

К.В. Михайловский, П.В. Просунцов,
С.В. Резник

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

В ракетно-космической технике востребованы конструкции, способные работать без изменения геометрических размеров в интервале температур 100...450 К. Эффективным приемом создания термостабильных конструкций считается применение полимерных композиционных материалов с малыми значениями коэффициента линейного термического расширения и высокой теплопроводностью. С увеличением теплопроводности материала удастся уменьшить температурные перепады и тем самым снизить температурные деформации. В настоящей работе с помощью методов математического моделирования исследованы подходы к получению высокотеплопроводных полимерных композиционных материалов.

E-mail: konst_mi@mail.ru

Ключевые слова: космические аппараты, композиционные материалы, углепластики, математическое моделирование, теплопроводность.

Конструкции перспективных космических аппаратов (КА), такие как панели корпуса, рефлекторы антенн, штанги и мачты, должны обладать повышенной термостабильностью в интервале температур 100...450 К в условиях периодических теплосмен, вызванных движением через теневые участки орбиты. Эффективный прием создания термостабильных конструкций — применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) с малыми значениями коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) и высокой теплопроводностью [1, 2]. Наилучшим образом для этой цели подошли бы углепластики при условии значительного увеличения их теплопроводности в направлении больших ожидаемых температурных перепадов. Актуальность проводимых в настоящей работе исследований обусловлена тем, что применяемые в современных конструкциях углепластики имеют теплопроводность в плоскости армирования не более 15 Вт/(м·К) [3, 4]. Хотя теплопроводность углепластиков в несколько раз превышает теплопроводность стекло- и органопластиков, она заметно уступает не только алюминий-магниевым сплавам, но и некоторым сталям. С увеличением теплопроводности материала удастся уменьшить температурные перепады и, как следствие, снизить температурные деформации.

В углепластике полимерная матрица обладает низкими теплопроводностью и термостойкостью. В основном она выполняет функции перераспределения напряжений между волокнами углеродный каркаса, который обеспечивает необходимые прочность и жесткость. Главные преимущества углепластика — малая плотность, высокие прочностные и жесткостные свойства, низкие значения КЛТР.

Проблема проектирования композитных конструкций осложнена тем, что действительные физико-механические свойства ПКМ можно определить лишь после изготовления конкретной детали. Кроме того, коэффициенты разброса свойств ПКМ значительно выше, чем для металлов и их сплавов, и при многоэтапной оптимизации параметров конструкции этот фактор может отражаться на достоверности данных. В связи с этим для оценки свойств ПКМ целесообразно использовать статистические и вероятностные методы, начиная с входного контроля компонентов и заканчивая проектированием и испытанием изделия [5, 6].

Цель работы заключается в создании алгоритма расчета теплопроводности ПКМ с армирующими волокнистыми наполнителями, имеющими высокую теплопроводность.

Постановка и результаты вычислительных экспериментов. Существует два подхода к определению теплопроводности ПКМ, которые условно можно назвать экспериментальным и расчетным. При экспериментальном подходе проводят тепловые испытания образцов ПКМ, в результате которых регистрируют значения температур и тепловых потоков [2]. Полученные данные в дальнейшем служат для определения теплопроводности ПКМ с использованием методов решения обратных задач. Экспериментальные методы позволяют надежно определять теплопроводность слоистых ПКМ поперек оси волокон, однако для определения этого показателя в направлении, совпадающем с осью волокон, или в плоскости армирования методы практически не разработаны. Кроме того, методы не позволяют использовать данные о теплопроводности материалов с одной схемой армирования для расчета теплопроводности материала с другой схемой армирования, что существенно увеличивает объем экспериментов.

Расчетные методы определения теплопроводности базируются на данных о структуре ПКМ, свойствах его компонент и математических моделях процессов переноса теплоты в элементарной ячейке материала [7, 8]. Важным преимуществом таких методов определения теплопроводности является возможность исследовать влияние свойств компонентов и характеристик структуры ПКМ на свойства материала, прогнозировать свойства ПКМ на основе новых компонентов, оптимизировать структуру ПКМ для конкретных условий

эксплуатации. Однако для успешного применения такого подхода необходимо наличие полных и достоверных данных о свойствах отдельных компонентов ПКМ — волокон, связующих, переходных зон, что представляет сложную научно-техническую задачу.

В настоящей работе используется метод определения теплопроводности монослоев ПКМ на основе математического моделирования процесса теплопереноса в элементарной ячейке слоистого ПКМ. В качестве элементарной ячейки ПКМ рассматривается единичное углеродное волокно, окруженное полимерной матрицей (рис. 1).

