

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ФОТОПОЛИМЕРОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Сметанников О.Ю., Ильиных Г.В., Фасхутдинова Ю.Б.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь*

Ключевые слова: фотополимер, термомеханика, математическое моделирование, эффект памяти формы, вязкоупругая модель, верификация.

Аннотация. В качестве определяющих соотношений для описания термомеханического поведения фотополимеров в широком диапазоне температур предложена вязкоупругая модель. Для найденных материальных констант и функций проведены верификационные испытания, в которых проводился нагрев образцов со ступенчато уменьшающейся и увеличивающейся нагрузкой. На примере задачи с охлаждением образца под нагрузкой и последующим нагревом в свободном состоянии проиллюстрирован эффект памяти формы.

MODELING THE THERMOMECHANICAL BEHAVIOR OF PHOTOPOLYMERS WITH SHAPE MEMORY EFFECT

Smetannikov O.Yu., Ilinykh G.V., Faskhutdinova Yu.B.

Perm National Research Polytechnic University, Perm

Keywords: photopolymers, thermomechanics, mathematical modeling, shape memory, viscoelastic model, verification.

Abstract. A viscoelastic model is proposed as the defining relations for describing the thermomechanical behavior of photopolymers in a wide temperature range. Verification tests were carried out for the found material constants and functions, in which samples were heated with a stepwise decreasing and increasing load. The shape memory effect is illustrated using the example of a problem with cooling a sample under load and subsequent heating in a free state.

1. Введение

Фотополимеры представляют собой материалы, получившие достаточно хорошую распространённость в сферах медицины и машиностроения. В большей степени это произошло благодаря развитию аддитивных технологий, позволяющих создавать детали геометрически сложной формы и получать более легкие конструкции с нужными прочностными характеристиками. Так, с помощью лазерной стереолитография в промышленном производстве изготавливают высокоточные модели для литья деталей различного назначения. Несмотря на широкое применение полимерных композиционных материалов, достаточно сложно прогнозировать характеристики и напряженно-деформированное состояние готовых изделий. В литературе предлагаются модели, предназначенные для описания поведения полимеров в достаточно узких температурных диапазонах [1-4]. Существует необходимость создания комплексной модели термомеханического поведения изделий из фотополимеров на всех стадиях их жизненного цикла.

2. Математическая модель термомеханического поведения фотополимеров

Для описания термомеханического поведения фотополимеров предложены вязкоупругие определяющие соотношения, являющиеся развитием модели упругого приближения [5], которые в одноосном случае с учетом температурной деформации имеют вид:

$$\sigma(t) = \sigma_1 + \sigma_2(t); \quad (1)$$

$$\sigma_1 = E_1[\varepsilon(t) - \varepsilon_T(t)]; \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_v(t) + \varepsilon_T(t); \quad (3)$$

$$\sigma_2(t) = \eta(T(t))\dot{\varepsilon}_v(t); \quad (4)$$

$$\sigma_2(t) = E_2 \left[\varepsilon_e(t)N(T(t)) - \int_0^t \varepsilon_e^*(\tau) dN(T(\tau)) \right]; \quad (5)$$

где σ , ε – напряжение и деформация соответственно; σ_1 – часть напряжения, определяемая высокоэластическим модулем E_1 ; σ_2 – часть напряжения, определяемая наращиваемыми межмолекулярными связями (НМС) с учетом релаксации; ε_v – деформация ползучести НМС; ε_e – гипоупругая деформация НМС; $\varepsilon_e^*(\tau)$ – запасенная на стадии охлаждения («замороженная») гипоупругая деформация НМС; $\varepsilon_T(T) = \int_{T_0}^T \alpha_T(T) dT$ – температурная деформация.

