

Моделювання та оптимізація режиму термообробки трубчастих елементів ферменних конструкцій літальних апаратів з вуглепластику

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

У статті проведено аналіз сучасного стану створення розміростабільних трубчастих елементів (ТЕ) і технологічних проблем, що виникають при їх виробництві. Показано, що поряд з емпіричними методами дослідження впливу різних технологічних схем на розміростабільність трубчастих елементів корисним є використовувати для термообробки оптимальний температурно-часовий режим і на його основі вибирати оптимальну технологічну схему. Проведено моделювання та визначення оптимального режиму термообробки трубчастих елементів. Дослідження 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 змодельовати і проводили дослідження впливу отриманого комбінованого режиму термообробки на геометричні характеристики та розміростабільність вуглепластикових ТЕ. Математична модель процесу термообробки та затвердіння ТЕ в термокамері, при нагріванні потоком повітря, що гріє, являє собою систему диференціальних рівнянь: теплопровідності та кінетики затвердіння. Запропоновано математичну модель процесу термообробки трубчастих елементів, виготовлених методом намотування, показані шляхи оптимізації режиму затвердіння вуглепластикових ТЕ. Виконано чисельний розрахунок температурно-конверсійних полів при затвердінні та розрахунок оптимальних режимів затвердіння трубчастих елементів з урахуванням різних технологічних схем. Розраховані значення теплоємності C та теплопровідності λ залежно від температури T , ступеня затвердіння β і коефіцієнта наповнення γ , потужність тепловиділень W та тепловий ефект реакції затвердіння Q вуглепластику. Отримано оптимальні режими затвердіння пластини з полімерного композиційного матеріалу, розраховані за даними, отриманими в результаті досліджень зразків матеріалу. Одержані температурно-часові режими затвердіння, які оптимізовані для різних товщин матеріалу, що вивчається. Методом дисперсійного аналізу доведено статистична гіпотеза про суттєвість впливу технологічної схеми та схеми армування на товщину стінки трубчастого елемента і його міцність при стисненні. Проведено дослідження впливу технологічних схем та режимів термообробки на геометричні та механічні характеристики вуглепластикових трубчастих елементів ферменних конструкцій літальних апаратів. Перевірена статистична гіпотеза про суттєвість впливу технологічної схеми та схеми армування на відхилення товщини стінки трубчастих елементів та їх характеристики міцності. Статистично доведено суттєвість впливу технологічних схем, що відрізняються режимами термообробки, на середню величину товщини стінки трубчастого елемента з вуглепластику.

Ключові слова: намотування, полімерний композиційний матеріал, термообробка, технологічна схема, трубчасті елементи, вуглепластик, фермові конструкції.

Вступ

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 [1, 2]. 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 [3]. 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 формоутворюючу 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 [4].

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 даної роботи є моделювання та визначення оптимального режиму термообробки вуглепластикових довгомірних трубчастих елементів конструкцій літальних апаратів за критерієм розміростабільності.

Моделювання та визначення оптимального 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. [4, 5].

Сучасні методи проектування оптимальних режимів термообробки та, зокрема, процесу затвердіння ПКМ базуються на використанні математичних моделей [6, 7]. 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 [8, 9]. 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 [10].

Основні завдання, які необхідно вирішити при розрахунку оптимального режиму затвердіння трубчастих елементів з ПКМ, що гарантують високу якість та низьку собівартість виробів, є наступні [4, 8]:

- 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 [4]. 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

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

$$\begin{aligned}
T &\equiv T(r, \tau), 0 \leq R_{i-1} < r < R_i, 0 < \tau \leq \tau_k, i = 1, 2, \\
C_1 &\equiv C_1(T), \lambda_1 \equiv \lambda_1(T), Q_{n1} = 0, \\
C_2 &\equiv C_2(T, \beta), \lambda_2 \equiv \lambda_2(T, \beta), Q_{n2} \neq 0, \\
T(r, 0) &\equiv f(r), 0 \leq R_0 \leq r \leq R_2,
\end{aligned} \tag{2}$$

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

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

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

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

- кінетики затвердіння

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

$$\begin{aligned}
\beta &\equiv \beta(r, \tau), 0 \leq R_1 < r < R_2, 0 < \tau \leq t_k \\
\beta(r, 0) &= \beta_0(r), 0 \leq R_1 < r < R_2 \\
h &= R_2 - R_1.
\end{aligned} \tag{8}$$

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 – формоутворююча оправка, 2 – ТЕ з ПКМ.

