

УДК 629.7.023:620

А.Ф. Санин, д-р техн. наук,  
В.Е. Гайдачук, д-р техн. наук,  
А.В. Кондратьев, канд. техн. наук,  
М.Е. Харченко

## **ПРЕДНАПРЯЖЕННОСТЬ, ТЕРМОНЕРАВНОВЕСНОСТЬ И ФОРМОСТАБИЛЬНОСТЬ ОБШИВОК ПАНЕЛЕЙ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИТА СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ТЕРМОНАГРУЖЕНИИ**

Анализ путей обеспечения прецизионной точности функционирования высокочувствительных приемопередающих устройств для приборов спутников, длительно эксплуатирующихся на околоземных орбитах, показывает, что эффективным средством для достижения этой цели является применение трехслойных углепластиковых обшивок с углесотопластом (УСП) [1 – 5].

Полимерные композиционные материалы на основе углеродных волокон (КМУ) имеют самые высокие удельные физико-механические характеристики (ФМХ), прочностные свойства и минимальные коэффициенты линейного термического расширения (КЛТР), обеспечивающие высокий уровень размероформостабильности при температурных воздействиях [5 – 6].

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). Со времени первых сообщений об УУКМ, которые появились в 70-х годах прошлого столетия [7 – 9] этот материал стал непревзойденным в конструкциях космических аппаратов для их эрозионной защиты, противостоянию высокоскоростным тепловым воздействиям (теплоудар) и обеспечивающим практически полную реализацию физико-механических и прочностных свойств углеродных волокон [3 – 4, 10].

Для этой цели разработан широкий спектр многонаправленных структур УУКМ, изначально формируемых как этот класс композитов. В ТОО же время представляет интерес формирование конструкций космического назначения из КМУ слоистой структуры, после изготовления подвергающихся карбонизации по существующим технологиям получения УУКМ [11 – 12].

В последних сообщениях известной корпорации Ultracor [3 – 7] приводятся сведения о том, что она разработала и производит углерод-углеродные сотовые панели, уже используемые на спутнике GOCE и в других изделиях (рис. 1).



Рисунок 1 – Опытная углерод-углеродная сотовая панель корпорации Ultracor [15]

Ниже приведен анализ преднапряженности, термонеровновесности и формостабильности обшивок из УУКМ, полученных однократной карбонизацией этих конструктивных элементов из ПКМ, описанных в [6].

В качестве базового варианта рассматривается обшивка размерами 500×500 мм, состоящая из двух монослоев  $\delta=0,12$  мм, подверженная охлаждению на температуру  $\Delta T=100^\circ\text{C}$ . Коэффициентом напряженности является численное значение критерия прочности Мизеса-Хилла:

$$\psi = \left( \frac{\sigma_x}{\sigma_{e1}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_{e2}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{xy}}{\tau_{e12}} \right)^2 - \frac{\sigma_x \sigma_y}{\sigma_{e1}^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  и  $\sigma_{e1}$ ,  $\sigma_{e2}$ ,  $\tau_{e12}$  – соответственно напряжения, действующие в осях ортотропии УУКМ и пределы прочности однонаправленного монослоя вдоль и поперек армирования в его плоскости.

В качестве показателя (уровня) формостабильности принято максимальное линейное перемещение в поперечном направлении  $W$ .

В качестве характеристик материала монослоя приняты характеристик УУКМ, полученные из исходных характеристик КМУ [6]:  $E_1=100$  ГПа;  $E_2=10$  ГПа;  $G_{12}=6$  ГПа;  $\mu_{12}=0,35$ ;  $\alpha_2=30 \cdot 10^{-6} 1/\text{град}$ ;  $\alpha_1=0$ ;  $\sigma_{e1}^{\oplus}=900$  МПа;  $\sigma_{e1}^{-}=700$  МПа;  $\sigma_{e2}^{\oplus}=500$  МПа;  $\sigma_{e2}^{-}=120$  МПа;  $\tau_{e12}=75$  МПа при исходных характеристиках связующего  $E_c=4,2$  ГПа;  $\rho_c=1300$  кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha_c=60 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ;  $\sigma_{ec}^{\oplus}=100$  МПа;  $\sigma_{ec}^{-}=160$  МПа.