Из экспериментов по определению комплексного модуля в широком температурном интервале и термомеханических испытаний были определены модули Юнга: в высокоэластическом состоянии $E_1 = 22.39$ МПа и в стеклообразном состоянии $E_g = E_1 + E_2 = 1.86$ ГПа, а также получены температурные зависимости логарифма вязкости и степени стеклования. В таблице 1 представлены коэффициенты для аппроксимации аналитических выражений температурных зависимостей $\ln \eta(T)$ и $N(T)$, имеющих вид:

$$\ln \eta(T) = g_0 + g_1 T + g_2 T^2, \quad (6)$$

$$\tilde{N}(T) = \left\{ \left[1 - 0.5 e^{-\frac{T-T_g}{\gamma}}, T < T_g \right]; \left[0.5 e^{-\frac{T-T_g}{\gamma}}, T \geq T_g \right] \right\}. \quad (7)$$

Табл. 1. Значения материальных констант

| Параметр | g_0 , | g_1, K^{-1} | g_2, K^{-2} | T_g, K | γ, K |
|----------|----------|---------------|---------------|----------|-------------|
| Значение | -10.3363 | 0.1487 | -2.5650e-4 | 332.4458 | 20.3269 |

3. Верификация модели в экспериментах со ступенчатой нагрузкой

Для верификационных испытаний использовались предварительно отожженные образцы. Программа экспериментов включала нагрев образца под воздействием ступенчато уменьшающейся (опыты 1.1 и 1.2), либо ступенчато растущей (опыты 2.1 и 2.2) нагрузки с разными скоростями нагрева. Для каждого вида испытаний использовалось по 3 образца.

При увеличении скорости нагрева минимум на кривых смещается вправо в случае ступенчато уменьшающейся нагрузки (рис. 1,а), а при ступенчато увеличивающейся нагрузке кривые на начальной стадии нагрева смещаются вверх (рис. 1,б). Это обусловлено тем, что вязкая составляющая деформации нарастает с запаздыванием, объясняющимся меньшим временем воздействия повышенной температуры при большей скорости нагрева. При перепадах нагрузки скачок деформации с ростом температуры увеличивается из-за снижения жесткости материала. Качественное и количественное совпадение данных расчета и эксперимента можно принять хорошим.

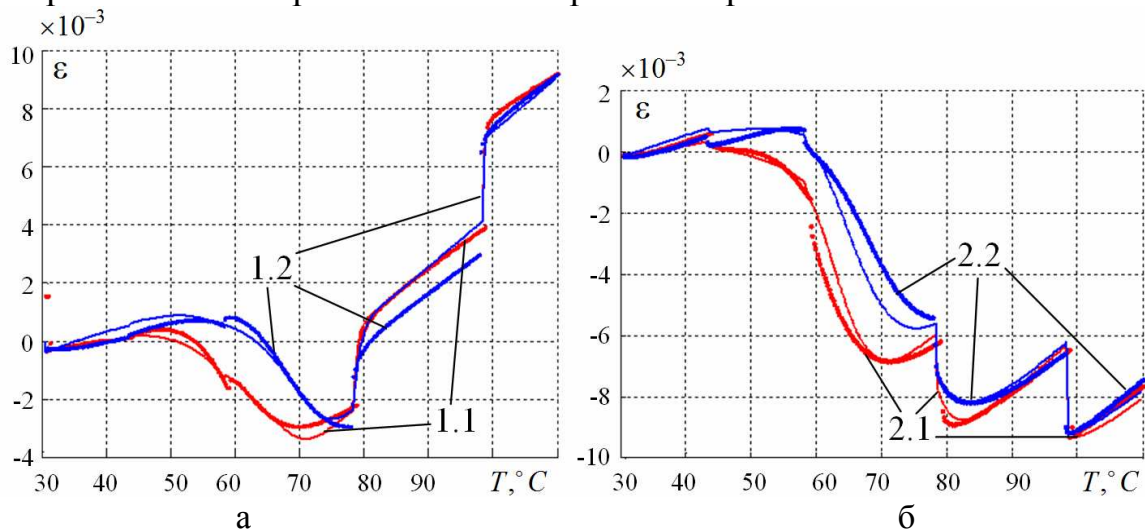


Рис. 1. Температурная зависимость деформации образцов: а – ступенчатое снижение нагрузки, б – увеличение; точки – эксперимент, линии – расчет; красные кривые – скорость нагрева 1 К/мин, синие – 2 К/мин

4. Моделирование эффектов памяти формы

Одноосное нагружение образца производилось при температуре выше интервала стеклования с последующим охлаждением до комнатной, затем происходило снятие нагрузки и дальнейший нагрев в свободном состоянии.

