

УДК 629.7.02

В. Е. ГАЙДАЧУК¹, А. В. КОНДРАТЬЕВ¹, М. Е. ХАРЧЕНКО²¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Украина*

АНАЛИЗ СТЕПЕНИ И ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОРАЗМЕРОСТАБИЛЬНОСТИ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА ПОСЛЕ ЕЕ КАРБОНИЗАЦИИ

Проведен сравнительный анализ степени и характера изменения термоформостабильности структуры ($0^{\circ}_m, \pm 45^{\circ}_m, 90^{\circ}_p$), углерод-углеродного композиционного материала, полученного карбонизацией идентичного прототипа из полимерного углепластика. Анализ проводился для оптимизированных структур по двум предложенным критериям минимальных приведенных коэффициентов линейного термического расширения при постоянной суммарной толщине пакета структуры для задачи двухосной размеростабильности с различными коэффициентами приоритетности направления минимального изменения формы структуры.

Ключевые слова: углерод-углеродный композиционный материал, термоформостабильность, оптимизация структуры, критерии минимальных коэффициентов линейного термического расширения.

Введение

В нашей работе [1] проведена оптимизация термоформостабильности структуры из полимерных композиционных материалов (ПКМ) ($0^{\circ}_m, \pm 45^{\circ}_m, 90^{\circ}_p$), с углеродными волокнами для конструкций космического назначения, длительно эксплуатирующихся на околоземных орбитах, предназначенных для прецизионного координирования приборов систем телекоммуникации относительно наземных приемо-передающих устройств.

Однако полимерное связующее в конструкциях этого класса не всегда обеспечивает все возрастающие требования к температурному диапазону их эксплуатации. В связи с этим представляет значительный практический интерес анализ возможностей использования в таких конструкциях углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) [2]. В последних сообщениях известной корпорации Ultrasor [3, 4] приведена информация о том, что она разработала и производит углерод-углеродные сотовые конструкции, уже использованные на спутнике GOCE. В [5] сообщается об использовании сотовых панелей из УУКМ низкой плотности также для огневой защиты самолетов и вертолетов.

В [6] также отмечается, что управление тепловыми потоками на спутниках становится все более важным для конструкций летательных аппаратов, так как новые спутники становятся все более мощными, генерируя до 20 кВт и имеют полезную нагрузку в виде электроники массой до 1000 кг. В качестве инновационного решения этих задач Ultrasor

Inc. предлагает трехслойную панель из УУКМ.

Постановка задачи

Предполагается, что рассматриваемая в работе [1] структура из ПКМ при объемном содержании волокон $\theta=0,65$ была подвергнута карбонизации, превратившей ее в УУКМ. При этом физико-механические характеристики (ФМХ) углеволокон не изменились, оставаясь равными: $E_B=163,9$ ГПа; $G_B=65,6$ ГПа; $\mu_B=0,25$; $\alpha_B=-3,06 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$.

Здесь $E_B, G_B, \mu_B, \alpha_B$ - модули упругости и сдвига, коэффициент Пуассона, коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) волокон.

Пределы прочности волокон при растяжении $\sigma_{\text{ВВ}}^+=1475$ МПа, сжатии $\sigma_{\text{ВВ}}^-=1147$ МПа и сдвиге $\tau_{\text{ВВ}}=123$ МПа.

Связующее превратилось в кокс с характеристиками: $E_{\text{КОКС}}=2$ ГПа; $G_{\text{КОКС}}=0,77$ ГПа; $\mu_{\text{КОКС}}=0,3$; $\alpha_{\text{КОКС}}=5 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$; $\sigma_{\text{В КОКС}}^+=15$ МПа; $\sigma_{\text{В КОКС}}^-=80$ МПа.

Результаты исследований

В качестве критериев для оптимизации двухосной размеростабильности нами предложены две целевые функции:

$$\alpha_{\text{прив1}} = |\alpha_x| \left(K_{\text{пр}} + \left| \frac{\alpha_y}{\alpha_x} \right| (1 - K_{\text{пр}}) \right) \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$\alpha_{\text{прив}2} = |\alpha_x| \sqrt{K_{\text{пр}}^2 + \left(\frac{\alpha_y}{\alpha_x}\right)^2 (1 - K_{\text{пр}})^2} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где α_x, α_y – КЛТР вдоль осей X и Y оптимизируемой структуры ПКМ; $K_{\text{пр}}$ – коэффициент приоритетности направлений минимальной размеростабильности, определяемый условиями эксплуатации конструкции $0 \leq K_{\text{пр}} \leq 1$.