При этом характеристики углеродных волокон приняты неизменными:  $E_{\epsilon} = 163,9$  ГПа;  $G_{\epsilon} = 65,5$  ГПа;  $\mu_{\epsilon} = 0,25$ ;  $\alpha_{\epsilon} = -1,025 \cdot 10^{-6}$  1/град;  $\sigma_{\epsilon\epsilon}^{\oplus} = 1475$  МПа;  $\sigma_{\epsilon\epsilon}^{-} = 1147$  МПа;  $\tau_{\epsilon\epsilon} = 123$  МПа.

Замена КМУ на УУКМ проводилась для полученных характеристик волокон при характеристиках кокса:  $E_{\text{КОКС}} = 2$  ГПа;  $G_{\text{КОКС}} = 0,77$  ГПа;  $\mu_{\text{КОКС}} = 0,3$ ;  $\alpha_{\text{КОКС}} = 5 \cdot 10^{-6}$  1/°C;  $\sigma_{\epsilon\text{КОКС}}^{+} = 15$  МПа;  $\sigma_{\epsilon\text{КОКС}}^{-} = 80$  МПа;  $\tau_{\epsilon\text{КОКС}} = 7,5$  МПа;  $\Pi = 0,35$ ;  $\chi = 0,65$ ; ( $\chi = 1 - \Pi$ ).

На основе этих данных по формулам нашей работы [6] для модулей упругости  $E_{1\text{УУКМ}}$ ,  $E_{2\text{УУКМ}}$ , сдвига  $G_{12\text{УУКМ}}$  и КЛТР  $\alpha_{1\text{УУКМ}}$ ,  $\alpha_{2\text{УУКМ}}$

$$E_{1\text{УУКМ}} = E_{\epsilon}\theta_{\epsilon} + E_{\text{КОКС}}(\chi - \theta_{\epsilon}); \quad (2)$$

$$E_{2\text{УУКМ}} \approx \frac{E_{\epsilon}}{\theta_{\epsilon} + \frac{E_{\epsilon}}{E_{\text{КОКС}}}(\chi - \theta_{\epsilon})}; \quad (3)$$

$$G_{12\text{УУКМ}} \approx \frac{E_{\epsilon}E_{\text{КОКС}}}{2[E_{\epsilon}(\chi - \theta_{\epsilon})(\chi + \mu_{\text{КОКС}}) + E_{\text{КОКС}}(\chi + \mu_{\text{КОКС}})\theta_{\epsilon}]}; \quad (4)$$

$$\alpha_{1\text{УУКМ}} = \frac{E_{\epsilon}\alpha_{\epsilon}\theta_{\epsilon} + E_{\text{КОКС}}\alpha_{\text{КОКС}}(\chi - \theta_{\epsilon})}{E_{\epsilon}\theta_{\epsilon} + E_{\text{КОКС}}(\chi - \theta_{\epsilon})}; \quad (5)$$

$$\alpha_{2\text{УУКМ}} = \alpha_{\epsilon}\theta_{\epsilon} - \mu_{\epsilon}\theta_{\epsilon}(\alpha_{1\text{УУКМ}} - \alpha_{\epsilon}) - \mu_{\text{КОКС}}(\chi - \theta_{\epsilon})(\alpha_{1\text{УУКМ}} - \alpha_{\epsilon}) + \alpha_{\text{КОКС}}(\chi - \theta_{\epsilon}) \quad (6)$$

были определены соответствующие характеристики.

Пределы прочности УУКМ в главных осях приближенно можно определить по формулам [18]

$$\sigma_{\epsilon 1\text{УУКМ}}^{+(-)} = \frac{\sigma_{\epsilon\epsilon}^{+(-)}}{E_{\epsilon}} [E_{\epsilon}\theta_{\epsilon} + E_{\text{КОКС}}^{+(-)}(\chi - \theta_{\epsilon})]; \quad (7)$$

$$\sigma_{\epsilon 2\text{УУКМ}}^{+(-)} = \sigma_{\epsilon\text{КОКС}}^{+(-)} \left( \frac{\pi}{2\theta_{\epsilon}} - 2 \right) \left( \frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 - 16\theta_{\epsilon}^2}} \arctg \sqrt{\frac{\pi + 4\theta_{\epsilon}}{\pi - 4\theta_{\epsilon}} - \frac{\pi}{4}} \right); \quad (8)$$

$$\tau_{\epsilon 12\text{УУКМ}} = \frac{\tau_{\epsilon\epsilon}}{G_{\epsilon}} [G_{\epsilon}\theta_{\epsilon} + G_{\text{КОКС}}(\chi - \theta_{\epsilon})]. \quad (9)$$

