

<https://doi.org/10.15407/knit2022.02.003>  
УДК 678.5.067

**О. В. ГАЙДАЧУК<sup>1</sup>**, проф., професор-консультант, д-р техн. наук  
E-mail: a.gaydachuk@khai.edu

**А. В. КОНДРАТЬЄВ<sup>2</sup>**, проф., проф., д-р техн. наук  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8101-1961>  
E-mail: kondratyev\_a\_v@ukr.net; andrii.kondratiev@kname.edu.ua

**Т. П. НАБОКІНА<sup>3</sup>**, доцент, доцент, канд. техн. наук  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0019-5066>  
E-mail: t.nabokina@khai.edu

<sup>1</sup> Технологічний університет Нінбо

201 вул. Фенхуа, Цзянбей Цюй, Нінбо Ші, Чжецзян Шен, КНР

<sup>2</sup> Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова  
вул. Маршала Бажанова 17, Харків, Україна, 61002

<sup>3</sup> Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ»  
вул. Чкалова 17, Харків, Україна, 61070

## ОПТИМІЗАЦІЯ ТИСКУ І ЧАСУ ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ ВИРОБІВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРІ МІНІМАЛЬНОЇ В'ЯЗКОСТІ СПОЛУЧНОГО

*Технологічний процес формування композитних виробів полягає в наданні їм на форматворному оснащенні необоротної форми шляхом полімеризації сполучного при певних температурі та тиску, що змінюються в часі. Статтю присвячено дослідженню технологічних параметрів найпоширенішого на практиці способу формування виробів із полімерних композиційних матеріалів, попередньо сформованих із препрегів. Отримала подальшого розвитку математична модель заповнення сполучним міжволоконного простору армувального матеріалу для полімерного композиційного матеріалу із різною щільністю впакування волокон від квадратичної до гексагональної, зумовленої видом армувального матеріалу. Розроблено нову методику оптимізації тиску та часу формування композитних виробів при температурі мінімальної в'язкості сполучного. Методику реалізовано аналітичними залежностями, що встановлюють оптимальні часові інтервали і тиск формування на ділянці температурно-часової діаграми, яка пов'язана зі здатністю застосовуваного устаткування (печі, автоклава) забезпечити максимально можливо швидкість підйому температури з метою «розм'якшення» сполучного у препрезі до мінімальної його в'язкості. Показано, що витрати енергії на переформування тетрагональної структури полімерного композиційного матеріалу у гексагональну в десятки раз перевищують витрати для формування тетрагональної структури. Так, переформування тетрагональної структури при об'ємному вмісті сполучного 0.4 у щільну гексагональну структуру вимагає збільшення тиску в 66.7 раза. Отримані результати дозволяють встановити економічно доцільний рівень тиску та часу формування композитних виробів при забезпеченні їхньої регламентованої якості.*

**Ключові слова:** препрег, полімеризація сполучного, міжволоконний простір, квадратична та гексагональна структура.

Цитування: Гайдачук О. В., Кондратьєв А. В., Набокiна Т. П. Оптимізація тиску і часу формування композитних виробів при температурі мінімальної в'язкості сполучного. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 2 (135). С. 3—13.  
<https://doi.org/10.15407/knit2022.02.003>

## 1. ВСТУП

Удосконалювання та розроблення нових конструкцій авіаційної та ракетно-космічної техніки пов'язане із більш широким використанням полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) [3, 12]. Такі матеріали мають властивості та особливості, що відрізняються від характеристик традиційних конструкційних матеріалів [10, 14]. Унікальна сукупність характеристик ПКМ відкриває широкі можливості як для вдосконалювання відомих, так і для розроблення нових конструкцій і технологічних процесів [22, 28].

Як відомо [4, 11], технологічний процес формування виробу із ПКМ полягає в наданні йому на формотворному оснащенні необоротної форми шляхом полімеризації сполучного при певних температурі  $t$  і тиску  $p$ , що змінюються в часі  $\tau$ . Параметри  $t$ ,  $p$  і  $\tau$  або  $t(\tau)$  і  $p(\tau)$  є основними зовнішніми технологічними параметрами процесу формування виробу із ПКМ. Внутрішніми параметрами процесу є динамічна в'язкість сполучного  $\mu(t, \tau)$ , а також об'ємний вміст  $\theta_b$  і його структурні характеристики.

Через те що внутрішні параметри визначаються обраними сполучним і армувальним матеріалом, виходячи з експлуатаційних характеристик виробу, то завданням процесу формування є встановлення такого оптимального співвідношення між ними та змінними зовнішніми параметрами, при якому забезпечується регламентована технічним завданням якість виробу при мінімальних енергетичних витратах. У зв'язку із цим виникає необхідність оптимізації параметрів процесу формування.

## 2. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В авіа- та супутникобудуванні переважають конструкції із ПКМ, що виготовляються методами викладення [3, 23]. Серед них найбільш висока якість виробів при прийнятних енерго- та працезатратах забезпечується застосуванням препрегів [9]. Однак і формоутворення виробів із ПКМ методами намотування, характерне для конструкцій ракетної техніки [3], практично не виключає формування, що описується співвідношенням тих же зовнішніх параметрів  $t(\tau)$  і  $p(\tau)$  [21].

Температурно-часовий режим формування залежить від багатьох факторів, основними з яких є [11, 23]:

- тип і склад сполучного;
- спосіб просочення армувального матеріалу: попереднє готування препрегів з наступним формуванням виробу («сухий» спосіб формування), «мокрый» спосіб, що полягає в просоченні армувального матеріалу у процесі формування та наступного формоутворення виробу;
- тип армувального матеріалу та спосіб його попередньої підготовки;
- спосіб формування.

Дослідженням цих факторів займалася досить велика кількість авторів [5]. У більшості випадків отримані результати є або узагальненими схемами розв'язання, або моделями, які враховують лише окремі фактори процесу формування. Так, наприклад, у процесі роботи із препрегами вирішуються питання оптимальних технологічних режимів, що забезпечують їхню регламентовану якість [13]. При цьому режими технологічних процесів неоднозначно гармонізовано один з одним.

