції; t – час.

Теплоту реакції виражають як функцію ступеня полімеризації [11]:

$$q_0 = \Delta H (1 - \theta) \rho \frac{d\eta}{dt}; \quad (2)$$

де ΔH – теплота, що виділяється на одиницю маси зв'язуючого під час екзотермічної реакції; θ – об'ємна частка армувального матеріалу; $\frac{d\eta}{dt}$ – швидкість отверднення (реакції).

Швидкість полімеризації здебільшого залежить від температури та поточного ступеня перетворення:

$$\frac{d\eta}{dt} = f(\eta, T, t); \quad (3)$$

де $f(\eta, T, t)$ – функція, яка зазвичай визначається експериментально для конкретного зв'язуючого.

Нерівномірність розподілу температури та ступеня перетворення на етапах III–V зумовлює формування напружено-деформованого стану. Фактичні напруження повинні залишатися нижчими за допустимі значення, оскільки напружено-деформований стан (НДС) є функцією теплових і хімічних процесів, структури матеріалу та геометрії елемента.

Застосування моделювання забезпечує можливість оптимізації режимів формування, скорочення тривалості виробничого циклу, зниження енергоспоживання та стабільне досягнення необхідних фізико-механічних властивостей відповідно до вимог конструкторської документації та експлуатаційних норм.

2. Результати досліджень

Проблему мінімізації витрат у процесі отверднення можна вирішувати як прямими, так і непрямыми методами. У широкому розумінні це охоплює не лише зниження енергоспоживання, але й підвищення технологічності, надійності та відтворюваності всього виробничого процесу.

Перший підхід пов'язаний із визначенням мінімально необхідної температури формування за мінімально потрібного часу переробки. Важливо зазначити, що ці параметри впливають не лише на енергоспоживання циклу, але й на кінцеві експлуатаційні характеристики виробу. Найбільш тривалим і енергоємним етапом процесу є ізотермічна витримка. Традиційно її параметри задаються відповідно до технічних характеристик застосовуваного зв'язуючого. Однак практика показує, що такі параметри не завжди є повністю обґрунтованими й нерідко призводять до необґрунтованого збільшення тривалості отверднення, що, у свою чергу, підвищує собівартість продукції.

Тому виникає потреба у методах уточнення параметрів ізотермічної витримки. Можливі два основні підходи: експериментальний та онлайн моніторинг та керування (див. рис. 4).

