

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

ПРОЧНОСТЬ И ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 629.7.036.5:539.4

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН И КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ТЕПЛООБМЕНА

Абашев В.М.^{*}, Демидов А.С.^{**}, Ерёмкин И.В.^{***},
Киктев С.И.^{****}, Хомовский Я.Н.^{*****}

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

** e-mail: vmabashev@gmail.com*

*** e-mail: demidov@mai.ru*

**** e-mail: horizont62@yandex.ru*

***** e-mail: kiktev_si@mail.ru*

****** e-mail: yariksp@mail.ru*

Рассматривается взаимосвязь радиальных температурных напряжений и теплопроводности в радиальном направлении в цилиндрической оболочке из углерод-углеродного композитного материала (УУКМ). Предлагается формула для оценки термического сопротивления оболочки. Показано, что уточнение результатов расчета возможно путем учета модуля Юнга поверхностного слоя углеродного волокна. Выполнены сравнительные расчеты теплопроводности оболочки из углеродных волокон диаметром 0,02; 0,05; 0,2; 0,5 и 1 мм в радиальном направлении. Приведены графики зависимостей контактных сил в местах касания волокон и радиусов контактных пятен от диаметров волокон. Представлены технологические возможности улучшения свойств углерод-углеродных композитных материалов по результатам анализа радиальных напряжений, и обоснована необходимость исследования механических свойств материала в направлении, перпендикулярном слоям оболочки.

Ключевые слова: углерод-углеродные композитные материалы, температурные напряжения, контактный теплообмен, цилиндрическая оболочка, термическое сопротивление.

В цилиндрической оболочке, нагруженной температурным градиентом по толщине, радиальные напряжения значительно ниже окружных и осевых, однако при использовании углерод-углеродных композитных материалов они могут оказаться определяющими. Это относится, например, к корпусным деталям ракетных двигателей, изготовленных

из УУКМ волокнистой структуры. Температурные напряжения в оболочке зависят от температурного градиента, а тот, в свою очередь, зависит от теплопроводности материала. Модель для оценки теплопроводности волокнистых материалов различной природы с упорядоченной структурой, достаточно близкой к структуре реальных материалов, расче-

ты по этой модели и их сравнение с опытными данными приведены в работе [1]. При этом использовался достаточно формальный подход к оценке термических сопротивлений элементов, аналогичный известному методу из теории электрических цепей.

Основными допущениями авторов [1] являются следующие:

- 1) материал имеет однородную упорядоченную структуру из элементарных волокон;
- 2) все волокна лежат в плоскости, перпендикулярной тепловому потоку;
- 3) поперечные сечения волокон имеют форму квадрата (по замечанию авторов, это «равносильно замене цилиндрического волокна бруском равнобедренного квадратного сечения»);
- 4) волокна пересекаются только под прямыми углами.

Расхождение между расчетными и опытными данными в ряде случаев получается весьма существенным, что объясняется сложностью задачи. Результаты решения подобной задачи приводят также авторы статьи [2]. Радиус a пятна контакта двух скрещенных цилиндрических волокон рассчитывается по формуле теории упругости

$$a \approx 1,13 \left(\frac{PR}{E} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

где P — нагрузка на один контакт, дин; R — радиус волокна, см; E — модуль Юнга материала волокон, дин/см².

Развивая идею авторов [2], укажем способ уточнения сил, действующих на контактных площадках скрещенных волокон, и оценим их влияние на теплопроводность оболочки в радиальном направлении. Эффекты излучения и конвекции в пространстве, ограниченном упорядоченной волокнистой структурой, не учитываются.

