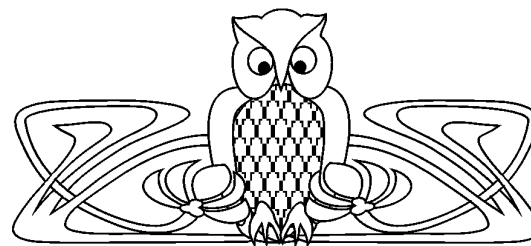




УДК 541.8

РАЗНОСОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ЗЕРНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НЕНАСЫЩЕННЫХ ПОЛИЭФИРОВ



Д.Е. Бессонов, Ю.П. Зезин*, Е.В. Ломакин

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, механико-математический факультет,
кафедра теории пластичности

*Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова
E-mail: denlandmex@yandex.ru, yuzezin@gmail.com,
lomakin@mech.math.msu.su

**Multimodulus Behavior of the Grained Composites on the Base
of Unsaturated Polyetheres**

D.E. Bessonov, Yu.P. Zezin, E.V. Lomakin

Lomonosov Moscow State University,
Chair of Theory of Plasticity;

*Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University
E-mail: denlandmex@yandex.ru, yuzezin@gmail.com,
lomakin@mech.math.msu.su

Представлены результаты исследования упругих свойств зернистого композита на основе ненасыщенных полиэфиров, предназначенного для замены природного камня в строительстве и машиностроении. Получены экспериментальные значения модуля упругости и коэффициента Пуассона при растяжении и сжатии. Показано, что исследуемый композит проявляет существенную зависимость упругих характеристик от вида напряженного состояния. Для описания свойств материала предложено использовать простейший вариант теории упругости разномодульных изотропных материалов, основанной на обобщении классического упругого потенциала на случай зависимости упругих характеристик от вида напряженного состояния. Для исследуемого композита определены постоянные величины, входящие в определяющие соотношения теории. Показано, что принятые соотношения позволяют получить расчетные значения упругих характеристик материала при растяжении и сжатии, близкие к экспериментальным.

The results of the investigation of elastic properties of grained composite based on the unsaturated polyetheres were presented. This material was designed to substitute natural rocks in civil and mechanical engineering. The experimental values of elastic modulus and the Poisson's ratio under the tension and compression were obtained. It was shown that the investigated composite exhibits the dependence of elastic properties on the type of the stress state. It was suggested to use the simplest version of the theory of multimodulus isotropic materials in order to describe of the properties of these materials. This theory is based on the generalization of the classic isotropic potential for the case of the dependence of elastic properties on the type of the stress state. The parameters of the constitutive equations for the investigated composite were determined. The satisfactory correspondence between the values of the elastic deformation properties of the material calculated on the base of the considered constitutive equations and the experimental data was demonstrated.

Ключевые слова: композиционные материалы, композиты полимерные, механические свойства, растяжение, сжатие, упругость, разносопротивляемость, определяющие соотношения.

Key words: composite materials, polymeric composites, mechanical properties, tension, compression, elasticity, multimodulus behavior, constitutive equation.

ВВЕДЕНИЕ

Зернистые композиты на основе полимеров широко применяются в различных отраслях современной техники. По сравнению с традиционными металлами, бетоном, природным камнем полимерные композиты обладают рядом существенных преимуществ. Основным достоинством композитов является высокий уровень их удельных характеристик, высокая технологичность, значительно меньшая энергоёмкость производства элементов конструкций из этих материалов. Указанные преимущества в полной мере относятся и к относительно новому классу зернистых композитов на основе ненасыщенных полиэфиров, предназначенных для замены природного камня в строительстве и машиностроении [1]. Одна из перспективных областей применения подобных материалов — изготовление элементов оснований для оборудования нанотехнологий. В этом случае практически полное отсутствие радиационного фона, существенно влияющего на ряд процессов нанотехнологий, является решающим преимуществом композитов по сравнению с натуральным камнем.

Замена традиционных материалов на композиты всегда сопровождается значительным объемом исследований особенностей их механического поведения. До недавнего времени в научной литературе можно было найти лишь отрывочные сведения о механических характеристиках подобных компози-



тов. В работе [2] представлены результаты экспериментального исследования деформационных и предельных свойств зернистого композита на основе ненасыщенных полиэфиров, моделирующего фактуру и свойства натурального гранита. Определены упругие свойства, прочность и характеристики вязкости разрушения композита. Показано, что для нового материала характерна существенная зависимость свойств от вида напряженного состояния: модули упругости при растяжении и сжатии различаются на 30%, коэффициенты Пуассона при растяжении и сжатии также существенно различны. Другой особенностью механических свойств материала является низкая деформируемость: предельная деформация при сжатии достигает уровня 0,04%, а при растяжении — 0,5%. Эта особенность привела в работе [2] к значительным погрешностям при оценке коэффициента Пуассона. Для определения этой характеристики при растяжении и сжатии был использован тензометрический метод измерения продольной и поперечной деформаций с применением тензометрической станции СИИТ-2. Нагружение образца в процессе испытаний осуществлялось по ступенчатой программе, и показания прибора (значения деформаций) регистрировались последовательно. При такой методике в оценку коэффициента Пуассона вносилась дополнительная погрешность, связанная с заметным дрейфом нуля регистрирующего прибора, сопоставимым с малыми значениями измеряемых деформаций.

