

УДК 541.6:539.4

## ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2011 г.

*А.В. Гуляев, Н.М. Кочнева*

НИИ полимерных материалов, Пермь

gulyaevav@inbox.ru

*Поступила в редакцию 15.06.2011*

Рассматриваются подходы к оценке прочностных свойств наполненных полимерных материалов при различном уровне содержания жестких компонентов. Проведен анализ механизмов деформирования и разрушения этих материалов при сложном напряженно-деформированном состоянии. Особое внимание уделено описанию закономерности появления микрповреждений, обусловленных отслоением частиц от матрицы, и их влиянию на макрохарактеристики: предельные напряжения и деформации.

*Ключевые слова:* высоконаполненный полимерный материал, механические свойства.

В последнее время остро стоит вопрос прогнозирования прочностных свойств полимерных материалов, наполненных жесткими частицами разных размеров, как правило, имеющих форму, существенно отличающуюся от сферической. Данные материалы получили широкое применение в различного рода конструкциях. Повышение эффективности этих конструкций достигается за счет увеличения количества наполнителя, в результате чего доля связующего уменьшается. Как показали лабораторные исследования, уменьшение доли связующего может привести к ряду особенностей механического поведения материалов.

В лабораторных условиях исследовались полимерные материалы со степенью наполнения жесткими частицами – от 80 до 90%. Проведенные лабораторные исследования в широком диапазоне температур и скоростей деформирования показали, что степень наполнения полимерных материалов существенно влияет на диаграммы растяжения  $\sigma = f(\epsilon)$ , при этом до определенного уровня наполнения диаграммы растяжения полимеров имеют только количественное отличие, а превышая этот уровень – и качественное. Так, для рассмотренных наполненных полимерных материалов отличия проявились при массовой доле наполнителя от 87% и более. При этом диаграммы растяжения для некоторых температур имеют немонотонный характер с наличием так называемого «горба». На кривой  $\epsilon_a = f(T)$  присутствует участок, на котором предельная деформация не зависит от температуры. Описанное поведение предельных характеристик можно объяснить изменением структуры материала в связи с недоста-

точным скреплением частиц наполнителя из-за наличия тонких прослоек связующего.

Степень структурных изменений наполненных полимеров определялась по результатам дилатометрических испытаний, которые заключались в определении зависимости объемных изменений  $\theta = f(\epsilon, T)$  материала в процессе нагружения. Для оценки прочности изделий при действии эксплуатационных нагрузок учитывалась величина  $\theta$ , соответствующая максимальной деформации, реализуемой в изделии, деформации начала объемных изменений  $\epsilon_0$  и интенсивного порообразования  $\epsilon_d$ . Анализ полученных характеристик при температуре 20 °С показал, что при увеличении доли наполнителя с 80 до 90%  $\epsilon_0$  уменьшается примерно в три раза,  $\epsilon_d$  в 2.5 раза, объемные изменения увеличиваются в 8 раз. Механическое поведение полимерных материалов будет зависеть от геометрических параметров конструкции и уровня нагрузок, действующих на нее. Экспериментально было показано, что для работоспособности конструкции имеет значение не только величина предельных характеристик полимерного материала, но и характер их зависимости от температурно-временных условий нагружения.

В процессе эксплуатации конструкции зачастую испытывают сезонные циклические колебания температуры. Исследования на образцах-лопаточках выявили, что циклическое воздействие нагрузок (циклирование), приводит к уменьшению предельных механических характеристик наполненных полимерных материалов, что необходимо учитывать при проектировании и отработке конструкций. Так как в процессе хранения и

эксплуатации скорость деформирования конструкций  $\dot{\epsilon}$  находится в диапазоне  $10^{-6}$ – $10^1$  с $^{-1}$ , численные и лабораторные исследования материала проводились для этих скоростей. Было показано, что при массовой доле наполнителя до 80% влияние медленных циклических нагрузок, связанных с сезонными колебаниями температуры, можно не учитывать до величины деформации циклирования  $\epsilon_{ц} = 0.7$ – $0.8$  от предельной деформации  $\epsilon_a$ , а у высоконаполненных при наполнении до 90% –  $\epsilon_{ц} = 0.2$ – $0.3$ . При  $\epsilon_{ц}$  выше указанных значений этим влиянием пренебрегать нельзя. Уменьшение предельной деформации может достигать 50% в зависимости от  $\epsilon_{ц}$  и числа циклов.