Рассмотрим цилиндрическую оболочку из УУКМ, внутренняя поверхность которой имеет более высокую температуру, чем внешняя. Элемент оболочки со скрещенными волокнами показан на рис. 1. Вследствие градиента температуры в ради-

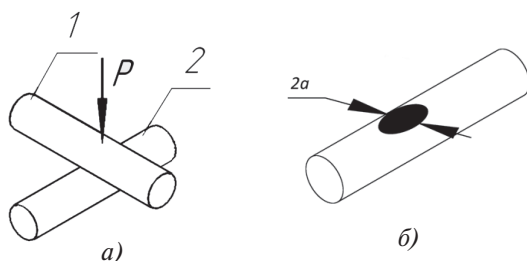


Рис. 1. Элемент оболочки: а — сила P в месте касания волокон; б — пятно контакта волокон радиуса a

альном направлении в оболочке возникает напряжение сжатия, из-за которого в месте касания волокон действует сила P на пятне контакта с радиусом a (технологические напряжения здесь не рассматриваются). Будем считать, что изменением поперечных размеров волокон под действием температуры также можно пренебречь.

Взаимосвязь между радиусом a контактного пятна, сближением волокон δ , контактным усилием P , геометрическими характеристиками волокон и механическими свойствами материала волокон устанавливается следующими формулами [3]:

$$a = 0,9086 \sqrt[3]{\eta PR}; \quad (2)$$

$$\delta = 0,8255 \sqrt[3]{\frac{\eta^2 P^2}{R}}; \quad (3)$$

$$\eta = \frac{E_1(1-\mu_2^2) + E_2(1-\mu_1^2)}{E_1 E_2}, \quad (4)$$

где R — радиус волокна; E_1, E_2, μ_1, μ_2 — модули Юнга и коэффициенты Пуассона материалов волокон 1 и 2.

Для волокон из одинакового материала формула (4) имеет вид:

$$\eta = \frac{2(1-\mu^2)}{E}. \quad (5)$$

Отметим, что в соотношениях (2)—(5) описан случай равенства поперечных размеров волокон ($R_1 = R_2 = R$) при их скрещивании под прямым углом. В эти зависимости входят значения модулей Юнга, которые при расчетах берутся из справочников. Между тем реальный контакт волокон происходит через соприкосновения их *поверхностных* слоев, механические свойства которых могут численно отличаться от указанных в литературных источниках. Для определения модуля Юнга поверхностного слоя углеродного волокна обратимся к экспериментальным данным из книги [4] (табл. 1).

При определении твердости по шкале М Роквелла общая нагрузка на шарик-индентор составляет 100 кгс (980,7 Н), а показатель твердости может быть получен из следующей зависимости [5]:

$$HR = 130 - e,$$

где e — глубина вдавливания шарика после снятия основной нагрузки в единицах измерения шкалы.

Для показателя твердости, приведенного в табл. 1 ($HR = 110$), величина e оказывается равной 20 и при цене деления шкалы 0,002 мм глубина вдавливания шарика радиусом 3,175 мм $\delta = 0,002 \times 20 = 0,04$ мм. Подставив в формулы (3) и (4) значения $\delta = 0,04$ мм, $R = 3,175$ мм, $P = 100$ кгс, $E_1 = 22000$ кгс/мм² (для стали), $\mu_1 = 0,3$ (для стали), $\mu_2 = 0,1$ (для УУКМ), получим квадратное уравнение общего вида с единственным действительным корнем $E_2 = 6652$ кгс/мм² = 66,52 ГПа.

Таким образом, определенный для поверхностного слоя углеродного волокна модуль Юнга оказался на 7,3 % выше, чем приведенный в табл. 1 (при изгибе). Заметим, что поправка значения термического сопротивления оболочки вследствие учета уточненного модуля Юнга будет меньше этого числа, но имеет принципиальное значение.

Для определения по формуле (2) радиуса a контактного пятна (рис. 1) необходимо знать силу P .

Ее значение можно подсчитать по сжимающему радиальному напряжению. Для цилиндрической оболочки из УУКМ примем следующие размеры и условия: наружный радиус $b_2 = 200$ мм; внутренний радиус $b_1 = 190$ мм; промежуточные значения радиуса r приведены в табл. 2; температура наружной поверхности 600 °С; температура внутренней поверхности 1500 °С.