При термообробці в автоклаві ТЕ, що затверджується (шар 2) із зовнішнього боку нагрівається потоком повітря, що обігрівається, при температурі $T_B(\tau)$. Тепло до внутрішньої поверхні ТЕ підводиться через формоутворювальну оправку (шар 1) потоком повітря, що обігрівається. У результаті на зовнішній поверхні ТЕ і внутрішній поверхні оправки 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-вимірвальну систему (ІВС) дослідження процесу затвердіння полімерних композитів [9]. 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 тепловиділень $W(\tau)$, повний тепловий ефект затвердіння Q_n), кінетичні характеристики (енергію активації процесу затвердіння $E(\beta)$, кінетичну функцію $\phi(\beta)$, 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 [8, 9].

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

$$I_{\tau_k} = \min_{U(\tau; \tau_k)} \int_0^{\tau_k} d\tau \text{ і забезпечує створення якісного готового виробу з мінімальною}$$

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

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

де \tilde{K}_j – швидкість нагрівання поверхні ТЕ, К/с; k_{cm} – кількість щаблів 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 [10].

Представлені розрахункові значення теплоємності C та теплопровідності λ залежно від температури T , ступеня затвердіння β і коефіцієнта наповнення γ (рис. 1).

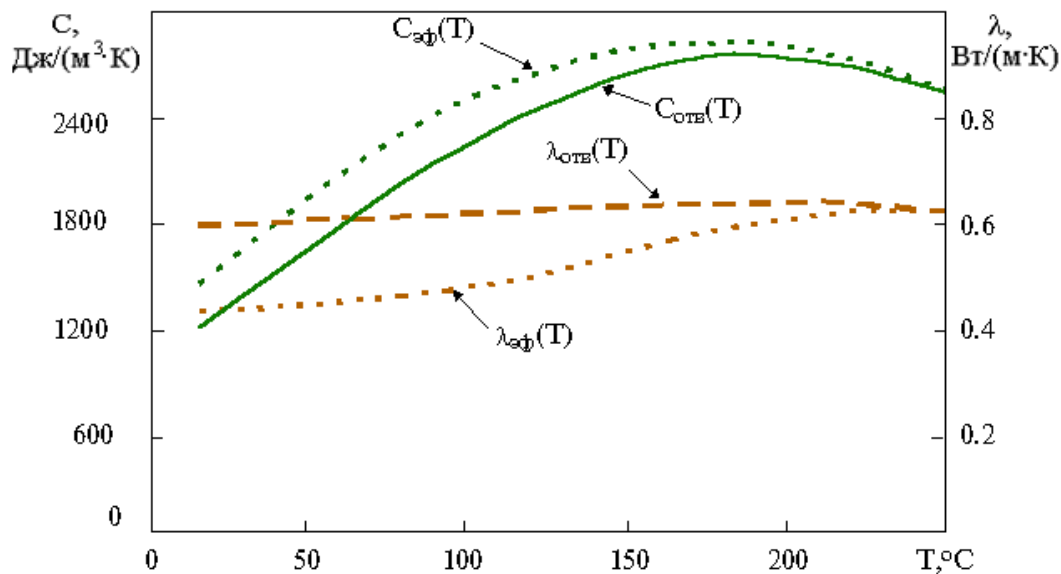


Рис. 1. Теплофізичні властивості вуглепластику (еф-ефективні, при затвердінні, отверденого матеріалу)

Розраховані потужність тепловиділень W та тепловий ефект реакції затвердіння Q вуглепластику (рис. 2).

