

## Напряженное состояние уплотнительного кольца из композиционного материала с заданными физико-механическими характеристиками

С. М. Верещака<sup>1</sup>, А. В. Дейнека, В. В. Данильцев

Сумской государственный университет, Сумы, Украина

<sup>1</sup> vereshakasergey@mail.ru

*Предложена методика определения физико-механических характеристик анизотропного материала с одной плоскостью упругой симметрии. На основе классической теории упругости анизотропного тела исследуется термоупругое напряженное состояние многослойного уплотнительного кольца рабочего колеса центробежного насоса из композиционного материала при тепловом воздействии с заданными физико-механическими характеристиками. Кинематические и статические условия контакта соседних слоев по сопряженным лицевым поверхностям считаются идеальными. Отмечается, что повышение температуры на поверхности композитного уплотнительного кольца существенно влияет на напряженное состояние.*

**Ключевые слова:** физико-механические характеристики, уплотнительное кольцо, композит.

**Введение.** Центробежные насосы, работающие по перекачке легких углеводородов, подвергаются повреждениям. Во-первых, легкие углеводороды не имеют свойств, достаточных для обеспечения смазки между вращающимися и неподвижными деталями. Во-вторых, большинство производственных процессов с такими углеводородами осуществляется при условиях, которые создают вероятность работы насоса “всухую”. С целью устранения повреждения насосов предлагается использовать композиционные материалы для изготовления уплотнений. Насосы, оборудованные деталями из композитов, менее подвержены повреждениям при сбоях производственного процесса. Кроме того, использование деталей из этих материалов дает возможность уменьшать зазор между снаниваемыми кольцами и валом, что повышает устойчивость и эффективность работы. При работе насоса всухую или при контакте вращающихся и неподвижных деталей во время нерасчетного режима детали либо не будут повреждены, либо износ будет существенно меньшим, чем у насосов с металлическими снаниваемыми кольцами. Металлические кольца могут заклиниваться, что приводит к поломкам и вероятности выброса технологической жидкости в атмосферу.

**Методика расчета.** В основу приближенного расчета эффективных упругих характеристик композиционных материалов положен принцип суммирования повторяющихся элементарных слоев [1–4]. Если композит состоит из  $n$  разноориентированных однонаправленных слоев материала, интегральные упругие характеристики рассматриваемого пакета слоев находят из соотношений:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_\alpha \\ \sigma_\beta \\ \sigma_z \\ \tau_{\alpha\beta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{16} \\ & a_{22} & a_{23} & a_{26} \\ & \text{сим.} & a_{33} & a_{36} \\ & & & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_\alpha \\ \varepsilon_\beta \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{\alpha\beta} \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \tau_{\beta z} \\ \tau_{\alpha z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{44} & a_{45} \\ \text{сим.} & a_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{\beta z} \\ \gamma_{\alpha z} \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Здесь  $a_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ij}^{\varphi(k)} \bar{h}^{(k)}$ ;  $\bar{h}^{(k)} = \frac{h^{(k)}}{h}$  ( $k = 1, 2, 3, \dots, n$ ) – относительная толщина

$k$ -го слоя, где  $k$  – номер однонаправленного слоя в пакете многослойного материала;  $n$  – количество слоев;  $\varphi^{(k)}$  – угол между осями общей системы координат и осями локальной системы координат  $k$ -го слоя композита. (Выражения для коэффициентов  $a_{ij}^{\varphi(k)}$  приведены в [1, 2, 4].)

Для определения упругих характеристик многослойного материала рассматривались углепластик, состоящий из 31 слоя со схемой армирования  $[0_2 / 90 / 0_2 / \pm 45 / (0_2 / 90)_2 / \pm 45 / \bar{0}]_S$ , и стеклопластик, состоящий из 21 слоя с продольно-поперечной схемой армирования  $[(0 / 90)_5 / \bar{0}]_S$ . Сравнение значений упругих постоянных указанных материалов с результатами экспериментов [5] было проведено ранее [4]. Различие в значениях интегральных физико-механических характеристик многослойного композита не превышает 15%.

Приведенные коэффициенты теплового линейного расширения всего пакета нетрудно найти с помощью алгоритма (1):

$$\{\varepsilon^t\} = [\alpha] \{t\}, \quad \{\varepsilon_{\alpha 3}^t\} = [\alpha_{\alpha 3}] \{t^\gamma\}, \quad (2)$$

где

$$\{\varepsilon^t\} = \{\varepsilon_\alpha^t, \varepsilon_\beta^t, \varepsilon_z^t, \varepsilon_{\alpha\beta}^t\}^T; \quad \{\varepsilon_{\alpha 3}^t\} = \{\gamma_{\beta z}^t, \gamma_{\alpha z}^t\}^T;$$

$[\alpha]$ ,  $[\alpha_{\alpha 3}]$  – диагональные элементы матрицы коэффициентов теплового линейного расширения 4- и 2-го порядка соответственно.