За осредненные свойства материала углеродных волокон в указанном диапазоне температур примем: модуль Юнга $E = 62$ ГПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,1$.

Сжимающие радиальные напряжения для четырех значений радиусов r были подсчитаны по формуле из книги [6]:

$$\sigma_r = \frac{E\alpha\Delta t}{2(1-\mu)\ln\frac{b_2}{b_1}} \left[-\ln\frac{b_2}{r} - \frac{b_1^2}{b_2^2 - b_1^2} \left(1 - \frac{b_2^2}{r^2} \right) \ln\frac{b_2}{b_1} \right] \quad (6)$$

Таблица 1

Характеристики углеродных волокон [4]

Образцы	Характеристики*		
	Твёрдость по Роквеллу (шкала М)	Модуль Юнга при растяжении, ГПа	Модуль Юнга при изгибе, ГПа**
Волокна длиной 12.5 мм	110	58,7	62,0
Волокна длиной 25 мм	110		

* В книге [4] диаметры образцов указаны не были; испытания проводились при комнатной температуре.

** Так как модуль Юнга при изгибе оказался выше, чем при растяжении, это позволяет считать его равным модулю Юнга при сжатии.

Таблица 2

Пример расчета оболочки из волокон диаметром 0,05 мм

Радиусы границ условных слоёв, мм	Радиальное напряжение по формуле (6), кгс/мм ²	Число точек на площадке контакта в 1 мм ²	Силы P на контактных площадках, кгс	Номер условного слоя	Среднее значение контактных сил в слоях P_{cp} , кгс	Радиус пятна контакта a , мм	Давление на контактных площадках $P_{cp}/\pi a^2$, кгс/мм ²	
$b_2 = 200$	0	400		5	$4,77 \cdot 10^{-5}$	$6,59 \cdot 10^{-4}$		
$r = 198.02$	-0,038		$9,54 \cdot 10^{-5}$		4	$11,8 \cdot 10^{-5}$	$8,92 \cdot 10^{-4}$	34,95
$r = 196.08$	-0,056		$14,1 \cdot 10^{-5}$		3	$14,55 \cdot 10^{-5}$	$9,56 \cdot 10^{-4}$	47,34
$r = 194.17$	-0,060		$15 \cdot 10^{-5}$		2	$11,3 \cdot 10^{-5}$	$8,79 \cdot 10^{-4}$	50,71
$r = 192.3$	-0,30		$7,62 \cdot 10^{-5}$		1	$3,81 \cdot 10^{-5}$	$6,12 \cdot 10^{-4}$	46,60
$b_1 = 190.48$	0							32,40

с подстановкой $\alpha = 2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$ — коэффициент термического расширения углеродного волокна; $\mu = 0,1$; $\Delta t = 900 \text{ К}$. Они сведены в табл. 2 и были использованы для построения эпюры напряжений (рис. 2,а). Затем оболочка по толщине была разбита на пять слоев, в каждом из которых напряжение условно считалось постоянным (см. таблицу и рис. 2,б). Далее расчет проводился применительно к оболочке из углеродных волокон диаметром 0,05 мм. Для того чтобы определить контактные силы в местах соприкосновения волокон, были выделены площадки размером 1 мм². С учетом количества точек соприкосновения волокон на таких площадках и радиальных напряжений в каждом слое эти контактные силы были подсчитаны. Это позволило вычислить радиусы пятен контакта для каждого из пяти слоев и соответствующие давления на площадках контакта.

Такие же расчеты были выполнены для оболочек с углеродными волокнами других размеров (табл. 3).

