

Л. А. Климакова, А. О. Половый

**ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
УГЛЕПЛАСТИКОВ В ТЕРМОСТАБИЛЬНЫХ
СТРУКТУРАХ ПРЕЦИЗИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Приведены методы проектирования одно- и двухосно-термонейтральных, а также термически изотропных слоистых композитных структур для прецизионных конструкций. Показано, что для каждого типа материала и структуры армирования существует однозначно определяемая область возможных значений термических коэффициентов линейного расширения. Приведены расчетные зависимости термоупругих характеристик однонаправленного материала, обеспечивающих термонейтральность армированной структуры. Представлены результаты анализа возможности создания термически стабильных структур на основе углепластиков с разными типами волокон.

Эффективность функционирования космического аппарата напрямую зависит от точности позиционирования приборов астроориентации и целевой аппаратуры в условиях космического полета, характеризующегося динамично меняющимся тепловым режимом. Вследствие этого важнейшим критерием качества прецизионной космической конструкции является термическая стабильность в пределах заданной точности ее геометрических характеристик.

Параметры размерной стабильности современных высокоточных конструкций определяются значениями 10 мкм/м для линейных и 2'' для угловых смещений базовых точек (при $\Delta T = 10^\circ\text{C}$). Обеспечение столь жестких требований по прецизионности требует специальных проектно-конструкторских решений, к которым относятся (рис. 1):

- выбор конструктивно-силовой схемы (КСС), обеспечивающей минимальные термические деформации конструкции при одновременном удовлетворении жесткостных и прочностных требований;
- минимизация диапазона изменения температур эксплуатации (стабильность температурного поля конструкции);
- минимизация термических коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) конструкции.

К числу основных методов управления конструктивно-силовой схемой относятся интеграция конструктивных элементов и геометрическая компактность зоны размеростабильности прецизионной конструкции, позволяющие уменьшить точностные погрешности вследствие исключения люфтовых соединений конструктивных элементов и минимизации числа конструктивных связей между ними [1, 2]. Для поддержания заданного теплового режима применяются активные (тепловые трубы, электрические нагреватели) и пассивные (теплоизоляция, терморегулирующие покрытия) системы терморегулирования.

Однако в условиях постоянного ужесточения требований по точностным и массовым характеристикам космических аппаратов, со-

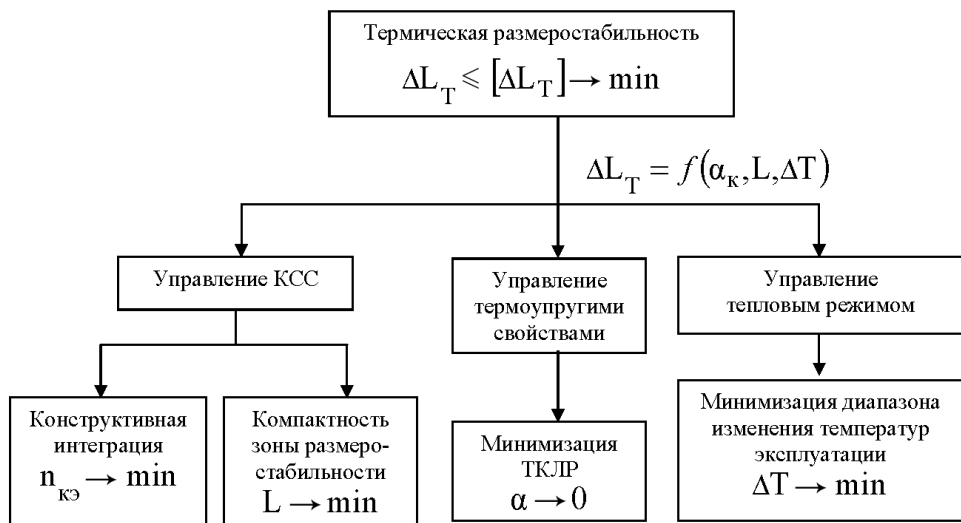


Рис. 1. Проектные принципы обеспечения термической размерной стабильности композитной конструкции

проводящегося переходом на принцип негерметичного исполнения служебных модулей, основную роль в достижении размеростабильности конструкций, обеспечивающих геометрическую прецизионную связь, начинают играть конструкционные материалы с низкими по абсолютной величине и стабильными ТКЛР.