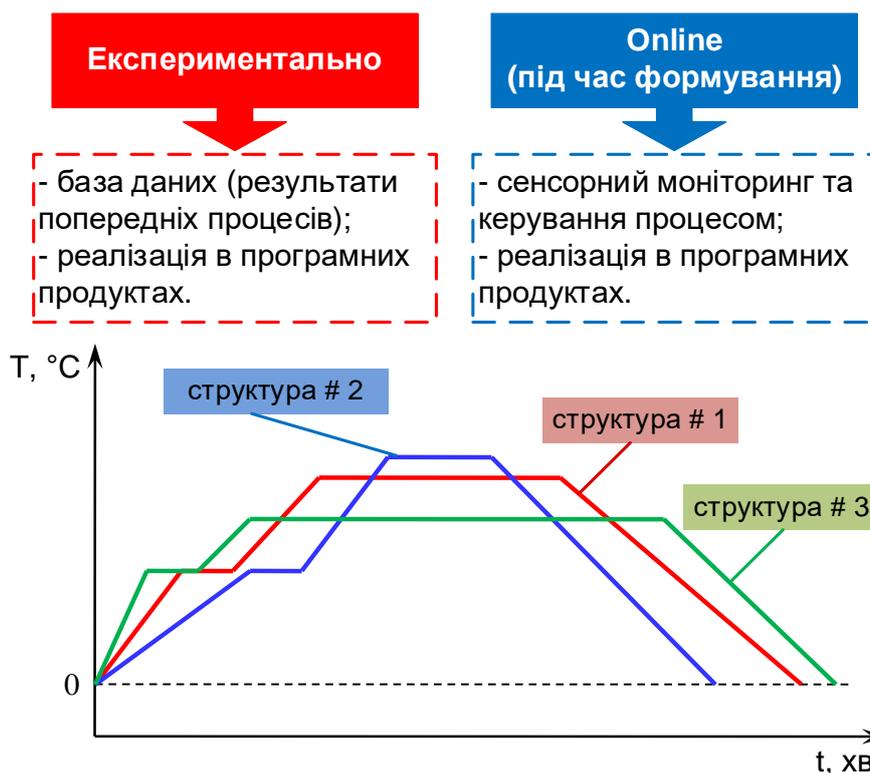


Рис. 4. Можливі шляхи оптимізації етапу витримки

Онлайн-підхід спрямований на скорочення кількості експериментів і базується на контрольованому втручанні в процес отверднення. Під час формування здійснюється безперервний моніторинг параметрів, що характеризують ступінь завершеності хімічного перетворення зв'язуючого із в'язкого стану в тверду полімерну матрицю (див. рис. 5). Такими параметрами можуть бути електрофізичні характеристики матеріалу, а також зміни температури й маси зв'язуючого під час отверднення. Сучасні аналітичні методи, такі як діелектрично-термічний аналіз та диференціальна сканувальна калориметрія, дозволяють опосередковано оцінювати завершеність процесу. Застосування цих методів дає можливість обмежити кількість тестових циклів до одного–двох, після чого визначаються необхідні технологічні параметри.

Другий підхід до зниження енергоспоживання є непрямим та полягає у підвищенні якості конструкції й забезпеченні її регламентованих властивостей шляхом попереднього визначення напруженого стану, що виникає під час отверднення. Для його реалізації необхідно розв'язати низку задач, пов'язаних із процесами, що відбуваються в пакеті під час формування, та встановити взаємозв'язки між факторами, які впливають на розвиток напруженого стану.

Незважаючи на різну фізичну природу цих факторів, їх можна описати через спільні параметри, а розроблені моделі дозволяють розрахувати напружений стан конструкції на будь-якому етапі процесу. Отримані результати показують, що найбільший вплив на формування напружень мають структура пакету, параметри режиму отверднення та конструкція оснащення. Відповідно, одним із методів зниження витрат є забезпечення допустимого рівня напруженого стану під час формування.

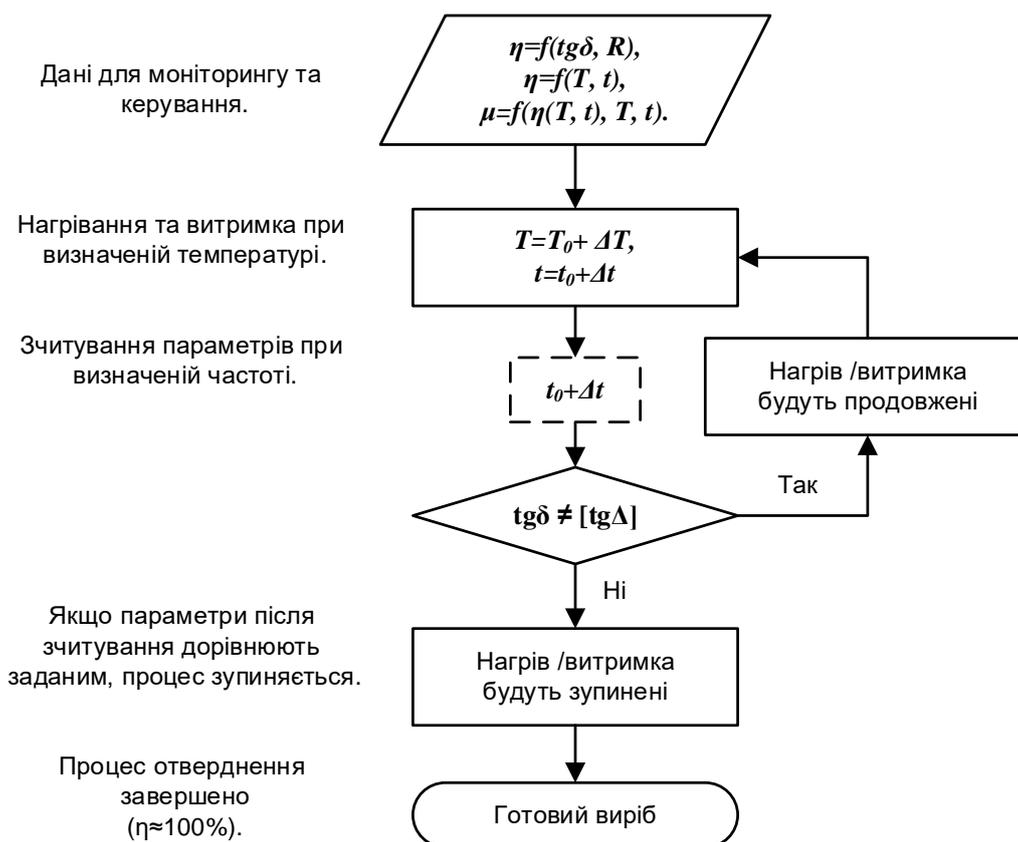


Рис. 5. Блок-схема онлайн-методу моніторингу та контролю параметрів процесу отверднення