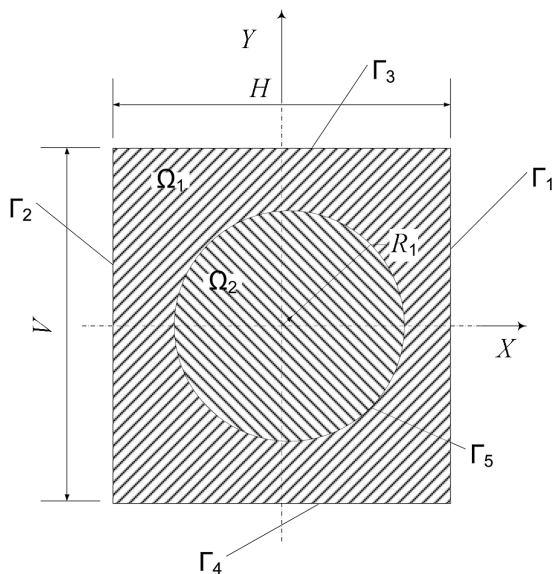


Рис. 1. Расчетная схема элементарной ячейки ПКМ

В элементарной ячейке полимерной матрицы Ω_1 с размерами $H \times V$ размещается углеродное волокно (область Ω_2) радиусом R_1 . Соотношение размеров R_1, H, V выбирают на основе данных об объемной доле волокна и матрицы в ПКМ. Считается, что на границе раздела волокна и матрицы Γ_5 имеет место идеальный тепловой контакт. Поверхности Γ_1 и Γ_2 полагаются теплоизолированными, а температуры поверхностей Γ_3 и Γ_4 — постоянными и равными соответственно T_{w1} и T_{w2} . Теплофизические свойства (ТФС) не зависят от температуры.

Тогда математическую модель процесса теплообмена в элементарной ячейке можно записать в следующем виде:

$$C_i \frac{\partial T(x, y)}{\partial \tau} = \lambda_i \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \lambda_i \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2}, \quad i = 1, 2, \quad (x, y) \in \Omega_1 \cup \Omega_2; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T(x, y)}{\partial x} = 0, \quad (x, y) \in \Gamma_i; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(x, y)}{\partial x} = 0, \quad (x, y) \in \Gamma_2; \quad (3)$$

$$T(x, y, \tau) = T_{w1}, \quad (x, y) \in \Gamma_3; \quad (4)$$

$$T(x, y, \tau) = T_{w2}, \quad (x, y) \in \Gamma_4, \quad (5)$$

где x, y — координаты, м; C_i — объемная теплоемкость, Дж/(м³·К); i — номер компонента ПКМ (1 — матрица; 2 — волокно); λ — теплопроводность, Вт/(м·К).

Теплопроводность в направлении оси Y

$$\lambda_Y = -V \int_{-H/2}^{H/2} \lambda_1 \frac{\partial T(x, V/2)}{\partial y} dx \frac{1}{H(T_{w1} - T_{w2})}.$$

Система уравнений (1)—(5) решалась численно методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. Указанным методом был выполнен расчет теплопроводности поперек волокон для материалов КМУ-4Л на основе ленты ЛУП-0,1 и углепластика серии ОКУП на основе волокна Кулон. Результаты расчета сравнивали с данными, основанными на соотношении, которое получено в работе [7]:

$$\lambda_Z = \lambda_2 V_2 + \lambda_1 (1 - V_2); \quad (6)$$

$$\lambda_{Y(x)} = \lambda_1 \left(1 + V_2 + \frac{V_1 \lambda_1}{\lambda_2} \right) / \left(V_1 + \frac{(1 + V_2) \lambda_1}{\lambda_2} \right), \quad (7)$$

где V_i — объемная доля компонента ПКМ; ось Z направлена вдоль оси волокна.

Следует отметить, что соотношение (6) является точным вследствие одномерности процесса теплопереноса вдоль волокна, в то время как зависимость (7) лишь приближенно отражает двумерный характер переноса теплоты в элементарной ячейке.

На рис. 2 приведена температурная зависимость теплопроводности материалов ОКУП и КМУ-4Л поперек волокна при объемной доле волокна 0,6. Данные о ТФС материалов волокон и матрицы взяты из работы [4].

Видно, что погрешность вычисления теплопроводности по приближенной формуле (7) составляет около 10 %. Точность этой формулы существенно зависит от объемной доли компонентов ПКМ. Исследования показали, что при объемной доле волокна менее 0,5 погрешность расчета теплопроводности по формуле (7) составляет менее 1 %, в то время как при объемной доле волокна 0,75 погрешность может достигать 100 %.