В связи с этим необходимо в методиках расчета напряженно-деформированного состояния и оценке прочности конструкций из высоконаполненных полимерных материалов учесть наличие структурных изменений, изменение физико-механических характеристик в процессе длительного их хранения и в условиях работы.

Для оценки динамики структурных изменений высоконаполненных полимерных материалов и расчета напряженно-деформированного состояния выбран энергетический подход: в вариационном уравнении энергетического баланса учтены затраты, идущие на увеличение поверхности расслоения матрицы связующего и частичек наполнителя.

В качестве параметра, характеризующего структурные изменения материала в рамках этого подхода, принята удельная поглощенная энергия [1, 2], затраченная на отрыв частиц связующего от наполнителя.

Оценка прочностной работоспособности конструкций проводилась:

– с помощью удельной поглощенной энергии, которая определялась экспериментально из петли гистерезиса при циклическом нагружении образцов;

– на основании дополнительного энергетического критерия для полимеров с 10–13% связующего, полученного из экспериментальных исследований.

В основе критерия лежат два безразмерных параметра  $X$  и  $Y$ :

$$X = \left( \frac{\sigma_a - \sigma_{ц} \frac{\sigma_a}{E_{10\%}}}{\sigma_a + \sigma_{ц}} \right)_{20^{\circ}\text{C}}, \quad Y = \left( \frac{\sigma_{ф} \sigma_{ф}}{\sigma_{исх} \sigma_{исх}} \right)_{-50^{\circ}\text{C}},$$

где  $\sigma_a$  – предельное напряжение,  $\sigma_{ц}$  – напряжение, соответствующее деформации циклирования, полученное из диаграммы растяжения при стандартных условиях ( $\dot{\epsilon} = 1.2 \cdot 10^{-3}$  с $^{-1}$  и температуре 20 °C),  $\sigma_{ф}$ ,  $\epsilon_{ф}$ ,  $\sigma_{исх}$ ,  $\epsilon_{исх}$  – экспериментальные финальные и исходные значения напряжений и деформаций, полученные при растяжении образцов при нестандартных условиях ( $T = -50$  °C,  $P = 100$  кгс/см $^2$ ,  $\dot{\epsilon} = 1.4$  с $^{-1}$ ).

Физический смысл названных выше комплексов имеет энергетическую природу и отображает механическую работу, затраченную на деформирование образца в соответствующих участках диаграмм нагружения. Параметр  $X$  характеризует оставшийся ресурс материала после проведения циклических испытаний,  $Y$  – оставшийся ресурс после проведения испытаний при  $T = -50$  °C под давлением.

В расчет требований по деформациям с учетом неизотермического характера нагружения введен коэффициент усталости  $K_{уст}^{\epsilon}$ , характеризующий уменьшение предельных деформаций, полученных при испытании образца в условиях максимально приближенных к условиям работы изделия, до и после циклирования, а также установлены нормы для нижнего значения этих деформаций.

Для контроля допустимой степени структурных изменений определена предельно допустимая величина объемных изменений  $\theta$ .

Такой комбинированный подход оценки прочностных свойств наполненных полимерных материалов и назначения требований к ФМХ является достаточно полным, так как позволяет учесть наличие в них структурных изменений.

#### Список литературы

1. Быков Д.Л., Коновалов Д.Н. Нелинейная эндохронная теория стареющих вязкоупругих материалов // Изв. РАН. МТТ. 2002. №4. С. 63–76.
2. Быков Д.Л. Использование структурных составляющих удельной работы внутренних сил для описания сопротивления вязкоупругих материалов // Изв. РАН. МТТ. 2003. №3. С. 99–111.

**PECULIARITIES OF PREDICTION OF THE STRENGTH PROPERTIES  
OF FILLED POLYMERIC MATERIALS**

*A.V. Gulyaev, N.M. Kochneva*

Approaches to assessment of the strength properties of filled polymeric materials with different level of the hard component content are considered. Investigation of deformation and destruction mechanisms of these materials in complicate stressed are strained state was conducted. Special attention is paid to the description of regularities of microdamages caused by delamination of particles from the matrix and their effect on macro-characteristics: ultimate stresses and strains.

*Keywords:* highly filled polymeric materials, mechanical properties.