Досягти цього можна шляхом забезпечення рівномірного температурного поля в пакеті композиту. Дослідження показали, що таке завдання вирішується комплексно:

- вибором раціонального температурно-часового режиму отверднення;
- проектуванням оснащення, яке забезпечує рівномірний двосторонній нагрів;
- використанням релаксаційних властивостей композиту на етапах ізотермічної витримки й охолодження.

Крім того, можливе свідоме проектування конструкцій із заданим напруженим станом, який може компенсуватися під час монтажних операцій.

Сучасні методи визначення раціональних технологічних параметрів дозволяють ефективно розв'язувати задачу теплопровідності за відомих граничних умов. Найчастіше її розглядають в одновимірній постановці, коли температурний фронт рівномірно розподілений по поверхні конструкції, тоді як поперек товщини пакету зберігається температурний градієнт. У такій постановці може бути врахований і екзотермічний ефект реакції.

У результаті проведеної оптимізації, виконаної для заданої структури композитного пакету, типу зв'язуючого та умов теплопередачі, тривалість ізотермічної витримки була зменшена у 1,7 раза порівняно з традиційним циклом отверднення. Відповідно, енергоспоживання процесу формування знизилося з 40 кВт·год до 23 кВт·год.

Порівняльні температурно-часові режими базового та оптимізованого режимів наведено на рисунку 6. Отримані результати демонструють потенціал

скорочення енерговитрат за рахунок раціонального вибору параметрів витримки та не претендують на універсальність без урахування конструктивних і теплофізичних особливостей конкретного виробу.

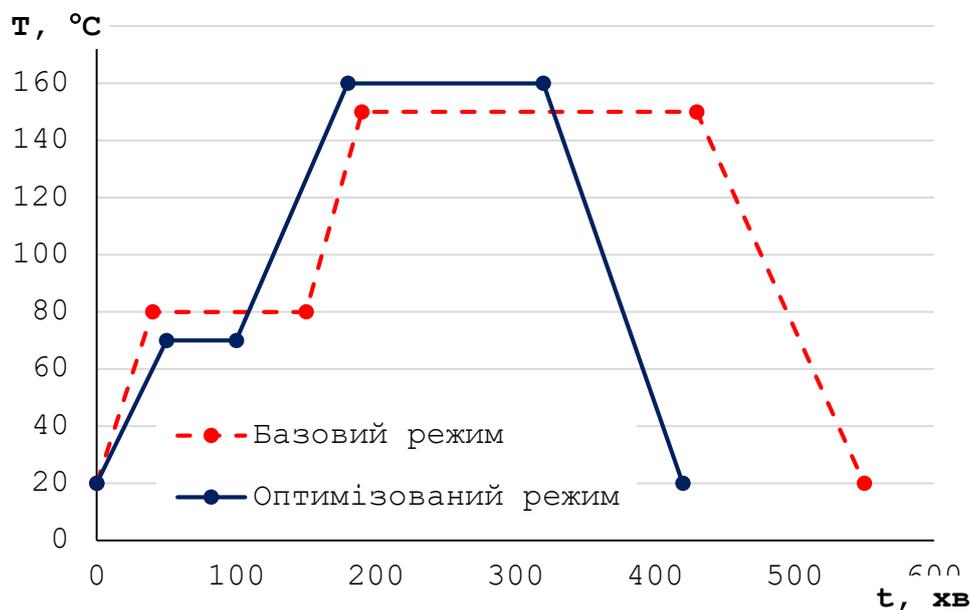


Рис. 6. Базовий та оптимізований режими формування

Слід зазначити, що наведений результат щодо скорочення тривалості ізотермічної витримки та зниження енергоспоживання отримано для конкретної конфігурації композитного пакету, типу зв'язуючого та умов теплопередачі, характерних для розглянутого технологічного процесу. У зв'язку з цим кількісні значення ефекту не слід розглядати як універсальні для всіх типів композитних конструкцій. Водночас запропонований підхід до оптимізації режимів отверднення ґрунтується на загальноновизнаних фізичних закономірностях теплопровідності та кінетики полімеризації, що забезпечує його коректність і відтворюваність за умов адаптації до конкретних матеріалів, геометрії виробів і технологічного обладнання. Отже, отримані результати мають методологічний характер і підтверджують принципову можливість істотного зниження енерговитрат без погіршення якості виробів за рахунок раціонального вибору параметрів процесу формування.

