

УДК 593.3

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЯХ КОНТЕЙНЕРОВ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА И ПОЛИМЕРБЕТОНА, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ ВЫСОКОАГРЕССИВНЫХ СРЕД

© 2012 А.В. Зайцев, А.В. Кислицын, А.В. Кутергин, А.А. Фукалов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 05.12.2012

На основе спрогнозированных эффективных упругих модулей полимербетона и полученного точного аналитического решения задачи о равновесии составного тяжелого горизонтального анизотропного цилиндра, жестко закрепленного по внешней поверхности, исследовано напряженное состояние контейнеров из стеклопластика и полимербетона, которые используются для длительного хранения высокоагрессивных твердых и жидких сред. Проанализировано влияние массовых сил и контактного давления на распределение напряжений в поперечных сечениях, на основе многокритериального подхода проведена оценка начальной прочности.

Ключевые слова: *контейнер, стеклопластик, полимербетон, тяжелый составной анизотропный горизонтальный цилиндр, композит, минеральный наполнитель, многомасштабная модель, аналитические решения, многокритериальная оценка*

Контейнеры для длительного хранения и транспортировки высокоагрессивных твердых и жидких сред – это конструкции ответственного назначения, которые работают в экстремальных условиях силового воздействия продолжительное время. Эти конструкции могут быть изготовлены из стеклопластика и полимербетона. Из-за отсутствия инженерных методик прочностного анализа, учитывающих анизотропию деформационных и прочностных свойств материалов, проблема исследования напряженного состояния и оптимального проектирования таких конструкций актуальна.

Полимербетон – это дисперсно-упрочненный композит, сложную многомасштабную структуру которого составляют диабазовый, мраморный или гранитный щебень (минеральный наполнитель для полиэфирных смол), содержащих мелкодисперсные частицы молотого известняка, кварцевого песка, мраморной, диабазовой муки или цемента. Свойства полимербетонов зависят от их структуры, свойств компонентов, их объемного содержания, степени адгезии матрицы и включений. Прогнозирование эффективных свойств полимербетонов представляет собой самостоятельную задачу, которая может быть решена на основе решения последовательности краевых задач по определению полей напряжений и деформаций для представительных объемов на различных масштабных уровнях, определяемых характерными размерами: неоднородностей случайных полей напряжений и деформаций в частицах наполнителя матрицы,

представительных объемов матрицы, наполненной минеральной мукой, и пространственной гексагональной ячейки периодичности полимербетона, содержащей армирующие минеральные частицы в наполненной матрице.

Определение эффективных упругих модулей квазиизотропной матрицы на основе полиэфирной смолы Виналкид 550 (модуль Юнга и коэффициент Пуассона – $E=5,3$ ГПа и $\nu=0,25$), наполненной мраморной мукой (модули Юнга в плоскости изотропии и в нормальном ей направлении $E=55,0$ ГПа и $\tilde{E}=23,0$ ГПа и коэффициенты Пуассона $\nu=0,29$ и $\tilde{\nu}=0,32$) до концентрации 26%, проводилось на основе численного решения краевых задач в конечно-элементном пакете ANSYS 12.0 для независимых реализаций представительных объемов, характерные размеры которых определялись при помощи метода, предложенного авторами [1-4], а сами пространственные случайные структуры были сгенерированы при помощи алгоритмов [5-8]. Полученные результаты показали, что наполненная матрица статистически изотропна, имеет эффективный модуль Юнга $E=8,276$ ГПа и коэффициент Пуассона $\nu=0,24$, которые попадают в ограничения Фойгта-Рейса и находятся вблизи нижней границы оценки Хашина-Штрихмана. Для проверки этих результатов были также спрогнозированы свойства полимербетонов аналитически в рамках полидисперсных моделей механики композитов [9, 10]. Отклонение численных значений эффективного модуля объемного сжатия матрицы, наполненной мраморной мукой, от аналитической оценки не превышает 5%.

