

## ВИЗНАЧЕННЯ ТИСКУ ФОРМУВАННЯ ТА ВПЛИВ ЙОГО НА ЯКІСТЬ ПАНЕЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС ФОРМУВАННЯ

Вибір рівня тиску під час формування виробів із полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) взагалі й панельних конструкцій зокрема визначається з міркувань отримання заданих на етапі проектування структурних параметрів ПКМ, а саме: щільності, об'ємного вмісту компонентів, товщини текстурного шару тощо.

Для забезпечення геометрії конструкції та регламентованого об'ємного вмісту армуючого матеріалу необхідно відповідним чином zdeформувати пакет ПКМ. Необоротність деформації забезпечується видаленням надлишків зв'язуючого з пакета ПКМ у поглинаючі шари допоміжного оснащення або рівномірним розтіканням зв'язуючого та заповненням порожнин. Після видалення надлишків зв'язуючого та ущільнення матеріалу деформований стан пакета має відповідати виробу.

Вирішення цієї задачі полягає у визначенні моменту та тиску формування, що прикладається і знімається.

Одним з найбільш розповсюджених дефектів композиційного виробу є утворення газових і повітряних порожнин у структурі матеріалу, це обумовлено присутністю у складі зв'язуючого летких розчинників, а у разі механічного змішування компонентів відбувається ще й насичення повітрям, яке завдяки високій в'язкості зв'язуючого не може вільно видалитись. Отже, для зменшення кількості порожнин у виробі необхідно підібрати технологічні параметри (температура, час, тиск) таким чином, щоб максимальна кількість летких продуктів виділялась за найменшої в'язкості зв'язуючого [1]. До того ж на початковій стадії, коли в'язкість зв'язуючого мінімальна, тиск формування має містити тільки вакуумний тиск, який сприяє видаленню летких фракцій і вільного повітря із зв'язуючого (рис. 1). Час витримки пакета ПКМ під вакуумним тиском визначається кількістю летких фракцій у виробі та швидкістю їх виходу із матеріалу, що формується [1]:

$$\tau = \frac{M_{\text{л}}}{V_{\text{л}}}, \quad (1)$$

де  $M_{\text{л}}$  – маса виходу летких продуктів, кг;  $V_{\text{л}}$  – швидкість виходу летких продуктів, кг/хв.

З наведених даних видно, що пік максимального виходу летких речовин для даного зв'язуючого знаходиться в такому температурному діапазоні, при якому ступінь твердіння не перевищує десятивідсоткового

значення, а отже в'язкість практично не змінюється, а це, в свою чергу, не буде заважати виходу летких продуктів із зв'язуючого.

За більш низької температури швидкість реакції невелика, тому й летких продуктів буде виділятися значно менше, але за високих температур, незважаючи на прискорення реакції і виділення летких речовин, буде спостерігатися і зростання в'язкості матеріалу, внаслідок чого леткі речовини залишаться всередині матеріалу, утворивши неоднорідну структуру з порожнинами.

Забезпечення заданої геометрії та регламентованого

вмісту армуючого матеріалу в конструкції досягається шляхом видалення надлишків зв'язуючого та рівномірним заповненням порожнин у пакеті, для цього до заготовки ПКМ прикладають надлишковий тиск. Після видалення надлишків зв'язуючого та ущільнення матеріалу деформований стан пакета ПКМ має відповідати виробу. При цьому слід зазначити, що під час деформування виробу треба створити такі умови, за яких перетікання рідини буде відбуватися тільки по нормалі до поверхні зовнішнього/внутрішнього контуру до моменту вирівнювання тиску в поглинаючому шарі та пакеті ПКМ, що формується.

Початком прикладання тиску можна вважати той момент, коли в'язкість зв'язуючого буде близькою до мінімальною, а вихід летких фракцій – максимальний.