Однак забезпечити рівномірний прогрів по товщині пакету не завжди можливо лише через підбір технологічних параметрів. Важливу роль відіграють обмеження обладнання, конструктивні особливості пакету, а також властивості оснащення та допоміжних шарів. У таких випадках ефективним рішенням є додаткове підведення тепла з одного боку. Існуючі методи розрахунку дозволяють визначити необхідний тепловий вплив, а конструктивні рішення формувальної поверхні – реалізувати цей підхід на практиці (див. рис. 7).

Слід також відзначити, що зниження напруженого стану у сформованій структурі може бути досягнуте завдяки реономним властивостям композиту на етапах охолодження. Прогнозування параметрів температури, тиску та тривалості витримки дає змогу в окремих випадках зменшити залишкові деформації у 1,2–2 рази.

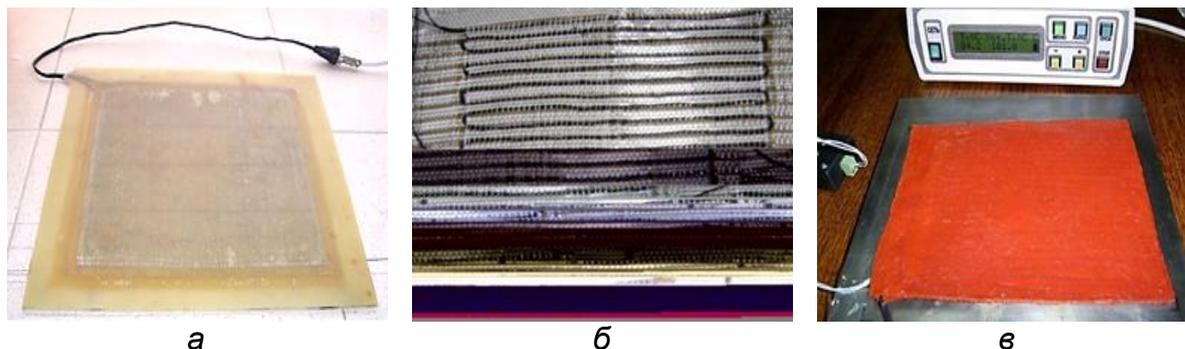


Рис. 7. Оснастка з резистивним елементом: а) склопластик та металевий дріт; б) склопластик та вуглецевий філамент; в) силікон та вуглецевий філамент (гнучка термоковдра)

Таким чином, поєднання запропонованих методів – оптимізації режимів отверднення, удосконалення конструкції оснащення, застосування аналітичних та онлайн-методів контролю – дозволяє знизити рівень напруженого стану до допустимих значень, забезпечити регламентовану якість виробів та зменшити як тривалість, так і енергоспоживання всього технологічного процесу.

Висновки

У роботі показано, що ізотермічна витримка є найбільш енергоємним і тривалим етапом процесу формування термореактивних полімерних композитів, а її параметри, які в промисловій практиці часто задаються директивно, не завжди є раціональними з точки зору енергоспоживання та тривалості технологічного циклу. Проведений аналіз підтверджує, що використання усереднених режимів отверднення без урахування геометрії виробу, структури композитного пакету та умов теплопередачі призводить до необґрунтованого перевитрачання енергії.

На основі застосування загальноновизнаних моделей теплопровідності та кінетики отверднення обґрунтовано можливість скорочення тривалості ізотермічної витримки без зміни максимальної температури циклу та без погіршення умов формування. Для розглянутої конфігурації процесу тривалість витримки була зменшена у 1,7 рази, що забезпечило зниження енергоспоживання з 40 кВт·год до 23 кВт·год. Отриманий результат демонструє потенціал оптимізації режимів отверднення як ефективного інструменту підвищення енергоефективності без модернізації виробничого обладнання.

Показано, що формування напружено-деформованого стану в композитному пакеті є наслідком сумарного впливу теплових, усадкових і релаксаційних процесів, а ключовими чинниками, що визначають рівень залишкових напружень, є структура пакету, температурно-часові параметри режиму та конструкція оснащення. Забезпечення рівномірного температурного поля, зокрема шляхом двостороннього нагрівання та використання підігрітого оснащення, розглянуто як ефективний спосіб зниження рівня залишкових напружень і деформацій.