В связи с изложенным целью предлагаемой работы является уточнение значений коэффициента Пуассона композита путем применения современных цифровых средств измерения, позволяющих синхронно регистрировать значения продольной и поперечной деформаций в процессе испытаний, а также идентификация параметров модели для описания зависимости упругих свойств исследуемого материала от вида напряженного состояния.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемый материал является зернистым композитом на основе полиэфирной смолы ARAPOL S280E, упрочненной гранулированным наполнителем в виде смеси карбоната кальция и карбоната магния. Плотность материала составляет 2000 кг/м^3 , прочность при растяжении 4,85 МПа, прочность при сжатии 74,5 МПа, значения модуля упругости при растяжении и сжатии 14000 и 18900 МПа соответственно [2].

Испытания материала на растяжение и сжатие проведены на установке Zwick Z-100 с постоянной скоростью относительного перемещения захватов $0,0008 \text{ мм/с}$. Для определения коэффициента Пуассона композита при растяжении и сжатии использован тензометрический метод измерения продольной и поперечной деформаций в процессе испытаний. В этом случае на поверхность образца в соответствующих направлениях наклеивались тензодатчики марки НВМ с сопротивлением 120 Ом. Датчики по полумостовой схеме подключались к цифровому тензоусилителю типа Spider-8. Выходной сигнал с усилителя подавался на персональный компьютер для регистрации и обработки экспериментальных данных. Таким образом, осуществлялось синхронное измерение продольной и поперечной деформации в процессе испытаний, что позволило значительно повысить точность определения коэффициента Пуассона.

Испытания на растяжение проведены на образцах в виде двойной лопатки. Общая длина образца составляла 200 мм, длина рабочей части 100 мм, ширина рабочей части 10 мм. Ширина концевой части образца, предназначенной для крепления в захватах испытательной машины, составляла 40 мм.

Испытания на сжатие проведены на призматических образцах с размерами поперечного сечения $17 \times 19 \text{ мм}$, высотой 60 мм. Образцы вырезались из пластин, полученных методом свободного литья [2].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе испытания осевая нагрузка, продольная и поперечная деформации синхронно регистрировались при помощи описанной тензометрической системы измерений с частотой 1 с^{-1} . Экспериментальные данные получали в виде таблицы значений измеряемых величин в зависимости от



времени. Для полного цикла испытания, включающего активное нагружение и разгрузку, исходная таблица представляла более двухсот значений зарегистрированных одновременно осевой силы и деформаций. В качестве примера в табл. 1 приведен фрагмент исходных экспериментальных данных для режима активного нагружения при сжатии.

Эти данные использовались для построения экспериментальной зависимости поперечной деформации от продольной, которая аппроксимировалась линейной зависимостью. Коэффициент пропорциональности между поперечной и продольной деформацией определяет значение коэффициента Пуассона материала. Примеры экспериментальных зависимостей поперечной деформации от продольной для растяжения и сжатия представлены на рис. 1 и рис. 2.

Таблица 1

Экспериментальные значения силы, продольной и поперечной деформаций

t, с	F, кг	$\varepsilon_{11}, \%$	$\varepsilon_{22}, \%$
25	-27	-0,00641	0,00216
35	-99	-0,02304	0,00826
45	-122,4	-0,02844	0,01032
55	-140,4	-0,03223	0,01186
65	-176,4	-0,03948	0,01459
75	-237	-0,05141	0,01922
85	-343,8	-0,0701	0,02663
95	-509,4	-0,09518	0,03811
105	-748,5	-0,12751	0,05388

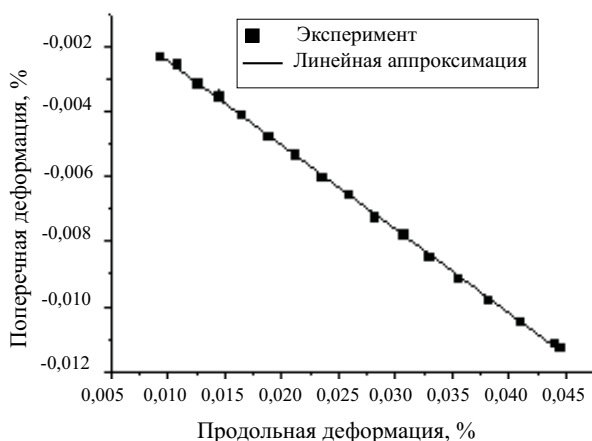


Рис. 1. Экспериментальная зависимость поперечной деформации от продольной при растяжении

