

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
РАЗНОМОДУЛЬНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ
С МЕЛКОДИСПЕРСНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ**

А.Ю. ЕРШОВА, кандидат технических наук, доцент
М.И. МАРТИРОСОВ, кандидат технических наук, доцент
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) МАИ
125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Yershova_A@mail.ru

В статье представлено экспериментальное изучение механических характеристик нового вида мелкозернистых полимерных композитов – литьевого искусственного камня, показано, что материал является разномодульным, идентифицирована модель, описывающая влияние вида напряженного состояния на свойства материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экспериментальные исследования, разномодульность, полимерные композиционные материалы, зернистые композиты, литьевой искусственный камень.

Работа посвящена экспериментальному изучению нового вида зернистых композиционных материалов на полиэфирной основе – литьевого искусственного камня. ЛИК представляет собой конструкционный композиционный мате-

риал, основными компонентами которого являются ненасыщенная полиэфирная смола и инертный зернистый наполнитель [1, 2]. Для определения механических характеристик нового класса зернистых композитов – литьевого искусственного камня - были определены оптимальные формы и размеры образцов, разработаны методики проведения эксперимента [3, 4]. Для проведения экспериментальных исследований по определению механических свойств ЛИК в данной работе использовалась современная универсальная испытательная машина ZWICK Z100 (Германия).

Проведенные экспериментальные исследования по определению механических характеристик ЛИК показали различные значения упругих механических характеристик исследуемого материала при растяжении и сжатии. Среднее значение модуля упругости при растяжении составляет $E = 15\,216$ МПа, среднее значение коэффициента Пуассона при растяжении составляет $\mu = 0,0,276$. Средние значения при сжатии составляют соответственно $E = 21445$ МПа и $\mu = 0,398$ [3]. Таким образом, можно говорить о том, что литевой искусственный камень можно отнести к материалам, чувствительным к виду напряженного состояния – разномодульным материалам. Используя сделанный вывод о принадлежности исследуемого материала к разряду разносопротивляющихся материалов, следует говорить о том, что для адекватной оценки напряженно-деформируемого состояния исследуемого материала следует использовать некоторые обобщения классической теории упругости, в которых учитывается зависимость свойств материала от вида напряженного состояния.

Разномодульность материалов связывается обычно с различием диаграмм деформирования при простом растяжении и сжатии. Исследуемый материал представляет собой мелкозернистый композитный материал. Тело, содержащее щелевидную трещину, при растяжении в перпендикулярном плоскости трещины направлении имеет большую податливость, чем при сжатии, поскольку при сжатии берега трещины смыкаются. В разномодульном материале трещины или поры распределены по объему материала и имеют различную ориентацию. Эти поры могут раскрываться в условиях растягивающих напряжений и закрываться при сжимающих напряжениях. Если характер пористости, а также упругие свойства частиц наполнителя и связующего таковы, что при сжатии площадь контакта частиц увеличивается, то естественно ожидать, что диаграмма сжатия будет лежать выше диаграммы растяжения. Это наблюдалось и у исследуемого ЛИК в ходе анализа диаграмм растяжения-сжатия [3].

Определение модуля упругости по таким диаграммам может быть связано со значительной погрешностью. Данные о различии модулей упругости при растяжении и сжатии чаще всего относятся к некоторым секущим модулям, в то время как начальный наклон диаграмм растяжения и сжатия один и тот же. Таким образом, под упругой разномодульностью следует понимать различие в значениях соответствующих секущих модулей при линейной аппроксимации криволинейных диаграмм. Это явление свойственно многим композитным материалам, некоторым конструкционным графитам, полимербетонам, чугунам, магниевым и алюминиевым сплавам, термопластам, углеродистой стали при низких температурах [5, 6, 7].

Из анализа существующих теорий разномодульных материалов [5, 6, 7] можно сделать вывод, что наиболее подходящей для описания напряженно-деформируемого состояния литьевого искусственного камня будут предложенные Ломакиным Е.В. соотношения [7].

Определяющие соотношения основаны на обобщении классического упругого потенциала, характеризующего зависимость свойств материала от вида напряженного состояния [6, 7].