Пусть между вектором теплового потока и градиентом температуры во всех фазах композиции выполняется линейный закон теплопроводности Фурье. Кроме того, на границах армирующих элементов и связующего, а также на границах соседних однонаправленных слоев реализуется идеальный термомеханический контакт (непрерывность полей температур, перемещений и векторов тепловых потоков). Тогда закон теплопроводности Фурье для ортотропного  $k$ -го слоя запишем в виде

$$\{q^{(k)}\} = -[\lambda^{(k)}] \{t_{,j}^{(k)}\}. \quad (3)$$

Здесь

$$\{q^{(k)}\} = \{q_1^{(k)}, q_2^{(k)}, q_3^{(k)}\}^T; \quad \{t_{,j}^{(k)}\} = \{t_{,1}^{(k)}, t_{,2}^{(k)}, t_{,3}^{(k)}\}^T;$$

$[\lambda^{(k)}]$  – диагональная матрица коэффициентов теплопроводности  $\lambda_{ij}^{(k)}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) 3-го порядка, где  $q_i^{(k)}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – составляющие компоненты вектора теплового потока  $\vec{q}$  в направлении  $i$ -й координатной линии;  $t_{,j}^{(k)}$  ( $j = 1, 2, 3$ ) – составляющие компоненты градиента температуры  $t$ .

Если композит состоит из  $n$  разноориентированных однонаправленных слоев материала, приведенные коэффициенты теплопроводности всего пакета будут  $\lambda = \sum_{k=1}^n \lambda_{ij}^{\varphi(k)} \bar{h}^{(k)}$ . Уплотнительное кольцо рабочего колеса состоит из  $N = 3$  анизотропных слоев с одной плоскостью упругой симметрии и нагружено по цилиндрическим поверхностям  $r = r_a$  и  $r = r_b$  стационарными температурными нагрузками  $t_a(z)$  и  $t_b(z)$ . Полагаем, что температурная нагрузка осесимметрична относительно продольной оси цилиндра. Кольцо представляет собой толстостенный цилиндр длиной  $l$ ,

в торцах которого выполняются условия свободного опирания. Все три слоя имеют одинаковые упругие и физические свойства, которые определяются по методике, предложенной в данной работе. Алгоритм решения поставленной задачи описан ранее [6].

Геометрические параметры многослойного уплотнительного кольца таковы:  $r_a = 0,05$  м;  $r_b = 0,06$  м и  $l = 0,1$  м. В результате контакта вращающихся и неподвижных деталей во время нерасчетного режима возникает тепловая нагрузка на внутренней поверхности:  $t_a(z) = \Delta t \sin(\pi z/l)$ ,  $t_b(z) = 0$ , где  $\Delta t = t_a(l/2) - t_b(l/2)$ . Считается, что изменение температурной нагрузки  $\Delta t$  на лицевых поверхностях оболочки постоянное и равно 80 К.

Рассматриваются два варианта уплотнительных колец, изготовленных из разных композиционных материалов – углепластик и стеклопластик – со схемами армирования  $[0/90_2/90_2/\pm 45/(90_2/0)_2/\pm 45/\bar{0}]_S$  и  $[45/90/\pm 45/(0/90_2)_2/\bar{0}]_S$  соответственно. В таблице приведены физико-механические характеристики композиционных материалов уплотнительного кольца. Из данных таблицы следует, что полученные значения удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными работы [7].

**Физико-механические характеристики дискретных слоев уплотнительного кольца**

Материал	$E_{ij}$ , МПа	$G_{ij}$ , МПа	$\nu_{ji}$	$\alpha_j \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup>	$\lambda_j$ , Вт/(м·К)
Углепластик	$E_z = 45390$	$G_{\theta z} = 12070$	$\nu_{z\theta} = 0,126$	$\alpha_z = 21,8$	$\lambda_z = 4,114$
	$E_\theta = 79210$	$G_{r\theta} = 4113$	$\nu_{\theta r} = 0,308$	$\alpha_\theta = 11,7$	$\lambda_\theta = 7,239$
	$E_r = 13700$	$G_{rz} = 3628$	$\nu_{zr} = 0,312$	$\alpha_r = 13,1$	$\lambda_r = 0,285$
Стеклопластик	$E_z = 23980$	$G_{\theta z} = 11200$	$\nu_{z\theta} = 0,147$	$\alpha_z = 20,5$	$\lambda_z = 0,507$
	$E_\theta = 32470$	$G_{r\theta} = 6378$	$\nu_{\theta r} = 0,335$	$\alpha_\theta = 14,9$	$\lambda_\theta = 0,610$
	$E_r = 14040$	$G_{rz} = 5636$	$\nu_{zr} = 0,338$	$\alpha_r = 25,3$	$\lambda_r = 0,332$