Для оценки термического сопротивления оболочки учитываются давления на пятнах контакта $P_{ср} / \pi a^2$, причем структура формулы сопоставима с известными из литературы [1, 2, 7] зависимостями:

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{\lambda_{\Sigma}}{h_{\Sigma}} = \kappa \frac{\lambda_{м}}{h_{с}} \sum \left(\frac{P_{ср i}}{\pi a_i^2} \right)^3, \quad (7)$$

где κ — безразмерный коэффициент пропорциональности; R_{Σ} — термическое сопротивление обо-

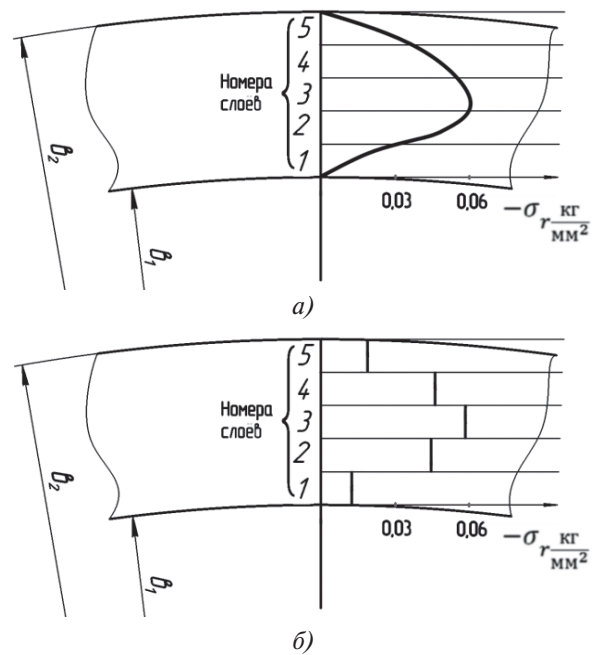


Рис. 2. Радиальные температурные напряжения: а — по формуле (6); б — средние на пяти условных участках

лочки; λ_{Σ} — эффективный коэффициент теплопроводности оболочки; $\lambda_{м}$ — коэффициент теплопроводности материала волокон; h_{Σ} — конструктивная толщина оболочки; $h_{с}$ — толщина условного слоя; $P_{ср i}$ — средняя сила, действующая на площадках контакта скрещивающихся волокон i -го слоя.

Используя формулу (7), можно учесть послойное различие контактных усилий, размеров пятен контакта, механических свойств и свойств теплопроводности, а также конструктивную толщину

Таблица 3

Схемы площадок в 1 мм², рассматриваемых при расчете оболочки из волокон различного диаметра, и геометрические характеристики оболочек

Характеристики оболочек	Схемы площадок				
Диаметр волокна, мм	0,02	0,05	0,2	0,5	1
Число контактных точек в соприкасающихся слоях	2500	400	25	4	1
Число волоконных слоев в оболочке толщиной 10 мм	500	200	50	20	10

оболочки. В то же время для элементов конструкции, которые изготавливаются путем намотки, учет шероховатости волокон не должен ощутимо влиять на теплопроводность и температурные напряжения вследствие наличия матрицы препрега. В этом заключается разница в подходах к оценке термического сопротивления конструктивного элемента (оболочки) и отдельной контактной пары. При большом количестве слоев волокон учесть все физические эффекты во всех контактных парах достаточно трудно, поэтому примененный здесь послойный анализ, по-видимому, целесообразен. Формула (7) может быть представлена также в интегральной форме, но в этом случае для ее практического использования необходимо располагать аналитическими зависимостями входящих в нее величин от температуры, что не всегда практически достижимо.

Численное значение коэффициента пропорциональности k было подсчитано по формуле (7) для оболочки толщиной 10 мм, состоящей из волокон различного диаметра. В расчетах использовались предварительно определенные:

- плотность излучения теплового потока Q с наружной поверхности оболочки с интегральной степенью черноты $\epsilon = 0,3$ и температурой 873 К, равная 9880 Вт/м²;
- термическое сопротивление оболочки, равное $\Delta t / Q = 900 / 9880 = 0,09109$ К·м²/Вт;
- величина, обратная термическому сопротивлению $1 / R_S = 10,98$ Вт/(К·м²);
- эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\Sigma} = h / R_S = 0,01 / 0,09109 = 0,1098$ Вт/(К·м²);
- коэффициент теплопроводности материала углеродных волокон $\lambda_M = 110$ Вт/(К·м).

