

УДК 538.9:621.002.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОГЕННОГО МАТЕРИАЛА

© 2011 г.

А.А. Филиппов, Т.А. Борисова

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
 Новосибирск

Filippov@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Экспериментально и теоретически исследуется поведение при разрушении композита на основе эпоксидно-диановой смолы ЭД-20, наполненной наночастицами диоксида кремния таркосил. Композит моделировали как трехфазную сплошную среду: эпоксидного клея, нанопорошка и пузырьков воздуха. Получена зависимость модулей упругости и коэффициентов Ламе от различной концентрации нанопорошка. Эксперименты показали, что добавки таркосила (до 12%) повышают модуль Юнга на 23%. При добавлении наноразмерного порошка диоксида кремния более 12% по объему прочность и упругость эпоксидного композита начинает падать из-за высокой концентрации пузырьков воздуха.

Ключевые слова: нанопорошок, эпоксидно-диановая смола ЭД-20, модуль Юнга.

Теоретическая часть

Как известно, гетерогенный материал состоит из различных материалов, обладающих определенными свойствами. Эти материалы взаимодействуют между собой при деформировании. Эффективность использования и работоспособность материала зависят от правильного выбора исходных компонентов и технологии их совмещения [1–5].

Существует множество аналитических методов для оценки модуля упругости эпоксидных смол на упругом участке деформирования с применением формул, используемых для композитных материалов, то есть модуль упругости может быть определен как функция характеристик компонентов ЭД-20, главным образом эпоксидного клея и наполнителя. Приведены некоторые из этих формул:

– модель Фойгта $E = c_1 E_1 + c_2 E_2$;

– модель Рейсса

$$\frac{1}{E} = \frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2};$$

– модель Хирша–Пуоджеля

$$E = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{c_1 E_1 + c_2 E_2} + \frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right);$$

$$E = \frac{\lambda + \mu}{\mu(3\lambda + 2\mu)} = \frac{c_1(\lambda_1 + \mu_1) + c_2(\lambda_2 + \mu_2) + c_3(\lambda_3 + \mu_3)}{(c_1 \mu_1 + c_2 \mu_2 + c_3 \mu_3)(3(c_1 \lambda_1 + c_2 \lambda_2 + c_3 \lambda_3) + 2(c_1 \mu_1 + c_2 \mu_2 + c_3 \mu_3))}.$$

– модель Поповича

$$E = \frac{1}{2} \left(c_1 E_1 + c_2 E_2 + \left(\frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right)^{-1} \right);$$

– модель Куээнто

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \sqrt{c_2}}{E_1} + \left(\frac{1 - \sqrt{c_2}}{\sqrt{c_2}} E_1 + E_2 \right)^{-1};$$

– модель Хашина

$$E = \left(\frac{(E_1 + E_2) + (E_1 - E_2)c_1}{(E_1 + E_2) - (E_1 - E_2)c_1} \right) E_1;$$

– модель Баче–Неппера–Чеместсена

$$E = E_1^{c_1} E_2^{c_2};$$

– модель А.Н. Гузя

$$E = c_1 E_1 + c_2 E_2 + \frac{4\mu_2 c_1 c_2 (\mu_1 - \mu_2)}{1 - c_1(1 - 2\mu_2) + c_2(1 - 2\mu_2)\mu_2 / \mu_1},$$

где E_1, E_2 – модули упругости наполнителя и эпоксидного клея; c_1, c_2 – объемные концентрации наполнителя и эпоксидного клея соответственно.

Кроме того, была предложена зависимость модуля упругости трехкомпонентной среды (нанопорошок, смола, воздух) от концентраций компонентов на основе гипотезы о равенстве деформаций $\varepsilon_{ij}^{(1)} = \varepsilon_{ij}^{(2)} = \varepsilon_{ij}^{(3)}$:

На рис. 1 представлена теоретическая зависимость модуля упругости от объемной концентрации нанопорошка, а также математические зависимости. Теоретическая зависимость совпадает с зависимостью, предложенной Рейссом ($c_3 = 0$).

