УДК 539.3+678.073

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ ПАРАМЕТРОВ СВМПЭ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ ПРОНИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КРАТКОСРОЧНЫХ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА СЖАТИЕ

[1]Гавриленко С.Л., [1]Шилько С.В., [2]Панин С.В.

[1]Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси», Гомель
[2]Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

Введение. Прогнозирование формостабильности изделий из термопластичных полимерных материалов в процессе переработки, например, методами 3D печати, а также при их длительной эксплуатации под действием силовых воздействий предполагает определение их реологических параметров путем испытаний на релаксацию или ползучесть [1-5]

Для описания вязкоупругого поведения наиболее часто используют линейные модели в виде интегрального оператора с разностным ядром. Относительно простой и при этом достаточно информативной является линейная вязкоупругая модель Прони с ядром в виде суммы экспонент [6-8]. В частности, модель Прони заложена в конечноэлементные расчеты конструкций с помощью программных продуктов ANSYS, MARC, SOLIDWORKS, WORKBENCH и др. В работах авторов показана возможность определения реологических параметров вязкоупругих моделей на основе ограниченного объема данных, получаемых при испытаниях на кратковременную релаксацию [9-11].

Целью настоящего исследования являлось определение вязкоупругих характеристик сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и дисперсно-наполненных композитов на его основе путем идентификации 2-х экспоненциальной вязкоупругой модели Прони по результатам релаксационных испытаний на сжатие.

Методы, оборудование, материалы и результаты исследования. В предположении линейной вязкоупругости справедливы следующие соотношения между девиаторами напряжений и деформаций [1,2]:

$$2G\acute{Y}_{ij}(t) = s_{ij}(t) + \int_0^t \tilde{A}(t-\tau)s_{ij}(\tau)d\tau\,,\ K\theta(t) = \sigma(t).$$

Здесь $\theta = \varepsilon_{kk}$ – относительное изменение объема, $\sigma = \sigma_{kk}/3$ – среднее (гидростатическое) напряжение, G– мгновенный модуль сдвига, K – мгновенный модуль объемной деформации. $\tilde{A}(t)$ – ядро (функция) ползучести.

Для связи тензора напряжений и деформации можно использовать определяющие соотношения вязкоупругой модели Прони [1–5]:

$$\sigma_{ij}(t) = \int_0^t 2G(t-\tau)\frac{e_{ij}(\tau)}{d\tau}d\tau + \delta_{ij}\int_0^t K(t-\tau)\frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}d\tau\,.$$

Здесь

$$G(\xi) = G_\infty + \sum_{i=1}^{n_G} G_i e^{-\frac{\xi}{\lambda_i^G}}\,,\ K(\xi) = K_\infty + \sum_{i=1}^{n_K} K_i e^{-\frac{\xi}{\lambda_i^K}}\,,$$

$$G(0) = G_\infty + \sum_{i=1}^{n_G} G_i = \mu,\ K(0) = K_\infty + \sum_{i=1}^{n_K} K_i = K\,.$$

Имеем также известные зависимости для модулей упругости [2]:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu};\ K = \frac{E}{3(1-2\nu)};\ \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)};\ \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

При постоянстве коэффициента Пуассона материала ν = const записываются следующие соотношения [1]:

$$ER_E(t-\tau) = 2(1+\nu)G_\tau^{'}(t-\tau),$$

$$K_\tau^{'}(t-\tau) = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)}G_\tau^{'}(t-\tau),$$

$$\sigma_{ij}(t) = \frac{E}{1+\nu}\left[\frac{\nu}{1-2\nu}\varepsilon(t)\delta_{ij} + \varepsilon_{ij}(t)\right] - \frac{E}{1+\nu}\int_0^t R_E(t-\tau)\left[\frac{\nu}{1-2\nu}\varepsilon(\tau)\delta_{ij} + \varepsilon_{ij}(\tau)\right]d\tau.$$