Обґрунтовано доцільність застосування онлайн-методів моніторингу ступеня завершеності процесу отверднення як альтернативи багаторазовим експериментальним підборам режимів. Такий підхід забезпечує адаптивність технологічного процесу, скорочення кількості тестових циклів і підвищення відтворюваності результатів у разі зміни конструктивних або технологічних параметрів.

Отримані результати можуть бути використані при створенні комп'ютерно-інтегрованих систем керування процесами формування полімерних композиційних матеріалів з метою підвищення їх енергоефективності та відтворюваності.

Узагальнюючи, поєднання оптимізації температурно-часових режимів отверднення, раціонального проектування оснащення та застосування аналітичних і онлайн-методів контролю створює методологічну основу для істотного зниження енергоспоживання, скорочення тривалості формування та забезпечення регламентованої якості полімерних композиційних конструкцій у промислових умовах.

References

1. Georgantzinis S. K. Composites in Aerospace and Mechanical Engineering [Text] / S. K. Georgantzinis, G. I. Giannopoulos, K. Stamoulis, S. Markolefas // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, No. 22. – 7230. <https://doi.org/10.3390/ma16227230>
2. Zhang J. Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications [Text] / J. Zhang, G. Lin, U. Vaidya, H. Wang // *Composites Part B: Engineering*. – 2023. – Vol. 250. – 110463. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110463>
3. Skarka W. The calculation and optimization methodology of repairable elements of a UAV structure [Text] / W. Skarka, S. Kurennov, K. Barakhov, F. Gagauz, O. Maksymovych, O. Vambol // *Aerospace*. – 2025. – Vol. 12, No. 5. – 441. <https://doi.org/10.3390/aerospace12050441>
4. Reddy S. Use of composite materials and hybrid composites in wind turbine blades [Text] / S. Reddy, R. Suresh, M. B. Hanamantraygouda, B. P. Shivakumar // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 46, No. 7. – P. 2827–2830. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.745>
5. Bilkenroth F. Enhancing rail vehicle structural performance through high-recyclability thermoplastic composite lightweight components [Text] / F. Bilkenroth, P. Ramisch, Y. Li, A. Ulbricht // *Transport Transitions: Advancing Sustainable and Inclusive Mobility*. – Cham : Springer, 2025. – (Lecture Notes in Mobility). https://doi.org/10.1007/978-3-031-89444-2_46
6. Collinson M. G. Novel composite curing methods for sustainable manufacture [Text] / M. G. Collinson, H. Zhang // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2022. – Vol. 161. – 107071. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100293>
7. Binali R. Energy saving by parametric optimization and advanced lubricating techniques in the machining of composites and superalloys: a systematic review [Text] / R. Binali, A. D. Patange, M. Kuntoğlu, T. Mikolajczyk, E. Salur // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, No. 21. – 8313. <https://doi.org/10.3390/en15218313>
8. Kondratiev A. Effect of heating conditions during moulding on residual stress–strain behaviour of a composite panel [Text] / A. Kondratiev, V. Píštěk, O. Vambol, P. Kučera // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14. – 1660. <https://doi.org/10.3390/polym14091660>
9. Kondratiev A. Determination of the composite panel moulding pressure value [Text] / A. Kondratiev, V. Píštěk, O. Vambol, Y. Otrosh, P. Kučera, O. Kučera // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14. – 2392. <https://doi.org/10.3390/polym14122392>
10. Zhai Z. Optimization of process parameters for carbon fiber reinforced polyamide 6 composites fabricated by self-resistance electric heating technology [Text]

/ Z. Zhai, Y. Du, X. Wang // *Polymers*. – 2023. – Vol. 15, No. 8. – 1914.
<https://doi.org/10.3390/polym15081914>

11. Yuan Z. Curing cycle optimization for thick composite laminates using the multi-physics coupling model [Text] / Z. Yuan, X. Tong, G. Yang [ets.] // *Applied Composite Materials*. – 2020. – Vol. 27. – P. 839–860. <https://doi.org/10.1007/s10443-020-09836-0>

12. Abali B. E. Experimental investigation for modeling the hardening of thermosetting polymers during curing [Text] / B. E. Abali, M. Y. Yardımcı, M. Zecchini, G. Daissè [ets.] // *Polymer Testing*. – 2021. – Vol. 102. – 107310. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107310>

13. Zhang Y. Predicting curing distortion in composite manufacturing – a fast and cost-efficient numerical simulation method [Text] / Y. Zhang, L. An, C. Zhao // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, No. 24. – 3597. <https://doi.org/10.3390/polym16243597>