Полученные кривые наглядно иллюстрируют эффект «размораживания» «замороженных» при охлаждении под нагрузкой деформаций (рис. 2), называемый эффектом памяти формы. После «размораживания» образец возвращается в исходное состояние. Переход через интервал стеклования выражается в наличии подъема на кривых нагрева в некотором температурном интервале.

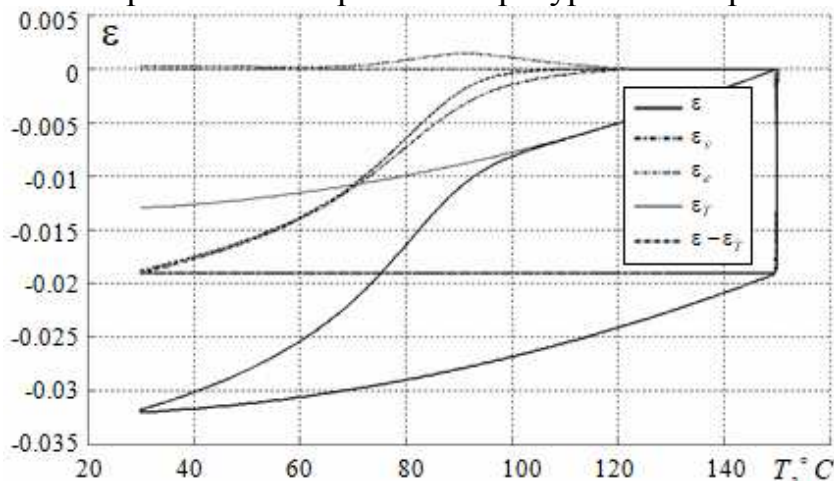


Рис. 2. Деформации при охлаждении под нагрузкой и свободном нагреве

Выводы

Для описания термомеханического поведения фотополимеров в широком температурном диапазоне предложены вязкоупругие соотношения. Верификационные испытания, проведенные с использованием материальных функций и констант, определенных из серии опытов, показали хорошее качественное и количественное совпадение расчетных и экспериментальных кривых. На примере численного решения задачи нагружения одноосного образца при циклическом охлаждении-нагреве показаны закономерности эволюции напряженного и деформированного состояния, демонстрирующего эффект памяти формы.

Финансирование. Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM- 2023-0006).

Список литературы

1. Verma S., Kumar Verma V. Shape memory polymers for additive manufacturing: An overview // *Materials Today: Proceedings*. 2022, vol. 57, pp. 2077-2081. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.507.
2. Chen J., Hamilton L. E., Mather P. T., Henderson J. H. Cell-Responsive Shape Memory Polymers // *ACS Biomater. Sci. Eng.* 2022, vol. 8, no. 7, pp. 2960-2969. DOI: 10.1021/acsbiomaterials.2c00405.
3. Xia Y., He Y., Zhang F., Liu Y., Leng J. A Review of Shape Memory Polymers and Composites: Mechanisms, Materials, and Applications // *Advanced Materials*. 2021, vol. 33, no. 6, pp. 2000713. DOI: 10.1002/adma.202000713.
4. Touri M., Kabirian F., Saadati M., Ramakrishna S., Mozafari M. Additive Manufacturing of Biomaterials – The Evolution of Rapid Prototyping // *Advanced Engineering Materials*. 2019, vol. 21, no. 2, p. 1800511. DOI: 10.1002/adem.201800511.
5. Matveenko V.P., Smetannikov O.Yu., Trufanov N.A., Shardakov I.N. Models of thermomechanical behavior of polymeric materials undergoing glass transition // *Acta Mechanica*. 2012, vol. 223, no. 6, pp. 1261-1284. doi.org/10.1007/s00707-012-0626-z.

Сведения об авторах:

Сметанников Олег Юрьевич – д.т.н., профессор;

Ильиных Глеб Валентинович – ведущий инженер;

Фасхутдинова Юлия Борисовна – ассистент.