Як модель, що описує процес перетікання зв'язуючого в пакеті ПКМ, можна застосувати модель фільтрування рідини у середовищі з порожнинами, яка описується законом Дарсі в одновимірній постановці (рис. 2) [2]:

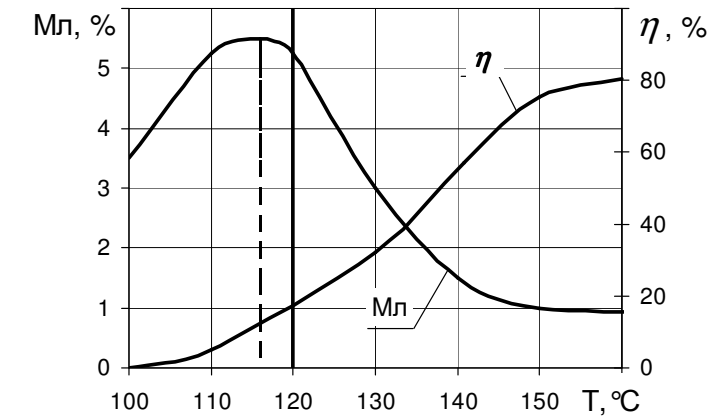


Рисунок 1 – Залежність виходу летких продуктів (Мл) та ступеню ствердіння (η) від температури нагріву для зв'язуючого ЛБС-4

$$q = -\frac{K}{\mu} \frac{dP}{dx}, \quad (2)$$

де  $K$  – проникність середовища;  $\mu$  – в'язкість, Па·с.

Проникність середовища є функцією від об'ємного вмісту, діаметра волокна, кута армування та типу плетіння матеріалу, вона визначається такою залежністю:

$$K = -\frac{d^2 (1 - \theta_a)^3}{k_0 \theta_a^2}, \quad (3)$$

де  $d$  – діаметр волокна, м;  $k_0$  – емпіричний коефіцієнт, що враховує структуру армуючого матеріалу,  $\theta_a$  – об'ємний вміст армуючого матеріалу.

Коефіцієнт  $k_0$  буде різним для кожного типу плетіння та кута Армування. Так для однонаправленого матеріалу в поздовжньому напрямку  $k_0$  дорівнюватиме 0,5–0,7, для того ж матеріалу але в поперечному напрямку  $k_0=11$ , для тканого матеріалу та мата  $k_0=5,5$ .

В'язкість зв'язуючого залежить від ступеня твердіння. На початковому етапі розігріву матеріалу, коли відбувається розм'якшення зв'язуючого, в'язкість падає, але після досягнення температури гелеутворення значення в'язкості починає зростати.

В інтегральній формі та після деяких перетворень рівняння (2) можна записати у наступному вигляді:

$$-\frac{d(h \cdot S)}{dt} = \frac{K_e K_c \cdot F}{\mu(\eta, t) \cdot (K_e h_c + K_c h_e)}, \quad (4)$$

де  $K_e$  – проникність поглинаючого шару;  $K_c$  – проникність пакета ПКМ;  $h_e$  – товщина поглинаючого шару;  $h_c$  – товщина пакета ПКМ;  $F$  – сила.

При постійній площі пакета, що формується, тиск визначається таким чином:

$$p_0 = -\frac{\mu(\eta, t) \cdot (K_e h_c + K_c h_e)}{K_e K_c} \frac{dh}{dt} - p_a, \quad (5)$$

де  $p_a$  – атмосферний тиск.

Використовуючи залежність (5), можна визначити час прикладання тиску до отримання структури з регламентованим об'ємним вмістом. До того ж дана залежність однозначно визначає потрібний рівень тиску залежно від в'язкості зв'язуючого та температури, структури як пакета, що формується, так і поглинаючого шару.

На етапі охолодження конструкції, коли процес утворення структури практично завершено, виникає потреба у фіксації отриманих характеристик, це можна реалізувати шляхом прикладання тиску та поступовим

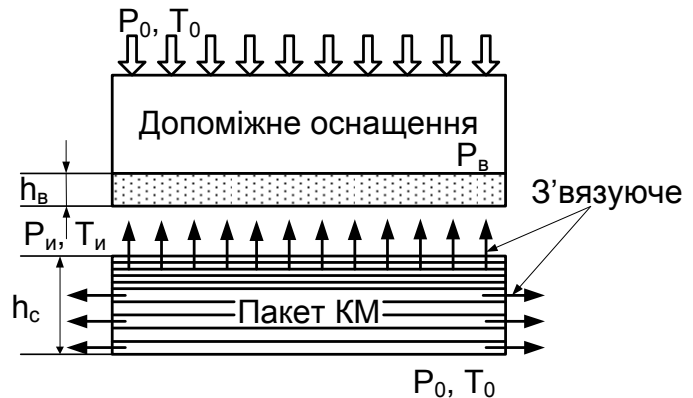


Рисунок 2 – Схема прикладання тиску

охладженням конструкції. Поступове охолодження конструкції, що відбувається під тиском, дозволяє реалізувати реономні властивості в конструкції, зменшити рівень напружено-деформованого стану (НДС) у конструкції шляхом релаксації напружень.