Если исходить из потенциала работы деформации, то в качестве параметра, характеризующего вид напряженного состояния, следует взять отношение среднего напряжения к интенсивности напряжений. Выражение для потенциала должно включать в себя как частный случай потенциал для классического упругого тела, который можно записать в виде

$$\Phi = \frac{1}{2} [1 + \zeta(\xi)] (A + B\xi^2) \sigma_0^2, \quad \xi = \frac{\sigma}{\sigma_0}; \quad \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}; \quad \sigma_0 = \sqrt{3s_{ij}s_{ij}/2}, \quad (1)$$

где σ - среднее напряжение, σ_{ij} - компоненты тензора напряжений; δ_{ij} - символ Кронекера; σ_0 - интенсивность напряжений; $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_{ij} \delta_{ij}$ - компоненты девиатора напряжений; A и B - постоянные материала; функция $\zeta(\xi)$ определяет свойства материала. Отметим, что при $\zeta(\xi) = 0$ потенциал (1) совпадает с потенциалом для классического упругого тела.

Из (1) вытекает следующая зависимость между деформациями ε_{ij} и напряжениями:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} = \varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \omega(\xi) s_{ij} + \frac{1}{3} \Omega(\xi) \sigma \delta_{ij} \quad (2)$$

где $\omega(\xi) = -\frac{1}{2} \zeta'(\xi) (A + B\xi^2) \xi + A(1 + \zeta(\xi))$, $\Omega(\xi) = \frac{1}{2\xi} \zeta'(\xi) (A + B\xi^2) + B(1 + \zeta(\xi))$.

Далее принимаем $\zeta(\xi) = C\xi$. (3)

В работе [7] показано, что подобное упрощение приемлемо для многих практических задач по оценке напряженно-деформированного состояния элементов конструкций из разномодульных материалов.

Функции $\omega(\xi)$ и $\Omega(\xi)$ в этом случае принимают вид:

$$\omega(\xi) = -\frac{1}{2} \xi (A + B\xi^2) C + A(1 + C\xi), \quad (4)$$

$$\Omega(\xi) = \frac{1}{2\xi} (A + B\xi^2) C + B(1 + C\xi). \quad (5)$$

Для идентификации постоянных материала используем результаты измерений продольной и поперечной деформации в испытаниях на растяжение и сжатие. Для одноосного растяжения можно записать:

$$\sigma = \frac{1}{3} \sigma_1, \quad \sigma_0 = \sigma_1, \quad \xi = \frac{1}{3}, \quad s_{11} = \frac{2}{3} \sigma_1, \quad s_{22} = s_{33} = -\frac{1}{3} \sigma_1,$$

где σ_1 - растягивающее напряжение, задаваемое в эксперименте.

Далее после подстановки параметров нагружения в (2)-(5) из соотношений для компонент тензора деформаций получаем два уравнения для определения постоянных материала:

$$\frac{1}{E^+} = A(1 + \frac{1}{3}C) + \frac{1}{9}(1 + \frac{1}{3}C); \quad (6)$$

$$\frac{\mu^+}{E^+} = -\frac{1}{4}(A + \frac{1}{9}B) + \frac{1}{2}A(1 + \frac{1}{3}C) + \frac{1}{9}B(1 + \frac{1}{3}C), \quad (7)$$

где E^+ и μ^+ - экспериментальные значения модуля упругости и коэффициента, полученные в испытаниях на растяжение.

Для случая одноосного сжатия для параметров нагружения справедливы следующие соотношения:

$$\sigma = -\frac{1}{3} \sigma_1, \quad \xi = -\frac{1}{3}, \quad s_{11} = -\frac{2}{3} \sigma_1, \quad s_{22} = s_{33} = \frac{1}{3} \sigma_1,$$

где σ_1 - абсолютное значение сжимающего напряжения.

Подстановка параметров нагружения в (2)-(5) и анализ соотношений для продольной и поперечной деформации приводит ко второй паре уравнений для определения постоянных материала:

$$\frac{1}{E^-} = A\left(1 - \frac{1}{3}C\right) + \frac{1}{9}B\left(1 - \frac{1}{3}C\right); \quad (8)$$

$$\frac{\mu^-}{E^-} = \frac{1}{4}\left(A + \frac{1}{9}B\right) + \frac{1}{2}A\left(1 - \frac{1}{3}C\right) - \frac{1}{9}B\left(1 - \frac{1}{3}C\right), \quad (9)$$

где E^- и μ^- - экспериментальные значения модуля упругости и коэффициента Пуассона, полученные в испытаниях на сжатие.