Здесь  $\sigma_{\epsilon\epsilon}^{+(-)}$ ,  $\sigma_{\text{КОКС}}^{+(-)}$  - пределы прочности углеволокон и кокса при растяжении (сжатии);  $\tau_{\epsilon\epsilon}$  - предел прочности углеволокна при сдвиге.

Деформативные свойства ортогонального и перекрестно армированных УУКМ определяются по формулам механики слоистых ПКМ [18] с учетом того, что ФМХ однонаправленных УУКМ в главных осях выражаются зависимостями (2) – (6).

Таким образом в первом приближении определен весь комплекс ФМХ УУКМ, позволяющий найти напряженно-деформированное состояние данных структур при эксплуатационных нагрузках на конструкцию из этих материалов.

Получены следующие характеристики УУКМ:  $E_1 = 98,4$  ГПа;  $E_2 = 34,9$  ГПа;  $G_{12} = 18,49$  ГПа;  $\mu_{12} = 0,35$ ;  $\alpha_1 = -1,02 \cdot 10^{-6} / \text{град}$ ;  $\alpha_2 = -0,368 \cdot 10^{-6} / \text{град}$ ;  $\sigma_{\epsilon_1}^{\oplus} = 886$  МПа;  $\sigma_{\epsilon_1}^{-} = 689$  МПа;  $\sigma_{\epsilon_2}^{\oplus} = 15,7$  МПа;  $\sigma_{\epsilon_2}^{-} = 84$  МПа;  $\tau_{\epsilon_{12}} = 73,9$  МПа.

Моделирование производилось с использованием конечноэлементного пакета многослойными четырехузловыми элементами.

1. В качестве базовой структуры обшивки рассматривается укладка монослоев под углами  $\phi = 0^\circ, 90^\circ$ . Толщина клеевого слоя не учитывалась.

Максимальные коэффициенты напряженности  $\psi$  и уровни формостабильности  $W$  в двухслойной обшивке при различных углах укладки монослоев при заневоленном в оснастке и освобожденном из нее состояниях (здесь и далее – закрепление на все степени свободы в центральном узле) приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Максимальные коэффициенты напряженности и уровни формостабильности двухслойной обшивки при различных углах укладки монослоев в заневоленном и свободном состоянии

Углы укладки		$0, 90^\circ$	$\pm 15^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 45^\circ$
Заневоленное состояние	$\psi_{max}$	0,00034	0	0,00022	0,00029
	$W_{max}$ , мм	0	0	0	0
Свободное состояние	$\psi_{max}$	0,00014	0	0,00013	0,00015
	$W_{max}$ , мм	11,77	12,32	20,6	23,45

2. Влияние толщины монослоев на технологическое НДС обшивки

В качестве базовой структуры обшивки рассматривалась укладка монослоев под углами  $\phi = 0^\circ, 90^\circ$ .

В табл. 2 приведены максимальные коэффициенты напряженности и уровни формостабильности при различных толщинах монослоев двухслойной обшивки в заневоленном и освобожденном состояниях.

Таблица 2 – Максимальные коэффициенты напряженности и уровни формостабильности двухслойной обшивки при различной толщине монослоев в заневоленном и свободном состоянии

Толщина монослоев, мм		0,06	0,12	0,2
Заневоленное состояние	$\psi_{max}$	0,00034	0,00034	0,00034
	$W_{max}$ , мм	0	0	0
Свободное состояние	$\psi_{max}$	0,00015	0,00014	0,00014
	$W_{max}$ , мм	22,85	11,77	7,09

### 3. Влияние размеров обшивки на ее технологическое НДС.

3.1 В качестве базовой структуры обшивки рассматривается толщина монослоев  $\delta=0,12$  мм, укладка монослоев под углами  $\phi=0^\circ, 90^\circ$ .

Для панели размерами 500x500 мм получено:

- в заневоленной обшивке максимальный коэффициент напряженности  $\psi=0,00034$  ( $W=0$ );
- в освобожденной из оснастки обшивке  $\psi=0,00014$ ;  $W=11,77$  мм.

