

К. Анискевич, О. Старкова*

Институт механики материалов Латвийского университета, Рига, Латвия

ОЦЕНКА ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПЭВП, НАПОЛНЕННОГО МНОГОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СООТНОШЕНИЯ СКОРОСТЕЙ РЕАКЦИИ¹

К. Aniskevich and O. Starkova*

EVALUATION OF VISCOPLASTIC STRAIN OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE/MULTIWALL CARBON NANOTUBE COMPOSITES USING THE REACTION RATE RELATION

Keywords: viscoplasticity, creep, strain rate, creep recovery, nano-composite

A novel semi-empirical method for decoupling of viscoplastic strain component from the total creep strain is proposed and validated by example of high density polyethylene (HDPE)/multiwall carbon nanotube (MWCNT) nanocomposites. The method is based on the Eyring's reaction-rate relation and analysis of creep data in semi-logarithmic co-ordinates strain-rate vs. strain. The initial linear part of the dependence corresponds to the reversible viscoelastic behavior, while a deviation from that is related to accumulation of the viscoplastic strain. The viscoplastic strain component is determined by simple calculations using four approximation coefficients determined on two linear parts of strain-rate vs. strain dependences. Common relationship between the viscoplastic strain and total creep strain is established from the data of 57 creep-recovery tests for samples filled with various contents of MWCNT and performed under different stresses and loading times. Validity of the method is proved by a reasonable correlation between the calculated viscoplastic strains and residual strains experimentally measured at the recovery stage. The proposed method contributes to an effective assessment of

*Автор, с которым следует вести переписку: a_klara@inbox.lv; olesja.starkova@pmi.lv
Corresponding author: a_klara@inbox.lv; olesja.starkova@pmi.lv

¹Перевод с англ.

viscoplastic strains from creep tests with no need to study creep recovery.

Ключевые слова: вязкопластичность, ползучесть, скорость деформации, ползучесть обратная, нанокompозит

Предложен и апробирован на примере полиэтилена высокой плотности, наполненного многослойными углеродными нанотрубками, новый полуэмпирический метод выделения вязкопластической компоненты из общей деформации ползучести. Метод основан на соотношении Эйринга для скоростей реакции и анализе результатов экспериментов на ползучесть в полулгарифмических координатах скорость деформации—деформация. Начальный линейный участок зависимости соответствует обратимой вязкоупругой деформации, а отклонение от линейности обусловлено появлением и развитием вязкопластической деформации. Вязкопластическая составляющая определяется простым вычислением с использованием четырех параметров аппроксимации двух линейных участков зависимости скорости деформации от общей деформации. Обобщенная зависимость вязкопластической составляющей от общей деформации получена с использованием результатов 57 испытаний на ползучесть разной длительности и при разных нагрузках образцов нанокompозита с разным наполнением. Применимость метода подтверждена приемлемой корреляцией вычисленных значений вязкопластической деформации, накопленной в процессе ползучести, и остаточной деформации, определенной экспериментально на стадии обратной ползучести. Предложенный метод позволяет оценить вязкопластическую деформацию без проведения дополнительных испытаний на обратную ползучесть.

Введение

Ползучесть композитного материала на основе полимерного связующего — развитие деформации во времени под действием постоянной нагрузки — обусловлена как релаксационными процессами в полимерной матрице, так и необратимыми изменениями структуры полимера и/или композита, приводящими к его разрушению [1, 2]. При рассмотрении аддитивности вкладов от обоих механизмов деформация ползучести выражена как сумма вязкоупругой и вязкопластической составляющих. Первая является обратимой и стремится к нулю после разгрузки, вторая необратима: её развитие под действием нагрузки приводит к остаточной деформации после разгрузки и обратной ползучести. Оценка вязкопластической составляющей деформации ползучести основывается на результатах испытаний в режиме ползучесть—обратная ползучесть после