**Примечание.**  $E_{ij}$  – модуль продольной упругости;  $G_{ij}$  – модуль сдвига;  $\nu_{ij}$  – коэффициент Пуассона;  $\alpha_j$ ,  $\lambda_j$  – коэффициенты линейного теплового расширения и теплопроводности.

Максимальные значения тангенциальных нормальных напряжений возникают в точках внутренней лицевой поверхности в средней части уплотнительного кольца. Так, например, нормальные напряжения в продольном направлении  $\sigma_z$  в зависимости от материала кольца изменяются от 31 МПа (стеклопластик) до 69 МПа (углепластик). Напряжения  $\sigma_\theta$  в окружном направлении в кольце из углепластика в 2,6 раза выше соответствующих напряжений в кольце из стеклопластика: 97 МПа (углепластик) и 38 МПа (стеклопластик).

Максимальное значение радиальных напряжений  $\sigma_r$  в кольце из углепластика составляет 0,2 МПа. В кольце из стеклопластика эти напряжения практически отсутствуют и не влияют на его прочность. Следует отметить заметное увеличение касательных напряжений поперечного сдвига  $\tau_{rz}$  в точках срединной поверхности на торцах уплотнительного кольца: 2,2 МПа (углепластик) и 0,9 МПа (стеклопластик).

**Заключение.** Предложена экспериментально-теоретическая методика определения упругих и термоупругих постоянных композиционных материалов. Приведены физико-механические характеристики армированных материалов (стеклопластик, углепластик). На основе дискретно-структурной теории исследовано напряженно-деформированное состояние многослойных уплотнительных колец рабочего колеса при

действию тепловой нагрузки, которая возникает в результате контакта (трения) вращающихся и неподвижных деталей насоса в зоне уплотнения. При этом учитываются как статические, так и кинематические условия взаимодействия сопряженных слоев. Методика решения рассмотренного класса задач позволяет получать расчетные данные для оценки влияния физико-механических характеристик отдельных слоев на термоупругое деформированное состояние неоднородных по толщине цилиндров. Показано, что в менее жестком уплотнительном кольце из стеклопластика тангенциальные напряжения, которые возникают от действия температурной нагрузки, примерно в три раза меньше, чем в кольце из углепластика.

## Резюме

Запропоновано методику визначення фізико-механічних характеристик анізотропного матеріалу з однією площиною пружної симетрії. На основі класичної теорії пружності анізотропного тіла досліджується термопружний напружений стан багатоплощадного ущільнювального кільця робочого колеса відцентрового насоса з композиційного матеріалу при тепловому впливі із заданими фізико-механічними характеристиками. Кінематичні і статичні умови контакту сусідніх шарів по спряжених лицевих поверхнях рахуються ідеальними. Відмічається, що підвищення температури на поверхні композитного ущільнювального кільця суттєво впливає на напружений стан.

1. Алфутов Н. А., Зиновьев П. А., Попов Б. Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
2. Болотин В. В., Новичков Ю. Н. Механика многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
3. Малмейстер А. К., Тамуж В. П., Тетерс Г. А. Сопротивление полимерных и композитных материалов. – Рига: Зинатне, 1980. – 572 с.
4. Верещака С. М. Нелинейное деформирование и устойчивость многослойных элементов конструкций с дефектами структуры. – Сумы: Изд-во Сумского гос. ун-та, 2009. – 286 с.
5. Кучер Н. К., Земцов М. П., Заразовский М. Н. Деформирование слоистых эпоксидных композитов, армированных высокопрочными волокнами // Пробл. прочности. – 2006. – № 1. – С. 41–57.
6. Vereshchaka S. M. and Deineka A. V. Thermal stress state of impeller seal made from composite material // Appl. Mech. Mater. – 2014. – 630. – P. 326–333.
7. Справочник по композитным материалам: В 2 кн. / Под ред. Дж. Любина, Б. Э. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.

Поступила 05. 11. 2015