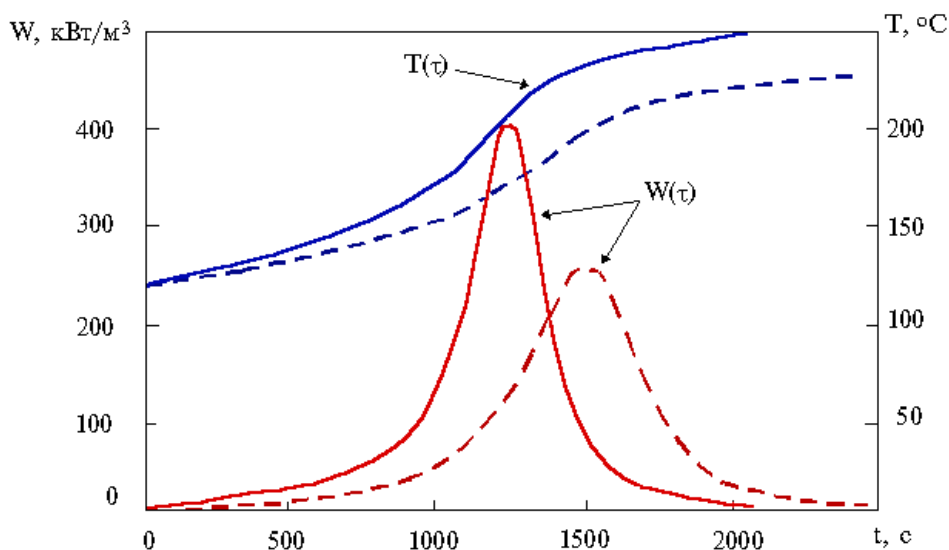


Рис. 2. Потужність тепловиділень при затвердінні вуглепластику.

Отримано оптимальні режими затвердіння пластини з полімерного композиційного матеріалу, розраховані за даними, отриманими в результаті досліджень зразків матеріалу. Одержані температурно-часові режими затвердіння, які оптимізовані для різних товщин матеріалу, що вивчається (рис. 3).

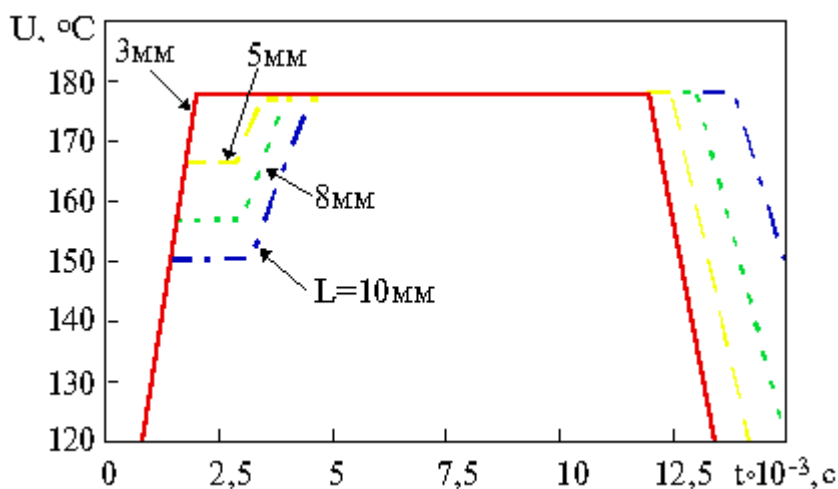


Рис. 3. Режими затвердіння вуглепластику

Дослідження впливу технологічних схем термообробки трубчастих елементів на їх геометричні та механічні характеристики

Важливими геометричними характеристиками ТЕ є товщина стінки, від якої істотно залежить розміростабільність виробів в умовах експлуатації, за наявності постійно діючих силових навантажень і термоциклів «нагрів-охолодження» [3]. Крім того, механічні пружно-міцнісні характеристики, такі як міцність при розтягуванні, модуль пружності при розтягуванні, руйнівна напруга при стисканні також залежать від товщини стінки і впливають на розміростабільність ТЕ.