завершения релаксационных процессов, когда вязкоупругая составляющая обращается в нуль. Для описания вязкоупруго-вязкопластической деформации обычно используются интегральные уравнения наследственной теории вязкоупругости [3—7]. Вязкопластическая составляющая деформации описывается нелинейной функцией напряжения и времени, в частности, степенной [5, 8]. Параметры этой функции определяют из остаточной деформации, измеренной в испытаниях на ползучесть—обратную ползучесть при разных напряжениях и временах. Такой подход широко использован и апробирован в многочисленных исследованиях разных видов полимерных композитных материалов [9]. Следует заметить, что под действием больших нагрузок в течение длительного времени напряжение не остается постоянным, поскольку поперечное сечение образца изменяется вследствие образования дефектов в структуре материала. Попытки учесть “эффективное” напряжение, равное нагрузке, деленной на текущее сечение образца, предприняты авторами [10, 11]. Позднее этот подход привел к моделям накопления повреждений с интегральными уравнениями [4, 12—13]. Обобщенная нелинейная вязкоупруго-вязкопластическая модель ползучести, учитывающая как нелинейность, так и необратимость зависящей от времени деформации, разработана на основе термодинамики [14]. Модель материала, учитывающая развитие в нем микрповреждений с возрастанием нагрузки, приводящее к взаимозависимому ухудшению упругих, вязкоупругих и вязкопластических свойств, предложена авторами [9].

Интегральные уравнения позволяют описывать результаты эксперимента на ползучесть “в чистом виде” путем подгонки соответствующих параметров, учитывать историю нагружения и в результате прогнозировать ползучесть. Основной недостаток такого подхода заключается в большом количестве параметров, являющихся функциями напряжения и времени; они должны быть определены из эмпирических соотношений, построенных на основе большого количества испытаний в режиме ползучесть—обратная ползучесть. Обычно исследователи ограничиваются описанием результатов испытаний на ползучесть при одном или нескольких уровнях напряжения, рассматривая один и тот же временной интервал в ползучести—обратной ползучести. Систематические данные в широком диапазоне напряжений и времен не всегда доступны, что усложняет построение надежных моделей поведения материала — определяющих уравнений напряжение—деформация—время. Во многих случаях более предпочтительно использование моделей и эмпирических подходов, где время исключается из основных соотношений и учитывается косвенно. Интегральный подход имеет недостаток и при анализе кинетики деформационного процесса.

Вязкопластическая деформация полимера обусловлена изменением подвижности макромолекулярных цепей под действием напряжения. Повышенная сегментальная подвижность основной цепи приводит к непре-

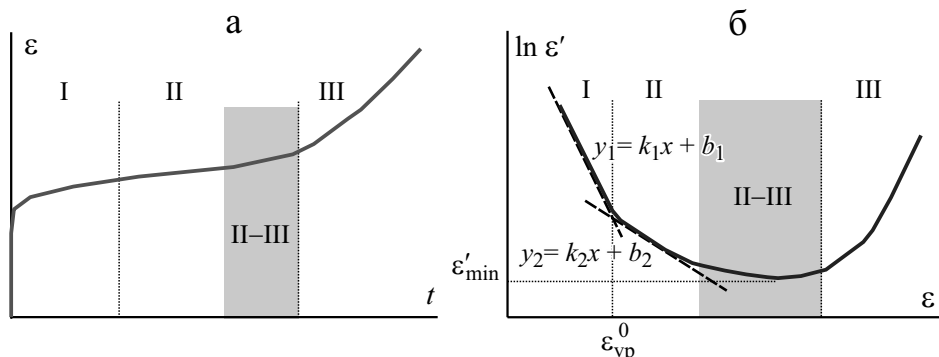


Рис. 1. Схема предложенного метода: кривая ползучести (а) и диаграмма $\ln \dot{\varepsilon} - \varepsilon$ с линейными аппроксимациями в областях I и II и характеристической точкой ε_{vp}^0 (б).

рывному динамическому изменению ее конформации и в результате — к пластическому течению. Кинетика деформации может быть описана на основе активационной теории течения Эйринга [15, 16].

