

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ТЕРМООБРОБКИ РОЗМІРОСТАБІЛЬНИХ
ВУГЛЕПЛАСТИКОВИХ ТРУБЧАТИХ ЕЛЕМЕНТІВ**Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Полімерні композиційні матеріали (ПКМ) армовані вуглецевими волокнами, відомі як вуглепластики, широко застосовуються в різних галузях сучасної техніки, у тому числі в конструкціях космічних та перспективних літальних апаратів. Зокрема, високомодульні вуглепластики поряд з унікальними характеристиками міцності і малою щільністю, мають високий опір втоми, меншу чутливість до концентрацій напружень, низьку швидкість поширення тріщин, що забезпечує підвищену довговічність конструкцій з цих матеріалів.

Як правило, матрицею для армованих вуглепластиків є термореактивні зв'язуючі на епоксидній основі. Ці зв'язуючі мають низьку хімічну усадку і гарантують отримання полімерних композитів з найбільш високими пружно-міцнісними властивостями, що дозволяє з вуглепластиків на їх основі виготовляти розміростабільні елементи. Тому в космічних апаратах із високомодульних вуглепластиків виготовляють трубчасті елементи (ТЕ) за технологією намотування.

Технологія намотування полягає в отриманні циліндричних виробів способом намотування ниток, волокон, стрічок, джгутів або інших рулонних матеріалів на формують циліндричну оправку з подальшою термообробкою в автоклаві або термокамері. Намотування виконують як «сухим» методом рулонним препрегом, так і «мокрим» методом, при якому намотувальний наповнювач безпосередньо перед укладанням на оправку просочують зв'язуючим.

У технології намотування істотно на одержувані фізико-механічні характеристики армованих пластиків надає технологічна схема (ТС) термообробки ТЕ, тобто. послідовність таких технологічних операцій як обтискання, витримка повітря, полімеризація, їх тривалість, черговість і поєднання. Найбільше значення в ТС термообробки має процес полімеризації або затвердіння. В результаті затвердіння фізико-механічні характеристики армованих пластиків змінюються у широких межах, що може призводити до нестабільності властивостей матеріалу у виробі. Крім того, в процесі затвердіння композитних виробів на основі термореактивних зв'язуючих, як правило, протікає екзотермічна реакція. При використанні неоптимального температурно-часового режиму затвердіння це викликає суттєвий перегрів внутрішніх шарів матеріалу, деструкцію зв'язуючого, накопичення внутрішніх напружень, що викликають зниження характеристик міцності матеріалу, короблення та зміну геометричних розмірів. Усунути зазначені недоліки і тим самим підвищити якісні показники та фізико-механічні характеристики виробів із ПКМ можна шляхом завдання оптимального температурно-часового режиму затвердіння у поєднанні з іншими технологічними прийомами. Особливо це завдання актуальне при виготовленні довгомірних трубчастих елементів.

Тому метою роботи є дослідження впливу режимів термообробки на геометричні характеристики та розміростабільність вуглепластикових довгомірних трубчастих елементів фермових конструкцій космічних апаратів.

Визначення режиму термообробки трубчастих елементів. Визначення технологічного режиму термообробки ТЕ із полімерних композитів є складним та відповідальним завданням. Воно пов'язане із суттєвими труднощами, викликаними відсутністю теорії, що описує процес термообробки, включаючи затвердіння композиту. До недавнього часу воно здійснювалося методом проб і помилок на основі виконання великої

кількості тривалих експериментів або методами термічного аналізу, що включають диференціальну скануючу калориметрію (ДСК), термомеханічний аналіз (ТМА), динамічний механічний аналіз (ДМА) і т.д.

Сучасні методи проектування оптимальних режимів термообробки та, зокрема, процесу затвердіння ПКМ базуються на використанні математичних моделей. Вони полягають у постановці та чисельному вирішенні екстремальної задачі мінімізації деякого критерію оптимальності, що забезпечує створення якісного готового виробу за мінімальний час з мінімальними залишковими напруженнями. За допомогою цих методів можна визначати режими затвердіння виробів з полімерних композитів будь-яких геометричних форм і розмірів, включаючи трубчасті довгомірні елементи фермових конструкцій.

Тому в цьому дослідженні визначення режиму термообробки ТЕ проводили у два етапи, спочатку методами математичного моделювання та оптимізації, а потім емпіричним перебором різних технологічних схем. На першому етапі проводили дослідження властивостей матеріалу, які є параметрами математичної моделі, та розраховували оптимальні режими затвердіння. На другому етапі, розраховані оптимальні режими затвердіння доповнювали різними технологічними прийомами, які неможливо математично змоделювати і проводили дослідження впливу отриманого комбінованого режиму термообробки на геометричні характеристики та розміростабільність вуглепластикових ТЕ.