Очевидно, что функция (1) соответствует требованию минимального среднего изменения формы конструкции в ее плоскости, определяемого значениями α_x и α_y , а функция (2) – требованию минимального среднеквадратичного (диагонального) искажения ее формы.

Оптимизация проводилась для постоянной суммарной толщины пакета $\Delta = 9$ мм при изменении относительной толщины групп монослоев n/Δ , m/Δ и r/Δ с использованием критериев приведенных КЛТР $\alpha_{\text{прив}1}$ (1) и $\alpha_{\text{прив}2}$ (2) для задачи двухосной размеростабильности с различным коэффициентом приоритетности направления минимального изменения формы $K_{\text{пр}} = (0; 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1)$ для ФМХ и КЛТР однонаправленного ПКМ, а также углеволокон и связующего, приведенных в [1].

ФМХ УУКМ в направлениях главных осей 1 и 2, посчитанные по формулам, полученным в [2], при пористости $\Pi = 0,35$ ($\chi = 0,65$) равны:

$$E_1^{\text{УУКМ}} = E_B \theta_B + E_{\text{КОКС}} (\chi - \theta_B) = 98,4 \text{ ГПа};$$

$$E_2^{\text{УУКМ}} \approx \frac{E_B}{\theta_B + \frac{E_B}{E_{\text{КОКС}}} (\chi - \theta_B)} = 34,9 \text{ ГПа};$$

$$G_{12}^{\text{УУКМ}} \approx \frac{0,5 E_B E_{\text{КОКС}}}{E_B (\chi - \theta_B) (\chi + \mu_{\text{КОКС}}) + E_{\text{КОКС}} (\chi + \mu_B) \theta_B} = 18,5 \text{ ГПа};$$

$$\alpha_1^{\text{УУКМ}} = \frac{E_B \alpha_B \theta_B + E_{\text{КОКС}} \alpha_{\text{КОКС}} (\chi - \theta_B)}{E_B \theta_B + E_{\text{КОКС}} (\chi - \theta_B)} = 3,05 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C};$$

$$\alpha_2^{\text{УУКМ}} = \alpha_{\text{КОКС}} (\chi - \theta_B) - \mu_B \theta_B (\alpha_1^{\text{УУКМ}} - \alpha_B) + \alpha_B \theta_B - \mu_{\text{КОКС}} (\chi - \theta_B) (\alpha_1^{\text{УУКМ}} - \alpha_B) = -1,59 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}.$$

Обращают внимание отрицательные КЛТР в двух направлениях, что не имеет места для структур ПКМ.

Результаты оптимизации структуры УУКМ по рассматриваемым критериям $\alpha_{\text{прив}1}$ и $\alpha_{\text{прив}2}$ при различных $K_{\text{пр}}$ приведены в табл. 1. Закономерности изменения $\alpha_{\text{прив}1}$ и $\alpha_{\text{прив}2}$ от $K_{\text{пр}}$ показаны на рисунке. На этих графиках приведены и соответствующие значения α_x и α_y .

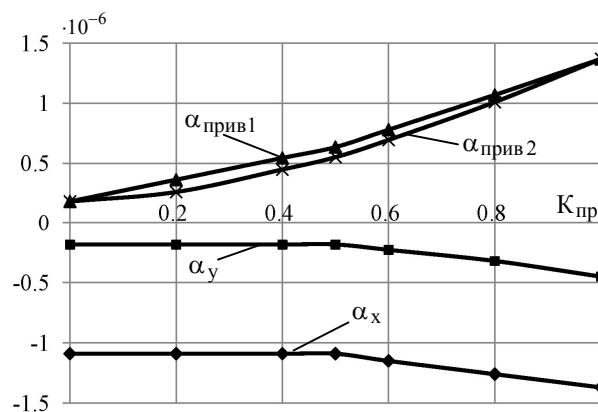


Рис. Изменение оптимальных КЛТР УУКМ в зависимости от величины коэффициента приоритетности направлений минимальной размеростабильности

Выводы

Анализ результатов оптимизации уровней терморазмеростабильности исследованной структуры УУКМ выявил следующее.