С этой точки зрения одними из наиболее перспективных материалов являются полимерные слоистые углекомпози́ты, имеющие высокую удельную жесткость, низкий по абсолютной величине и стабильный ТКЛР, а также обеспечивающие возможность управления в широком диапазоне термодформационными свойствами конструкции путем изменения структурных параметров материала.

Управление микроструктурой монослоев волокнистых углепластиков позволяет получить структуры с одно- и двухосной размеростабильностью, в которых ТКЛР вдоль одной или двух ортогональных осей равен нулю (одно- или двухосная термонейтральность) или некоторому ранее заданному значению [3, 4].

На практике реализуются три основных подхода к проектированию структуры композита, обеспечивающих близкий к нулю ТКЛР конструкции (рис. 2), в рамках которых рассматриваются:

- однородные структуры с нулевым ТКЛР, слои которых непрерывны (поле напряжений и деформаций однородно);
- неоднородные структуры, слои которых находятся в стесненном состоянии при термическом нагружении (поле напряжений и деформаций неоднородно при отличном от нуля ТКЛР материала, ТКЛР конструкции в заданных направлениях равен нулю) [4, 5];
- структуры с заданными значениями ТКЛР, обеспечивающие взаимную компенсацию термических перемещений конструктивных элементов в составе сборной конструкции (ТКЛР конструктивных эле-

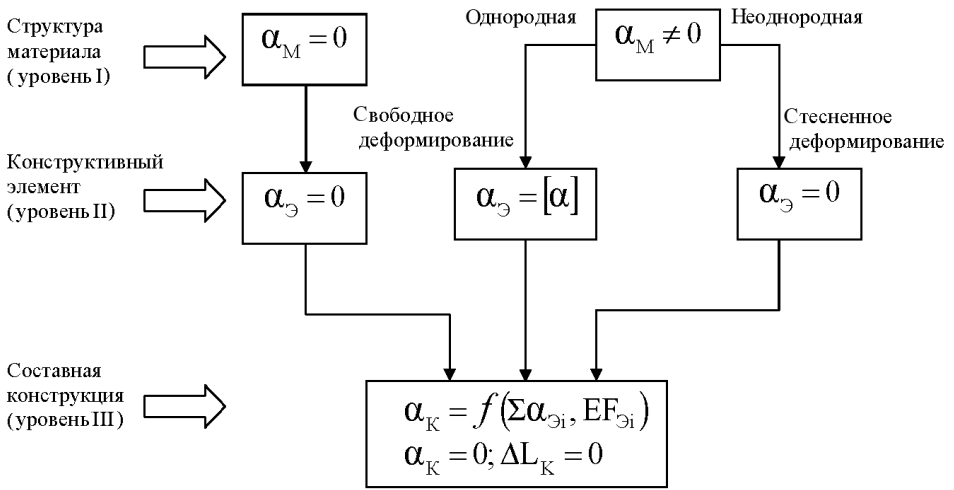


Рис. 2. Управление ТКЛР композитной конструкции

ментов отличен от нуля при нулевом значении ТКЛР всей конструкции) [6].

При создании композиционного материала слоистой структуры с заданным ТКЛР управляемыми параметрами являются исходные термоупругие свойства наполнителя и матрицы, их объемное содержание в пластике и углы ориентации слоев. Эти параметры однозначно определяют область существования возможных значений ТКЛР структуры композита, что позволяет проектировать конструкции с заданными термическими перемещениями посредством оптимального выбора типа материала, его структурных параметров и схемы армирования.