В испытании на ползучесть выделяют три стадии: начальную, или переходную, установившуюся и ускоренную. Начальная стадия соответствует области вязкоупругости, где скорость деформации ползучести убывает со временем или с ростом деформации. При установившейся ползучести скорость деформации достигает постоянного значения, что соответствует пластическому течению. Далее скорость деформации растет (ускоренная ползучесть), что приводит к локализации деформации и разрушению (рис. 1: I, II и III — области начальной, установившейся и ускоренной ползучести соответственно). Следует заметить, что переход из стадии установившейся ползучести в стадию ускоренной не определен строго, а является аппроксимацией процесса изменения скорости ползучести. Переход обычно определяют как область, в которой это изменение меняет характер от убывающего к возрастающему.

Несмотря на то что три стадии процесса ползучести не всегда выделяются, изучение скорости деформации как функции времени t или деформации ε может дать важную информацию о кинетике деформационного процесса.

Логарифмический масштаб скорости деформации ползучести как функции общей деформации раскрывает начальные стадии процесса ползучести. Положение минимума скорости деформации, соответствующего началу ускоренной ползучести, определяет деформацию разрушения. Положение минимума на диаграммах $\ln \dot{\varepsilon} - \varepsilon$ использовано авторами [17] для оценки времени долговечности полиамидов, поликарбоната и армированного углеродными волокнами пластика. Получено достаточ-

но удовлетворительное соответствие результатов расчета с применением для скорости деформации ползучести уравнения скорости реакции Эйринга и эксперимента. Моделирование ползучести как термически активируемого процесса обобщено авторами [18]. В [19] на основе анализа скорости деформации ползучести как функции деформации проведено моделирование ползучести полиоксиметилена с применением реологических уравнений. Согласно формулировке Фойгта [20] при ползучести срабатывает механизм обратной связи: увеличение деформации приводит к увеличению скорости деформации [21]. Таким образом, значение деформации ползучести $\varepsilon(t)$ само по себе может рассматриваться как параметр соотношения скорость деформации—деформация.

Зависимость логарифма скорости деформации ползучести от общей деформации, известная как диаграмма Шерби—Дорн [22], широко используется для прогнозирования долговечности металлов и композитных материалов на основе полимеров в условиях их пластического разрушения [23, 24]. Положение минимума на диаграмме Шерби—Дорн — “критическая деформация” не зависит от приложенного напряжения. Это относится к минимуму скорости деформации ползучести на этапе установившейся ползучести и предполагаемого перехода на стадию ускоренной ползучести.

Ранее на основе анализа экспериментальных данных в режиме ползучесть—обратная ползучесть полипропилена (ПП) и полиэтилена высокой плотности (ПЭВП), наполненных многостенными углеродными нанотрубками (МСУНТ), было сообщено о существовании обобщенного соотношения между остаточной деформацией и общей деформацией ползучести [25, 26]. Первая, будучи функцией напряжения и времени, характеризует необратимую деформацию безотносительно к ее природе, будь то вязкопластичность и/или повреждение. Для описания обобщенной зависимости остаточной деформации от общей деформации ползучести разных композитных материалов на основе полимеров применима степенная функция [25].

Цель настоящего исследования — разработка метода выделения вязкопластической деформации из общей деформации ползучести с использованием модели термически активированного пластического течения. Это позволит охарактеризовать развитие вязкопластической деформации как функции общей деформации, без прямого рассмотрения эффектов приложенного напряжения и времени ползучести. Применимость метода подтверждается анализом результатов 57 испытаний на ползучесть—обратную ползучесть ПЭВП, наполненного многостенными углеродными нанотрубками [27]. Метод позволяет оценить вязкопластическую деформацию без проведения испытаний на обратную ползучесть, требующих много времени и не всегда доступных.