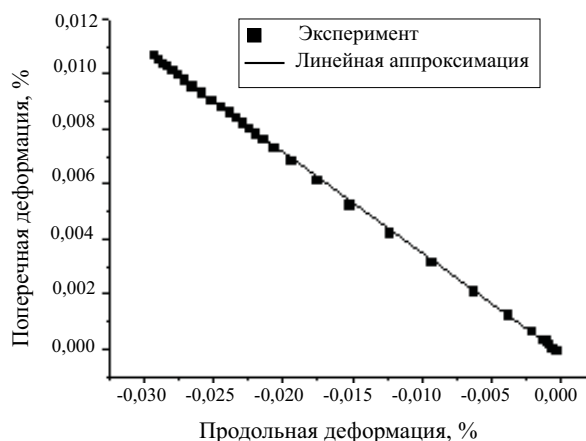


Рис. 2. Зависимость поперечной деформации от продольной в испытании на сжатие

Всего проведено 5 испытаний при сжатии и 5 испытаний при растяжении. Значения коэффициентов Пуассона представлены в табл. 2.

Средние значения коэффициента Пуассона при растяжении и сжатии составляют 0,276 и 0,398 соответственно. Статистические характеристики погрешностей измерений получены в соответствии с известными рекомендациями [3]. Для серии экспериментальных данных, представленных в табл. 2, получены следующие значения среднего квадратического отклонения: 0,06 для растяжения и 0,0225 для сжатия. Доверительные интервалы составляют 0,074 и 0,0278 для растяжения и сжатия соответственно. Существенное различие в значениях коэффициента Пуассона при растяжении и сжатии характерно для материалов с зависимостью свойств от вида напряженного состояния. Примером могут служить данные по графиту АРВ, для которого значения этой характеристики при растяжении и сжатии составляют 0,2 и 0,35 [4]. Обзор экспериментальных данных по механическим характеристикам разносопротивляющихся материалов различной природы представлен в работе [5].

Таблица 2

Экспериментальные значения коэффициента Пуассона, полученные по результатам испытаний на растяжение и сжатие

№	Растяжение	Сжатие
1	0,258	0,421
2	0,249	0,419
3	0,324	0,392
4	0,287	0,389
5	0,263	0,367
Среднее	0,276	0,398



3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Для описания упругого поведения исследуемого композита при различных видах напряженного состояния приняты соотношения теории упругости для изотропных разномодульных материалов [6–8], основанные на введении потенциала вида

$$\Phi = \frac{1}{2} [1 + \zeta(\xi)] (A + B\xi^2) \sigma_0^2, \quad (1)$$

где $\xi = \sigma/\sigma_0$; $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$; σ_{ij} — тензор напряжений; δ_{ij} — символ Кронекера; A и B — постоянные материала; $\sigma_0 = (\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij})^{1/2}$ — интенсивность напряжений; $S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}$ — девиатор напряжений. Отметим, что при $\zeta(\xi) = 0$ потенциал (1) совпадает с потенциалом для классического упругого тела.

С учетом (1) зависимость между деформациями ε_{ij} и напряжениями можно представить в виде

$$\varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \omega(\xi) S_{ij} + \frac{1}{3} \Omega(\xi) \sigma \delta_{ij}, \quad (2)$$

где функции $\omega(\xi)$ и $\Omega(\xi)$ определяются соотношениями:

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

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

Примем $\zeta(\xi) = C\xi$. В работе [7] показано, что подобное упрощение приемлемо для многих практических задач по оценке напряженно-деформированного состояния элементов конструкций из разномодульных материалов. Для функций $\omega(\xi)$ и $\Omega(\xi)$ в этом случае получим:

$$\omega(\xi) = -\frac{1}{2} \xi (A + B\xi^2) C + A(1 + C\xi), \quad (3)$$

$$\Omega(\xi) = \frac{1}{2\xi} (A + B\xi^2) C + B(1 + C\xi). \quad (4)$$

Для идентификации постоянных материала, входящих в определяющие соотношения (1)–(4) используем результаты измерений продольной и поперечной деформации в испытаниях на растяжение и сжатие. Для одноосного растяжения можно записать: $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_1$, $\sigma_0 = \sigma_1$, $\xi = \frac{1}{3}$, $S_{11} = \frac{2}{3} \sigma_1$, $S_{22} = S_{33} = -\frac{1}{3} \sigma_1$, σ_1 — растягивающее напряжение, задаваемое в эксперименте. Далее после подстановки этих величин в соотношения (2)–(4) получим два уравнения для определения постоянных материала:

$$\frac{1}{E^+} = A \left(1 + \frac{1}{3} C\right) + \frac{1}{9} \left(1 + \frac{1}{3} C\right), \quad (5)$$

$$\frac{\nu^+}{E^+} = -\frac{1}{4} \left(A + \frac{1}{9} B\right) C + \frac{1}{2} A \left(1 + \frac{1}{3} C\right) + \frac{1}{9} B \left(1 + \frac{1}{3} C\right), \quad (6)$$

где E^+ и ν^+ — экспериментальные значения модуля упругости и коэффициента Пуассона, полученные в испытаниях на растяжение.

Для случая одноосного сжатия параметры нагружения определяются следующими соотношениями: $\sigma = -\frac{1}{3} \sigma_1$, $\xi = -\frac{1}{3}$, $S_{11} = -\frac{2}{3} \sigma_1$, $S_{22} = S_{33} = \frac{1}{3} \sigma_1$, σ_1 — абсолютное значение сжимающего напряжения. Подстановка параметров нагружения в (2)–(4) и анализ соотношений для продольной и поперечной деформации приводит ко второй системе уравнений для определения постоянных материала:

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

$$\frac{\nu^-}{E^-} = \frac{1}{4} \left(A + \frac{1}{9} B\right) + \frac{1}{2} A \left(1 - \frac{1}{3} C\right) - \frac{1}{9} B \left(1 - \frac{1}{3} C\right), \quad (8)$$



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

Уравнения (5)–(8) позволяют получить выражения постоянных A и B через значения модулей упругости и коэффициентов Пуассона:

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

Подстановка экспериментальных величин модулей упругости и коэффициентов Пуассона в соотношения (9) дает следующие значения параметров A и B : $5,504 \cdot 10^{-5}$ МПа $^{-1}$ и $6,419 \cdot 10^{-5}$ МПа $^{-1}$ соответственно. Постоянную C определим из уравнений (5) или (7). Оба уравнения дают одинаковое значение этой постоянной — 0,447. Из уравнений (6) и (8) получены расчетные значения коэффициента Пуассона при растяжении и сжатии, которые составляют 0,23 и 0,459 соответственно. Следует отметить, что расчетные значения вполне удовлетворительно согласуются с экспериментальными — 0,276 и 0,398.

ВЫВОДЫ

Получены экспериментальные оценки значений коэффициентов Пуассона при растяжении и сжатии для зернистого композита на основе ненасыщенных полиэфиров. Показано, что исследуемый композит проявляет существенную зависимость упругих характеристик от вида нагружения. Для описания свойств материала предложено использовать простейший вариант теории упругости разномодульных изотропных материалов, основанный на обобщении классического упругого потенциала на случай зависимости упругих характеристик от вида напряженного состояния. Дано описание метода определения характеристик зависимости свойств материала от условий нагружения. Для исследуемого композита получены значения параметров, входящих в определяющие соотношения теории. Показано, что принятые соотношения позволяют получить расчетные значения коэффициентов Пуассона материала при растяжении и сжатии, близкие к экспериментальным и лежат в полосе разброса экспериментальных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 09-08-00502).

Библиографический список

1. Мэтьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. М.: Техносфера, 2004. 408 с.
2. Бессонов Д.Е., Ершова А.Ю., Зезин Ю.П., Мартиросов М.И., Рыбинский Л.Н. Экспериментальное исследование деформирования и разрушения зернистых композитов на основе полиэфирных смол // Механика композиционных материалов и конструкций. 2008. Т. 14, № 1. С. 111–125.
3. Румицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента: Справочное пособие. М.: Наука, 1971. 192 с.
4. Березин А.В., Ломакин Е.В., Строков В.И., Барбанов В.Н. Сопротивление деформированию и разрушение изотропных графитовых материалов в условиях сложного напряженного состояния // Проблемы прочности. 1979. № 2. С. 60–65.
5. Мясников В.П., Олейников А.И. Основы механики гетерогенно-сопротивляющихся сред. Владивосток: Дальнаука, 2007. 172 с.
6. Ломакин Е.В., Работнов Ю.Н. Соотношения теории упругости для изотропного разномодульного материала // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1978. № 6. С. 29–34.
7. Ломакин Е.В. Разномодульность композитных материалов // Механика композитных материалов. 1981. № 1. С. 23–29.
8. Ломакин Е.В. Определяющие соотношения механики разномодульных материалов. Препринт № 159. М.: ИПМ АН СССР, 1980. 64 с.