Для панели размерами 1000x1000 мм имело место:

- в заневоленной обшивке максимальный коэффициент напряженности  $\psi=0,00034$  ( $W=0$ );
- в освобожденной из оснастки обшивке  $\psi=0,00014$ ;  $W=47,31$  мм.

3.2. Для обшивки размерами 500x500 мм состоящей из шести монослоев  $\delta=0,12$  мм и подверженной охлаждению на температуру  $\Delta T=100^\circ\text{C}$  при укладке монослоев под углами  $\phi=\pm 45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, \mp 45^\circ$  получено:

- в заневоленной обшивке максимальный коэффициент напряженности  $\psi=0,0003$  ( $W=0$ );
- в освобожденной из оснастки обшивки  $\psi=0,0003$ ;  $W=0,55$  мм;
- для свободно опертой по кромкам обшивки (монтаж на каркас)  $\psi=0,033$ ;  $W=0,015$  мм.

### Выводы

Сравнение полученных результатов с ранее приведенными для обшивок из КМУ [6] позволяет сделать следующие выводы.

1. Максимальные коэффициенты напряженности для всех аналогов двухслойных обшивок КМУ при обращении композита в УУКМ более, чем на два порядка ниже, что свидетельствует о практически не напряженной обшивке.

Так для структур с углами укладки волокон соответственно  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$  и  $\pm 45^\circ$  отношение  $\Psi_{\max \text{УУКМ}} / \Psi_{\max \text{КМУ}} = 0,0065; 0; 0,0055; 0,006$ .

2. Для двухслойной обшивки с разной толщиной монослоев 0,06 мм; 0,12 мм и 0,2 мм отношение  $\Psi_{\max \text{УУКМ}} / \Psi_{\max \text{КМУ}}$  сохраняет постоянную величину, равную 0,0065.

3. Размеры обшивки, как и в случае с КМУ, не влияют на ее преднапряженность, при этом сохраняется отношение  $\Psi_{\max \text{УУКМ}} / \Psi_{\max \text{КМУ}} = 0,0065$  в заневоленном виде и 0,0042 в освобожденном из оснастки виде, во всяком случае, для схемы укладки слоев ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ) и толщины монослоя  $\delta = 0,12$  мм для размеров 500×500 мм и 1000×1000 мм.

4. Для обшивки размерами 500×500 мм, состоящей из шести монослоев с углами укладки ( $\pm 45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, \mp 45^\circ$ ) толщиной монослоя  $\delta = 0,12$  мм в заневоленном виде  $\Psi_{\max \text{УУКМ}} / \Psi_{\max \text{КМУ}} = 0,0016$ , в освобожденном из оснастки виде – 0,0061.

Однако для свободно опертой по кромкам обшивке (монтаж на каркас) отношение  $\Psi_{\max \text{УУКМ}} / \Psi_{\max \text{КМУ}}$  существенно возрастает и становится равным 0,313.

Проведенный анализ преднапряженности обшивок из УУКМ свидетельствует о их существенно более высокой несущей способности или увеличенном ресурсе при регламентированном режиме эксплуатации на орбите, чем их аналоги из КМУ.

5. Формостабильность обшивок из УУКМ  $W_{\text{УУКМ}}$  в свободном состоянии более, чем на порядок выше, чем у аналогов из КМУ. Так отношение  $W_{\text{УУКМ}} / W_{\text{КМУ}}$  для обшивок с углами укладки  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ;  $\pm 15^\circ$ ;  $\pm 30^\circ$  и  $\pm 45^\circ$  соответственно равно: 0,03; 0,032; 0,053 и 0,03.

Такой же порядок имеет это отношение и для других вариантов обшивок из УУКМ, рассмотренных выше при анализе их преднапряженности.

Таким образом проведенный выше предварительный анализ возможностей создания эффективных терморазмеростабильных конструкций космического назначения из УУКМ позволяет считать актуальными проведение углубленных исследований этого направления в совершенствовании систем телекоммуникаций и дистанционного зондирования Земли орбитальными КА и других направлений.