З досвіду виробництва вуглепластикових ТЕ відомо, що зазначені характеристики знаходяться в залежності від технологічної схеми їх виготовлення, включаючи режим термообробки, і схеми армування. З метою перевірки впливу різних технологічних схем виготовлення вуглепластикових трубчастих елементів на їх геометричні та механічні характеристики були розроблені та реалізовані чотири технологічні схеми, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Технологічні схеми виготовлення трубчастих елементів

№ ТС	Технологічна схема	Число зразків ТЕ, n_i
1	Н + ПБО/2 год. + ПСО/6 год.	11
2	Н + В/(9-17) год. + ПБО/2 год. + О + ПСО/6 год.	11
3	Н + В/(2-45) год. + О + ПСО/8 год.	8
4	Н + О + ПСО/8 год.	10

Н – операція намотування;

ПБО - операція полімеризації без обтиснення;

ПСО - операція полімеризації з обтисканням;

О - операція обтиснення;

В – витримка повітря.

Вплив схем армування на геометричні та механічні характеристики ТЕ оцінювали, варіюючи співвідношення числа поздовжніх шарів s_1 і кільцевих шарів

s_2 в намотаному ТЕ, тобто текстурний коефіцієнт $m = \frac{s_1}{s_1 + s_2}$.

Досліджували ТЕ квадратного перерізу 50×50 мм з номінальною товщиною стінки 1,5 мм, виготовлені з вуглепластику УКН-5000/ЕДТ-10 «мокрим» способом методом автоматизованої намотування на верстаті з числовим програмним управлінням. Намотані за відповідною схемою армування ТЕ піддавали технологічним операціям у відповідність з розробленими технологічними схемами. По кожній ТС були виготовлені серії ТЕ (рис. 4).

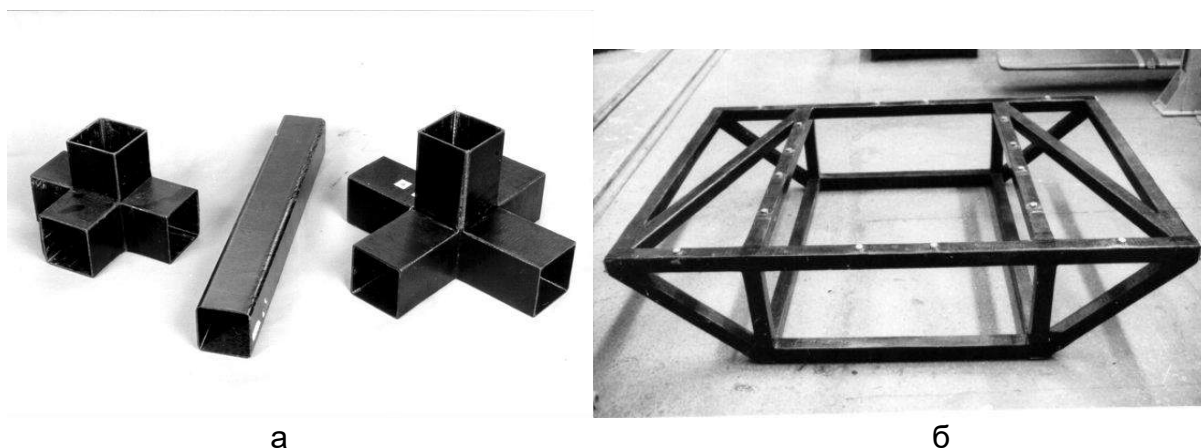


Рис.4. Елементи конструкції ферми з вуглепластику: трубчастий елемент прямокутного перерізу та багатопроменеві фітинги (а), безфітингова ферма (б), виготовлені методом намотування

Після термообробки ТЕ, виготовлених за кожною ТС, у кожного ТЕ вимірювали товщину стінки h , виконуючи по три виміри з кожного боку, і розраховували середню величину $h_{ср}$. Товщину стінки ТЕ вимірювали ультразвуковим товщиноміром УДТ-40 з похибкою вимірювання не більше 0,005 мм. Розподіл товщини стінки h в залежності від схеми армування та результати міцнісних випробувань представлено в таблиці 2 та на рисунку 5.