У роботі [15] досліджено закономірності нерівномірного просочення полімерного матеріалу. Показано, що ці явища зумовлені нерівномірністю градієнта температури. На основі цього розроблено технологічні заходи, які дозволили знизити нерівномірність масопереносу сполучного, забезпечивши необхідний ступінь просочення розглянутого полімерного матеріалу. На жаль, отримані результати слушні тільки для полімерного паперу, та не можуть бути узагальнені на інші полімерні матеріали.

У роботах [27, 32] описуються хімічні та фізичні процеси, що протікають у ПКМ у процесі затвердіння. Розглядаються проблеми, які виникають у процесі формування, моделюються хімічні перетворення у сполучному. У роботах [26, 31, 33] процес формування моделюється тільки одним компонентом — сполучним. При цьому розміри конструкції, умови прогріву та наявність армувального матеріалу не враховуються. В експериментальних дослідженнях [17, 30] показано, що на етапі розігрівання ПКМ, нарівні з усадкою у виникненні напруженого стану бе-

руть участь і температурні явища. Температурні напруження стають сумірними з усадковими по досягненню в'язкості матеріалу, яка відповідає 60...70 % конверсії в сполучному. Однак у цих роботах розглядається тільки етап розігріву та не враховується зміна властивостей матеріалів від температури.

Роботи [6, 24] досить точно моделюють неізо-термічний процес формування ПКМ на етапах нагрівання та охолодження. Досить докладно описується етап охолодження, обґрунтовуються можливі дефекти, які можуть виникнути на даному етапі за рахунок нерівномірного розподілу температурного поля по товщині виробу. Однак такі процеси, як видалення летких продуктів з формованого виробу, підведення тепла, а також виникнення напружено-деформівного стану за рахунок армувального матеріалу не розглядаються.

Практично всі роботи, за винятком [32], не приділяють належної уваги визначенню тиску формування, тоді як цей параметр є одним з основних [4, 11]. Тиск формування регламентує об'ємний вміст армувального матеріалу та забезпечує однорідність, дегазацію, а також і можливе зниження залишкового напруженого стану [23, 32].

У роботі [7] розроблено математичну модель укладання препрегу змінної ширини для заданих режимів його формування. У роботі [29] експериментально досліджено технологічні режими формування ПКМ. Проведені дослідження дозволили збільшити міцність ПКМ на 25...35 %. Однак отримані результати можуть бути застосовані лише для вузького класу матеріалів фторопласта і кварцової тканини.

У роботі [19] наведено аналіз проблемних питань формування для типового технологічного циклу виробництва композицій епоксидних полімерів. Обґрунтовано доцільність застосування ультразвукової модифікації для досягнення енергозбереження та підвищення якості одержуваних композитних виробів. У роботі [20] розроблено підхід до застосування принципів автоматизованого проектування для вибору оптимальних конструкторсько-технологічних параметрів при формуванні ПКМ із застосуванням ультразвукової обробки.

Особливий інтерес представляють моделі формування, запропоновані в роботах [8, 16]. Автори цих робіт пропонують не тільки вирішувати завдання вибору раціональних технологічних параметрів режиму формування, але й проводити контроль заданих параметрів, а якщо буде потреба — робити коректування у процесі формування. Запропонована в роботі [1] модель одержала подальший розвиток у роботі [2] для задачі про дві поверхні, що зближаються, видавлюючи рідину з в'язкістю. Однак у цій роботі як зовнішнє зусилля використано не розподілене по довжині пластини, а зосереджене в точці початку координат. Таке допущення призвело до його заниження в 1.33 раза. В роботах [1] ця математична модель заповнення сполучним отримала подальший розвиток. Було отримано аналітичну залежність тиску автоклавного формування від в'язкості, геометричних параметрів виробу, що формується, препрегу, моношару ПКМ і часу формування. Показано, що напрямлений вздовж горизонтальних каналів тиск в армувальному матеріалі завжди вище автоклавного. Це сприяє більш повному видаленню повітряних бульбашок і заповненню пустот сполучним, що забезпечує вищу якість формування композитного виробу. Але отримані результати не дозволили оптимізувати основні стадії температурно-часової діаграми циклу формування композитного виробу.

Із наведеного огляду видно, що у більшості робіт явище виникнення та впливу температурних напружень на етапі розігріву матеріалу і наявності армувального матеріалу у виробі не враховується, а технологічні параметри визначалися винятково фізико-механічними характеристиками сполучного. Такий підхід до визначення технологічних параметрів найчастіше призводить до порушення структури, появи неприпустимого напружено-деформівного стану у матеріалі-виробі та до додаткових витрат при виробництві конструкцій із ПКМ.

Метою роботи є розроблення методики оптимізації тиску і часу формування виробів із ПКМ при температурі мінімальної в'язкості сполучного, яка забезпечить мінімізацію енергетичних витрат на їхнє виготовлення.

### 3. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Як вказувалося вище, температурно-часовий режим формування залежить від багатьох факторів [11, 21]. Кожен із цих факторів, від якого залежить температурно-часовий режим формування ПКМ, є комплексним. Він включає в себе ряд їхніх складових, комбінація яких і формує собою комплексний фактор, що призводить до виродження тієї або іншої ділянки температурно-часової діаграми. Діаграма температурно-часового режиму формування виробу з ПКМ в загальному випадку має вигляд, показаний на рис. 1.