Для упрощения расчетов значение коэффициента η в формуле (7) было принято постоянным во всех слоях.

Результаты расчета сведены в табл. 4 и в графическом виде показаны на рис. 3.

Характер графиков показывает качественные и количественные нелинейные зависимости размеров пятен контакта и давлений на площадках контакта от диаметров волокон, которые особенно явно проявляются при диаметрах волокон меньше 0,2 мм и больше 0,5 мм. Коэффициент пропорциональности во всех случаях остается практически неизмен-

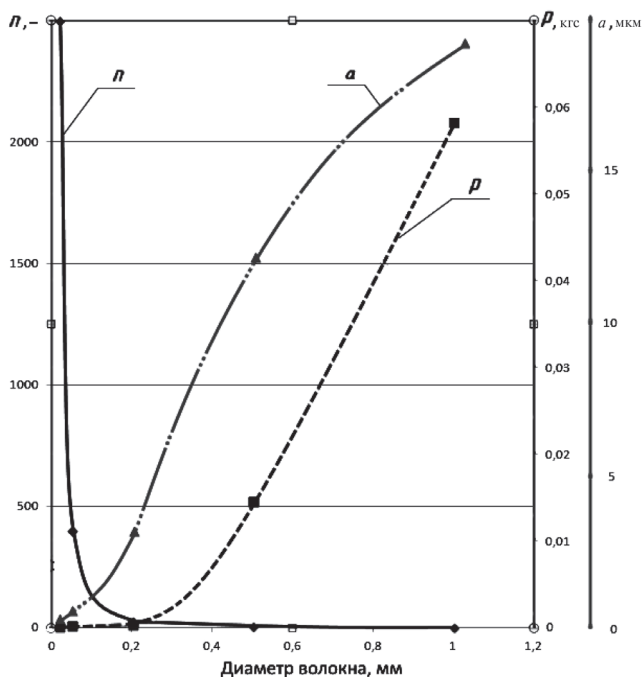


Рис. 3. Зависимость расчетных характеристик (коэффициента k , радиуса a пятна контакта в среднем слое, силы P в среднем слое) и числа n точек контакта на выделенной площадке от диаметра волокон

Таблица 4

Результаты расчета по формуле (7)

Расчетные величины	Диаметры волокон, мм				
	0,02	0,05	0,2	0,5	1,0
Коэффициент пропорциональности k	$0,7039 \cdot 10^{-3}$	$0,704 \cdot 10^{-3}$	$0,705 \cdot 10^{-3}$	$0,7033 \cdot 10^{-3}$	$0,7035 \cdot 10^{-3}$
Число точек контакта на площадке в 1 мм ²	2500	400	25	4	1
Сила, действующая на пятне контакта (в слое №3), гс	0,02325	0,1455	0,233	14,55	58,23
Радиус a пятна контакта (в слое №3), мкм	0,3817	0,956	3,83	12,05	19,12
Максимальное давление на пятне контакта (в слое №3), кгс/мм ²	50,82	50,71	50,58	50,71	50,74

ным (в пределах точности расчета), и это позволяет предполагать, что структура формулы в основном является правильной.

Очевидно, что в цилиндрической оболочке, температура наружной поверхности которой выше, чем внутренней, радиальные напряжения будут растягивающими. Для многослойной структуры из углеродных волокон такие напряжения могут привести к расслаиванию [10]. Поэтому желательно иметь результаты испытаний материала на растяжение в направлении, перпендикулярном слоям намотки. Образцы для подобных испытаний должны быть изготовлены специально. Заменой таких могут служить образцы для испытаний на изгиб, вырезанные в радиальном направлении. В любом случае они скорее всего будут малогабаритными.