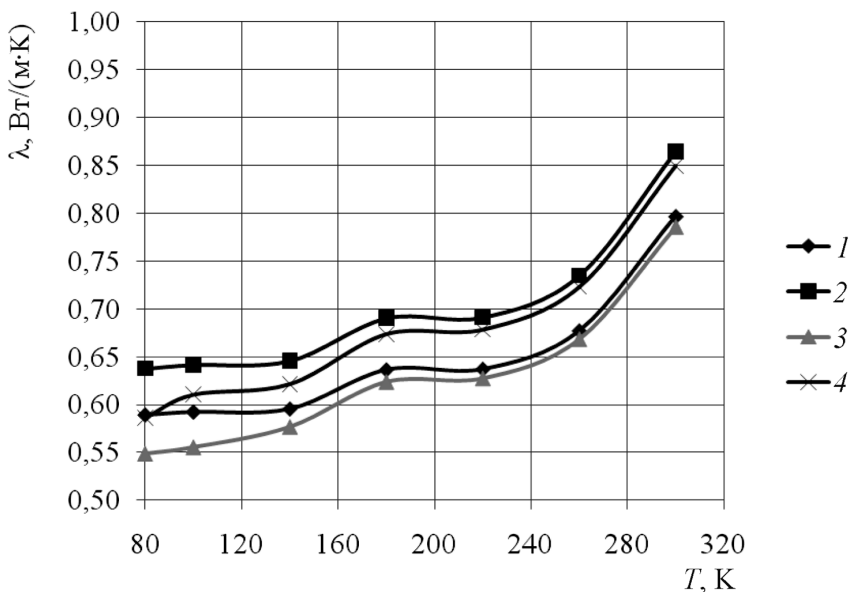


Рис. 2. Температурная зависимость теплопроводности ПКМ поперек укладки волокон:

1, 2 — ОКУП, расчет по формуле (7) и по предлагаемому численному методу соответственно; 3, 4 — КМУ-4Л, расчет по формуле (7) и по предлагаемому численному методу соответственно

На рис. 3 приведены данные о теплопроводности материалов ОКУП и КМУ-4Л при температуре 300 К и разном объемном содержании волокна.

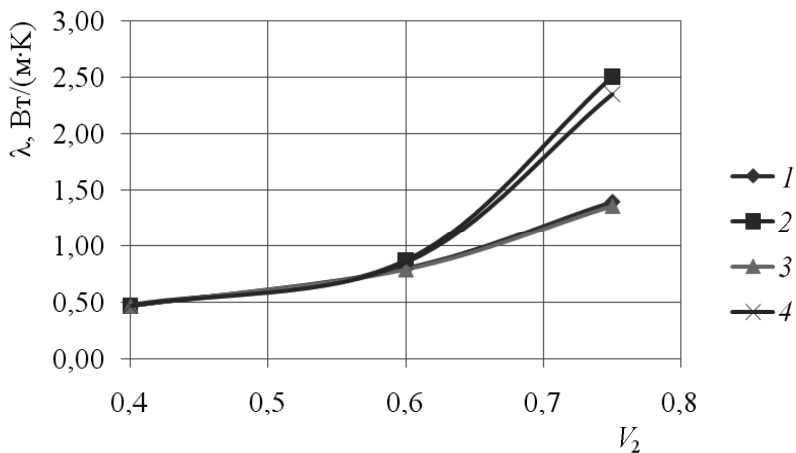


Рис. 3. Температурная зависимость теплопроводности ПКМ поперек укладки волокон при температуре 300 К и разном объемном содержании волокна V_2 :

1—4 — то же, что и на рис. 2

Представленные результаты указывают на возможность существенного увеличения теплопроводности монослоя поперек укладки волокон при увеличении объемного содержания волокна.

Еще одним фактором, влияющим на теплопроводность материала, является соотношение вертикального и горизонтального размеров элементарной ячейки, т. е. толщины монослоя, при фиксированной площади ячейки и, следовательно, фиксированном объемном содержании волокна и матрицы.

Рисунок 4 отражает изменение теплопроводности монослоев материалов ОКУП и КМУ-4Л при разных значениях V/H для температуры 300 К.