Так, наприклад, застосування сполучного холодного затвердіння при ручному пошаровому просоченні армувального матеріалу у процесі

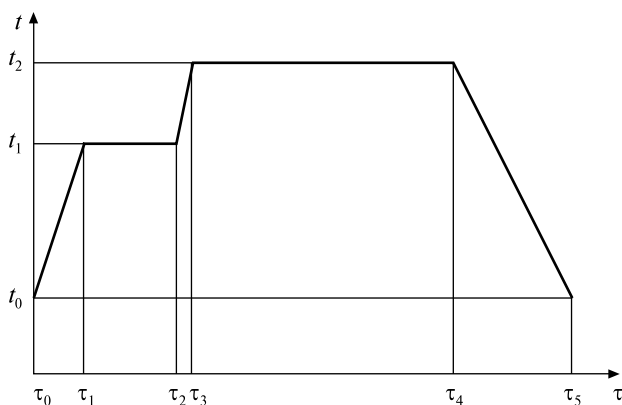


Рис. 1. Типова діаграма температурно-часового режиму формування виробів із полімерних композиційних матеріалів

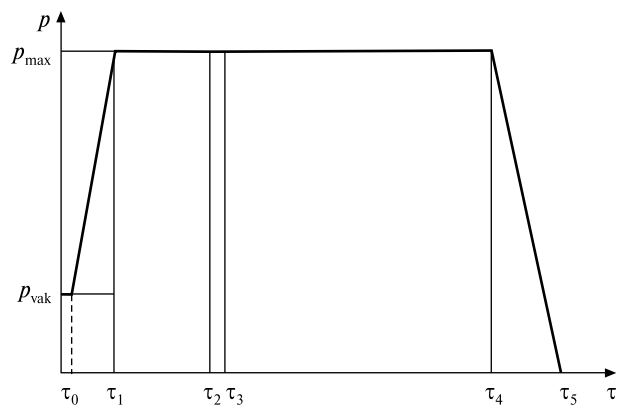


Рис. 2. Типова діаграма подачі тиску в процесі формування виробів із полімерних композиційних матеріалів

формування та наступного вільного формування без надлишкового тиску перетворює діаграму рис. 1 у пряму лінію  $t_0 = \text{const}$  при  $\tau = \tau_5$ . При препреговій технології та досить малій кількості газовиділень компонентів сполучного в процесі полімеризації вироджується ділянка  $\tau_1 - \tau_2$  і т. д. [11].

Температурно-часовий режим супроводжується певним режимом надлишкового тиску  $p$  (рис. 2).

При цьому режим подачі надлишкового тиску теж залежить від зазначених вище комплексних факторів. Наприклад, при застосуванні сполучного холодного затвердіння при ручному пошаровому просоченні армувального матеріалу у процесі формування та наступного вільного формування діаграма рис. 2 вироджується в лінію  $p = 0$ ,  $\tau = \tau_5$  або  $p = p_{vak}$ ,  $\tau = \tau_5$ . При пресуванні пакета  $p = p_{max}$ ,  $\tau = \tau_4$  і т. д. [11]

Водночас становить інтерес загальний випадок, коли суттєвими є всі зазначені вище комплексні фактори. Дослідимо загальний випадок, який характеризується наявністю діаграм рис. 1 і 2 при найпоширенішому на практиці способі формування виробу із ПКМ, попередньо сформованого із препрегу [5, 9]. У цьому випадку в «сухому» препрезі при якісному його виготовленні вміст розчинника становить 0...3 % [11, 25], який можна не враховувати. Наявність ділянки  $\tau_1 - t_1$  пов'язана зі здатністю застосовуваного устаткування (печі, автоклава) забезпечити максимально можливу швидкість підйому температури з метою «розм'якшення» сполучного у препрезі пакета ПКМ до мінімальної його в'язкості  $\mu_{min}$ , необхідної для його рівномірного розтікання в об'ємі пакету, що формується [18].

Раніше в роботі [1] було отримано залежність тиску формування виробів із ПКМ  $p$  від мінімальної в'язкості сполучного  $\mu_{min}(t, \tau)$  при постійній температурі  $t_1$ , що відповідає «сходінці» на температурно-часовій діаграмі циклу формування (рис. 1):

$$p_{max} = \frac{8\mu L^2}{\tau \left(1 - \sqrt{\frac{\pi}{1 - \theta_c}}\right)^2 h_{CM}^2}, \quad (1)$$

де  $\mu$  — в'язкість сполучного,  $L$  — найбільший позовжній розмір виробу, що формується,  $h_{CM}$  —

товщина формованого виробу,  $\tau$  — час, протягом якого сполучне заповнить усі порожнечі у пакеті композиту,  $\theta_b$  — об'ємний вміст сполучного.

Залежність (1) дозволяє визначити тиск формування при заданому часі  $\tau = \tau_2 - \tau_1$  або цей час при заданому тиску  $p$ .

Однак при отриманні залежності (1) передбачалося, що об'ємний вміст сполучного в ПКМ не перевищує відповідного квадратичній упаковці армувального матеріалу у структурі моношару ПКМ (рис. 3).

Така структура при максимальній щільності армувального матеріалу, яка відповідає  $l = d_f$ , забезпечує об'ємний вміст сполучного, що дорівнює

$$\theta_{bq}^{\max} = \frac{d_f^2 - \frac{\pi d_f^2}{4}}{d_f^2} = 1 - \frac{\pi}{4} = 0.215.$$

Водночас теоретично максимальний об'ємний вміст сполучного при щільному гексагональному упакуванні волокон (рис. 4) дорівнює  $\theta_{bq}^{\max} = 0.09$  [4]. При армувальному матеріалі на основі тканини максимальний об'ємний вміст сполучного дорівнює  $\theta_b^{\max} = 0.32$  [4, 11].

Можна припустити, що в процесі формування протягом часу  $\tau_2 - \tau_1$  структура ПКМ отримує квадратичне впакування волокон.

Для переходу від цієї структури до гексагональної необхідний додатковий тиск, що забезпечує перетікання сполучного по криволінійній траєкторії  $l^*$  при зближенні сусідніх волокон (рис. 5, а).