Таблиця 2

Вплив схем армування на геометричні та міцнісні властивості ТЕ

№ п/п	Схема армування	Текстурний коефіцієнт, m	Суха вага ТЕ $G_{сух}$, г/м	Товщина стінки h , мм	Руйнівне навантаження на стиск, P_p , Н	Питома міцність P/G , кгм/г
1	6/0° + 2/90°	0,75	291,2	1,40	34730	11,93
2	5/0° + 2/90°	0,71	256,0	1,31	30180	11,79
3	5/0° + 3/90°	0,63	296,0	1,50	47620	16,09
4	7/0° + 2/90°	0,78	326,4	1,61	44200	13,54
5	5/0° + 4/90°	0,56	336,0	1,52	65800	19,58

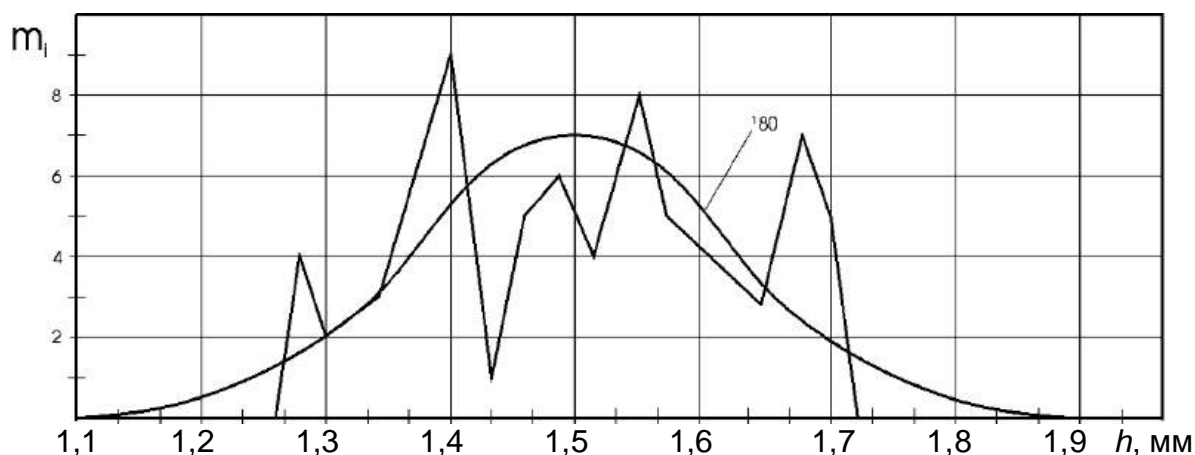


Рис. 5. Гістограма, полігон та крива розподілу товщини стінки ТЕ з вуглепластику УКН-5000/ЕДТ-10: $h_{\text{ср}} = 1,50$ мм; схема армування: $5/0^\circ + 3/90^\circ$

Як видно з таблиці 2, при $m < 0,71$ зазначені параметри для ТЕ з вуглепластику залежать від зміни кількості кільцевих шарів s_2 при незмінній кількості поздовжніх шарів s_1 , а при $m > 0,71$ - від зміни кількості поздовжніх шарів при незмінній кількості кільцевих шарів.

Методом дисперсійного аналізу за результатами вимірювань товщин ТЕ доведена статистична гіпотеза про суттєвість впливу технологічних схем та схем армування на середню товщину стінки трубчастого елемента з вуглепластику та його міцність при стисканні.

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.
5. Методом дисперсійного аналізу перевірено та доведено статистичну гіпотезу про суттєвість впливу технологічних схем, що відрізняються режимами термообробки, та схем армування на середню товщину стінки трубчастого елемента з вуглепластику.