Вычислительные эксперименты в пакете ANSYS 12.0 позволили также определить эффективные упругие модули полимербетона (модули Юнга и коэффициенты Пуассона в плоскости

Зайцев Алексей Вячеславович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций». E-mail: zav@pstu.ru

*Кислицын Антон Владимирович, аспирант
Кутергин Алексей Владимирович, магистрант
Фукалов Антон Александрович, аспирант*

изотропии $E=29,20$ ГПа, $\nu=0,19$ и в нормальном к ней направлении $\hat{E}=27,30$ ГПа и $\hat{\nu}=0,21$), матрица которого – полиэфирная смола Виналкид 550, наполненная мраморной мукой, а армирующая фаза – сферические transversально-изотропные частицы диабазы, образующие пространственную гексагональную структуру с объемной долей минеральных включений 60%.

Контейнеры для хранения высокоагрессивных веществ являются тяжелыми составными цилиндрами, изготовленными из анизотропных материалов. Составные части этих конструкций ограничены цилиндрическими поверхностями радиусов a и b ($a < b$), а поверхность контакта находится на расстоянии c от оси симметрии. Будем считать, что материал обоих цилиндров линейно-упругий однородный, с постоянной плотностью по всему объему, обладает цилиндрической ортотропией. Наиболее распространенными видами нагрузки являются статическое или изменяющееся во времени внешнее и/или внутреннее давление и собственный вес. В простейшем случае, пренебрегая влиянием торцевых нагрузок, контейнер может быть представлен в виде бесконечного составного горизонтального ортотропного цилиндра, жестко закрепленного по внешней поверхности и находящегося в равновесии под действием массовых сил.

В силу бесконечной протяженности цилиндра функции перемещений, деформаций и напряжений не зависят от осевой координаты z , цилиндрической ортогональной системы координат r, θ и z , вследствие чего уравнения равновесия могут быть записаны в следующем виде:

$$D^{(k)} = 1 - 2\mu_{r\theta}^{(k)}\mu_{\theta z}^{(k)}\mu_{zr}^{(k)} - \mu_{r\theta}^{(k)}\mu_{\theta r}^{(k)} - \mu_{\theta z}^{(k)}\mu_{z\theta}^{(k)} - \mu_{zr}^{(k)}\mu_{rz}^{(k)},$$

определяемые модулями Юнга $E_r^{(k)}$, $E_\theta^{(k)}$ и $E_z^{(k)}$ в направлениях r, θ и z , коэффициентами Пуассона $\mu_{r\theta}^{(k)}$, $\mu_{\theta z}^{(k)}$ и $\mu_{zr}^{(k)}$, поперечным модулем сдвига $G_{r\theta}^{(k)}$.

Последовательная подстановка геометрических соотношений Коши

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr}^{(k)} &= \frac{\partial u^{(k)}}{\partial r}, \quad \varepsilon_{\theta\theta}^{(k)} = \frac{u^{(k)}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v^{(k)}}{\partial \theta}, \\ \gamma_{r\theta}^{(k)} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u^{(k)}}{\partial \theta} + \frac{\partial v^{(k)}}{\partial r} - \frac{v^{(k)}}{r} \end{aligned} \quad (3)$$

в определяющие (2), а затем полученного результата в уравнения равновесия (1) позволяет записать неоднородную систему дифференциальных уравнений Ламе в частных производных, которые не приводятся ввиду громоздкости. Граничные условия на жестко закрепленной внешней ($r=b$), свободной от нагрузок внутренней ($r=a$) и контактной ($r=c$) поверхностях

$$u^{(2)}|_{r=b} = v^{(2)}|_{r=b} = 0, \quad \sigma_{rr}^{(1)}|_{r=a} = 0,$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}^{(k)}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}^{(k)}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_{rr}^{(k)} - \sigma_{\theta\theta}^{(k)}}{r} &= \rho^{(k)} \cos \theta, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}^{(k)}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}^{(k)}}{\partial r} + 2 \frac{\tau_{r\theta}^{(k)}}{r} &= -\rho^{(k)} \sin \theta. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\rho^{(k)}$ – удельный вес материала. Все константы и функции будем обозначать верхними индексами 1 и 2 для внутреннего и внешнего цилиндров соответственно. Определяющие соотношения