1. Наблюдается некоторое ухудшение терморазмеростабильности структуры УУКМ по сравнению с ПКМ. Однако неоспоримым преимуществом УУКМ является не только в 5 – 10 раз превосходящий ПКМ температурный диапазон эксплуатации, но и потенциальное снижение массы изделия, находящееся в пределах (при равном объеме) $\rho_{\text{ПКМ}} / \rho_{\text{УУКМ}} = 1,24 \dots 1,33$, где $\rho_{\text{УУКМ}} = 1050 \text{ кг/м}^3$ соответствует однократной карбонизации при атмосферном давлении.

2. Рациональные толщины групп слоев и их относительные толщины, соответствующие минимальным КЛТР $\alpha_{\text{прив}1}$ и $\alpha_{\text{прив}2}$ при всех коэффициентах приоритетности направления $K_{\text{пр}}$, имеет те же значения, что и исходный ПКМ, подвергшийся карбонизации.

Таблица 1

Результаты оптимизации структуры УУКМ по критериям приведенных КЛТР

Ориентация группы слоев ϕ_i в структуре пакета	Исходная толщина группы слоев δ_i , мм и их относительная толщина	Рациональная толщина группы слоев δ_i , мм и их относительная толщина	
		по критерию $\alpha_{прив1}$	по критерию $\alpha_{прив2}$
$K_{пр} = 0$			
0	1,5 (0,167)	0,9 (0,1)	0,9 (0,1)
± 45	6 (0,666)	1,8 (0,2)	1,8 (0,2)
90	1,5 (0,167)	6,3 (0,7)	6,3 (0,7)
α_x	$-1,76 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$-1,09 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$-1,09 \cdot 10^{-6}$ 1/град
α_y	$-0,862 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$-0,183 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$-0,183 \cdot 10^{-6}$ 1/град
$\alpha_{прив}$	$0,862 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$0,183 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$0,183 \cdot 10^{-6}$ 1/град
$K_{пр} = 0,5$			
0	1,5 (0,167)	0,9 (0,1)	0,9 (0,1)
± 45	6 (0,666)	1,8 (0,2)	1,8 (0,2)
90	1,5 (0,167)	6,3 (0,7)	6,3 (0,7)
α_x	$-1,76 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$-1,09 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$-1,09 \cdot 10^{-6}$ 1/град
α_y	$-0,862 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$-0,183 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$-0,183 \cdot 10^{-6}$ 1/град
$\alpha_{прив}$	$1,31 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$0,636 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$0,552 \cdot 10^{-6}$ 1/град
$K_{пр} = 1,0$			
0	1,5 (0,167)	0,9 (0,1)	0,9 (0,1)
± 45	6 (0,666)	4 (0,444)	4 (0,444)
90	1,5 (0,167)	4,1 (0,444)	4,1 (0,444)
α_x	$-1,76 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$-1,37 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$-1,37 \cdot 10^{-6}$ 1/град
α_y	$-0,862 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$-0,45 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$-0,45 \cdot 10^{-6}$ 1/град
$\alpha_{прив}$	$1,76 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$1,37 \cdot 10^{-6}$ 1/град	$1,37 \cdot 10^{-6}$ 1/град

3. Уровни минимальных КЛТР $\alpha_{прив1}$, определяющих степень термоформостабильности, у структуры ПКМ и УУКМ сохраняется одинаковым от $K_{пр} = 0$ до $K_{пр} \leq 0,4$, а затем возрастает до отношения $\alpha_{прив1}^{УУКМ} / \alpha_{прив1}^{ПКМ} = 1,3$ при $K_{пр} = 1$. Аналогичная закономерность имеет место и для уровней минимальных КЛТР $\alpha_{прив2}$, но в данном случае возрастание КЛТР УУКМ относительно КЛТР ПКМ имеет место во всем диапазоне $K_{пр}$, достигая при $K_{пр} = 1$ значения $\alpha_{прив2}^{УУКМ} / \alpha_{прив2}^{ПКМ} = 1,3$, равного их отношениям для критерия $\alpha_{прив1}$.