У перехідній стадії замість відстані  $l$ , яку протікало сполучне у період формування квадратичної структури, воно має подолати відстань  $l^*$ , що дорівнює довжині дуги  $\cup EABC$  (рис. 5, б). Приймаючи ділянки  $EA$  і  $BC$  прямолінійними, довжину дуги  $\cup EABC = l^*$  можна визначити як

$$l^* = 2AE + \cup AB = \sqrt{l^2 - d_f^2} + 2\pi d_f \sin \frac{l}{4d_f}. \quad (2)$$

З урахуванням того, що  $\theta_b = \frac{\pi}{4} \frac{1 - d_f}{2l}$ , одержимо

$$l = \frac{\pi d_f}{4(1 - \theta_{bq})}. \quad (3)$$

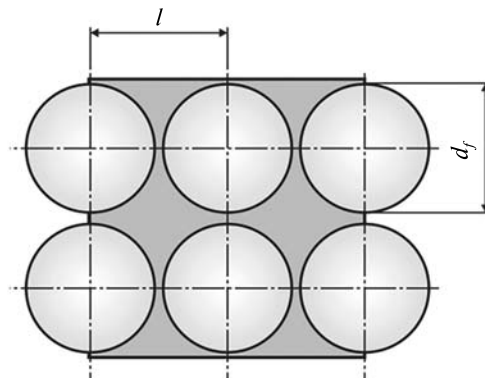


Рис. 3. Квадратична упаковка волокон у структурі полімерних композиційних матеріалів

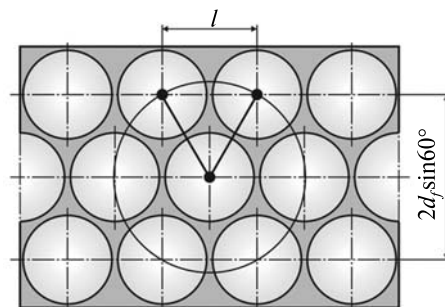


Рис. 4. Гексагональна упаковка волокон у структурі полімерних композиційних матеріалів

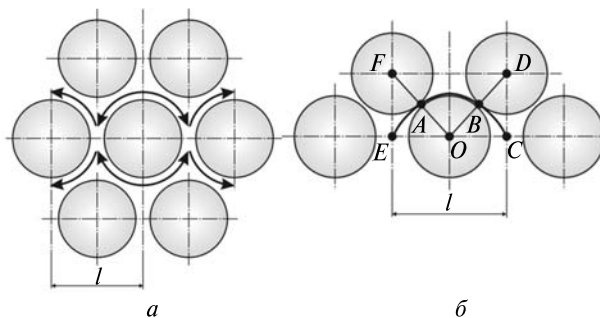


Рис. 5. Лінії течії сполучного у міжволоконних каналах при переході від квадратичної до гексагональної упаковки волокон армувального матеріалу: а — проміжна стадія, б — кінцева стадія

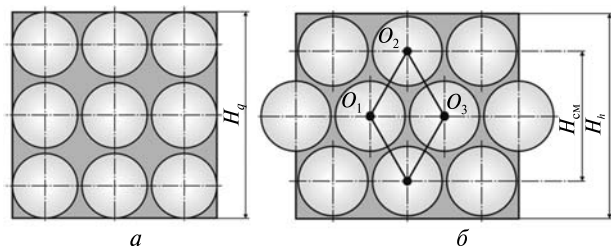


Рис. 6. Структура пакета у процесі формування полімерних композиційних матеріалів: а — при завершенні стадії квадратичного впакування волокон, б — при завершенні стадії гексагонального впакування волокон

З урахуванням (2) відношення матиме вигляд

$$\frac{l}{l^*} = \psi = \frac{4(1-\theta_{bq})}{\pi} \times \left[ \sqrt{\frac{\pi^2}{16(1-\theta_{bq})^2} - 1} + 2\pi \arcsin \frac{\pi}{16(1-\theta_{bq})} \right]. \quad (4)$$

На цей же коефіцієнт у повинна бути збільшена довжина виробу із ПКМ, що формується, у формулі (1):

$$L^* = L\psi. \quad (5)$$

До моменту, коли буде повністю сформоване квадратичне впакування волокон, товщина пакета із трьох моношарів (рис. 6, а) буде дорівнювати  $H_q = 3d_f$ . Товщина трьох моношарів при сформованому гексагональному впакуванні волокон  $H_h$  буде дорівнювати (рис. 6, б):

$$H_h = d_f + H_{CM}^*, \quad (6)$$

де

$$H_{CM}^* = 2d_f \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{64(1-\theta_{bq})^2}}. \quad (7)$$

Таким чином, товщина шару сполучного  $h^*$ , що видавлюється на другій стадії формування, яка відповідає кінцевому об'ємному вмісту в ПКМ  $\theta_b^*$ , буде дорівнювати

$$h^* = \frac{H_q - H_h}{2} = d_f \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{64(1-\theta_{bq})^2}} \right]. \quad (8)$$

При цьому  $\theta_b^*$  визначається формулою

$$\theta_b^* = 1 - \frac{V_f}{V_b} = 1 - \frac{\pi d_f^2}{2h^*l} = 1 - \frac{1 - \theta_{bq}}{\sqrt{1 - \frac{\pi^2}{64(1-\theta_{bq})^2}}}. \quad (9)$$

Якщо стадію «сходінки» на рис. 1 представити двома часовими інтервалами  $(\tau'_2 - \tau_1)$  та  $(\tau_2 - \tau'_2)$ , де  $\tau'_2$  відповідає часу формування щільної квадратичної структури, то замість залежності (1) одержимо тиск для кожного із двох етапів:

$$P_{(\tau'_2 - \tau_1)} = \frac{8\mu L^2}{(\tau'_2 - \tau_1) d_f^2 \left( \sqrt{\frac{\pi}{1-\theta_c}} - 1 \right)^2}, \quad (10)$$

$$P_{(\tau_2 - \tau'_2)} = \frac{8\mu L^2 \psi^2}{(\tau_2 - \tau'_2) d_f^2 \left( \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{64(1-\theta_{bq})^2}} - 1 \right)^2}. \quad (11)$$

Сумарна робота  $W_\Sigma$ , яка витрачається на формування в автоклаві кінцевої гексагональної структури ПКМ, дорівнює

$$W_\Sigma = P_{(\tau'_2 - \tau_1)} U + (P_{(\tau_2 - \tau'_2)} - P_{(\tau'_2 - \tau_1)}) U = P_{(\tau_2 - \tau'_2)} U, \quad (12)$$

де  $U$  — об'єм автоклава з урахуванням завантаження його виробом в оснащенні, що формується.