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^{(k)} &= K_{11}^{(k)} \varepsilon_{rr}^{(k)} + K_{12}^{(k)} \varepsilon_{\theta\theta}^{(k)}, \\ \sigma_{\theta\theta}^{(k)} &= K_{12}^{(k)} \varepsilon_{rr}^{(k)} + K_{22}^{(k)} \varepsilon_{\theta\theta}^{(k)}, \\ \sigma_{zz}^{(k)} &= E_z^{(k)} \left(\frac{\mu_{rz}^{(k)} \sigma_{rr}^{(k)}}{E_r^{(k)}} + \frac{\mu_{z\theta}^{(k)} \sigma_{\theta\theta}^{(k)}}{E_\theta^{(k)}} \right), \\ \tau_{r\theta}^{(k)} &= G_{r\theta}^{(k)} \gamma_{r\theta}^{(k)}, \end{aligned} \quad (2)$$

для тяжелого составного ортотропного осесимметричного тела, находящегося в условиях плоской деформации, содержат коэффициенты

$$\begin{aligned} K_{11}^{(k)} &= \frac{E_r^{(k)}}{D^{(k)}} (1 - \mu_{\theta z}^{(k)} \mu_{z\theta}^{(k)}), \\ K_{12}^{(k)} &= \frac{E_r^{(k)}}{D^{(k)}} (\mu_{r\theta}^{(k)} + \mu_{rz}^{(k)} \mu_{z\theta}^{(k)}), \\ K_{22}^{(k)} &= \frac{E_\theta^{(k)}}{D^{(k)}} (1 - \mu_{rz}^{(k)} \mu_{zr}^{(k)}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{r\theta}^{(1)}|_{r=a} &= 0, \\ u^{(1)}|_{r=c} &= u^{(2)}|_{r=c}, \quad v^{(1)}|_{r=c} = v^{(2)}|_{r=c}, \\ \sigma_{rr}^{(1)}|_{r=c} &= \sigma_{rr}^{(2)}|_{r=c}, \quad \tau_{r\theta}^{(1)}|_{r=c} = \tau_{r\theta}^{(2)}|_{r=c} \end{aligned} \quad (4)$$

не нарушают симметрию задачи, что позволяет применить метод, основанный на разложении компонент вектора перемещений по окружной и радиальной координате в тригонометрические и обобщенные степенные ряды [11-14]. Разложение по окружной координате в тригонометрические ряды

$$\begin{aligned} u^{(k)} &= u_0^{(k)} + u_1^{(k)} \cos \theta + \sum_{i=2}^{\infty} u_i^{(k)} \cos i \theta, \\ v^{(k)} &= v_1^{(k)} \cos \theta + \sum_{i=2}^{\infty} v_i^{(k)} \sin i \theta \end{aligned}$$

позволяет понизить размерность задачи и перейти к последовательности систем обыкновенных дифференциальных уравнений, однородных при $i \neq 1$. Вид граничных условий (3) позволяет сделать вывод о том, что все системы при $i \neq 1$ имеют единственное тривиальное решение: $u_i^{(k)}=0$ и $v_i^{(k)}=0$, а совместное использование метода вариации произвольных постоянных и разложения вектора

перемещений по радиальной координате в обобщенные степенные ряды позволяют получить точное аналитическое решение задачи о равновесии

толстостенного тяжелого составного ортотропного цилиндра с жестко закрепленной внешней поверхностью [13]