Уравнения (6) – (9) позволяют найти постоянные A , B , C . При этом необходимо учитывать, что величины μ^+ , μ^- , E^+ , E^- должны быть связаны между собой равенством [7]:

$$\mu^+ / E^+ = \mu^- / E^-. \quad (10)$$

Найденные экспериментальные величины модулей упругости и коэффициентов Пуассона ($E^+ = 14300$ МПа, $\mu^+ = 0,276$, $E^- = 21445$ МПа, $\mu^- = 0,398$) показывают, что это равенство приближенно выполняется. Это дает возможность исключить из системы (6) – (9) одно уравнение. Решение системы из трех уравнений (6), (8) и (9) приводит к следующему результату.

$$A = 4,661 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}, \quad B = 8,612 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}, \quad C = 0,51.$$

Выводы

Выявлено, что ЛИК проявляет существенную зависимость упругих характеристик от вида напряженного состояния. Для описания этих свойств предложено использовать простейший вариант теории упругости разномодульных изотропных материалов. Найденны коэффициенты определяющих соотношений для исследуемого материала. Таким образом, можно говорить о том, что литевой искусственный камень можно отнести к материалам, чувствительным к виду напряженного состояния – разномодульным материалам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ (код проекта НШ-2047.2012.8)

Л и т е р а т у р а

1. *Ершова А.Ю., Мартиросов М.И.* Литевой искусственный камень: особенности, преимущества, перспективы // *Материалы XIII международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», Тезисы докладов.* – М.: Изд. МАИ, 2007. – С.109– 110.
2. *Ершова А.Ю., Мартиросов М.И.* Экспериментально-теоретические исследования по определению механических свойств дисперсно-упрочненных композитов на полиэфирной основе // *Материалы XXI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова.* – Т.1. – М.:МАИ, 2015. – С.81– 82.
3. *Ершова А.Ю., Мартиросов М.И.* Экспериментальные исследования полимерных композитов с мелкодисперсным наполнителем (испытания на растяжение-сжатие)// *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* – 2014.–№5. – С.61-69.
4. *Ершова А.Ю., Мартиросов М.И.* Экспериментальные исследования полимерных композитов с мелкодисперсным наполнителем (испытания на изгиб)// *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* – 2015. – № 2. – С.75 – 80.
5. *Амбарцумян С.А.* Разномодульная теория упругости. – М.: Наука, 1981. – 278 с.
6. *Ломакин Е. В., Работнов Ю. Н.* Соотношения теории упругости для изотропного разномодульного тела // *Изв. АН СССР МТТ.* – 1978. № 6. – С.29 – 38.
7. *Ломакин Е.В.* Определяющие соотношения механики разномодульных материалов. – Препринт № 159. М.: ИПМ АН СССР. – 1980. – 64 с.

References

1. *Ershova, A.Yu, Martirosov, M.I.* (2007). Molding artificial stone: features, advantages, prospects. Proceedings of the XIII International Symposium "Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continua": Abstracts. Moscow: MAI, p. 109-110.
2. *Ershova, A.Yu, Martirosov, M.I.* (2015). Experimental and theoretical studies to determine the mechanical properties of dispersion-strengthened composites polyester-based. Proceedings of the XXI International Symposium "Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continua" to them. A. G. Gorshkov. Vol.1, Moscow: MAI, p.81-82.
3. *Ershova, A.Yu, Martirosov, M.I.* (2014). Experimental studies of polymer composites with fine filler (test expansion-comprssion). *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No. 5, p.61-69.
4. *Ershova, A.Yu, Martirosov, M.I.* (2015). Experimental studies of polymer composites with fine filler (bending tests). *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No. 2, p.75-80.
5. *Ambartsumyan, S. A.* (1981). *Heterogeneous Elasticity Theory*, Moscow: Nauka, 278p.
6. *Lomakin, E. V., Rabotnov, Y. N.* (1978). Relations of the theory of elasticity for isotropic heterogeneous body, *Izv. AN SSSR. MTT*, No. 6, p. 29-38.
7. *Lomakin, E. V.* (1980). Denning relations of mechanics of heterogeneous materials. *Preprint No. 159. Moscow: IPM AN SSSR*, 64 p.

**EXPERIMENTAL STUDY HETEROGENEOUS POLYMER COMPOSITES
WITH FINELY DIVIDED FILLER**

A.U. YERSHOVA, M.I. MARTIROSOV

Moscow Aviation Institute (National Research University)

This article presents an experimental study of the mechanical characteristics of a new type of fine-grained polymer composites molding artificial stone. It is shown that the material is heterogeneous, the identified model describing the effect of stress on the material properties

KEY WORDS: experimental studies, heterogeneous, polymer composites, granular composites, injection molding artificial stone.

