

задачи в первом приближении. Снова перейдем на параметрическую плоскость комплексного переменного  $\zeta$  с помощью преобразования  $z = \omega(\zeta)$ . С помощью полученных соотношений и представления (1), как и в нулевом приближении, находим напряжения в первом приближении. Условие разрешимости краевой задачи служит для определения размера  $a$ .

В случае заданной функции  $h(\theta)$  формы отверстия полученные соотношения являются замкнутыми и позволяют исследовать напряженно-деформированное состояние тела в условиях антиплоской деформации.

Для построения недостающих уравнений, позволяющих определить искомые коэффициенты ряда Фурье, надо найти окружное тангенциальное напряжение  $\tau_{z\theta}$  на контуре отверстия. С помощью полученного решения находим  $\tau_{z\theta}$  в поверхностном контуре  $L$  с точностью до величин первого порядка относительно малого параметра  $\varepsilon$ .

Напряжение  $\tau_{z\theta}$  зависит от коэффициентов ряда Фурье искомой функции  $h(\theta)$ . Для построения недостающих уравнений, позволяющих найти эти коэффициенты, требуем, чтобы обеспечивалось распределение напряжений на контуре отверстия согласно условию (2) равнопрочности. Снижение концентрации напряжений на контуре отверстия осуществляем путем минимизации критерия

$$U = \sum_{i=1}^M [\tau_z \theta(\theta_i) - \tau_*]^2 \rightarrow \min.$$

Здесь  $\tau_*$  – оптимальное значение окружного тангенциального напряжения в поверхностном слое отверстия; для упругого материала подлжит определению в процессе решения задачи оптимизации. В случае упругопластического материала тела  $\tau_*$  – заданная величина.

Используя необходимое условие экстремума нескольких переменных, получаем бесконечную линейную систему уравнений для определения искомых величин. Эта система совместно с полученными соотношениями задачи теории упругости в нулевом и первом приближениях позволяет определить форму равнопрочного контура, напряженно-деформированное состояние тела, а также оптимальное значение окружного тангенциального напряжения  $\tau_*$  для случая упругого материала.

Условие хрупкого разрушения (условие роста трещины) запишем в виде

$$\tau_* (K_{III}) = \tau_c. \quad (6)$$

Здесь  $\tau_c$  зависит от характерного размера отверстия в кончике трещины и характеристик материала.

#### Список литературы

- 1 Финкель, В. М. Физические основы торможения разрушения / В. М. Финкель. – М. : Metallurgia, 1977. – 360 с.
- 2 Мирсалимов, В. М. Влияние разгружающих отверстий на развитие трещины / В. М. Мирсалимов // Проблемы прочности. – 1971. – Т. 3, № 4. – С. 18–19.
- 3 Мирсалимов, В. М. Об одном способе торможения растущих трещин / В. М. Мирсалимов // Изв. АН Азерб. ССР. Сер. физ.-техн. и мат. наук. – 1972. – № 1. – С. 34–38.
- 4 Мустафаев, А. Б. Оптимизация формы отверстия для остановки трещины продольного сдвига / А. Б. Мустафаев // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2021. – Ч. 2. – С. 169–171.
- 5 Мирсалимов, В. М. Разрушение упругих и упругопластических тел с трещинами / В. М. Мирсалимов. – Баку : Элм, 1984. – 124 с.

УДК 620.174

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИИМИДНОГО ПЕНОПЛАСТА

*М. Ю. КАЛЯГИН, Л. Н. РАБИНСКИЙ, С. А. ШУМСКАЯ*  
*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

Работа посвящена исследованию полиимидного пенопласта с разной пористостью. Подобные материалы широко применяются в различных сферах авиастроения, судостроения, приборостроения и транспортного машиностроения [1–9]. В особенности они хорошо зарекомендовали себя в качестве вспененного заполнителя при изготовлении многослойных деталей и элементов техники, в

которой используются композиционные материалы. В работе рассматривался акриמיד полученный по технологии вспенивания на основе поли(мет)акриламида с разной плотностью. Были получены образцы с различной пористостью. Проведено исследование микроструктуры акримида. Определен размер пор и их распределение по объему. Проведены испытания на 3-точечный изгиб, по результатам которых были получены значения модуля упругости и предела прочности.