Значення потрібного тиску визначається за існуючою методикою та залежностями (рис. 3) [3].

Розрахункова залежність для визначення тиску в даному випадку набуде наступного вигляду:

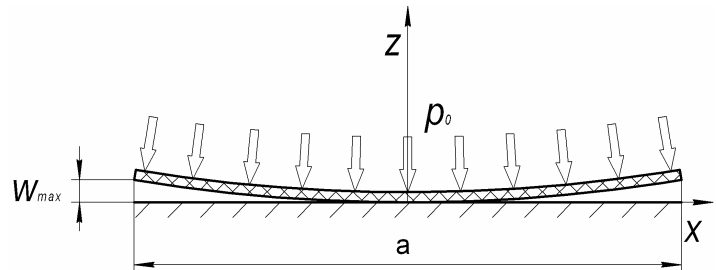


Рисунок 3 – Схема прикладання тиску на етапі охолодження

$$p_0 = -w_{max} \beta^3 D \cdot ch(\beta x) \cos(\beta x). \quad (6)$$

Тут  $w_{max}(\Delta T)$  – прогин пластини;  $D$  – жорсткість пластини в заданому напрямку;

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4(EJ)_{KM}}}, \quad (7)$$

де  $k$  – коефіцієнт жорсткості основи.

Реалізація змінного за площиною тиску дуже важко реалізувати з технологічного боку, тому значення тиску приймається постійним і це значення буде відповідати максимальному прогину пластини.

Слід зазначити той факт, що у разі визначення тиску за максимальним значенням прогину  $w(x,y)$  приймається постійним. Однак в цьому випадку в деяких зонах можна завищити значення тиску, а це, в свою чергу, може спричинити деформацію волокон армуючого матеріалу та призвести до зміни заданих на етапі проектування характеристик виробу.

За наведеною методикою було проведено експериментальні дослідження, а результати прогину порівняно з теоретичними. Як зразки було використано пластину зі склопластику розмірами 100x100 мм з симетричною укладкою шарів. Порівнюючи отримані експериментальні результати з теоретичними, можна зазначити, що похибка складає не більше 6%, а в деяких випадках – близько 2%.

За отриманими результатами можна зробити висновок, що рівень тиску процесу формування треба вибирати для кожного етапу окремо, враховуючи геометрію та властивості матеріалу конструкції. Крім того, наявність тиску на етапі охолодження конструкції є бажаним фактором, оскільки дозволяє реалізувати реономні властивості матеріалу, зменшити рівень НДС в конструкції шляхом релаксації напружень. Наведена залежність (6) дозволяє визначити потрібну товщину поглинаючого шару.

Таблиця 1

Вплив прогину та дефектів залежно від режиму формування

Режим	Тиск, атм.	Прогин, мм	Похибка, %	Примітки
Вільне охолодження				
1	–	2,5	5,4	Поверхня хвиляста. Спостерігається розшарування крайок
2	1	1,9	3,5	Поверхня гладка. На крайках незначне розшарування
3	3	1,5	3,1	Поверхня гладка, дефекти не спостерігаються
Поетапне охолодження				
4	–	3,2	5,9	Поверхня хвиляста. Спостерігаються розшарування крайок, часткове відшарування верхнього шару
5	1	1,4	4,2	Поверхня гладка, є незначне розшарування
6	3	0,7	1,9	Поверхня гладка дефекти не спостерігаються

## Список використаних джерел

1. Сидоренкова М.А. Разработка эффективных способов совершенствования основных технологических процессов производства элементов авиаконструкций из полимерных композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04. – Харків, 1995. – 155 с.
2. Gutowski T.G., Cai Z. The consolidation of composites, in the manufacturing science of composites, Proc. / Gutowski T.G. // Manufacturing International. – 1988. – Vol. 4. – P. 13 – 25.
3. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов / В. В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.

*Поступила до редакції 22.04.09.*

*Рецензент: канд. техн. наук, доцент О.В. Івановська,  
Національний аерокосмічний університет  
ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», м. Харків*