Основні завдання, які необхідно вирішити при розрахунку оптимального режиму затвердіння трубчастих елементів з ПКМ, що гарантують високу якість та низьку собівартість виробів, є наступні:

- знизити температурно-конверсійні неоднорідності матеріалу ТЕ;
- повністю затвердіти зв'язуюче в готовому трубчастому елементі;
- знизити тривалість режиму термообробки та енерговитрати;
- ущільнити композит до заданих розмірів та геометрії ТЕ.

Особливістю процесу намотування ТЕ є висока пористість виробів, що одержуються за цією технологією, викликана захопленням повітря намотувальним матеріалом у процесі намотування. Для зменшення пористості намотаного виробу намотування армуючого наповнювача здійснюють під певним зусиллям. В результаті силового намотування кожен виток, що намотується з натягом, створює певний «контактний» тиск на нижчележачі шари неотвердженого ПКМ. При цьому відбуваються міжшарова фільтрація зв'язуючого до зовнішніх шарів та переміщення у зворотному напрямку армуючого наповнювача. Це, в основному, відбувається на етапі намотування та видалення летких речовин при нагріванні та розм'якшенні зв'язуючого, витримці та обтисненні. На етапі гарячого затвердіння в автоклаві перерозподіл зв'язуючого всередині ТЕ практично не відбувається, і тому немає необхідності враховувати в математичній моделі масоперенесення та локальну зміну коефіцієнта наповнення композиту.

Математична модель процесу термообробки та затвердіння ТЕ в термокамері, при нагріванні потоком повітря, що гріє, являє собою систему диференціальних рівнянь:

- теплопровідності

$$C_i \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q_{ni} \frac{\partial \beta_i}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$T \equiv T(r, \tau), \quad 0 \leq R_{i-1} < r < R_i, \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad i = 1, 2,$$

$$C_1 \equiv C_1(T), \quad \lambda_1 \equiv \lambda_1(T), \quad Q_{n1} = 0,$$

$$C_2 \equiv C_2(T, \beta), \quad \lambda_2 \equiv \lambda_2(T, \beta), \quad Q_{n2} \neq 0,$$

$$T(r, 0) \equiv f(r), \quad 0 \leq R_0 \leq r \leq R_2, \quad (2)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_0} = \alpha [T_b(\tau) - T(R_0, \tau)], \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad (3)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \alpha [T_B(\tau) - T(R_2, \tau)], \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad (4)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_i-0} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_i+0}, \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

$$T(r, \tau) \Big|_{r=R_i-0} = T(r, \tau) \Big|_{r=R_i+0}, \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad i = 1, 2, \quad (6)$$

- кінетики затвердіння

$$\frac{\partial \beta}{\partial \tau} = \begin{cases} \varphi(\beta) \exp\left[-\frac{E(\beta)}{R \cdot T}\right], & \beta < 1 \\ 0, & \beta = 1 \end{cases}, \quad (7)$$

$$\beta \equiv \beta(r, \tau), \quad 0 \leq R_1 < r < R_2, \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad (8)$$

$$\beta(r, 0) = \beta_0(r), \quad 0 \leq R_1 < r < R_2, \quad (8)$$

$$h = R_2 - R_1. \quad (9)$$

де C – об'ємна теплоємність, Дж/(м³·К); E – енергія активації затвердіння, Дж/моль; f – початковий розподіл температури, К; h – товщина стінки ТЕ, м; Q_n – повний тепловий ефект, Дж/м³; i – номер шару; R – універсальна постійна газова; R_i, r – еквівалентний радіус, м; T – температура, К; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); β – ступінь затвердіння; φ – кінетична функція, 1/с; λ – теплопровідність, Вт/(м·К); τ – час, с; шари: 1 – формують опрацювання, 2 – ТЕ з ПКМ.

При термообробці в автоклаві ТЕ, що затверджується (шар 2) із зовнішнього боку нагрівається потоком повітря, що обігрівается, при температурі $T_B(\tau)$. Тепло до внутрішньої поверхні ТЕ підводиться через формують опрацювання (шар 1) потоком повітря, що обігрівается. У результаті на зовнішньої поверхні ТЕ і внутрішньої поверхні опрацювання має місце вимушений конвективний теплообмін за законом Ньютона, тобто здійснюється гранична умова третього роду. Температура повітря, що гріє $U(\tau) = T_B(\tau)$ є керуючим впливом, за допомогою якого матеріал ТЕ, що затверджується, піддається температурному навантаженню за певним строго заданим режимом.