На рис.3 приведены характерные области существования значений ТКЛР, полученных расчетным путем, для нескольких типов эпоксидных углепластиков со структурами армирования вида $[\pm\phi]$, $[\pm\phi_1/\pm\phi_2]$, $[\pm\phi_1/\pm\phi_2/\pm\phi_3]$.

Как следует из полученных зависимостей, для каждого типа материала с исследованными структурами армирования реализуемые зна-

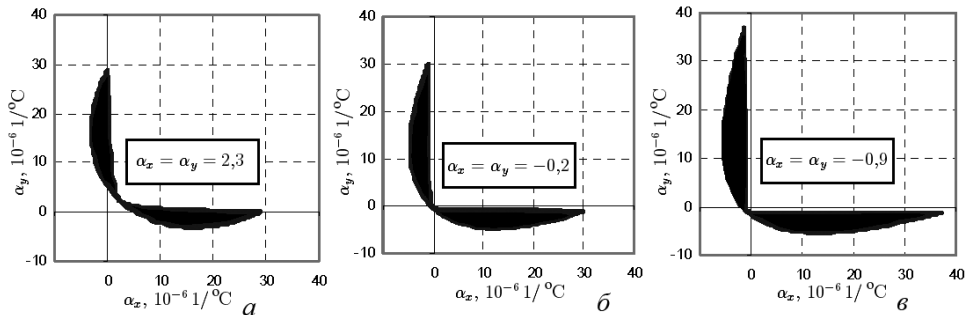


Рис. 3. Области возможных значений ТКЛР углеэпоксипластов ($V_B = 60\%$) со структурами армирования вида $[\pm\phi]$, $[\pm\phi_1/\pm\phi_2]$, $[\pm\phi_1/\pm\phi_2/\pm\phi_3]$:

a — углепластик со стандартным модулем (AS-4/3501); *б* — высокомодульный углепластик (GY-70/Code 69); *в* — ультравысокомодульный углепластик (YS-90A/25P)

чения ТКЛР находятся внутри области, ограниченной сверху кривой для структуры $[0^\circ/90^\circ]$ с изменением доли нулевых слоев от 0 до 100 %, а снизу — кривой для структуры $[\pm\phi]$ с изменением угла армирования перекрестных слоев от 0 до 90° .

Для конструкций, размеры которых стабильны, практическую значимость представляют одно- и двухосно-термонеутральные, а также термически изотропные композитные структуры, вследствие чего критериями оптимизации материала по ТКЛР являются: $\alpha_x = 0$ ($\alpha_y = 0$; $\alpha_x, \alpha_y = 0$) и $\alpha_x = \alpha_y = [\alpha]$.

Характерная точка термической изотропии $\alpha_x = \alpha_y = \text{const}$, получаемая в структурах, созданных из терморазмеростабильных блоков вида $[\pm 45^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ]$, $[0^\circ/\pm 60^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$, зависит от термоупругих свойств однонаправленного материала:

$$\alpha_x = \alpha_y = \frac{\alpha_1 E_1 (1 + \nu_{21}) + \alpha_2 E_2 (1 + \nu_{12})}{E_1 (1 + \nu_{21}) + E_2 (1 + \nu_{12})}, \quad (1)$$

где E_1, E_2 — модули упругости вдоль и поперек волокон; α_1, α_2 — ТКЛР вдоль и поперек волокон; ν_{12}, ν_{21} — коэффициенты Пуассона.

