

УДК 539.319

МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ РЕЛАКСАЦИОННОГО ПЕРЕХОДА (СТЕКЛОВАНИЯ)

© 2011 г.

Н.А. Труфанов, О.Ю. Сметанников, А.Н. Труфанов

Пермский государственный технический университет

ant@pstu.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Предложен ряд феноменологических моделей для описания термомеханического поведения стеклующихся материалов. В основу моделей положен единый подход, основанный на использовании скалярного нормированного параметра – степени стеклования и гипотезы о естественном ненапряженном состоянии наращиваемых при отверждении материала межмолекулярных связей. Приводится методика экспериментальной идентификации полученных определяющих соотношений, ее реализация для двух типов полимеров – сшитого и несшитого; сравнение результатов расчета и натуральных экспериментов по определению технологического и остаточного напряженно-деформированного состояния в осесимметричных неравномерно охлаждаемых образцах. Предложенный для полимерных материалов подход обобщен на класс низкомолекулярных стекол, разработанные физические уравнения использованы при решении задачи предотвращения растрескивания гетерогенных заготовок силовых элементов оптических волокон и выбора оптимальных конструктивных параметров волокна.

Ключевые слова: анизотропное оптическое волокно, остаточные напряжения, релаксационный переход, стеклование.

Разрабатываемые модели [1–3] основываются на трактовке структурного стеклования как процесса постепенного усиления с уменьшением температуры в структуре полимера межмолекулярных связей, что приводит к монотонному снижению сегментальной подвижности и соответствующему росту жесткости материала на феноменологическом уровне. В предположении упругого поведения материала за пределами интервала стеклования $(T < T_{g2}) \cup (T > T_{g1})$ получаем определяющие соотношения «упругого приближения», которые в случае одноосного напряженного состояния имеют вид

$$\sigma(t) = E_1(T(t))[\varepsilon(t) - \varepsilon_T(t)] + E_2(T(t)) \times \int_{T_H}^{T(t)} [\varepsilon(\tau) - \varepsilon_T(\tau) - \varepsilon^*(\tau) + \varepsilon_T^*(\tau)] dN(T(\tau)), \quad (1)$$

где $E_2(T) = E_g(T) - E_1(T_{g1})$; E_1, E_g – модули Юнга материала в высокоэластическом и стеклообразном состояниях соответственно;

$$\varepsilon_T(t) = \int_{T_H}^{T(t)} \alpha(T) dT(\tau);$$

α – коэффициент линейного температурного расширения материала. В (1) звездочкой отмечены текущая и свободная деформации $\varepsilon^*, \varepsilon_T^*$, соответствующие степени стеклования N при охлаждении материала. Их значения запоминаются или

«замораживаются» на этапе стеклования и не меняют своей величины при последующем обратном переходе из стеклообразного в высокоэластическое состояние. Величина N , характеризующая степень завершенности процесса уменьшения сегментальной подвижности полимера, меняется от $N = 0$ ($T > T_{g1}$) до $N = 1$ ($T < T_{g2}$). В частности, для ее расчета можно использовать симметричное распределение вероятности Лапласа. Обобщение одноосных определяющих соотношений для стеклующегося полимера в «упругом приближении» на случай учета вязкоупругих свойств стеклообразного состояния приводит к следующей модели:

$$\sigma(t) = E_1[\varepsilon(t) - \varepsilon_T(t)] + \int_0^{N(t)} \left[\int_{\omega}^t R(t' - \omega', \tau' - \omega') \times d(\varepsilon(\tau) - \varepsilon_T(\tau)) \right] dN(\omega), \quad (2)$$

где $R(t, \tau) = R_{11}(t, \tau) - E_1$, $R_{11}(t, \tau)$ – функция релаксации полностью застеклованного материала, $t' = \int_0^t a_T d\tau$, $\tau' = \int_0^\tau a_T d\tau$, $\omega' = \int_0^\omega a_T d\tau$ – приведенные времена, a_T – функция температурно-временного сдвига материала в стеклообразном состоянии. Для низкомолекулярных стекол характер-

но вязкотекучее состояние материала при температурах выше интервала стеклования. Полагая, что для застеклованного материала справедлив закон Гука, а для размягченного стекла – линейно-вязкие соотношения, с использованием смешанных соотношений получим:

$$\sigma(t) = EN(T(t))[\varepsilon(t) - \varepsilon_T(t)] + \eta(T)[1 - N(T(t))]\frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t}, \quad (3)$$

где температурная зависимость вязкости может быть описана традиционными соотношениями Аррениуса.

Разработана методика экспериментальной идентификации предложенных моделей, включающая установочные и проверочные испытания. Методика апробирована на двух типах материалов – эпоксидной смоле ЭДТ-10 (сшитый полимер) и полиметилметакрилате (несшитый полимер, рис. 1). На рис. 1 обозначено: *a, b, c* – установочные испытания ($a - \dot{T} = 2.5, b - 5, c - 10$ К/мин); *d* – проверочные испытания.

