

УДК 539.374

© 1994 г. Г. Б. КУЗНЕЦОВ, В. Н. КОВРОВ

УЧЕТ ЭФФЕКТОВ РАЗРЫХЛЕНИЯ ВЫСОКОНАПОЛНЕННОГО ПОЛИМЕРА В УРАВНЕНИЯХ НАСЛЕДСТВЕННОЙ ВЯЗКОУПРУГОСТИ

Проведены эксперименты на растяжение с постоянными скоростями, ползучесть и длительную прочность высоконаполненного резиноподобного полимера с измерением объемных изменений. Установлено, что разрыхление полимера происходит после достижения некоторой пороговой деформации удлинения, после которой начинают проявляться нелинейные вязкоупругие эффекты. Введение функции повреждаемости, учитывающей структурные изменения, в уравнение наследственной ползучести позволило описать как область линейного, так и нелинейного поведения полимера. Показано, что использование полученных соотношений дает возможность уточнить также описание длительной прочности.

1. Объектом исследований являлся высоконаполненный полимер, состоящий из эластичной матрицы из полидиенэпоксиуретана и мелкодисперсного наполнителя с размером частиц $10^{-3} - 10^4$ мм.

Высокая степень наполнения (0,6—0,7) определяет особенности механического поведения, в частности, существенное изменение объема при деформировании, связанные с отслоением частиц от матрицы и образованием пор на межфазной границе. Исследуемый резиноподобный материал при небольших деформациях до момента отслоения характеризуется постоянным значением коэффициента Пуассона, равным 0,5. При увеличении степени деформации коэффициент Пуассона уменьшается до 0,35, а объем материала возрастает примерно на 15%. Это явление обнаруживается методом объемной деформации, в частности, путем измерения продольной и поперечной деформации с помощью специально сконструированных датчиков, закрепленных на образце квадратного сечения.

Объемная деформация вычисляется по формуле

$$\Theta = \lambda_1 \lambda_2^2 - 1 = \Delta V / V_0 \quad (1.1)$$

где $\lambda_{1,2}$ — относительное изменение длины в продольном и поперечном направлениях.

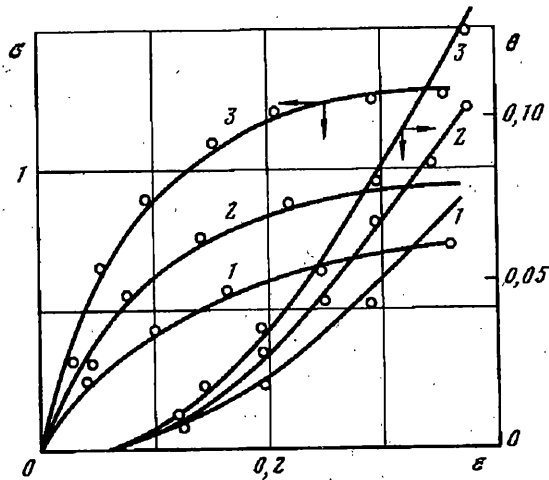
Программа испытаний состояла в растяжении образцов до разрушения с различными скоростями деформации и в опытах на ползучесть и длительную прочность при постоянных нагрузках.

Полученные кривые растяжения существенно зависят от скорости деформации и характеризуются двумя участками линейно-упругим и участком незначительного упрочнения.

Аппроксимирующая зависимость, учитывающая скорость деформации, принимается в виде

$$\sigma = E_1 e^k (\xi_i / \xi_0)^c \quad (1.2)$$

где E_1, k, c — константы, ξ_0 — скорость приведения, относительно которой находили величины E_1 и k . Константу c определяли по одной из кривых растяжения при скорости, отличной от скорости приведения.



Фиг. 1

Кривые растяжения и соответствующего относительного изменения объема показаны на фиг. 1. Из приведенных данных следует, что увеличение объема (разрыхление) начинается с некоторой пороговой осевой деформации, не зависящей от скорости деформации. Это, однако, не означает, что адгезионная прочность матрицы и наполнителя индифферентна к скорости нагружения, поскольку начало отслоения характеризуется различными уровнями напряжений. Скорость порообразования после достижения пороговой деформации медленно нарастает, а затем становится постоянной вплоть до разрушения. Повышение скорости деформации ведет к росту текущих и предельных значений относительного изменения объема. Полученные данные свидетельствуют, что при удлинениях меньше пороговых значений материал остается несжимаемым. В дальнейшем объем начинает расти и, следовательно, коэффициент Пуассона уменьшается вследствие разрыхления структуры.