Выводы

1. В многослойной цилиндрической оболочке из углеродных волокон при ее внутреннем подогреве радиальное напряжение и теплопроводность в радиальном направлении оказывают взаимное влияние через контактный теплообмен и контактные силы. Поэтому, несмотря на то что радиальное напряжение обычно является относительно небольшим, его следует принимать во внимание. Результаты расчета позволили выявить качественную и количественную взаимосвязь диаметров волокон, размеров контактных пятен и контактных сил. Эти результаты могут быть использованы при выборе размеров углеродных волокон для оболочек ракетных двигателей.

2. В формулах теории упругости, в которые входят контактные силы на скрещающихся волокнах, размеры контактных пятен и сближение волокон, необходимо учитывать значения модулей Юнга материала поверхностных слоев волокон. Шероховатость волокон с учетом наличия относительно пластичной матрицы в расчетах во внимание не принималась.

3. Предложенный подход позволяет, основываясь на подсчитанных по выражению (6) температурных напряжениях, определить контактные силы и размеры контактных пятен на скрещающихся волокнах, термическое сопротивление оболочки, а затем уточнить температурный перепад между внутренней и внешней ее поверхностями и заново подсчитать температурные напряжения. При определенных условиях такой расчет можно осуществлять методом итераций. Расчет можно выполнять также для пересекающихся волокон, изготовленных из различных материалов.

4. Вследствие того что наименьшее контактное давление на поверхность волокон имеет место в слоях, близких к внутренней и внешней поверхностям оболочки, повышения теплопроводности в этих зонах можно добиваться путем использования специальных технологий, например за счет увеличения усилий натяжения препрега при намотке. С другой стороны, высокие значения контактного давления внутри оболочки могут привести к ее разрушению.

5. В цилиндрических оболочках с относительно более высокой температурой наружной поверхности вследствие появления растягивающих напряжений в радиальном направлении может возникать опасность расслоения волокнистой структуры, поэтому необходимо проведение испытаний на специальных образцах и создание соответствующего руководящего документа (примером могут служить методические указания [9]).

Библиографический список

1. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: Справочная книга. — Л.: Энергия, 1974. — 264 с.
2. Стронг Х.М., Бэнди Ф.П., Бовенкерк Х.П. Вакуумная тепловая изоляция для плоских стенок // Вопросы глубокого охлаждения: Сборник статей. М.: Иностранная литература, 1961. С. 362-389.
3. Пономарев С.Д., Бидерман В.Л., Лихарев К.К., Макушин В.М., Малинин Н.Н., Феодосьев В.И. Расчеты на прочность в машиностроении. — М.: Машгиз, 1958. — Т. 2. — 974 с.
4. Углеродные волокна: Пер. с японского / Под ред. С. Симамуры. — М.: Мир, 1987. — 304 с.
5. ГОСТ 24622-91 Пластмассы. Определение твердости. Твердость по Роквеллу. — М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. — 11 с.
6. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. — М.: Наука, 1979. — 560 с.
7. Авдеевский В.С., Галицкий Б.М., Глебов Г.А. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике: Учебник для авиационных специальностей вузов. — М.: Машиностроение, 1975. — 519 с.
8. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. — М.: Атомиздат, 1968. — 484 с.
9. РД 50-675-88. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Материалы композиционные. Методы испытаний на межслойный сдвиг. — М.: Издательство стандартов, 1989. — 8 с.
10. Демидов А.С., Кашелкин В.В. Экспериментально-расчетная оценка поврежденности конструктивных элементов // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т.17. №3. С. 163-167.