Список літератури

1. Каблов, Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. – С. 7–17.
2. Гуняев, Г. М. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов / Г. М. Гуняев, В. В. Кривонос, А. Ф. Румянцев,

- Г. Ф. Железина // Конверсия в машиностроении. – 2004. № 4. – С. 65–69.
3. Гаврюсев, В. И. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций: Обзор – Л.: ЦНИИ «Румб», 1990. – 112 с.
4. Кербер, М. Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / М.Л. Кербер, В.М. Виноградова, Г.С. Головкин и др.; Под ред. А. А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
5. Алексашин, В. М., Антюфеева, Н. В. Применение методов термического анализа для исследования клеевых композиций // Клеи, герметики, технологии. – 2005, № 12, – С. 28–31.
6. Дмитриев, О. С. Математическое моделирование процесса отверждения изделия из полимерных композиционных материалов методом горячего прессования / О. С. Дмитриев, С. В. Мищенко, С. В. Пономарев // Вестник ТГТУ. – 1998, Т.4, № 4. – С. 390–399.
7. Дмитриев, О.С. Тепломассоперенос и кинетика отверждения полимерного композиционного материала при автоклавном вакуумном формовании изделий / О. С. Дмитриев, В. Н. Кириллов, С. В. Мищенко, А. О. Дмитриев // Инженерная физика. – 2010, №9. – С. 3–12.
8. Дмитриев, О. С. Определение оптимальных режимов отверждения толстостенных изделий из полимерных композитов / О. С. Дмитриев, В. Н. Кириллов, А. О. Дмитриев, А. В. Зуев // Тепловые процессы в технике. – 2013. № 10. – С. 467–475.
9. Дмитриев, О. С. Интегрированная информационно - измерительная система исследования свойств и расчета режимов отверждения полимерных композитов / О. С. Дмитриев, С. В. Мищенко, А. О. Дмитриев, И. С. Касатонов, С. О. Дмитриев // Вестник ТГТУ. – 2008, Т. 14, № 2. – С. 230–240.
10. Малков, И. В. Оптимизация технологии формообразования намоткой размеростабильных трубчатых элементов / И. В. Малков, Ю. М. Тарасов, В. Н. Рыбаков, В. И. Воскобойников // Теория и практика технологии производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ): тр. 5-й Междунар. конф., 24-27 апр. 2007 г., МГУ – М., – С. 403–408.

Reference

1. Kablov, Ye. N. Strategicheskiye napravleniya razvitiya materialov i tekhnologiy ikh pererabotki na period do 2030 goda // Aviatsionnyye materialy i tekhnologii. 2012. № 5. – P. 7–17.
2. Gunyayev, G. M. Polimernyye kompozitsionnyye materialy v konstruktsiyakh letatel'nykh apparatov / G. M. Gunyayev, V. V. Krivonos, A. F. Rummyantsev, G. F. Zhelezina // Konversiya v mashinostroyenii. – 2004. № 4. – P. 65–69.
3. Gavryusev, V. I. Razmernaya stabil'nost' materialov i elementov konstruktsiy: Obzor – L.: TSNII «Rumb», 1990. – 112 p.
4. Kerber, M. L. Polimernyye kompozitsionnyye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya / M. L. Kerber, V. M. Vinogradova, G. S. Golovkin i dr.; Pod red. A. A. Berlin. – SPb.: Professiya, 2008. – 560 p.
5. Aleksashin, V. M., Antyufeyeva, N. V. Primeneniye metodov termicheskogo analiza dlya issledovaniya kleyevykh kompozitsiy // Klei, germetiki, tekhnologii. – 2005, № 12, – P. 28–31
6. Dmitriyev, O. S. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa otverzhdeniya izdeliya iz polimernykh kompozitsionnykh materialov metodom goryachego

pressovaniya / O. S. Dmitriyev, S. V. Mishchenko, S. V. Ponomarev // Vestnik TGTU. – 1998, T.4, № 4. – P. 390–399.

7. Dmitriyev, O. S. Teplomassoperenos i kinetika otverzhdeniya polimernogo kompozitsionnogo materiala pri avtoklavnom vakuumnom formovanii izdeliy / O. S. Dmitriyev, V. N. Kirillov, S. V. Mishchenko, A. O. Dmitriyev // Inzhenernaya fizika. – 2010, №9. – P. 3–12.

8. Dmitriyev, O. S. Opredeleniye optimal'nykh rezhimov otverzhdeniya tolstostennykh izdeliy iz polimernykh kompozitov / O. S. Dmitriyev, V. N. Kirillov, A. O. Dmitriyev, A.V. Zuyev // Teplovyye protsessy v tekhnike. – 2013. № 10. – P. 467–475.