Из рассмотрения кривых изменения объема в зависимости от осевой деформации при различных скоростях следует, что одним из возможных вариантов их аппроксимации является выражение

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + A\Theta^n (\xi_t/\xi_0)^n \quad (1.3)$$

или

$$\Theta = [(\varepsilon - \varepsilon_0) (\xi_0/\xi_t)^n (1/A)]^{1/n} \quad (1.4)$$

Параметры формул (1.2) и (1.3), найденные по методу наименьших квадратов, имели следующие значения: $E_1 = 1,75$; $k = 0,314$; $c = 0,115$; $A = 1,042$; $m = 0,557$; $n = 0,785$; $\xi_0 = 10^{-2} 1/c$; $\varepsilon_0 = 0,05$.

2. Одной из основных особенностей механического поведения высоконаправленных полимеров является ярко выраженная зависимость напряженно-деформированного состояния от времени. Уравнения наследственного типа и их модификации [1—3] отражают влияние вида напряженного состояния и степень нелинейности путем введения в них специальных функций. Эти функции задаются априорно, а их параметры определяются из условия наибольшего соответствия экспериментальным данным. Достоинством такого подхода является возможность описания с единых позиций основных реологических процессов, которые не сопровождаются сложными эффектами. В то же время эффекты такого рода могут быть с необходимой точностью аппроксимированы подходящими аналитическими зависимостями, которые, однако, не обладают общностью, присущей наследственной теории. Можно полагать, что симбиоз этих двух подходов позволит уточнить описание механического поведения полимеров. Так, связь относительного

изменения объема и среднего напряжения при растяжении, с учетом (1.2) и (1.3), имеет вид

$$\Theta = \left\{ \frac{1}{A} \left[\left(\frac{3\sigma_*}{E_1} \right)^{1/k} \left(\frac{\xi_0}{\xi_t} \right)^{c/k} - \varepsilon_0 \right] \left(\frac{\xi_0}{\xi_t} \right)^{n_1/m} \right\} \quad (2.1)$$

Полученные соотношения могут быть использованы, например, для описания объемной ползучести следующим образом. Разделяя переменные в (1.2), при $\sigma = \text{const}$, имеем

$$\varepsilon(t) = (\alpha \xi_0 t (\sigma/E_1)^{1/c})^{1/\alpha}, \quad \alpha = (k + c)/c \quad (2.2)$$

Подставляя (2.2) в (1.4), получим

$$\Theta(t) = \left(\frac{1}{A} \left(\frac{\xi_0}{\xi_t} \right)^n \left((\alpha \xi_0 t)^{1/\alpha} \left(\frac{\sigma}{E_1} \right)^{1/ac} - \varepsilon_0 \right) \right)^{1/m} \quad (2.3)$$

Уравнение (2.3) является аппроксимирующим выражением, учитывающим скорость деформации и пороговое значение деформации, с которой начинается разрыхление полимера, т. е. характеризует повреждаемость материала при ползучести.

Как известно, для ряда полимерных материалов можно выделить две области механического поведения. При малых постоянных напряжениях полимеры характеризуются линейной вязкоупругостью, имея единую кривую податливости. При высоких напряжениях происходит нарушение прямой пропорциональности действующим напряжениям, что свидетельствует о переходе в область нелинейной вязкоупругости. Для описания этих явлений существуют наследственные уравнения двух типов — линейные и нелинейные.