14. Dolkun D. Optimization of cure profile for thick composite parts based on finite element analysis and genetic algorithm [Text] / D. Dolkun, W. Zhu, Q. Xu, Y. Ke // *Journal of Composite Materials*. – 2018. – Vol. 52, No. 28. – P. 3885–3894. <https://doi:10.1177/0021998318771458>

Надійшла до редакції 29.12.2025, розглянута на редколегії 2.02.2026

Energy-Efficient Approaches to the Manufacturing of Polymer Composite Structures

This paper investigates approaches to improving the energy efficiency of the manufacturing process of thermosetting polymer composites through optimization of curing parameters. It is shown that the isothermal dwell stage is the longest and most energy-intensive phase of the technological cycle, while curing schedules commonly used in industrial practice and often based on averaged datasheet properties of the resin are not always rational when the part geometry, composite lay-up structure, and heat transfer conditions are taken into account.

Within the study, two principal approaches to determining optimal technological parameters are analysed: the experimental approach and the online method. The experimental approach involves selecting curing schedules based on a series of tests for a specific structure, which ensures compliance with the required material properties but is associated with significant time and energy costs. The online method is based on continuous monitoring of parameters characterising the degree of completion of chemical reactions in the resin and enables adaptive adjustment of temperature–time profiles during the forming process without the need for additional experiments.

To analyse the curing process, well-established physical and mathematical models of heat transfer and polymerisation kinetics are employed, allowing prediction of the spatial–temporal distributions of temperature and degree of cure within the composite laminate. Particular attention is paid to the investigation of the stress–strain state formed as a result of the combined effects of thermal, shrinkage, and relaxation processes. It is demonstrated that the level of residual stresses can be reduced by ensuring a uniform temperature field, applying double-sided heating, optimising tooling design, and exploiting the relaxation properties of the material.

As a result of curing schedule optimisation for a given composite laminate configuration, the duration of the isothermal dwell was reduced by a factor of 1.7, leading to a decrease in energy consumption of the forming process from 40 to 23 kWh

without deterioration of processing conditions or product quality. The obtained results are methodological in nature and can be applied in the development of energy-efficient manufacturing technologies for polymer composite structures and in the creation of computer-integrated process control systems.

Keywords: energy efficiency, polymer composites, curing process, technological process optimisation, residual stresses, vacuum autoclave manufacturing technique, aerospace manufacturing.

Відомості про авторів:

Вамболь Олексій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри авіаційної та виробничої інженерії Національного університету “Львівська політехніка”, Львів, Україна, e-mail: oleksii.o.vambol@lpnu.ua. ORCID 0000-0002-1719-8063.

Гагауз Федір Миронович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства Національного аерокосмічного університету “Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна, e-mail: f.gagauz@khai.edu. ORCID 0000-0001-6880-1857.

Пургіна Світлана Михайлівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства Національного аерокосмічного університету “Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна, e-mail: s.purhina@khai.edu. ORCID 0000-0001-6992-5210.

Баратов Костянтин Петрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: Kostiantyn.Barakhov@kname.edu.ua. ORCID 0000-0003-1714-7917.

Близнюк Павло Володимирович – аспірант кафедри автоматики та телекомунікацій Донецького національного технічного університету, Дрогобич, Україна, e-mail: pavlo.blyzniuk.asp@donntu.edu.ua. ORCID 0009-0008-4518-812X.

About the authors

Oleksii VAMBOL – Ph.D., Assoc. Prof. of the Department of Aviation and Manufacturing Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, e-mail: oleksii.o.vambol@lpnu.ua. ORCID 0000-0002-1719-8063.

Fedir GAGAUZ – Ph.D., Assoc. Prof. of the Department of Composite Structures and Aviation Materials, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: f.gagauz@khai.edu. ORCID 0000-0001-6880-1857.

Svitlana PURHINA – Ph.D., Assoc. Prof. of the Department of Composite Structures and Aviation Materials, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: s.purhina@khai.edu. ORCID 0000-0001-6992-5210.

Kostiantyn BARAKHOV – Ph.D., Assoc. Prof. of the Department of Theoretical and Structural Mechanics, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine, e-mail: Kostiantyn.Barakhov@kname.edu.ua. ORCID 0000-0003-1714-7917.

Pavlo BLYZNIUK – PhD Student, Department of Automation and Telecommunications, Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine, e-mail: pavlo.blyzniuk.asp@donntu.edu.ua. ORCID 0009-0008-4518-812X.