$$\begin{aligned} u_1^{(k)} &= (a_1^{(k)} r^{\beta_k} + a_2^{(k)} r^{-\beta_k} + a_3^{(k)} \ln r + a_4^{(k)} + B^{(k)} r^2) \cos \theta \\ v_1^{(k)} &= (a_1^{(k)} \alpha_1^{(k)} r^{\beta_k} + a_2^{(k)} \alpha_2^{(k)} r^{-\beta_k} - a_3^{(k)} \ln r - a_4^{(k)} + A^{(k)} r^2) \sin \theta \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \alpha_1^{(k)} &= \frac{\beta_k (k_k^2 + 1) + p_k^2 + 1}{\beta_k^2 - p_k^2 - 1}, \\ \alpha_2^{(k)} &= -\frac{\beta_k (k_k^2 + 1) - p_k^2 - 1}{\beta_k^2 - p_k^2 - 1}, \\ \beta_k &= \sqrt{n_k^2 + p_k^2 - q_k^2 (2 + k_k^2) + 1}, \\ A^{(k)} &= \frac{(\omega_4^{(k)} \Theta^{(k)} - 1) \rho^{(k)}}{\omega_3^{(k)} G_{r\theta}^{(k)}}, \quad B^{(k)} = \frac{\Theta^{(k)} \rho^{(k)}}{G_{r\theta}^{(k)}}, \\ \Theta^{(k)} &= \frac{\omega_3^{(k)} G_{r\theta}^{(k)} + \omega_{r\theta}^{(k)} K_{11}^{(k)}}{K_{11}^{(k)} (\omega_1^{(k)} \omega_3^{(k)} + \omega_2^{(k)} \omega_4^{(k)})}, \\ \omega_1^{(k)} &= 4 - m_k^2 - n_k^2, \quad \omega_2^{(k)} = 2q_k^2 + m_k^2 - n_k^2, \\ \omega_3^{(k)} &= 3 - p_k^2, \quad \omega_4^{(k)} = 2k_k^2 + p_k^2 + 3, \\ m_k &= \sqrt{\frac{G_{r\theta}^{(k)}}{K_{11}^{(k)}}}, \quad n_k = \sqrt{\frac{K_{22}^{(k)}}{K_{11}^{(k)}}}, \quad q_k = \sqrt{\frac{K_{12}^{(k)}}{K_{11}^{(k)}}}, \\ p_k &= \sqrt{\frac{K_{22}^{(k)}}{G_{r\theta}^{(k)}}}, \quad k_k = \sqrt{\frac{K_{21}^{(k)}}{G_{r\theta}^{(k)}}}. \end{aligned}$$

Постоянные интегрирования $a_1^{(k)}$, $a_2^{(k)}$, $a_3^{(k)}$ и $a_4^{(k)}$, входящие в общее решение (5) неоднородной системы обыкновенных дифференциальных уравнений при $i=1$ определяются первым членом разложения граничных условий (3) в тригонометрический ряд по окружной координате и не приводятся ввиду громоздкости. Подстановка уравнений (5) последовательно в геометрические (4) и определяющие (2) соотношения позволяет записать выражения для напряжений. Обратим внимание на то, что в частном случае для изотропного тяжелого горизонтального толстостенного цилиндра новое решение совпадает с результатами, приведенным в работе [11], а в случае, когда можно пренебречь вкладом массовых сил – совпадает с решением [15].

Поскольку полимербетон и стеклопластик имеют ярко выраженную анизотропию свойств, то прочностной анализ элементов конструкций, изготовленных из таких материалов, необходимо осуществлять на основе многокритериального подхода [16]. Инвариантными относительно ортогональных преобразований, допустимых над цилиндрически ортотропным однородным телом, являются компоненты тензора напряжений в главных осях, которые позволяют описать различные механизмы разрушения от растяжения или сжатия в окружном,

осевом и радиальном направлении, от сдвигов в поперечных плоскостях.

Будем рассматривать контейнер, представляющий собой жестко закрепленное по внешней поверхности цилиндра с геометрическими параметрами: $a=0,3$ м, $c=0,5$ м и $b=0,6$ м, состоящий из внутренней полимербетонной ($E_r^{(1)}=E_\theta^{(1)}=29,2$ ГПа, $E_z^{(1)}=27,3$ ГПа, $G_{r\theta}^{(1)}=11,5$ ГПа, $\mu_{r\theta}^{(1)}=0,19$, $\mu_{rz}^{(1)}=0,21$ и $\gamma^{(1)}=25$ кН/м³) и внешней стеклопластиковой ($E_r^{(2)}=11,8$ ГПа, $E_\theta^{(2)}=56,8$ ГПа, $E_z^{(2)}=15,7$ ГПа, $G_{r\theta}^{(2)}=9,8$ ГПа, $\mu_{\theta r}^{(2)}=0,06$, $\mu_{rz}^{(2)}=0,38$, $\mu_{z\theta}^{(2)}=0,21$ и $\gamma^{(2)}=19$ кН/м³) составных частей. На рис. 1 и 2 представлены распределения ненулевых компонент тензора напряжений в поперечных сечениях контейнеров, вызванные массовыми силами и внутренним давлением $p=0,4$ МПа, вдоль меридиональной и обезразмеренной радиальной $\tilde{\rho}=(r-\rho_1)/(\rho_2-\rho_1)$ координаты.