Для рассматриваемого класса высоконаполненных полимеров переход из одной области в другую можно связать со структурными изменениями, в частности, с порообразованием, изменяющим характер сопротивления полимера. Из полученных экспериментальных данных следует, что порообразование (повреждаемость) происходит в области осевых деформаций, превышающих некоторое пороговое значение. Пороговая деформация составляет существенную часть от разрывной (до 15%), и можно полагать, что она разделяет области линейного и нелинейного вязкоупругого поведения при ползучести. Следовательно, поскольку полученные эмпирические соотношения содержат информацию о состоянии структуры высоконаполненного полимера, представляется возможным описать его поведение в обеих областях с помощью линейных уравнений вязкоупругости, дополненных эмпирическими зависимостями. В частности, для процесса ползучести при одноосном растяжении можно записать

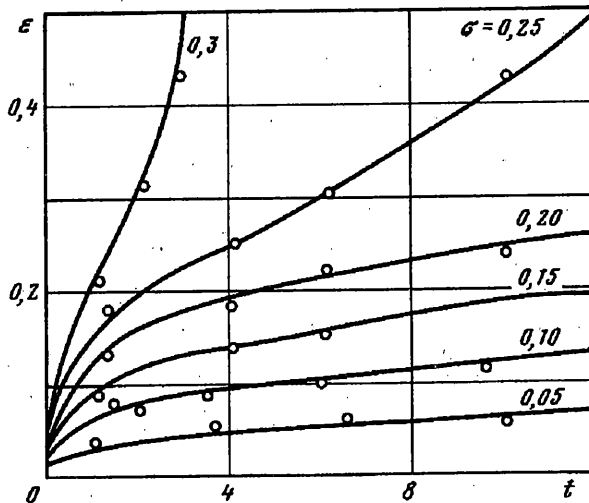
$$E\varepsilon(t)(1 - \Pi) = \sigma \left(1 + \int_0^t K(t - \tau) d\tau \right) \quad (2.4)$$

Здесь Π — функция повреждаемости, вносимой порообразованием при нагружении, записываемая в виде

$$\Pi = \sum_i \frac{\Theta_i(t)}{\Theta_*} \quad (2.5)$$

где Θ_* — предельное значение относительного изменения объема при разрушении; Θ_i — текущее значение объемной деформации на i -той ступени нагружения, определяемой уравнением (2.3).

Если сплошность структуры не нарушена ($\Pi = 0$), уравнение (2.4) описывает линейное вязкоупругое поведение при ползучести. При напряжениях, превышающих порог структурного перехода, повреждаемость начинает интенсивно



Фиг. 2

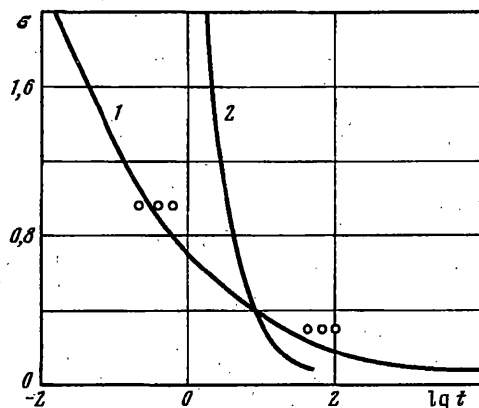
нарастать, что ведет к значительному расхождению кривых податливости как в опыте, так и в расчете по уравнению (2.4).

Из опытов на ползучесть в линейной области были определены параметры степенного ядра $K(t - \tau) = B(1 - \lambda)(t - \tau)^{-\lambda}$: $B = 1,18$; $1 - \lambda = 0,286$ (для времени, исчисляемом в секундах). Затем по уравнению (2.4) были рассчитаны кривые ползучести в диапазоне напряжений, определяемых кривой растяжения. Пример реализации подхода показан на фиг. 2. Результаты расчета свидетельствуют, что в рамках линейной наследственной модели, учитывающей особенность изменения объема при растяжении высоконаполненного полимера удается описать весь спектр кривых ползучести как в линейной, так и в нелинейной области.

Следовательно, представления о структурном переходе, связанные с порообразованием, начинающемся при достижении пороговой деформации, оказываются полезными при прогнозировании реального поведения высоконаполненных полимеров. Полученные зависимости являются начальным этапом в построении определяющих соотношений, учитывающих изменение структуры при деформировании дисперсноармированных полимеров. Их обобщение на другие виды напряженного состояния можно вести в следующем направлении. Наличие сжимающих напряжений, тормозящих порообразование, может быть учтено заменой в уравнении (2.3) действующего напряжения на эквивалентную величину $\sigma = 3\sigma_*$, т. е. на первый инвариант тензора напряжений, являющийся силовой характеристикой объемных изменений при сложном напряженном состоянии. Формальное обобщение уравнения (2.4) возможно путем записи связи между девиаторами напряжений и деформаций [1].