Запропонована математична модель, доповнена конкретними характеристиками композиту, була використана для розрахунку режиму затвердіння ТЕ.

Необхідні для вирішення рівнянь математичної моделі характеристики композиту визначаються з дослідів з використанням спеціальних методів та установок, що відтворюють умови, близькі до технологічного процесу намотування. Було розроблено низку методів, алгоритмів та інформаційно-вимірювальну систему (ІВС) дослідження процесу затвердіння полімерних композитів. ІВС дозволяє досліджувати в процесі затвердіння наступні характеристики ПКМ: теплофізичні характеристики (об'ємну теплоємність $C(T, \beta)$ та теплопровідність $\lambda(T, \beta)$ залежно від температури T та ступеня затвердіння (β), потужність тепловиділення $W(\tau)$, повний тепловий ефект затвердіння Q_n , кінетичні характеристики (енергію активації процесу затвердіння $E(\beta)$, кінетичну функцію $\varphi(\beta)$, що включає швидкість і порядок хімічної реакції). Інші параметри матеріалу та виробу, такі як товщина одного шару зв'язуючого, щільність, маса, кількість шарів вуглецевого волокна у виробі задаються з проектною документації або визначаються за стандартними методиками. Досліджені за допомогою ІВС характеристики ПКМ є інформаційною основою для комп'ютерного моделювання різних ситуацій у процесі затвердіння та розрахунку оптимальних режимів затвердіння вуглепластикових ТЕ.

Математична постановка задачі оптимізації процесу затвердіння ТЕ полягає в пошуку температурно-часового режиму повітря, що гріє $U(\tau) = T_B(\tau)$, що є керуючим впливом, який

доставляє мінімум деякому критерію оптимальності $I_{\tau_k} = \min_{U(\tau; \tau_k)} \int_0^{\tau_k} d\tau$ і забезпечує створення

якісного готового виробу з мінімальною тривалістю процесу τ_k при виконанні зв'язків в вигляді математичної моделі (1)-(9), що відповідає розглянутій технології намотування та термообробки, а також обмеженням у вигляді нерівностей, що накладаються на процес з урахуванням допустимих обладнанням температурно-часових режимів.

Шуканий ступінчастий температурно-часовий режим перебуває у вигляді

$$U_j(\tau) = \begin{cases} \tilde{T}_{j-1} + \tilde{K}_j \tau, & \tau_{j-1} < \tau < \tau_{n_j} \\ \tilde{T}_j, & \tau_{n_j} \leq \tau \leq \tau_j \end{cases}, \quad j = 1, 2, \dots, k_{\text{ст}},$$

де \tilde{K}_j – швидкість нагрівання поверхні ТЕ, К/с; $k_{\text{ст}}$ – кількість шаблів нагріву; \tilde{T}_j – температура ізотермічної витримки на j -го ступеня нагріву, К.

Численні значення обмежень, що виражають зв'язок з механічними характеристиками композиту, визначені експериментально.

Для дослідженого типу вуглепластику на основі епоксидного зв'язуючого ЕДТ-10, армованого вуглецевим джгутом УКН-5000 було виконано чисельний розрахунок температурно-конверсійних полів при затвердінні та розрахунок оптимальних режимів затвердіння ТЕ з урахуванням різних технологічних схем. В результаті отримали можливість, використовуючи розраховані оптимальні режими, досліджувати різні технологічні схеми виготовлення ТЕ.

Висновки:

1. Проведено аналіз сучасного стану створення розміростабільних трубчастих елементів і технологічних проблем, що виникають при їх виробництві.
2. Показано, що поряд з емпіричними методами дослідження впливу різних технологічних схем на розміростабільність трубчастих елементів корисним є використовувати для термообробки оптимальний температурно-часовий режим та на його основі вибирати оптимальну технологічну схему.
3. Запропоновано математичну модель процесу термообробки трубчастих елементів методом намотування, показано шляхи оптимізації режиму затвердіння вуглепластикових ТЕ.
4. Виконано чисельний розрахунок температурно-конверсійних полів при затвердінні та розрахунок оптимальних режимів затвердіння трубчастих елементів з урахуванням різних технологічних схем.