З виразу (11) випливає, що мінімальне значення тиску  $P_{(\tau_2 - \tau'_2)}$ , яке забезпечує перехід від тетрагональної до гексагональної структури ПКМ, має місце при максимальному значенні часового інтервалу  $(\tau_2 - \tau'_2)$ , тобто

$$P_{(\tau_2 - \tau'_2)} \rightarrow \min \text{ при } (\tau_2 - \tau'_2) \rightarrow \max. \quad (13)$$

Реалізація (13) у свою чергу вимагає виконання умови

$$(\tau_2 - \tau'_2) \rightarrow \max \text{ при } (\tau'_2 - \tau_1) \rightarrow 0. \quad (14)$$

Умова (14) виконується, якщо  $\tau'_2 \rightarrow \tau_1$ .

Таким чином, мінімальний тиск в автоклаві, що забезпечує перехід від тетрагональної до гексагональної структури ПКМ, реалізується його постійністю у всьому часовому інтервалі  $\tau_2 - \tau_1$ .

У цьому випадку з умови рівності тисків  $P_{(\tau'_2 - \tau_1)}$  з (10) і  $P_{(\tau_2 - \tau'_2)}$  з (11) знаходимо умовне

значення  $\tau'_2$ , що відповідає початку переходу тетрагональної структури в гексагональну. Термін «умовне» підкреслює, що  $\tau'_2$  не пов'язане зі зміною тиску в цей момент часу, а відповідає тільки початку переходу структури ПКМ від однієї форми до іншої.

Після відповідних перетворень значення  $\tau'_2$  визначиться залежністю

$$\tau'_2 = \frac{\tau_2 \left( \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{64(1-\theta_b)^2}} - 1 \right)^2 + \tau_1 \psi^2 \left( 1 - \sqrt{\frac{\pi}{(1-\theta_b)}} \right)^2}{\left( \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{64(1-\theta_b)^2}} - 1 \right)^2 + \psi^2 \left( 1 - \sqrt{\frac{\pi}{(1-\theta_b)}} \right)^2} \quad (15)$$

Підставивши значення  $\tau'_2$  в (10) або (11), що рівнозначно, тому що  $\tau'_2$  отримане з умови їхньої рівності, яке забезпечує мінімум енерговитрат на формування, отримаємо після перетворень

$$p_{opt} = \frac{8\mu L^2 \left[ \left( \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{64(1-\theta_b)^2}} - 1 \right)^2 + \psi^2 \left( 1 - \sqrt{\frac{\pi}{(1-\theta_b)}} \right)^2 \right]}{d_f^2 \left( 1 - \sqrt{\frac{\pi}{(1-\theta_b)}} \right)^2 \left( \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{64(1-\theta_b)^2}} - 1 \right)^2 (\tau_2 - \tau_1)} \quad (16)$$

В окремому випадку, коли щільність волокон в армувальному матеріалі дозволяє сформувати щільну тетрагональну структуру ПКМ, а потім його гексагональну структуру, залежності (15) і (16) можуть бути суттєво спрощені, тому що при цьому  $\theta_b = \theta_b^{\max} = 0.215$ , а  $\psi = 1.57$ .

Витрати енергії на переформування тетрагональної структури ПКМ у гексагональну в десятки раз перевищують витрати для формування тетрагональної структури. Так при  $\tau_1 = 30$  хв і  $\tau_2 = 50$  хв тиск для формування тетрагональної структури при  $q_b = 0.4$  дорівнює

$$p_t = 0.24 \frac{\mu L^2}{d_f^2}.$$

Натомість переформування цієї структури у щільну гексагональну структуру вимагає тиску

$$p_{opt} = 16 \frac{\mu L^2}{d_f^2},$$

тобто в 66.7 раз більше, ніж для  $p_t$ .