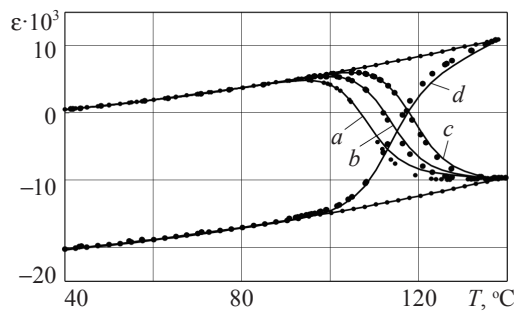


Рис. 1

Проведена верификация разработанных моделей в условиях сложноподвижного состояния. В частности, на рис. 2 показаны графики распре-

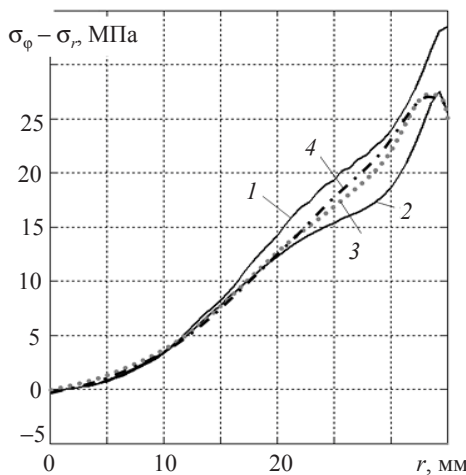


Рис. 2

деления разности главных остаточных напряжений по радиусу центральной части короткого цилиндра из эпоксидной смолы ЭДТ-10, неравномерно охлажденного в водной среде. Цифрами на рисунке обозначены кривые: 1 – расчет по модели (1); 2 – расчет по (2); 3 – эксперимент (метод разрезки колец); 4 – эксперимент (поляризационно-оптический метод).

Модель (3) использована для расчета технологических и остаточных напряжений в силовом стержне одномодового анизотропного оптического волокна «ПАНДА». Стержень изготавливается из чистого кварца с легирующими добавками. Концентрация легирующих добавок зависит от радиуса по степенному закону с показателем *n*. На рис. 3 показана зависимость остаточных напряжений – первого главного σ_1 и интенсивности σ_i в наиболее опасных точках силового стержня.

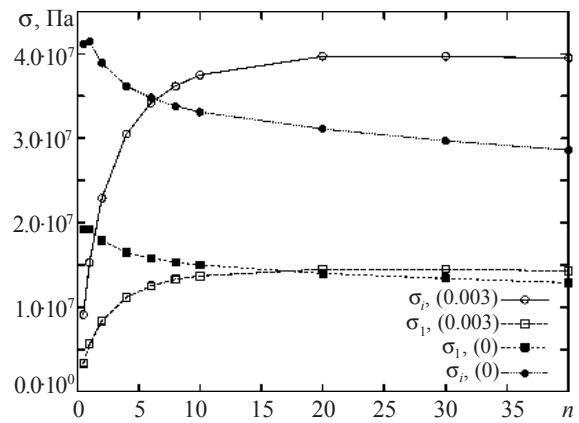


Рис. 3

Установлено, что оптимальным с точки зрения прочности и требуемых эксплуатационных характеристик стержня является интервал $n \in [4, 6]$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №10-01-96032-р_урал-а.

Список литературы

1. Матвеев В.П. и др. Термомеханика полимерных материалов в условиях релаксационного перехода. М.: Физматлит, 2009. 176 с.
2. Сметанников О.Ю., Труфанов Н.А. Численный анализ технологических и остаточных напряжений в стеклующихся телах // Вычислительная механика сплошных сред. 2008. Т. 1, №1. С. 92–108.
3. Trufanov A. N., Smetannikov O. Yu., Trufanov N. A. Numerical analysis of residual stresses in preform of stress applying part for PANDA-type polarization maintaining optical fibers // Optical Fiber Technology. 2010. Vol. 16, No 3. P. 156–161.

**MODELS OF FORMATION OF TECHNOLOGICAL AND RESIDUAL STRESSES
DURING THE RELAXATION TRANSITIONS (VITRIFICATION)**

N.A. Trufanov, O.Y. Smetannikov, A.N. Trufanov

Several phenomenological models for describing the thermomechanical behavior of vitrifying materials are presented. The model is based on a unified approach using a scalar normalized parameter – the degree of vitrification, the hypotheses about the natural unstressed state and growing during the curing of the material of intermolecular bonds. The methods of experimental identification of the obtained constitutive relations and its implementation for two types of polymers (cross-linked and not cross-linked) are suggested. Comparison of calculation results and experiments to determine the technological and residual stresses in axisymmetric unevenly cooled samples is made. The approach proposed for polymeric materials is generalized for a class of low molecular vitrifying materials. The derived physical equations are used to solve the problem of preventing cracking of the parts where stress is applied to optical fibers and determining the optimal design parameters of the fiber.

Keywords: polarization maintaining fiber, residual stresses, relaxation transition, vitrification.