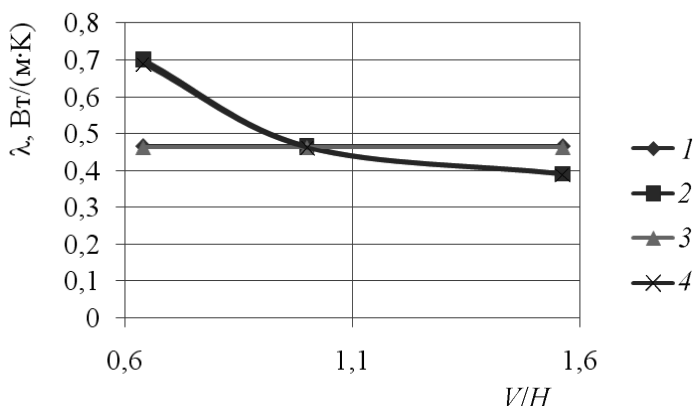


Рис. 4. Расчетные значения теплопроводности монослоев ПКМ поперек укладки волокон при температуре 300 К и разных значениях V/H : 1—4 — то же, что и на рис. 2

Видно, что переход к монослоям малой толщины при том же объемном содержании волокна позволяет повысить теплопроводность монослоя поперек оси волокна примерно в 1,5 раза.

В настоящее время наметилась тенденция перехода к использованию в ПКМ углеродных волокон на основе пекового прекурсора. Важным преимуществом волокон этого типа являются высокие (до 1000 Вт/(м·К)) значения теплопроводности. Были выполнены оценки возможных значений теплопроводности ПКМ при переходе на волокна такого типа. На рис. 5 дано сравнение теплопроводности поперек и вдоль оси волокна для материалов ОКУП, КМУ-4Л и нового углепластика на основе углеродных волокон из пека.

Определено, что применение волокон на основе пекового прекурсора дает незначительный выигрыш в значении теплопроводности материалов поперек оси волокна, но обеспечивает существенный рост этого показателя вдоль оси волокна.

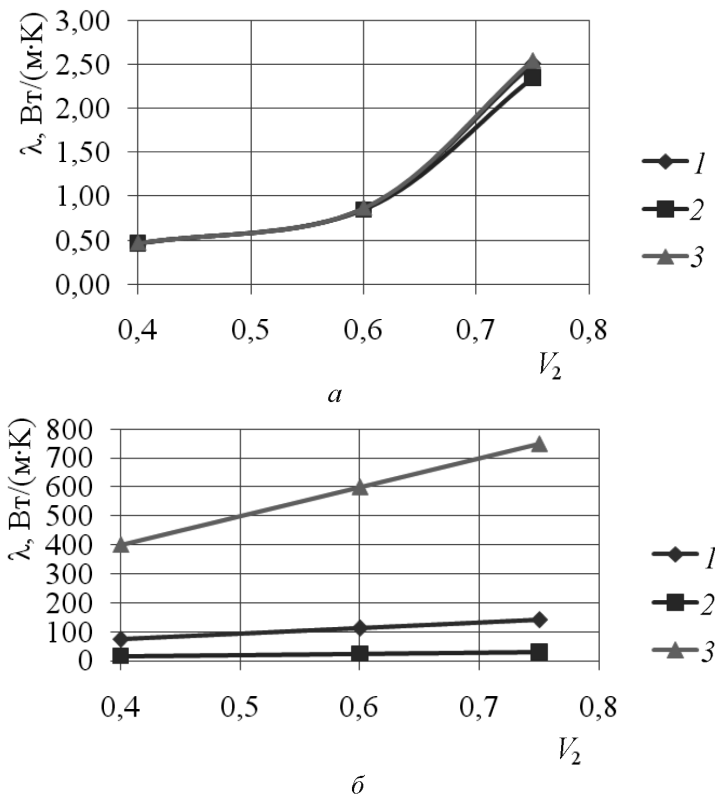


Рис. 5. Расчетные значения теплопроводности материалов ОКУП (1), КМУ-4Л (2) и углепластика на основе углеродных волокон из пекового прекурсора (3) поперек (а) и вдоль (б) оси волокна при температуре 300 К и разном объемном содержании волокна V_2

Эффективную теплопроводность многослойных пакетов углепластиков определяли следующим образом:

$$\lambda_X = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \lambda_{X\alpha_i}; \quad \lambda_Y = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \lambda_{Y\alpha_i}; \quad \lambda_Z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \lambda_{Z\alpha_i},$$

где $\lambda_{X\alpha_i} = \sqrt{(\lambda_{X_i} \cos \alpha_i)^2 + (\lambda_{Y_i} \sin \alpha_i)^2}$, $\lambda_{Y\alpha_i} = \sqrt{(\lambda_{X_i} \sin \alpha_i)^2 + (\lambda_{Y_i} \cos \alpha_i)^2}$ — теплопроводность i -го монослоя материала с углом армирования α_i к осям X и Y соответственно; k — число слоев. Здесь для монослоя ось X_i считается направленной вдоль оси волокна, ось Y_i — перпендикулярно к ней вдоль поверхности пакета, а ось Z_i — поперек пакета.