1. Основное уравнение

В теории термической активации полагают, что макроскопическая скорость деформации ползучести есть произведение количества единиц течения, среднего приращения деформации на преодоление энергетического барьера и вероятности того, что каждая единица может преодолеть этот энергетический барьер [1, 15, 16]. Она имеет место в ограниченном диапазоне скорости деформации—времени из-за допущения того, что постоянное число единиц течения доступно для активационного перехода и среднее приращение деформации на преодоление энергетического барьера остается постоянным в процессе ползучести. В соответствии с [1, 17] скорость деформации ползучести $\dot{\varepsilon}$ определяется следующим образом:

$$\dot{\varepsilon}(\sigma, t, T) = C_0 e^{-\frac{U_0}{RT}} e^{\frac{\sigma v_p}{3RT}} e^{-\frac{(\sigma - \sigma_{\text{int}}) v_s}{RT}}, \quad (1)$$

где σ — приложенное напряжение; t — время, T — температура; C_0 — постоянная; U_0 — энергия активации; v_p и v_s — активационные объемы давления и сдвига; R — универсальная газовая постоянная; σ_{int} — внутреннее напряжение. Это напряжение противоположно приложенному напряжению σ и пропорционально обратимой деформации ε_R , которая включает в себя как упругую $\varepsilon_{\text{el}}(\sigma, T)$, так и вязкоупругую $\varepsilon_{\text{ve}}(\sigma, t, T)$ составляющие:

$$\sigma_{\text{int}} = K_2 \varepsilon_R, \quad (2)$$

где K_2 — постоянная, пропорциональная температуре.

С учетом (2) уравнение (1) преобразуем к виду

$$\dot{\varepsilon}(\sigma, t, T) = C e^{-\frac{\sigma(v_p + 3v_s)}{3RT}} e^{-\frac{K_2 v_s \varepsilon_R}{RT}}, \quad (3)$$

где $C = C_0 e^{-\frac{U_0}{RT}}$.

Полагая взаимонезависимость механизмов деформирования, общую деформацию ползучести определяем как сумму обратимой упругой и вязкоупругой ε_R и необратимой вязкопластической ε_{vp} составляющих:

$$\varepsilon(\sigma, t, T) = \varepsilon_R(\sigma, t, T) + \varepsilon_{\text{vp}}(\sigma, t, T). \quad (4)$$

Подобно ε_R величина ε_{vp} есть функция напряжения, времени и температуры. Далее используем упрощенные обозначения, переменные в скобках опускаем.

Из уравнения (4) следует, что

$$\varepsilon_R = \varepsilon - \varepsilon_{\text{vp}}, \quad (5)$$

и уравнение (3) принимает вид

$$\dot{\varepsilon} = C e^{\frac{\sigma(v_p+3v_s)}{3RT}} e^{-\frac{K_2 v_s (\varepsilon - \varepsilon_{vp})}{RT}}$$

или

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln C' - \frac{K_2 v_s}{RT} \varepsilon + \frac{K_2 v_s}{RT} \varepsilon_{vp}, \quad (6)$$

где $\ln C' = \ln C + \frac{\sigma(v_p + 3v_s)}{3RT}$.

В отсутствии вязкопластической деформации $\varepsilon_{vp} = 0$ запишем

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln C' - \frac{K_2 v_s}{RT} \varepsilon, \quad (7)$$

т. е. логарифм скорости деформации линейно уменьшается с ростом общей деформации ползучести ε .

Из уравнения (6) следует, что

$$\varepsilon_{vp} = \frac{RT}{K_2 v_s} \ln \dot{\varepsilon} - \frac{RT}{K_2 v_s} \ln C - \left(1 + \frac{v_p}{3v_s}\right) \frac{\sigma}{K_2} + \varepsilon. \quad (8)$$

В испытаниях на ползучесть вязкопластическая деформация возрастет во времени и достигает максимального значения ε_{vp}^{\max} к моменту разгрузки $t = t_{\text{creep}}$. При обратной ползучести, когда $\sigma = 0$, вязкопластическая деформация не накапливается, оставаясь постоянной. В этом случае уравнение (6) преобразуется к виду

$$\ln |\dot{\varepsilon}| = \frac{K_2 v_s}{RT} \varepsilon - \ln C' - \frac{K_2 v_s}{RT} \varepsilon_{vp}^{\max}. \quad (9)$$

Следует заметить, что приведенные уравнения не содержат переменную времени в явном виде. Она опосредована деформацией, которая является функцией времени и приложенного напряжения. Эти уравнения будут использованы далее для оценки скорости деформации ползучести как функции деформации и выделения вязкопластической составляющей из общей деформации ползучести.