## Список использованных источников

1. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов [Текст] / Г.А. Молодцов, В.Е. Биткин, В.Ф. Симонов, Ф.Ф. Урманов. – М.: Машиностроение, 2000. – 352 с.
2. Халиманович, В.И. Сотовые конструкции для космических аппаратов связи и навигации: опыт проектирования и изготовления [Текст] / В.И. Халиманович, Ф.К. Синьковский, Н.Н. Ишенина // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов III междунар. науч-практич. конф., Днепропетровск 27 – 29 мая 2009 г. Укр. НИИ технологии машиностроения. – Днепропетровск, 2009. С. 161 – 171.
3. Carbon honeycomb plastic as light-weight and durable structural material [Текст] / V.I. Slyvynskiy, A.I. Alyamovskyi, A.V. Kondratjev, V.A. Kovalenko // 63-th International Astronautical Congress 2012 – Naples, Italy – IAC-12.C2.4.6. – P. 1 – 11.
4. Pilot industrial technology for creating carbon honeycomb plastics and sandwich structures based on them for products of rocket and space engineering [Текст] / V.I. Slyvynskiy, M.E. Kharchenko, V.E. Gajdachuk, A.V. Kondratjev, V.A. Kovalenko // SEICO 13 SAMPE EUROPEAN 34th International conference and forum 2013. – P. 304 – 309.
5. Харченко, М.Е. Обзор и анализ состояния разработки формостабильных композитных конструкций космического назначения [Текст] / М.Е. Харченко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Вип. 4(87). – Дніпропетровськ, 2013. – С. 180 – 186.
6. Харченко, М.Е. Исследование напряженности, термонеравновесности и формостабильности углепластиковых обшивок и трехслойных панелей с углесотопластовым наполнителем космического назначения [Текст] М.Е. Харченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. - № 6(103). – С. 28 – 35.
7. McAllister, L.E. Development and Evaluation of Mod 3 Carbon/Carbon Composites [Текст] / L.E. McAllister, A.R. Taverna // Proc. 17<sup>th</sup> Nat. SAMPE Symp., 1972. – P. III-A Three I III A Three 7.
8. Mullen, C.K. Fabrication and Properties Description of AVCO 3 D Carbon/Carbon Cylinder Materials [Текст] / C.K. Mullen, P.J. Roy // Proc. 17<sup>th</sup> Nat. SAMPE Symp., 1972. – P. III-A Two I III A Two 8.
9. Rowe, S.R. The Effect of Weave Spacing on the Properties of 3D Orthogonal Carbon/Carbon Composites [Текст] / S.R. Rowe // Proc. 19<sup>th</sup> Nat. SAMPE Symp., 1974. – vol. 19, P. 359 – 373.
10. Гайдачук, В.Е. Анализ создания терморазмеростабильных конструкций космического назначения из углерод-углеродных композиционных материалов [Текст] / В.Е. Гайдачук, М.Е. Харченко, А.Ф. Санин / Открытые информационные
11. Композиционные материалы [Текст]: справ. / В.В. Васильев,

В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

12. Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учебник для вузов [Текст] / И.М. Буланов, В.В. Воробей. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.

13. Твердопаливні ракетні двигуни. Матеріали і технології [Текст] : підруч. / Ф.П. Санін, Л.Д. Кучма, Є.О. Джур, А.Ф. Санін. – Д.:ДНУ, 1999. – 320 с.

14. New Developments in Honeycomb Core Materials Presented by Christian Le AF/NASA ING, WWW. Ultracorinc.com Rev. 022802.Cle. – 5 p.

15. Carbon-carbon Sandwich Panel / Ultracor Inc / [http:// Ultracorinc.com/Products/Carbon-carbon-honeycomb](http://Ultracorinc.com/Products/Carbon-carbon-honeycomb).

16. Christian M. Le. Carbon-carbon Honeycomb Panels for Aircraft and Helicopter Firewalls Ultracor Inc., Livermore, C.A. – 4 p.

17. Carbon-carbon Honeycomb Sandwich (rev. 091301) – 3 p.

18. Гайдачук, В.Е. Механика волокнистых композиционных материалов [Текст] / В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов, М.Ю. Русин. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1991. – 98 с.

*Поступила в редакцию 31.03.2014.*

*Рецензент: д-р техн. наук, ст. науч. сотр. В.И. Сливинский, УкрНИИТМ, г. Днепропетровск.*