В таблице даны расчетные значения теплопроводности материалов ОКУП, КМУ-4Л и углепластика на основе углеродных волокон из пекового прекурсора К-1100S при объемной доле волокна 0,6 для пакета со схемой армирования $-78/0/0/+78$.

Расчетные значения теплопроводности ПКМ

Материал	T, К	Теплопроводность, Вт/(м·К)		
		λ_x	λ_y	λ_z
ОКУП	80	17,08	14,14	0,64
	300	68,18	55,64	0,86
КМУ-4Л	80	2,31	2,08	0,59
	300	14,58	12,20	0,85
Углепластик из волокон на основе пекового прекурсора	80	54,36	44,34	0,65
	300	362,38	293,88	0,87

Приведенные данные наглядно демонстрируют преимущества использования углеродных волокна на основе пека при создании ПКМ.

В качестве примера для реализации предлагаемого алгоритма проведено математическое моделирование панели из ПКМ при использовании материалов ОКУП, КМУ-4Л и углепластика на основе углеродных волокон из пекового прекурсора. Объектом исследований служила панель из ПКМ размером 300×800 мм и толщиной 5 мм. По контуру и в середине длинной стороны панель была подкреплена ребрами жесткости высотой 20 и толщиной 5 мм.

Максимальные перепады температуры по поверхности панели определяли для условий полета космического аппарата в околоземном космическом пространстве. Предполагалось, что левая часть верхней поверхности панели нагревается потоком солнечного излучения плотностью 1 400 Вт/м² и все поверхности панели охлаждаются за счет радиационного теплообмена с окружающей средой, имеющей температуру 4 К. Степень черноты ПКМ принималась равной 0,85.

Анализ результатов расчетов показал, что использование материалов на основе углеродных волокон из пекового прекурсора обеспечивает снижение перепадов температуры приблизительно в 3 раза и позволяет рассчитывать на соответствующее снижение температурных деформаций панели.

Решение широкого круга научно-исследовательских задач в ближайшие годы будет связано с созданием конструкций ракетно-космической техники из ПКМ. В связи с этим высокую важность имеют исследования, направленные на повышение работоспособности углепластиков при воздействиях силовых и тепловых нагрузок.

Выводы. Разработаны математические модели, позволяющие последовательно оценить значение теплопроводности монослоев и пакетов углеродных ПКМ. Выявлены основные факторы, влияющие на теплопроводность ПКМ, среди них — объемная доля волокна, толщина монослоя и теплопроводность волокна. Проведено математиче-

ское моделирование температурного состояния панелей из современных и перспективных ПКМ. Получены данные о максимальных значениях перепадов температуры по поверхности панели для материалов различных типов. Показана высокая эффективность применения углепластиков на основе углеродных волокон из пекового прекурсора в теплонагруженных конструкциях космических аппаратов, состоящая в существенном уменьшении перепадов температуры при неравномерном нагреве, а значит, и в снижении температурных деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее: В 3 т. – Т. 1. Прогнозирование и анализ экстремальных воздействий / Ю.В. Полежаев, С.В. Резник, Э.Б. Василевский и др.; Под ред. С.В. Резника. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 224 с.
2. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем / О.М. Алифанов, П.Н. Вабищевич, В.В. Михайлов и др. – М.: Логос, 2001. – 400 с.
3. Method and results of investigations of thermophysical properties of carbon-polymer composites with full-scale samples of beam space structures / S.V. Reznik, P.V. Prosuntsov, V.S. Railyan, A.V. Shulyakovsky // Proc. 2nd Int. Symp. on Inverse Problems, Design and Optimization (April 16–18, 2007, Miami, Florida, U.S.A.). – P. 657 – 660.
4. Исследования теплопроводности углепластиков в широком диапазоне эксплуатационных температур с использованием элементов натуральных конструкций / С.В. Резник, О.В. Денисов, В.А. Нелюб и др. // Все материалы. Энцикл. справ. – 2012. – № 3. – С. 2–6.
5. Карпов Я.С., Ставиченко В.Г. Исследование и анализ способов удовлетворения критериям прочности слоистого композиционного материала // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 1. – С. 3–10.
6. Румянцев А.Ф., Раскутин А.Е., Ефимов В.А. Эксплуатационная надежность углепластиков // 75 лет. Авиационные материалы. Избр. тр. ВИАМ 1932–2007. – М.: изд. ВИАМ, 2007. – С. 239–241.
7. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: Справ. книга. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1974. – 264 с.
8. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 248 с.

Статья поступила в редакцию 19.09.2012