2. Метод

Предложенный метод основан на анализе результатов испытаний материалов в режиме ползучесть—обратная ползучесть в координатах логарифм скорости деформации ползучести—общая деформация ползучести $\ln \dot{\varepsilon} - \varepsilon$, т. е. фактически рассматриваются диаграммы Шерби—Дорн. Однако этот термин не будет использован, поскольку рассматриваются

лишь начальные участки зависимостей $\ln \dot{\varepsilon}$ от ε , в то время как диаграммы Шерби—Дорн используются для анализа положения минимума скорости деформации ползучести, который отождествляется с разрушением материала при ползучести (длительной прочностью, долговечностью), что не является целью настоящей работы.

Кривая ползучести и диаграмма $\ln \dot{\varepsilon} — \varepsilon$ показаны схематично на рис. 1. В общем случае эта зависимость является нелинейной. На ней могут быть выделены три области, соответствующие разным механизмам деформации. Согласно уравнению (7) в области I, представленной линейной зависимостью $\ln \dot{\varepsilon}$ от ε , развивается вязкоупругая деформация. В области II помимо вязкоупругой развивается и вязкопластическая деформация, скорость деформации ползучести при этом описывается уравнением (6). В области перехода II—III механизм деформации все еще контролируется пластическим течением, хотя и с меньшей скоростью по сравнению со скоростью в области II. В общем случае переход II—III с “близким к нулю” наклоном соответствует кажущемуся переходу от установившейся ползучести к ускоренной [22, 23]. Последняя проявляется в области III, заканчивающейся разрушением материала. В настоящей работе анализ данных ограничивается областями I и II.

Итак, полагаем, что отклонение от линейности зависимости $\ln \dot{\varepsilon} — \varepsilon$ при переходе I—II вызвано вкладом вязкопластической составляющей деформации. Нелинейная функция в области II может быть представлена как кусочно-линейная или в первом приближении как линейная функция с параметрами, отличными от таковых для линейной функции в области I. Такое упрощение позволяет определить деформацию ползучести ε_{vp}^0 , при которой инициируется вязкопластическая составляющая, как точку пересечения двух линий (см. рис. 1—б):

$$\text{при } \varepsilon \leq \varepsilon_{vp}^0 \quad \ln \dot{\varepsilon} = -k_1 \varepsilon + b_1, \quad (10)$$

$$\text{при } \varepsilon > \varepsilon_{vp}^0 \quad \ln \dot{\varepsilon} = -k_2 \varepsilon + b_2. \quad (11)$$

В соответствии с уравнением (7) прямая линия в области I, определяемая уравнением (10) с параметрами $k_1 = \frac{K_2 v_s}{RT}$ и $b_1 = \ln C'$, характеризует развитие вязкоупругой деформации. Используя обозначения параметров k_1 и b_1 , выражение (8) для вязкопластической деформации можно записать как

$$\varepsilon_{vp} = \frac{1}{k_1} (\ln \dot{\varepsilon} - b_1) + \varepsilon. \quad (12)$$

Для $\varepsilon > \varepsilon_{vp}^0$, т.е. в области II, зависимость $\ln \dot{\varepsilon}$ от ε описывается уравнением (11), а зависимость вязкопластической деформации от общей дефор-

магии (12) принимает вид

$$\varepsilon_{vp} = \left(1 - \frac{k_2}{k_1} \right) \varepsilon + \frac{b_2 - b_1}{k_1}. \quad (13)$$

Как видно из (13), ε_{vp} есть линейная функция ε с начальной точкой $\varepsilon_{vp}^0 = \frac{b_2 - b_1}{k_2 - k_1}$. После определения параметров k_1, k_2, b_1 и b_2 путем простой линейной аппроксимации уравнениями (10), (11) (см. рис. 1—б) величина ε_{vp} может быть вычислена для любого ε . Еще раз заметим, что влияние приложенного напряжения и времени опосредовано значением ε .