9. Dmitriyev, O. S. Integrirovannaya informatsionno-izmeritel'naya sistema issledovaniya svoystv i rascheta rezhimov otverzhdeniya polimernykh kompozitov / O. S. Dmitriyev, S. V. Mishchenko, A. O. Dmitriyev, I. S. Kasatonov, C. O. Dmitriyev // Vestnik TGTU. – 2008, T. 14, № 2. – P. 230–240.

10. Malkov, I. V. Optimizatsiya tekhnologii formoobrazovaniya namotkoy razmerostabil'nykh trubchatykh elementov / I. V. Malkov, YU. M. Tarasov, V. N. Rybakov, V. I. Voskoboynikov // Teoriya i praktika tekhnologii proizvodstva izdeliy iz kompozitsionnykh materialov i novykh metallicheskiy splavov (TPKMM): tr. 5-y Mezhdunar. konf., 24-27 apr. 2007 g., MGU – M., – P. 403–408.

Надійшла до редакції 27.08.2024, розглянута на редколегії 27.08.2024.

Modeling and optimization of heat treatment mode for tubular elements of truss structures of aircraft made of carbon fiber

The article analyzes the current state of development of dimensionally stable tubular elements (TE) and technological problems arising during their production. It is shown that along with empirical methods of studying the influence of various technological schemes on the dimensional stability of tubular elements, it is useful to use the optimal temperature-time mode for heat treatment and, based on it, select the optimal technological scheme. Modeling and determination of the optimal mode of heat treatment of tubular elements were performed. The study of the TE heat treatment mode was carried out in two stages, first by methods of mathematical modeling and optimization, and then by empirical enumeration of various technological schemes. At the first stage, the material properties, which are parameters of the mathematical model, were studied, and the optimal curing modes were calculated. At the second stage, the calculated optimal curing modes were supplemented with various technological methods that cannot be mathematically modeled, and a study was carried out on the influence of the resulting combined heat treatment mode on the geometric characteristics and dimensional stability of carbon fiber TE. The mathematical model of the process of heat treatment and curing of TE in a heat chamber, when heated by a heating air flow, is a system of differential equations: thermal conductivity and curing kinetics. A mathematical model of the process of heat treatment of tubular elements manufactured by the winding method is proposed, the ways of optimizing the curing mode of carbon fiber TE are shown. A numerical calculation of temperature-conversion fields during curing and calculation of optimal curing modes of tubular elements are performed taking into account various process schemes. The values of heat capacity C and thermal conductivity λ are calculated depending on the temperature T , the degree of curing β and the filling coefficient γ ,

Безфітингова ферма з вуглепластику Безфітингова ферма з вуглепластику the power of heat release W and the thermal effect of the curing reaction Q of carbon fiber. Optimum curing modes for a plate made of composite polymer material are obtained, calculated from the data obtained as a result of studying material samples. Temperature-time curing modes are obtained, which are optimized for different thicknesses of the studied material. The statistical hypothesis about the significance of the influence of the process flow chart and reinforcement pattern on the wall thickness of a tubular element and its compressive strength was proved by the dispersion analysis method. The influence of process flow charts and heat treatment modes on the geometric and mechanical characteristics of carbon fiber tubular elements of aircraft truss structures was studied. The statistical hypothesis about the significance of the influence of the process flow chart and reinforcement pattern on the deviation of the wall thickness of tubular elements and their strength characteristics was tested. The significance of the influence of process flow charts with different heat treatment modes on the average wall thickness of a carbon fiber tubular element was statistically proven.

Keywords: winding, polymer composite material, heat treatment, technological scheme, tubular elements, carbon fiber, truss structures.

Відомості про авторів:

Малков Ігор Владиславович – доктор технічних наук, професор, професор каф. 103 «Проектування літаків та вертольотів» Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна, e-mail: i.malkov@khai.edu

About the Authors:

Malkov Igor – Doctor of Technical Sciences, Professor, Dep. N^o. 103 “Aircraft and Helicopter Design”, National Aerospace University “KhAI”, Ukraine, e-mail: i.malkov@khai.edu