С учетом $E_1 \nu_{21} = E_2 \nu_{12}$ выражение (1) можно также представить в виде

$$\alpha_x = \alpha_y = \frac{\alpha_1 \nu_{12} (1 + \nu_{21}) + \alpha_2 \nu_{21} (1 + \nu_{12})}{\nu_{12} (1 + \nu_{21}) + \nu_{21} (1 + \nu_{12})}. \quad (2)$$

Продольный ТКЛР пластика, при котором обеспечивается заданное значение $\alpha_x = \alpha_y = \text{const}$, определяется следующим соотношением:

$$\alpha_1 = \alpha_x + (\alpha_x - \alpha_2) \frac{E_2 (1 + \nu_{12})}{E_1 (1 + \nu_{21})}, \quad (3)$$

или

$$\alpha_1 = \alpha_x + (\alpha_x - \alpha_2) \frac{\nu_{21} (1 + \nu_{12})}{\nu_{12} (1 + \nu_{21})}. \quad (4)$$

Условие получения двухосной термонеутральности ($\alpha_x = \alpha_y = 0$) можно записать как

$$\alpha_1 E_1 (1 + \nu_{21}) + \alpha_2 E_2 (1 + \nu_{12}) = 0, \quad (5)$$

или для продольного ТКЛР —

$$\alpha_1 = - \frac{1}{E_1} \frac{\alpha_2 E_2 (1 + \nu_{12})}{(1 + \nu_{21})}. \quad (6)$$

С учетом того, что для рассмотренных углепластиков величина, взятая в скобки, колеблется в сравнительно малом диапазоне и равна приблизительно $300 \cdot 10^{-6} 1/(\text{°С}\cdot\text{ГПа})$, построена зависимость

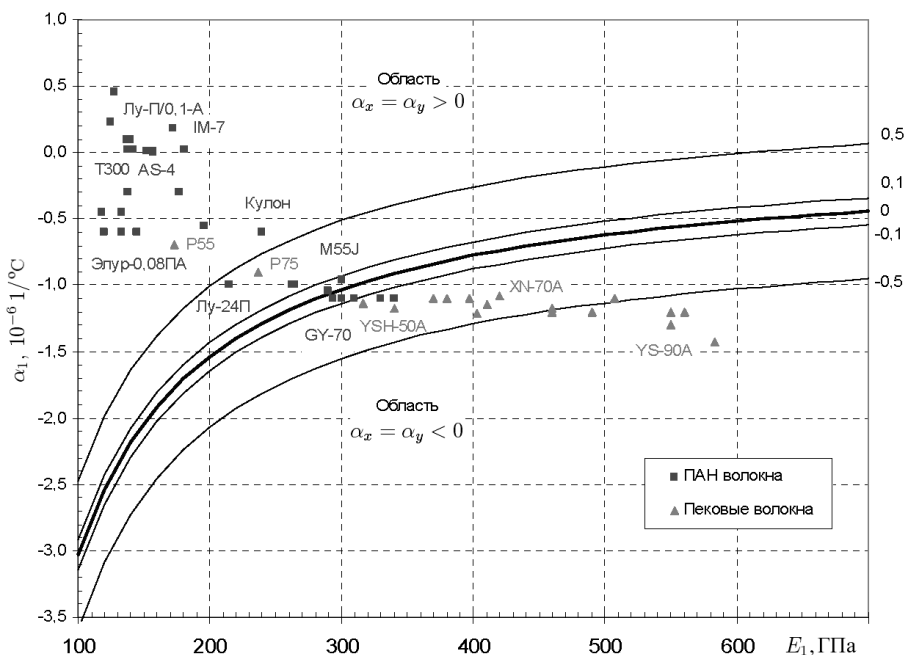


Рис. 4. Зависимость продольного ТКЛР α_1 от продольного модуля упругости E_1 однонаправленного углепластика, обеспечивающая двухосную термонеutrальность армированной структуры ($V_b = 60\%$)

продольного ТКЛР от продольного модуля упругости однонаправленного углепластика, обеспечивающая двухосную термонеutrальность (рис. 4).

Из рис. 4 следует, что двухосно-термонеutrальные структуры с $\alpha_x = \alpha_y = 0$ реализуются в углепластике как на основе ПАН волокон (Лу-24П, М55J, GY-70), так и пековых волокон (Р75, YSH-50A). При этом доля волокон в композите соответствует технологически приемлемым значениям — 50... 70%, а термоупругие характеристики α_1 и E_1 находятся на уровнях $1 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ и 300 ГПа соответственно.