Отдельного изучения требует вопрос о характере объемных изменений при сдвиге. Известно [4], что при чистом сдвиге объемные изменения пренебрежимо малы, однако простой сдвиг может вызывать существенное изменение объема [5]. В последнем случае установлено, что простой сдвиг может вызывать как разрыхление, так и уплотнение исследованных материалов. При этом следует отметить, что, если объемная деформация от действия гидростатического давления составляла единицы процентов, то от сдвиговых напряжений — сотые доли процента. Что касается высоконаполненных полимеров, то этот вопрос требует дальнейшего экспериментального исследования.

3. Исследования, направленные на установление связи между параметрами уравнений ползучести и длительной прочности, известны [6, 7]. В указанных работах для получения необходимых зависимостей привлекалась теория течения, недостатками которой, как известно, являются неинвариантность относительно



Фиг. 3

изменения начала отсчета времени и неадекватное описание начального и конечного участков кривых ползучести (замедленной и ускоренной ползучести). При прогнозировании длительной прочности с привлечением уравнения ползучести эти погрешности приводят к существенным ошибкам в определении времени до разрушения.

Уточнение в определении длительной прочности представляется возможным путем замены закона ползучести теории течения на уравнение наследственности, более точно описывающее процесс ползучести.

В [6] эти использования известного в теории течения закона Нортона

$$\xi^n = N\sigma^d \quad (3.1)$$

получено выражение для времени до разрушения

$$t_* = \frac{2(\sigma/E)(\nu - \nu_0) + \ln(\rho_0/\rho_*)}{(1 - 2\nu)N\sigma^d} \quad (3.2)$$

Здесь ν_0 и ρ_0 — начальные значения коэффициента Пуассона и плотность материала, ξ — скорость деформации ползучести.

Следуя выкладкам [6], можно получить подобную зависимость при применении уравнения ползучести (2.1) с ранее определенными параметрами

$$t_* = \left(\frac{2(\sigma/E)(\nu - \nu_0) + \ln(1 + \Theta_*)}{(\sigma/E)(1 - 2\nu)B} \right)^{1/(1-\lambda)} \quad (3.3)$$

Для исследуемого высоконаполненного полимера были также найдены параметры уравнения теории течения: $d = 1,0395$; $N = 3,55 \cdot 10^{-5}$.

Расчитанные по уравнениям (3.2) и (3.3) кривые (2.1) длительной прочности показаны на фиг. 3. Их сравнение свидетельствует: прогноз долговечности по (3.2) проявляет слабую зависимость от уровня напряжений, кривая имеет слишком крутой наклон, не характерный для реальных кривых длительной прочности; контрольные опыты на долговечность, показанные точками, находятся в большом соответствии с расчетом по уравнению (3.3).

Таким образом, проведенные исследования показали, что одним из путей дальнейшего развития уравнений, характеризующих вязкоупругое поведение высоконаполненных полимеров, является использование в классических соотношениях экспериментальных зависимостей, отражающих структурные изменения в материалах. Такой подход позволяет уточнить описание механического поведения полимеров и расширяет возможности уравнений вязкоупругости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Москвитин В. В.* Сопротивление вязкоупругости материалов. М.: Наука, 1976. 328 с.
2. *Майборода В. П., Ефимов А. Б., Зуев В. В., Вестяк В. А.* Разрушение при соударении деформируемых тел — проблема моделирования//Проблемы контактного взаимодействия, трения и износа: Тез. докл. выездн. сессии. Ростов н/Д, 1990. С. 72.
3. *Горшков А. Г., Старовойтов Э. И.* Термоциклового изгиб трехслойных пластин//Расчеты на прочность. М.: 1989: № 30. С. 130—137.
4. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
5. *Гольдман А. Я.* Нелинейное вязкоупругое поведение полимерных и композитных материалов, свойства которых зависят от гидростатического давления//Механика композитных материалов. 1984. № 1. С. 21—34.
6. *Арутюнян Р. А.* О критериях разрушения в условиях ползучести//Проблемы прочности. 1982. № 9. С. 42—45.
7. *Фомин В. Л.* Разрыхление материала и длительная прочность при ползучести//Вестник ЛГУ. Сер. 1. Вып. 1. 1989. С. 71—74.

Пермь

Поступила в редакцию
6.IV.1992