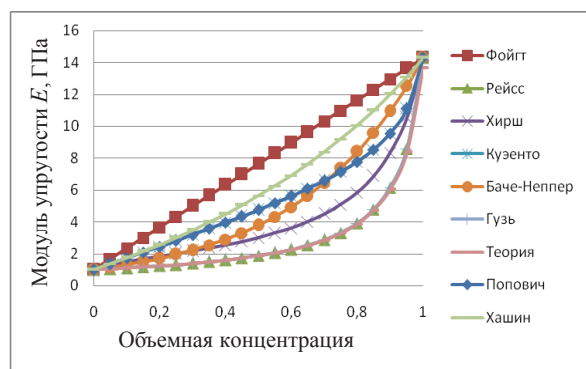


Рис. 1

Экспериментальная часть

Для сравнения с теоретическими формулами были изготовлены образцы из эпоксидной смолы с добавлением различной концентрации нанопорошка SiO_2 от 0 до 12%. Полученная смесь подвергалась вакуумированию. Предел прочности на растяжение и модуль упругости Юнга определялись с помощью машины для прочностных испытаний материалов Zwick/Roell Z005 (Германия). Зависимость модуля упругости эпоксидного композита от объемной концентрации нанопорошка Т-20 представлена на рис. 2. Из данных, приведенных на рисунке, видно, что при увеличении концентрации порошка от 0 до 12% наблюдается рост характеристик, а при 11.9% достигается максимум. Модуль упругости при добавке 12% таркосила вырос (по сравнению со случаем отсутствия добавки порошка) на 23%.

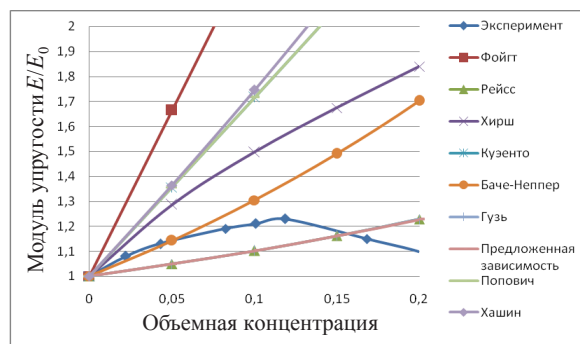


Рис. 2

Проведенные исследования показали, что небольшие добавки наноразмерного порошка диоксида кремния таркосил (до 12%) повышают предел прочности на растяжение и модуль упругости Юнга композиционного материала, причем максимальная прочность достигается при объемной концентрации порошка примерно 12%. С использованием теории многофазных сред и гипотезы о том, что перемещения сред совпадают, построена математическая модель гетерогенного материала. Показано, что при $c_1 \leq 0.12$ предложенная зависимость качественно совпадает с данными экспериментов.

Список литературы

1. Ванин Г.А. Микромеханика композиционных материалов. Киев: Наук. думка, 1973. 230 с.
2. Ван Фо Фы. Теория армированных материалов. Киев: Наук. думка, 1971. 232 с.
3. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 360 с.
4. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 400 с.
5. Baalbaki W., Aitcin P.C., Ballivy G. On predicting modulus of elasticity in high-strength concrete // ACI Materials Journal. 1992. V. 89(5). P. 517–520.

INVESTIGATING THE EFFECT OF NANOPARTICLES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF A HETEROGENEOUS MATERIAL

A.A. Filippov, T.A. Borisova

The paper presents the experimental and theoretical study of the behavior of fracture of the composite based on ED-20 epoxy-diane resin filled with nanoparticles of silicon dioxide Tarkosil. The composite is modeled as a three-phase continuum: epoxy adhesive, the nanopowder and air bubbles. The elastic moduli and Lamé coefficients have been determined as a function of various concentrations of the nanopowder. Experiments have shown that doping by Tarkosil (up to 12%) increases Young modulus by 23%. Concentrations of the nanosized powder of silicon dioxide in excess of 12% deteriorate the strength and elasticity of the epoxy composite because of the high concentration of air bubbles.

Keywords: nanopowder, epoxy-diane resin ED-20, Young modulus.