Следует отметить, что для углепластиков на основе ПАН-волокон (Лу-П/0,1-А, Элур-П/0,08-А, Т300, АS-4, ИМ-7) точка термоизотропии $\alpha_x = \alpha_y$ находится, главным образом, в положительной области (см. рис. 3). При создании из таких материалов одноосно-термонеutrальных структур $\alpha_x = 0$ реализуется широкий диапазон положительных значений $\alpha_y > 0$ (рис. 3, а). Это дает возможность согласования поперечного ТКЛР в конструкциях, выполняемых из разнородных материалов, с большим положительным ТКЛР, например в зонах соединения ПКМ с металлами.

Для углепластиков, выполненных на основе пековых волокон (XN-70A, YS-90A), точка $\alpha_x = \alpha_y$ находится преимущественно в отрицательной области (см. рис. 3). В этом случае в структурах с $\alpha_x = 0$ имеется узкий диапазон отрицательных значений $\alpha_y < 0$ (см. рис. 3, а), что следует учитывать при проектировании.

Другим способом управления терморазмеростабильностью является использование гибридных ПКМ на основе углеродных наполнителей из первой и второй групп [7]. В этом случае область существования возможных значений ТКЛР значительно расширяется: решения существуют не только в областях, соответствующих каждому материалу в отдельности, но и между этими областями (рис. 5).

Термический коэффициент линейного расширения гибридного материала, состоящего из терморазмеростабильных блоков на основе различных наполнителей ($\alpha_{xi} = \alpha_{yi} = \text{const}_i$), определяется термоупругими свойствами используемых материалов и их относительной толщиной в пакете:

$$\alpha_x^r = \alpha_y^r = \frac{\sum (\alpha_{1i} E_{1i} (1 + \nu_{21i}) + \alpha_{2i} E_{2i} (1 + \nu_{12i})) \bar{\delta}_i}{\sum (E_{1i} (1 + \nu_{21i}) + E_{2i} (1 + \nu_{12i})) \bar{\delta}_i}, \quad (7)$$

где $\bar{\delta}_i$ — относительная толщина i -го материала в пакете ($\sum \bar{\delta}_i = 1$).

Из условия обеспечения двухосной терморазмеростабильности гибридного материала $\alpha_x^r = \alpha_y^r = 0$ рассчитываются относительные толщины входящих углепластиков:

$$\sum (\alpha_{1i} E_{1i} (1 + \nu_{21i}) + \alpha_{2i} E_{2i} (1 + \nu_{12i})) \bar{\delta}_i = 0. \quad (8)$$

Так, например, гибридный материал на основе волокон двух типов AS-4 и YS-90A будет двухосно-термонейтральным при использовании терморазмеростабильных блоков указанных материалов с относительными толщинами в пакете 0,57 и 0,43 соответственно.

Таким образом, показана возможность создания углекомпозитного материала с заданным значением ТКЛР, в том числе нулевым, путем проектирования структурных параметров пластик. Получены аналитические зависимости для выбора типа материала и структуры армирования, обеспечивающих конструирование одно-, двухосно-термонейтральных и термически изотропных структур. Приведены примеры построения термически стабильных структур на основе углепластиков с разными типами волокон, в том числе гибридных углепластиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ф о р м о с т а б и л ь н ы е и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов / Г.А. Молодцов, В.Е. Биткин, В.Ф. Симонов, Ф.Ф. Урмансов. — М.: Машиностроение, 2000.