После математических преобразований получим аналитическую зависимость силы от времени при испытании призматического образца на релаксацию при сжатии [9,10]:

$$P(t) = E\varepsilon_0 S_0\left(1 - \frac{2(1+\nu)}{E}(G(0) - G(t))\right).$$

Здесь $G(t)$ – функция сдвиговой релаксации. Применяя метод наименьших квадратов, получим систему алгебраических уравнений, из которой можно найти параметры функции сдвиговой релаксации. Для вышеприведенной функции сдвиговой релаксации выражение для сжимающего усилия примет вид [9,10]:

$$P(t) = E\varepsilon_0 S_0\left(1 - \frac{2(1+\nu)}{E}\left(\sum_{i=1}^{n_G} G_i\left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_i^G}}\right)\right)\right).$$

Исследовались дисперсно-наполненные термопластичные композиты на основе СВМПЭ двух марок: СВМПЭ$_{2122}$ и СВМПЭ$_{4120}$ – в общей сложности двенадцать составов: 1) СВМПЭ$_{2122}$ (материал 1), 2) СВМПЭ$_{4120}$ (материал 2), 3) 90 вес. % СВМПЭ$_{2122}$, 10 вес. % углеволокна 70 мкм (материал 3), 4) 90 вес. % СВМПЭ$_{4120}$, 10 вес. % углеволокна 70 мкм (материал 4), 5) 90 вес. % СВМПЭ$_{2122}$,10 вес. % углеволокна 200 мкм (материал 5), 6) 90 вес. % СВМПЭ$_{4120}$, 10 вес. % углеволокна 200 мкм (материал 6), 7) 90 вес. % СВМПЭ$_{2122}$, 10 вес. % углеволокна 2 мм (материал 7), 8) 90 вес. % СВМПЭ$_{4120}$, 10 вес. % углеволокна 2 мм (материал 8), 9) 99,5 вес. % СВМПЭ$_{2122}$, 0,5 вес. % наноуглеволокна (материал 9), 10) 99,5 вес. % СВМПЭ$_{4120}$, 0,5 вес. % углеродные нановолокна (материал 10), 11) 90 вес. % СВМПЭ$_{2122}$, 10 вес. % частицы базальта 5-10 мкм (материал 11), 12) 90 вес. % СВМПЭ$_{2122}$, 10 вес. % волокна базальта 200 мкм (материал 12).

Вязкоупругие свойства вышеперечисленных материалов изучали на машине для механических испытаний Инстрон 5567 (ИММС НАН Беларуси) на образцах высотой 20 мм и квадратным поперечным сечением площадью 100 мм^2 в условиях релаксации при одноосном сжатии и комнатной температуре 22 ^{0}С. Исходя из предельной упругой деформации предварительно испытанных на прочность матричного материала (СВМПЭ), задавались 3 уровня кинематического нагружения ε = 1, 2 и 3 %. Релаксационные зависимости двух марок СВМПЭ и композитов на их основе №№ 1–12, полученные при длительности нагружения 180 мин, имеют вид, показанный на рисунке.

Для определения параметров вязкоупругой модели Прони использовали минимизацию невязки отклонения теоретической зависимости усилия при релаксации от экспериментальных значений. Использовали 20 экспериментальных значений в характерные моменты времени в стадии начальной и установившейся релаксации.

Результаты идентификации модели Прони при значении коэффициента Пуассона для всех видов материалов, равном ν = 0,45, представлены в Таблице. Для идентификации модели Прони. Относительная погрешность определения модуля Юнга не превышала 12 %. Средняя невязка между экспериментальными и теоретическими значениями усилия при релаксации не превышала 5 %.

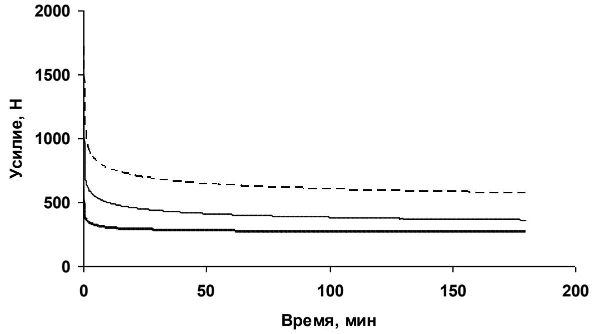

Рис. 1. Характерные релаксационные кривые для композитов на основе СВМПЭ. Нижняя кривая – ε_0 = 1,0 %, сплошная тонкая линия ε_0 = 2,0 %, пунктирная тонкая линия ε_0 = 3,0 %.