В соответствии с (10) параметр k_1 характеризует скорость затухания вязкоупругой деформации. Аналогично параметр k_2 уравнения (11) характеризует скорость затухания общей деформации ползучести после того, как инициирована вязкопластическая деформация; $k_2 < k_1$. В режиме обратной ползучести, согласно уравнению (9), линейные зависимости $\ln|\dot{\varepsilon}|$ от ε характеризуются тем же значением параметра k_1 , но с отрицательным наклоном прямой к оси ε .

3. Проверка применимости метода и обсуждение

Метод апробирован с использованием результатов экспериментов на ползучесть—обратную ползучесть в условиях одноосного нагружения образцов ПЭВП, наполненного многостенными углеродными нанотрубками ($c = 2, 5, 7,5$, и 10% по массе). Методика изготовления и испытания нанокompозита детально описаны в [26], а экспериментальные данные представлены в [27]. Для покрытия широкого диапазона значений деформации ползучести в областях вязкоупругости и вязкоупругопластичности

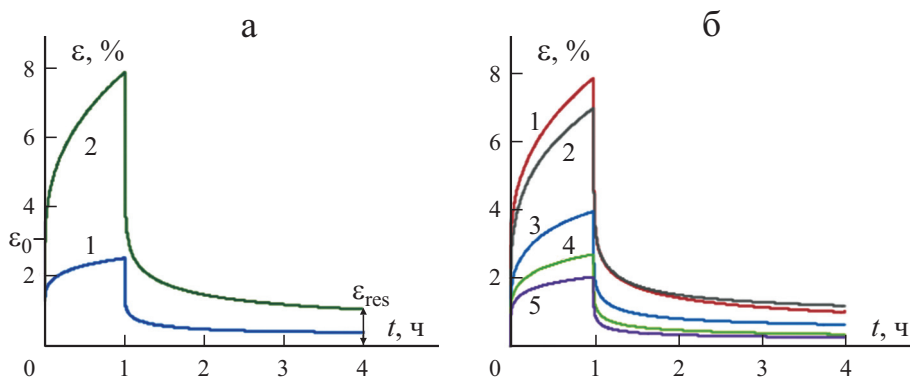


Рис. 2. Характерные кривые ползучести и обратной ползучести чистого ПЭВП при $\sigma = 0,25 \sigma_y$ (1) и $\sigma = 0,5 \sigma_y$ (2) (а) и нанокompозита с наполнением $c = 0$ (1), 2 (2), 5 (3), 7,5 (4) и 10% по массе (5) (б) при $\sigma = 0,5 \sigma_y$ [27].

использованы результаты испытаний на ползучесть разной длительности (30 мин и 1 ч) и при разных напряжениях, соответствующих $0,25\sigma_y$ и $0,5\sigma_y$, где σ_y — предел текучести ПЭВП и каждой композиции. Длительность обратной ползучести всегда была в 3 раза больше, чем длительность активного нагружения. Испытывали по крайней мере три образца-близнеца каждой композиции. В общем проанализированы результаты испытаний на ползучесть—обратную ползучесть 57 образцов нанокompозита.

Характерные кривые ползучести и обратной ползучести чистого ПЭВП и нанокompозита показаны на рис. 2. Они монотонны и не обнаруживают какого-либо качественного отличия от результатов, известных из литературы: мгновенная деформация ε_0 , деформация ползучести $\varepsilon(t)$, а также остаточная деформация ε_{res} возрастают с увеличением уровня напряжения (рис. 2—*a*). Нанокompозит обладает меньшей ползучестью и меньшей остаточной деформацией по сравнению с чистым полимером, эффект усиливается с ростом величины c (рис. 2—*б*). Эти результаты обсуждали более подробно в предыдущих работах авторов [25, 26]. Материалы проявляют нелинейное вязкоупруго-вязкопластическое поведение.