## ВИСНОВКИ

На основі запропонованих раніше підходу та математичної моделі заповнення сполучним міжволоконного простору армувального матеріалу для ПКМ із різною щільністю впакування волокон від квадратичної до гексагональної, зумовленої видом армувального матеріалу, розроблено нову методику оптимізації тиску та часу формування виробів із ПКМ при температурі мінімальної в'язкості сполучного. Методику реалізовано аналітичними залежностями, що встановлюють оптимальні часові інтервали і тиск формування на ділянці температурно-часової діаграми, які відповідають постійній температурі («сходінці»). Методика дозволяє встановити економічно доцільний рівень тиску при забезпеченні регламентованої якості композитного виробу, що формується.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гайдачук А. В. Методика исследования технологических параметров процесса формования изделий из полимерных композиционных материалов на основе препрегов. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. 2002. Вып. 30(3). С. 17–22.
2. Гайдачук В. Е., Сидоренкова М. А. Выбор оптимального давления при формовании конструкций из полимерных композиционных материалов. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. 1997. С. 8–12.
3. Дегтярев А. В., Коваленко В. А., Потапов А. В. Применение композиционных материалов при создании перспективных образцов ракетной техники. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2012. № 2(89). С. 34–38.
4. Михайлин Ю. А. *Конструкционные полимерные композиционные материалы*. — СПб.: НОТ, 2008. 822 с.
5. Baran I., Cinar K., Ersoy N., Remko Akkerman, Jesper H. Hattel A review on the mechanical modeling of composite manufacturing processes. *Archives of computational methods in engineering*. 2017. No. 24. P. 365–395. <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9167-2>
6. Baranov A. V. Non-isothermal curing and chemical effects during cavity filling with impregnated anisotropic layer. *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2004. **10**, No. 1. P. 15–22.
7. Bitjukov Yu. I., Kalinin V. A. The numerical analysis of the scheme on packing of the tape of variable width on the technological surface in the course of winding of designs from composite materials. *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2010. **16**, No. 2. P. 276–290.
8. Blagonadezhin V. L., Vorontsov A. N., Murzakhanov G. K. Technological problems of mechanics of structures made of composite materials. *Mechanics of composite materials*. 1988. **23**. P. 608–625. <https://doi.org/10.1007/BF00605687>
9. Budelmann D., Schmidt C., Meiners D. Prepreg tack: a review of mechanisms, measurement, and manufacturing implication. *Polymer composites*. 2020. **41**, No. 9. P. 3440–3458. <https://doi.org/10.1002.pc.25642>
10. Bychkov A. S., Kondratiev A. V. Criterion-based assessment of performance improvement for aircraft structural parts with thermal spray coatings. *J. superhard materials*. 2019. **41**, No. 1. P. 53–59. <http://doi.org/10.3103/S1063457619010088>
11. Campbell F. C. *Manufacturing processes for advanced composites*. — Elsevier science. 2004. 532 p.
12. Castanie B., Bouvet C., Malo Ginot. Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites part C*. 2020. **1**. 100004. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100004>
13. Deng B., Shi Y., Yu T., Zhao P. Influence mechanism and optimization analysis of technological parameters for the composite prepreg tape winding process. *Polymers*. 2020. **12**, No. 8. P. 1843. <https://doi.org/10.3390/polym12081843>
14. Fomin O., Logvinenko O., Burlutsky O., Rybin A. Scientific substantiation of thermal leveling for deformations in the car structure. *Int. J. engineering & technology*. 2018. **7**, No. 4.3. P. 125–129. <http://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19721>
15. Gaydachuk A. V., Slivinskiy M. B., Golovanevskiy V. A. Static electricity build-up considerations in manufacture of cores for sandwiched composite materials structures. *Materials forum*. 2006. **30**. P. 103–109.
16. Jaeger J. C. *Elasticity, Fracture and Flow*. Springer, 1969. 268 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-6024-7>
17. Jinno M., Sakai S., Osaka K., Fukuda T. Smart autoclave processing of thermoset resin matrix composites based on temperature and internal strain monitoring. *Adv. composite material*. 2003. **12**, No. 1. P. 57–72. <https://doi.org/10.1163/156855103322320374>
18. Karandashov O., Avramenko V. Studies of thermal stability of epoxy compound for glass-fiber pipes. *Chemistry & chemical technology*. 2017. **11**, No. 1. P. 61–64. <https://doi.org/10.23939/chcht11.01.061>
19. Kolosov A. E., Sakharov A. S., Sivetskii V. I., Sidorov D. E., Sokolskii A. L. Substantiation of the efficiency of using ultrasonic modification as a basis of a production cycle for preparing reinforced objects of epoxy polymer composition. *Chemical and petroleum engineering*. 2012. **48**. P. 391–397. <https://doi.org/10.1007/s10556-012-9629-9>
20. Kolosov A. E., Virchenko G. A., Kolosova E. P., Virchenko G. I. Structural and technological design of ways for preparing reactoplastic composite fiber materials based on structural parametric modeling. *Chemical and petroleum engineering*. 2015. **51**. P. 493–500. <https://doi.org/10.1007/s10556-015-0075-3>
21. Kondratiev A. V. A concept of optimization of structural and technological parameters of polymer composite rocket units considering the character of their production. *Space Science and Technology*. 2020. **26**, No. 6 (127). P. 5–22. <https://doi.org/10.15407/knit2020.06.005>
22. Kondratiev A. V., Gaidachuk V. E. Mathematical analysis of technological parameters for producing superfine prepregs by flattening carbon fibers. *Mechanics of Composite Materials*. 2021. **57**, № 1. P. 91–100. <https://doi.org/10.1007/s11029-021-09936-3>
23. Kondratiev A. V., Kovalenko V. O. Optimization of design parameters of the main composite fairing of the launch vehicle under simultaneous force and thermal loading. *Space Science and Technology*. 2019. **25**, No. 4 (119). P. 3–21. <https://doi.org/10.15407/knit2019.04.003>



24. Korotkov V. N., Chekanov Y.A., Rozenberg B. A. Nonisothermal curing of articles formed from polymeric composite materials in the winding process. *Mechanics of composite materials*. 1989. **25**. P. 73–78. <https://doi.org/10.1007/BF00608454>
25. Mustafa L. M., Ismailov M.B., Sanin A.F. Study on the effect of plasticizers and thermoplastics on the strength and toughness of epoxy resins. *Naukovyi visnyk natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2020. **4**. P. 63–68. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/063>
26. Nemirovskii Y. V., Yankovskii A. P. Effect of the thermal action and thermosensitivity of phase materials on the load-carrying capacity of momentless shells with an equal-stressed reinforcement. *Mechanics of composite materials*. 2002. **38**. P. 525–538. <https://doi.org/10.1023/A:1021778626055>
27. Nikolaev V. P., Pichugin V. S., Korobeinikov A. G. Effect of molding conditions on fracture mechanisms and stiffness of a composite of grid structure. *Mechanics of composite materials*. 1999. **35**. P. 49–54. <https://doi.org/10.1007/BF02260811>
28. Rodichev Y. M., Smetankina N. V., Shupikov O. M., Ugrimov S. V. Stress-strain assessment for laminated aircraft cockpit windows at static and dynamic load. *Strength of materials*. 2018. **50**, No. 6. P. 868–873. <http://doi.org/10.1007/s11223-019-00033-4>
29. Rodionov V. V. Optimization of molding the polymeric composite material with improved characteristics. *Plasticheskie massy*. 2019. **3-4**. P. 55–58. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-3-4-55-58>
30. Russell John D., Madhu S. Madhukar Mohamed S., Genidy Andre Y. Lee. A new method to reduce cure-induced stresses in thermoset polymer composites, Part III: Correlating stress history to viscosity, degree of cure and cure shrinkage. *J. composite materials*. 2000. **34**, No. 22. P. 1925–1947.
31. Teters G., Kregers A. Optimization of a composite plate buckling under thermal action with account of reliability. *Mechanics of composite materials*. 2000. **36**. P. 453–458. <https://doi.org/10.1023/A:1006750431407>
32. Tomashevskii V. T. Yakovlev V. S. Models in the engineering mechanics of polymer-matrix composite systems. *Int. applied mechanics*. 2004. **40**, No. 6. P. 601–621. <https://doi.org/10.1023/B:INAM.0000041391.28104.b7>
33. Verbitskaya N. A. Influence of complex compounds of rhenium (V), molybdenum (V) with macrocyclic ligands on processes of structure formation in epoxyurethane binder. *Plasticheskie massy: sintez svojstva pererabotka primenenie*. 2001. **7**. P. 10–14.