Вклад массовых сил в распределение напряжений для конструкции контейнера заданной геометрии не превышает 5%. Касательные напряжения, возникающие в поперечных сечениях, определяются исключительно массовыми силами, в результате чего их величина не зависит от заданного равномерного давления (рис. 1). Радиальные напряжения по абсолютной величине убывают от нагруженной давлением внутренней к закрепленной внешней поверхности. Окружные и осевые напряжения имеют скачок на поверхности контакта.

В процессе формирования элементов конструкций из стеклопластика существует ряд факторов, которые приводят к возникновению собственных технологических напряжений: различие в геометрии отдельных частей, приводящее к натягу, технологическое натяжение волокон (обязательное условие при формировании волокнистого материала), которое после намотки нескольких слоев стеклопластикового цилиндра проявляется в виде давления по поверхности контакта [17]; усадка связующего при отверждении и др. Определение закона распределения собственных технологических напряжений в поперечных сечениях является самостоятельной задачей, которая выходит за рамки данного исследования. Однако для оценки начальной прочности контейнера с учетом этого фактора будем предполагать, что технологические напряжения известны, имеют единственную, отличную от нуля, радиальную составляющую (контактное давление p_c) и равномерно распределены только по поверхности сопряжения внутреннего и внешнего цилиндров.

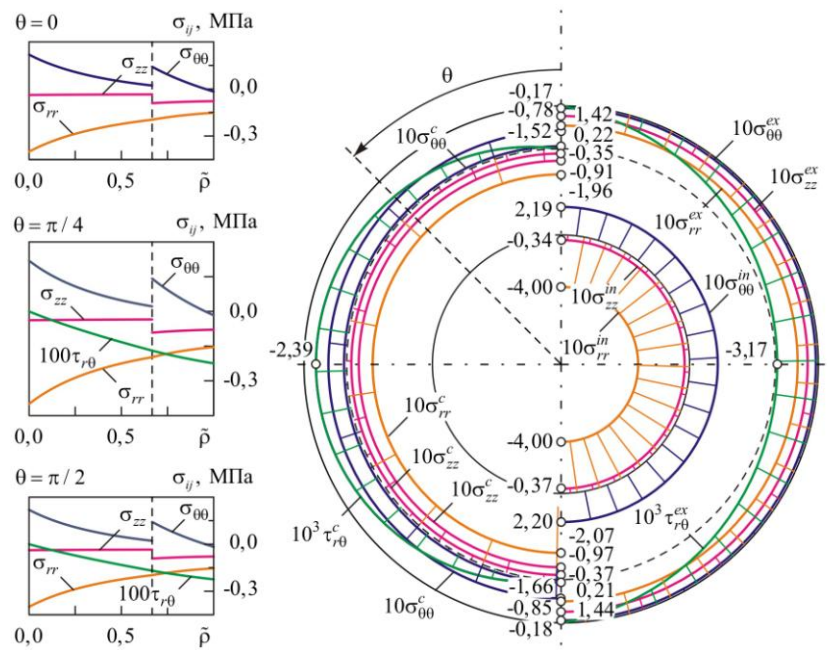


Рис. 1. Распределение напряжений (МПа) на нагруженной давлением $p=0,4$ МПа внутренней σ_{ij}^{in} , закрепленной внешней σ_{ij}^{ex} и контактной σ_{ij}^c поверхности контейнера

Наибольший вклад в распределение напряжений в поперечных сечениях контейнера, вызванных сочетанием нескольких факторов, вносит контактное давление $p_c = 1,96$ МПа (рис. 2). Наибольшие по абсолютной величине значения радиальных, окружных и осевых напряжений достигаются на верхнем и нижнем сводах цилиндрического контейнера и, следовательно, эти точки являются наиболее опасными с точки зрения возможности

начала разрушения, от растяжения или сжатия в соответствующем направлении. В свою очередь, максимумы касательных напряжений лежат в горизонтальной диаметральной плоскости, что с точки зрения оценки начальной прочности свидетельствует о возможности начала разрушения контейнера по механизму сдвига в диаметральной плоскости.