TEMPERATURE STRESSES IN A CYLINDRICAL SHELL OF CARBON FIBERS AND THE CONTACT PROBLEM OF HEAT TRANSFER

Abashev V.M.* , Demidov A.S.** , Eremkin I.V.*** ,
Kiktev S.I.**** , Khomovskii Ya.N.*****

Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

* e-mail: vmabashev@gmail.com

** e-mail: demidov@mai.ru

*** e-mail: horizont62@yandex.ru

**** e-mail: kiktev_si@mail.ru

***** e-mail: yariksp@mail.ru

Abstract

Cylindrical shells are the most common structural elements of rocket engines. When loading by the temperature gradient in radial direction radial temperature stresses occur in them. Such stresses in carbon-carbon shells can be rather dangerous notwithstanding that they are much smaller than the circumferential and axial ones. Moreover, they substantially depend on the thermal conductivity of the carbon fiber material and the shell structure.

The article suggests the equation for the structural thermal conductivity (contact thermal exchange) evaluation of a cylindrical shell in radial direction. When calculating with the equation the carbon fibers' roughness was not accounted for due to the presence of pre-preg matrix, and the shell was divided conditionally through-the-thickness into several layers. The contact forces acting on the fibers were determined based on a primary evaluation of the temperature stresses. The results of the shells' made of carbon fibers calculations with a diameter of 0.02, 0.05, 0.2, 0.5, and 1 mm are presented in the form of tables and graphical dependencies. It is shown, that the elasticity modulus of the first genus of carbon fibers' surface layers can be accounted for in the calculations. It was revealed, that in shells with internal warming-up the specific pressures at the areas of contact spots of the adjoining fibers could reach several tens of kilograms per square millimeter. There is a risk of the carbon fibers structure stratification in the shells with the external warming-up. Thus, we recommend conduct tensile or bending tests with small-sized samples, cut from the shell in radial direction. Tests of such samples should be carried out according to the methodological instructions.

Keywords: carbon-carbon composite materials, thermal stresses, contact heat transfer, cylindrical shell, thermal resistance.

References

1. Dul'nev G.N., Zarichnyak Yu.P. *Teploprovodnost' smesey i kompozitsionnykh materialov* (Thermal conductivity of mixtures and composite materials), Leningrad, Energiya, 1974, 264 p.
2. Strong H.M., Bundy F.P., Bovenkerk H.P. *Voprosy glubokogo okhlazhdeniya. Sbornik statei*, Moscow, Inostrannaya literatura, 1961, pp. 362-389.
3. Ponomarev S.D., Biderman V.L., Likharev K.K., Makushin V.M., Malinin N.N., Feodos'ev V.I. *Raschety na prochnost' v mashinostroenii* (Strength calculations in mechanical engineering), Moscow, Mashgiz, 1958, vol. 2, 974 p.
4. Simamura S. *Uglerodnye volokna* (Carbon fiber), Moscow, Mir, 1987, 304 p.
5. *Plastmassy. Opredelenie tverdsti. Tverdst' po Rokvellu. GOST 24622-91* (Plastic. Definition of hardness. Rockwell hardness. State Standard 24622-91), Moscow, Standarty, 1991, 11 p.
6. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. *Teoriya uprugosti* (Theory of elasticity), Moscow, Nauka, 1979, 560 p.
7. Avduevskii V.S., Galitseiskii B.M., Glebov G.A. *Osnovy teploperedachi v aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi tekhnike* (Fundamentals of heat transfer in aviation and rocket-space technology), Moscow, Mashinostroenie, 1975, 519 p.
8. Chirkin V.S. *Teplofizicheskie svoystva materialov* (Thermophysical properties of materials), Moscow, Atomizdat, 1968, 484 p.
9. *Metodicheskie ukazaniya. Raschety i ispytaniya na prochnost' v mashinostroenii. Materialy kompozitsionnye. Metody ispytaniya na mezhsloyni sdvig. RD 50-675-88* (Methodical instructions. Calculations and strength tests in mechanical engineering. The materials of composite. Test methods for interlaminar shear. RD 50-675-88), Moscow, Standarty, 1989, 8 p.
10. Demidov A.S., Kashelkin V.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 163-167.