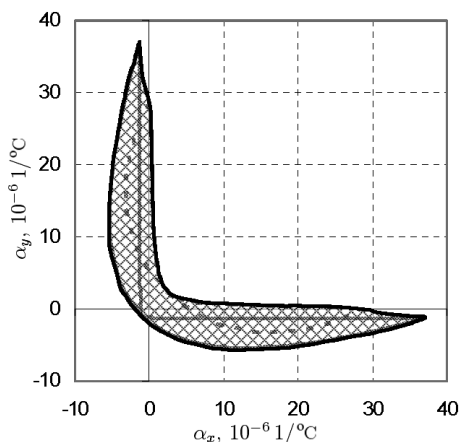


Рис. 5. Область существования решений ТКЛР гибридного углепластика на примере углеродных волокон AS-4 и YS-90A ($V_B = 60\%$) и эпоксидного связующего

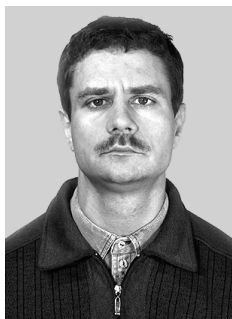
2. Klimakova L., Polovy A., Vymorkov N., Zinoviev P., Catinaccio A. Functional Designing of CFRP Precision Large-Sized Support Structure // Material & Process Technology – the Driver for Tomorrow’s Improved Performance: Proceedings of the 25th Jubilee International Europe SAMPE Conference 2004 of the Society for the Advancement of Materials and Process Engineering, March 30th–April 1st 2004, Paris. – Europe SAMPE, 2004. – P. 260–265.
3. Зиновьев П. А. Термостабильные структуры многослойных композитов // Механика конструкций из композиционных материалов: Сб. научных статей / Под ред. В.Д. Протасова. – М.: Машиностроение, 1992. – С. 193–207.
4. Смердов А. А., Баслык К. П. Возможности управления термическим деформированием космической платформы из углепластика // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2005. – Т. 11. – № 1. – С. 41–48.
5. Углепластиковая трехслойная опорная платформа с “направленной” термостабильностью для космического оптического модуля / Л.А. Климакова, А.О. Половый, В.О. Маркин и др. // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов: Тр. 4-й междунар. конф., 26–29 апреля 2005, Москва. – М.: Знание, 2006. – С. 755–759.
6. Применение термокомпенсационных углепластиковых профилей для обеспечения точностных характеристик космического телескопа / Л.А. Климакова, А.О. Половый, В.О. Маркин и др. // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов: Тр. 4-й Международной конференции, 26–29 апреля 2005, Москва. – М.: Знание, 2006. – С. 748–754.
7. Мелбардис Ю. Г. Зависимость коэффициентов линейного термического расширения волокнистого композита от структурных параметров схемы армирования // Механика композитных материалов. – 1990. – № 6. – С. 1002–1007.

Статья поступила в редакцию 19.04.2007



Любовь Анатольевна Климакова родилась в 1960 г., окончила в 1983 г. Московский инженерно-физический институт. Начальник бригады проектирования композитных конструкций Обнинского НПП “Технология”. Автор более 50 научных работ в области создания подкрепленных и размеростабильных композитных конструкций для авиационно-космической техники.

L.A. Klimakova (b. 1960) graduated from the Moscow Institute for Engineering and Physics in 1983. Head of team for design of composite constructions of the Obninsk Scientific and Production Enterprise “Tehnologiya”. Author of more than 50 publications in the field of creation of stiffened and size-stable composite constructions for aviation and space technology.



Половый Александр Олегович родился в 1973 г., окончил в 1996 г. Харьковский авиационный институт. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела проектирования композитных конструкций Обнинского НПП “Технология”. Автор 20 научных работ в области создания подкрепленных и размеростабильных композитных конструкций для авиационно-космической техники.

A.O. Poloviy (b. 1973) graduated from the Khar’kov Aviation Institute in 1996. Ph. D. (Eng.), senior researcher of department for design of composite constructions of the Obninsk Scientific and Production Enterprise “Tehnologiya”. Author of more 20 publications in the field of creation of stiffened and size-stable composite constructions for aviation and space technology.