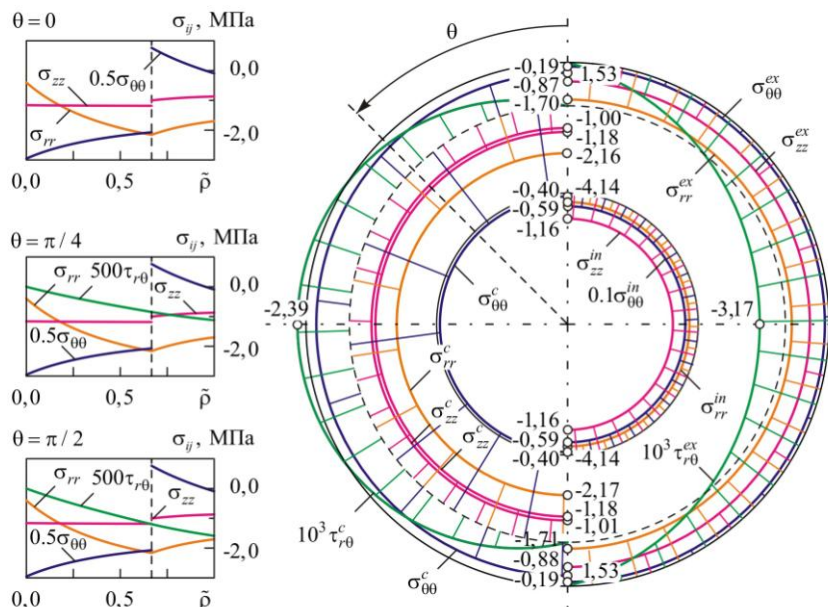


Рис. 2. Распределение напряжений (МПа) на нагруженной давлением $p=0,4$ МПа внутренней σ_{ij}^{in} , закрепленной внешней σ_{ij}^{ex} и контактной σ_{ij}^c поверхности контейнера, с учетом контактного давления

Выводы: несмотря на то, что вклад массовых сил в напряженное состояние контейнера из стеклопластика и полимербетона не превышает

5%, полученное аналитическое решение позволяет учесть еще и неоднородные реакции основания [14], а также любые другие нагрузки, симметричные