В ходе исследования были проведены исследования структуры акримида и механические испытания образцов на изгиб. По результатам исследования микроскопии определены характерный размер пор и их распределение. Размер пор отличается на 9 % между образцами с плотностями 80 кг/м<sup>3</sup> и 100 кг/м<sup>3</sup>. Образцы испытывались на трехточечный изгиб, где результат показал значительное влияние пористости на модуль упругости материалов. Для материалов с плотностью 80 кг/м<sup>3</sup> модуль упругости составляет порядка 136 МПа, с плотностью 100 кг/м<sup>3</sup> – 159 МПа. При этом предел прочности для материалов с плотностью 80 кг/м<sup>3</sup> составляет 2,5 МПа, с 100 кг/м<sup>3</sup> – 3 МПа. Проведено численное моделирование в квазистатической постановке. Результат, полученный при численном моделировании, хорошо согласуется с результатом, полученным входе экспериментального исследования.

*Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-49-00133 со стороны РФ, проект № 12261131505 со стороны Китая).*

#### Список литературы

- 1 Построение системы теплозащиты из углеродных композиционных материалов с покрытиями для теплонапряженных конструкций двигателей летательных аппаратов / В. А. Сорокин [и др.] // Труды МАИ. – 2015. – № 84. – С. 11.
- 2 **Калягин, М. Ю.** Моделирование приборных отсеков летательных аппаратов пористо-смесевыми ударниками / М. Ю. Калягин // Труды МАИ. – 2018. – № 98. – С. 8.
- 3 **Бабайцев, А. В.** Методика приближенной оценки напряжений в толстостенной осесимметричной композитной конструкции / А. В. Бабайцев // Труды МАИ. – 2019. – № 107. – С. 4.
- 4 **Русланцев, А. Н.** Модель напряженно-деформированного состояния криволинейной слоистой композитной балки / А. Н. Русланцев, А. М. Думанский, М. А. Алимов // Труды МАИ. – 2017. – № 96. – С. 1.
- 5 **Берлин, А. А.** Современные полимерные композиционные материалы / А. А. Берлин // Соросовский образовательный журнал. – 1995. – № 1. – С. 2.
- 6 **Матренин, С. В.** Композиционные материалы и покрытия на полимерной основе : учеб. пособие / С. В. Матренин, Б. Б. Овечкин. – Томск : ТПУ, 2008. – 198 с.
- 7 **Ташкинов, М. А.** Моделирование влияния микромасштабных морфологических параметров на деформационное поведение пористых материалов с металлической матрицей / М. А. Ташкинов, А. С. Шалимов. // Физ. мезомех. – 2021. – № 5.
- 8 Динамические характеристики трехслойных балок с несущими слоями из алюмокомпозитного пластика / О. А. Прокудин [и др.] // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2020. – № 4. – DOI : 10.15593/perm.mech/2020.4.22.
- 9 **Vasiliev, V. V.** Advanced mechanics of composite materials and structures / V.V. Vasiliev, E.V. Morozov // Elsevier. – 2018.

УДК 539.3

### К ПОСТРОЕНИЮ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВЯЗКОУПРУГОГО КОМПОЗИЦИОННОГО СЛОИСТОГО СТЕРЖНЯ

*А. М. КАРИМОВ, А. АБДУСАТТАРОВ*

*Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан*

В данной статье решается динамическая задача линейной теории вязкоупругости для слоистого стержня периодической структуры методом осреднения [1–3], который учитывает микроперемещения, обусловленные структурой композита. Рассматривается колебательный процесс в слоистом композиционном стержне, состоящем из двух чередующихся однородных изотропных вязкоупругих материалов с различными функциями релаксации, плотностью и толщинами

$$\{R(x,t), \rho(x)\} = \begin{cases} R_1(x), \rho_1, & \text{если } nl < x < nl + l_1, \\ R_2(x), \rho_2 & \text{если } nl + l_1 < x < (n+1)l, \end{cases} \quad (1)$$

$n = \dots - 1, 0, 1, \dots$ ,  $l = l_1 + l_2$ ,  $l_1$  и  $l_2$  – толщина слоев, соответственно.