#### REFERENCES

1. Hajdachuk A. V. (2002). Technique for studying the technological parameters of the molding process of products from polymer composite materials based on prepregs. *Design and production of aircraft structures*, **30**(3), 17–22. [In Russian].
2. Gaidachuk V. E., Sidorenkova M. A. (1997). Selection of the optimal pressure when molding structures from polymer composite materials. *Design and production of aircraft structures*, 8–12.
3. Degtjarev A. V., Kovalenko V. A., Potapov A. V. (2012). The use of composite materials to create promising rocket technology. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, No. 2(89), 34–38.
4. Mihajlin Ju. A. (2008). *Structural polymer composite materials*. SPb.: NOT Publ. 822.
5. Baran I., Cinar K., Ersoy N., Remko Akkerman, Jesper H. (2017). Hattel A review on the mechanical modeling of composite manufacturing processes. *Archives of computational methods in engineering*, No. 24, 365–395. <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9167-2>
6. Baranov A. V. (2004). Non-isothermal curing and chemical effects during cavity filling with impregnated anisotropic layer. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*, **10**, No. 1, 15–22.
7. Bitjukov Yu. I., Kalinin V. A. (2010). The numerical analysis of the scheme on packing of the tape of variable width on the technological surface in the course of winding of designs from composite materials. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*, **16**, No. 2, 276–290.
8. Blagonadezhin V. L., Vorontsov A. N., Murzakhanov G. K. (1988). Technological problems of mechanics of structures made of composite materials. *Mechanics of composite materials*, **23**, 608–625. <https://doi.org/10.1007/BF00605687>
9. Budelmann D., Schmidt C., Meiners D. (2020). Prepreg tack: a review of mechanisms, measurement, and manufacturing implication. *Polymer composites*, **41**, No. 9, 3440–3458. <https://doi.org/10.1002.pc.25642>
10. Bychkov A. S., Kondratiev A. V. (2019). Criterion-based assessment of performance improvement for aircraft structural parts with thermal spray coatings. *J. superhard Materials*, **41**, No. 1, 53–59. <http://doi.org/10.3103/S1063457619010088>
11. Campbell F. C. (2004). *Manufacturing processes for advanced composites*. Elsevier Science, 532 p.
12. Castanie B., Bouvet C., Malo Ginot. (2020). Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites part C*, **1**, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100004>
13. Deng B., Shi Y., Yu T., Zhao P. (2020). Influence mechanism and optimization analysis of technological parameters for the composite prepreg tape winding process. *Polymers*, **12**, No. 8, 1843. <https://doi.org/10.3390/polym12081843>
14. Fomin O., Logvinenko O., Burlutsky O., Rybin A. (2018). Scientific substantiation of thermal leveling for deformations in the car structure. *Int. J. engineering & technology*, **7**, No. 4.3, 125–129. <http://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19721>