относительно вертикальной диаметральной плоскости, которые можно разложить в тригонометрические ряды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Зайцев, А.В. Статистическое описание структуры двухфазных волокнистых композитов / А.В. Зайцев, А.В. Лукин, Н.В. Трефилов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2002. № 10. С. 52-62.
2. Зайцев, А.В. Корреляционные функции случайных структур двухфазных волокнистых композитов, синтезированных методом статистических испытаний / А.В. Зайцев, А.В. Лукин, Н.В. Трефилов // Вестник ПГТУ. Аэрокосмическая техника. 2002. Вып. 14. С. 3-7.
3. Зайцев, А.В. Закономерности случайных полей структуры двухфазных композитов с эллиптическими в поперечном сечении волокнами / А.В. Зайцев, М.С. Костюсов, А.В. Лукин // Вестник ПГТУ. Аэрокосмическая техника. 2003. № 15. С. 3-10.
4. Зайцев, А.В. Закономерности скейлинга в случайных полях структуры однонаправленно армированных волокнистых композитов / А.В. Зайцев, А.В. Лукин, Н.В. Трефилов // Физическая мезомеханика. Спецвыпуск. Ч. 1. 2004. Т. 7. С. 58-61.
5. Зайцев, А.В. Случайные структуры двухфазных композитов: синтез, закономерности, новая оценка характерных размеров представительных объемов / А.В. Зайцев, А.В. Лукин, А.А. Ташинов, Н.В. Трефилов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2004. № 12. С. 30-44.
6. Зайцев, А.В. Компьютерный синтез, закономерности случайных структур и моделирование процессов разрушения волокнистых композитов при продольном сдвиге / А.В. Зайцев, А.В. Лукин, Н.В. Трефилов // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7, № 5. С. 73-79.
7. Зайцев, А.В. Новый метод построения моментных функций второго порядка случайной структуры полимербетон / А.В. Зайцев, Я.К. Покатов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2007. № 15. С. 28-45.
8. Зайцев, А.В. Общие закономерности структуры, случайных полей напряжений и деформаций в волокнистых и дисперсно-упрочненных композитах / А.В. Зайцев, А.В. Кислицын, В.С. Кокищаров // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4. Ч. 4. С. 1485-1487.
9. Зайцев, А.В. Эффективные упругие модули двухфазных композитов на основе термореактивных смол с минеральным наполнителем / А.В. Зайцев, А.В. Новгородова, Д.И. Федоров // Вестник ПГТУ. Аэрокосмическая техника. 2005. № 25. С. 62-68.
10. Зайцев, А.В. Эффективные модули объемного сжатия дисперсно-упрочненных композитов со сплошными и полыми анизотропными сферическими включениями / А.В. Зайцев, А.А. Фукалов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2010. №4. С. 46-54.
11. Кузнецов, Г.Б. Упругость, вязкоупругость и длительная прочность цилиндрических и сферических тел. – М.: Наука, 1979. 112 с.
12. Зайцев, А.В. Упругое равновесие тяжелой трансверсально-изотропной толстостенной сферы с жестко закрепленной внутренней поверхностью / А.В. Зайцев, А.А. Фукалов // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2010. №5(21). С. 85-95.
13. Зайцев, А.В. Упругое равновесие тяжелого горизонтального толстостенного ортотропного цилиндра, находящегося под действием неравномерно распределенного бокового давления / А.В. Зайцев, А.В. Кутергин // Вестник ПНИПУ. Механика. 2010. №4. С. 36-45.
14. Фукалов, А.А. Точные аналитические решения задач о равновесии упругих анизотропных тяжелых тел с центральной и осевой симметрией и их приложения / А.А. Фукалов, А.В. Кутергин // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4. Ч. 4. С. 1831-1833.
15. Зайцев, А.В. Об одном решении задачи Ламе для составного протяженного элемента конструкции, состоящего из посаженных с натягом толстостенного трансверсально-изотропного внешнего цилиндра на соосный изотропный внутренний / А.В. Зайцев, А.В. Кислицын // Вестник СамГТУ. Физико-математические науки. 2007. № 1(14). С. 164-167.
16. Вильдеман, В.Э. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / В.Э. Вильдеман, Ю.В. Соколкин, А.А. Ташинов. – М.: Наука, 1997. 288 с.
17. Цыплаков, О.Г. Научные основы технологии композиционно-волокнистых материалов. Ч. 1. – Пермь: Пермское кн. изд-во, 1974. 316 с.

STRESS DISTRIBUTION IN A CROSS SECTION OF CONTAINER FOR LONG-TERM STORAGE OF HIGH-CORROSIVE MEDIA

© 2012 A.V. Zaitsev, A.V. Kislitsyn, A.V. Kutergin, A.A. Fukalov

Perm National Research Polytechnical University

On the basis of the predicted effective elastic moduli for polymer concrete and obtained new exact analytical solutions to problem on equilibrium state of thick-walled heavy combined horizontal anisotropic cylinder, which is fixed on external lateral surface, the stress states of containers for long-term storage of high-corrosive solid and liquid media were investigated. External cylinders of containers were usually produced by fiber-glass plastics and coaxial internal one by polymer concrete. Influence of gravity forces and contact pressure on distribution of stresses in cross-sections is analysed, and an initial strength analysis of containers was cared out on the basis of multicriteria approach.

Key words: container, fiber-glass, heavy combined horizontal anisotropic cylinders, composite, mineral aggregates, multiscale model, analytical solutions, multicriteria analysis

Aleksey Zaitsev, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department "Mechanics of Composite Materials and Constructions". E-mail: zav@pstu.ru; Anton Kislitsyn, Post-graduate Student; Aleksey Kutergin, Master Student; Anton Fukalov, Post-graduate Student