Литература

1. Кондратьев, А. В. Проектирование формо-размеростабильных структур из полимерных композиционных материалов для конструкций космического назначения [Текст] / А. В. Кондратьев, В. В. Кириченко, М. Е. Харченко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. трудов Нац. аэрокосм. ун-

та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 1(77). – Х., 2014. – С. 7 – 14.

2. Гайдачук, В. Е. Анализ создания терморазмеростабильных конструкций космического назначения из углерод-углеродных композиционных материалов / В. Е. Гайдачук, М. Е. Харченко, А. Ф. Санин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2013. – Вып. 62. – С. 71 – 79.

3. Panin, F. Development of carbon-carbon sandwich panels [Text] / F. Panin, M. Lutz-Nivet, H. Lemaire // Proceedings of the 9th International Symposium on Materials in a Space Environment, 16-20 June 2003, Noordwijk, The Netherlands. – P. 81 – 86.

4. Carbon-carbon Sandwich Panel [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.Ultracorinc.com/Products/Carbon-carbon-honeycomb.

5. Christian H. Le. Carbon-carbon Honeycomb Panels for Aircraft and Helicopter Firewalls [Text] / H. Le. Christian // Livermore Ultracor, C.A. – 4 p.

6. Carbon-carbon Honeycomb Sandwich (rev. 091301) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ultracorinc.com/wp-content/uploads/2010/03/Paper6.pdf>. – 3 p.

Поступила в редакцию 13.01.2014, рассмотрена на редколлегии 20.05.2014

Рецензент: д-р техн. наук, глав. науч. сотр. В.И. Сливинский, ПАО «Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения», Днепропетровск.

АНАЛІЗ СТУПЕНЯ І ХАРАКТЕРУ ЗМІНИ ТЕРМОРОЗМІРОСТАБІЛЬНОСТІ СТРУКТУРИ ПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИТА ПІСЛЯ ЇЇ КАРБОНІЗАЦІЇ

В. Є. Гайдачук, А. В. Кондратьєв, М. Є. Харченко

Проведено порівняльний аналіз ступеня і характеру зміни термоформостабільності структури $(0^{\circ}_n, \pm 45^{\circ}_m, 90^{\circ}_p)_s$ вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу, що отриман карбонізацією ідентичного прототипу з полімерного вуглепластика. Аналіз проводився для оптимізованих структур за двома запропонованими критеріями мінімальних зведених коефіцієнтів лінійного термічного розширення при постійній сумарній товщині пакету структури для задачі двовісної розміростабільності з різними коефіцієнтами пріоритетності напряму мінімальної зміни форми структури.

Ключові слова: вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, терморозміростабільність, оптимізація структури, критерії мінімальних приведених коефіцієнтів лінійного термічного розширення.

ANALYSIS OF THE DEGREE AND CHARACTER OF CHANGING THE THERMAL DIMENSIONAL STABILITY OF POLYMERIC COMPOSITE STRUCTURE AFTER ITS CARBONIZATION

V. E. Gajdachuk, A. V. Kondratyev, M. E. Kharchenko

The paper includes comparative analysis of the degree and character of changing the thermal form stability of the structure $(0^{\circ}_n, \pm 45^{\circ}_m, 90^{\circ}_p)_s$ of carbon-carbon composite material obtained by carbonization of the identical prototype of polymeric carbon fiber reinforced plastic. Analysis was carried out for optimized structures on two proposed criteria of minimal reduced linear thermal expansion coefficients at the constant total thickness of the structure pack for the task of two-axial dimensional stability with various coefficients of priority of the direction of minimal changing of the structure form.

Kew words: carbon-carbon composite material, thermal dimensional stability, structural optimization, criteria of minimal reduced linear thermal expansion coefficients.

Гайдачук Віталій Євгенєвич – д-р техн. наук, проф., зав. каф. проектування ракетно-космічних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «Харьковский авиационный институт», Харьков, Україна, e-mail: k403@d4.khai.edu.

Кондратьєв Андрей Валерєвич – канд. техн. наук, доцент каф. проектування ракетно-космічних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «Харьковский авиационный институт», Харьков, Україна, e-mail: kondratyev_a_v@mail.ru.

Харченко Максим Євгенєвич – аспірант каф. технології виробництва летательних апаратів, Днепропетровский национальный университет ім. О. Гончара, Днепропетровск, Україна