15. Gaydachuk A. V., Slivinskiy M. B., Golovanevskiy V. A. (2006). Static electricity build-up considerations in manufacture of cores for sandwiched composite materials structures. *Materials forum*, **30**, 103–109.
16. Jaeger J. C. (1969). *Elasticity, fracture and flow*. Springer, 268 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-6024-7>
17. Jinno M., Sakai S., Osaka K., Fukuda T. (2003). Smart autoclave processing of thermoset resin matrix composites based on temperature and internal strain monitoring. *Adv. composite material*, **12**, No. 1, 57–72. <https://doi.org/10.1163/156855103322320374>
18. Karandashov O., Avramenko V. (2017). Studies of thermal stability of epoxy compound for glass-fiber pipes. *Chemistry & chemical technology*, **11**, No. 1, 61–64. <https://doi.org/10.23939/chcht11.01.061>
19. Kolosov A. E., Sakharov A. S., Sivetskii V. I., Sidorov D. E., Sokolskii A. L. (2012). Substantiation of the efficiency of using ultrasonic modification as a basis of a production cycle for preparing reinforced objects of epoxy polymer composition. *Chemical and petroleum engineering*, **48**, 391–397. <https://doi.org/10.1007/s10556-012-9629-9>
20. Kolosov A. E., Virchenko G. A., Kolosova E. P., Virchenko G. I. (2015). Structural and technological design of ways for preparing reactoplastic composite fiber materials based on structural parametric modeling. *Chemical and petroleum engineering*, **51**, 493–500. <https://doi.org/10.1007/s10556-015-0075-3>
21. Kondratiev A. V. (2020). A concept of optimization of structural and technological parameters of polymer composite rocket units considering the character of their production. *Space Science and Technology*, **26**, No. 6 (127), 5–22. <https://doi.org/10.15407/knit2020.06.005>
22. Kondratiev A. V., Gaidachuk V. E. (2021). Mathematical analysis of technological parameters for producing superfine prepreps by flattening carbon fibers. *Mechanics of Composite Materials*, **57**, № 1. P. 91–100. <https://doi.org/10.1007/s11029-021-09936-3>
23. Kondratiev A. V., Kovalenko V. O. (2019). Optimization of design parameters of the main composite fairing of the launch vehicle under simultaneous force and thermal loading. *Space Science and Technology*, **25**, No. 4 (119), 3–21. <https://doi.org/10.15407/knit2019.04.003>
24. Korotkov V. N., Chekanov Y. A., Rozenberg B. A. (1989). Nonisothermal curing of articles formed from polymeric composite materials in the winding process. *Mechanics of composite materials*, **25**, 73–78. <https://doi.org/10.1007/BF00608454>
25. Mustafa L. M., Ismailov M. B., Sanin A. F. (2020). Study on the effect of plasticizers and thermoplastics on the strength and toughness of epoxy resins. *Naukovyi visnyk natsionalnoho hirnychoho universytetu*, **4**, 63–68. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/063>
26. Nemirovskii Y. V., Yankovskii A. P. (2002). Effect of the thermal action and thermosensitivity of phase materials on the load-carrying capacity of momentless shells with an equal-stressed reinforcement. *Mechanics of composite materials*, **38**, 525–538. <https://doi.org/10.1023/A:1021778626055>
27. Nikolaev V. P., Pichugin V. S., Korobeinikov A. G. (1999). Effect of molding conditions on fracture mechanisms and stiffness of a composite of grid structure. *Mechanics of composite materials*, **35**, 49–54. <https://doi.org/10.1007/BF02260811>
28. Rodichev Y. M., Smetankina N. V., Shupikov O. M., Ugrimov S. V. (2018). Stress-strain assessment for laminated aircraft cockpit windows at static and dynamic load. *Strength of materials*, **50**, No. 6, 868–873. <http://doi.org/10.1007/s11223-019-00033-4>
29. Rodionov V. V. (2019). Optimization of molding the polymeric composite material with improved characteristics. *Plasticheskie massy*, **3-4**, 55–58. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-3-4-55-58>
30. Russell John D., Madhu S. Madhukar Mohamed S., Genidy Andre Y. (2000). Lee A new method to reduce cure-induced stresses in thermoset polymer composites, Part III: Correlating stress history to viscosity, degree of cure and cure shrinkage. *J. composite materials*, **34**, No. 22, 1925–1947.
31. Teters G., Kregers A. (2000). Optimization of a composite plate buckling under thermal action with account of reliability. *Mechanics of composite materials*, **36**, 453–458. <https://doi.org/10.1023/A:1006750431407>
32. Tomashevskii V. T., Yakovlev V. S. (2004). Models in the engineering mechanics of polymer-matrix composite systems. *Int. applied mechanics*, **40**, No. 6, 601–621. <https://doi.org/10.1023/B:INAM.0000041391.28104.b7>
33. Verbitskaya N. A. (2001). Influence of complex compounds of rhenium (V), molybdenum (V) with macrocyclic ligands on processes of structure formation in epoxyurethane binder. *Plasticheskie massy: sintez svoystva pererabotka primenenie*, **7**, 10–14.

Стаття надійшла до редакції 19.04.2021

Прийнято до друку 20.01.2022

Received 19.04.2021

Accepted 20.01.2022

*O. V. Haidachuk*<sup>1</sup>, Dr. Sci. in Tech., Professor, Consultant Professor

E-mail: a.gaydachuk@khai.edu

*A. V. Kondratiev*<sup>2</sup>, Dr.Sci. in Tech., Professor, Full Professor

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8101-1961>

E-mail: kondratyev\_a\_v@ukr.net; andrii.kondratiev@kname.edu.ua

*T. P. Nabokina*<sup>3</sup>, Ph.D. in Tech., Associate Professor, Associate Professor

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0019-5066>

E-mail: t.nabokina@khai.edu

<sup>1</sup>Ningbo University of Technology

201 Fenghua Rd, Jiangbei Qu, Ningbo Shi, Zhejiang Sheng, China

<sup>2</sup>O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

Kharkiv, Ukraine

<sup>3</sup>National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”

Kharkiv, Ukraine

### OPTIMIZATION OF PRESSURE AND TIME OF COMPOSITE PRODUCTS MOLDING AT THE TEMPERATURE OF MINIMUM BINDER VISCOSITY

The technological process of composite products' molding consists in giving them non-a reversible shape using shape-generating molding tools through polymerization of the binder at a certain temperature and pressure varying in time. The paper deals with the research of technological parameters of the most common practical method of molding products made of polymeric composite materials, pre-formed of prepregs. The mathematical model of filling with a binder of inter-fiber space of the reinforcing material for the polymeric composite material with the varying fiber packing densities, from quadratic to hexagonal one, depending on the type of reinforcing material, has been further developed.

A new method for optimization of the pressure and time of composite products' molding at the temperature of the minimum binder viscosity has been developed. The method is implemented by analytical dependencies, which establish the optimal time intervals and pressure of molding on the section of the temperature and time diagram, associated with the ability of the operating equipment (oven, autoclave) to provide the maximum possible rate of temperature rise in order to “soften” the binder in prepreg to its minimum viscosity. It is shown that energy consumption for the re-formation of the tetragonal structure of the polymeric composite material into hexagonal one is ten times higher than the costs for the tetragonal structure formation. For example, re-formation of the tetragonal structure at volume content of the binder of 0.4 into dense hexagonal structure requires 66.7 times increase in pressure. Obtained results allow establishing the economically feasible level of pressure and time of composite products' molding while ensuring their specified quality.

**Keywords:** prepreg, polymerization of the binder, inter-fiber space, quadratic and hexagonal structure.