Таблица 1 – Параметры модели Прони для СВМПЭ-композитов

Материал	E, МПа	G_∞, МПа	G_1, МПа	λ_1, мин	G_2, МПа	λ_2, мин
№ 1	614	65,9	114,5	1,6	26,5	2,51
№ 2	557	56,6	103,5	1,6	32,0	28,5
№ 3	772	85,2	122,0	1,6	59,0	28,5
№ 4	643	89,7	80,0	1,6	52,0	25,5
№ 5	462	67,8	48,5	1,6	43,0	27,0
№ 6	775	71,2	120,0	0,1	76,0	13,6
№ 7	1265	255,2	87,0	1,6	94,0	28,5
№ 8	1113	167,8	150,0	1,6	66,0	28,5
№ 9	555	59,4	94,0	1,6	38,0	28,5
№ 10	600	67,9	101,0	1,6	38,0	25,5
№ 11	720	81,3	115,0	1,6	52,0	28,5
№ 12	637	73,7	101,0	1,6	45,0	28,5

Заключение

Рассматривается возможность ускоренной аттестации вязкоупругих свойств экструдируемых полимерных композитов для аддитивных технологий. С этой целью разработана методика определения параметров вязкоупругой модели Прони путем ее идентификации по результатам релаксационных испытаний на сжатие 2-х марок сверхвысокомолекулярного полиэтилена и 10-ти СВМПЭ композитов.

С использованием 2-х экспоненциального варианта модели Прони определены значения модулей и времен релаксации, на основании которых найдены параметры функции ползучести, что позволяет прогнозировать формостабильность элементов конструкций при длительном нагружении.

Работа выполнена в рамках проекта Т18Р-286.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кравчук А.С. Механика полимерных и композиционных материалов: учебное пособие / А.С. Кравчук, В.П. Майборода, Ю.С. Уржумцев – М.: Наука, 1985. – 303 с.*
2. *Старовойтов Э.И. Основы теории упругости, пластичности и вязкоупругости: учебное пособие / Э.И. Старовойтов – Гомель: БелГУТ, 2001. – 344 с.*
3. *Москвитин, В.В. Сопротивление вязкоупругих материалов / В.В. Москвитин – М.: Наука, 1972. – 327 с.*
4. *Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация: учебное пособие / М.А. Колтунов – М.: Высшая школа, 1976. – 277 с.*
5. *Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости / Р. Кристенсен – М.: Мир, 1974. – 340 с.*
6. *Исаев К.В. Активная идентификация дифференциальных моделей вязкоупругого поведения материалов / К.В. Исаев // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1991. – № 6. – С. 82–88.*
7. *Образцов И.Ф. Применение метода минимакса для уравнений состояния вязкоупругих сред / И.Ф. Образцов, Ю.А. Басистов, Ю.Г. Яновский // ДАН РАН. – 1994. –Т. 35, № 4. – С. 455–458.*
8. *Басистов, Ю.А. Модифицированный метод регуляризации вычисления релаксационных функций вязкоупругих сред / Ю.А. Басистов, Ю.Г. Яновский, И.Ф. Образцов // Механика композитных материалов. – 1994. – Т. 30, № 4. – С. 482–493.*
9. *Гавриленко С.Л. Идентификация линейных вязкоупругих моделей антифрикционных полимерных композитов по результатам ускоренных испытаний на релаксацию при сжатии / С.Л. Гавриленко, С.В. Шилько // Актуальные вопросы машиноведения: Сб. статей. – 2016. – Вып. 5. – С. 326–328.*
10. *Шилько, С.В. Определение реологических параметров полимерных материалов на основе идентификации вязкоупругой модели Прони по результатам статических и динамических испытаний / С.В. Шилько, С.Л. Гавриленко, С.В. Панин, О.В. Алексенко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2017.– № 3. – С. 33–38.*
11. *Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б.А. Люкшин, С.В. Шилько, С.В. Панин и др. – Новосибирск, Изд.-во СО РАН. – 2017. – 311 с.*