Данные рис. 2 в координатах $\ln \dot{\varepsilon} - \varepsilon$ приведены на рис. 3. Как видно из данных рис. 3—*a*, при $\sigma = 0,25\sigma_y$ кривая, соответствующая стадии ползучести, четко разделяется на два линейных участка, что указывает на вязкоупругую и вязкоупруго-вязкопластическую деформацию в областях I и II (см. рис. 1—*б*). При $\sigma = 0,5\sigma_y$ диаграмма $\ln \dot{\varepsilon} - \varepsilon$ нелинейна с различимым переходом из области II в III, что указывает на разные скорость и, вероятно, природу вовлекаемых в деформирование необратимых процессов. Нелинейность диаграмм $\ln \dot{\varepsilon} - \varepsilon$ наполненного композита заметно уменьшается с увеличением содержания нанонаполнителя c (рис. 3—*б*).

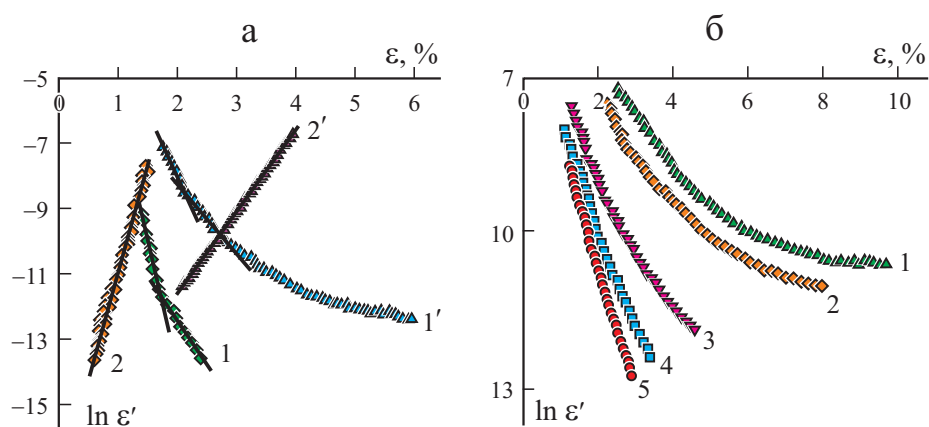


Рис. 3. Диаграммы $\ln \dot{\varepsilon} - \varepsilon$ чистого ПЭВП для ползучести (1, 1') и обратной ползучести (2, 2') при $\sigma = 0,25\sigma_y$ (1, 2) и $\sigma = 0,5\sigma_y$ (1', 2') (по данным рис. 2—*a*) и нанокompозитов (по данным рис. 2—*б*).

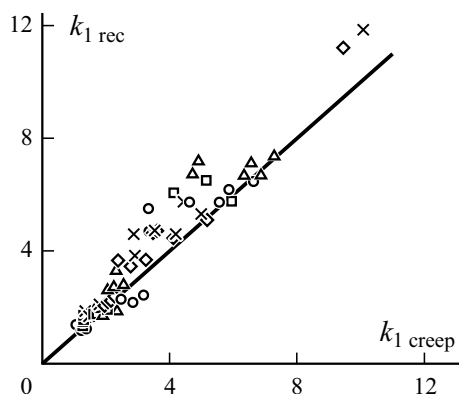


Рис. 4. Соотнесенность параметров k_1 для ползучести и обратной ползучести нанокомпозитов при $c = 0$ (\circ); 2 (\square); 5 (Δ); 7,5 (\diamond); 10% по массе (\times) при разных значениях напряжения и длительности испытаний на ползучесть. Линия — прямая пропорциональность.

При обратной ползучести диаграммы $\ln \dot{\varepsilon} - \varepsilon$ линейны для обоих рассматриваемых уровней нагрузки при ползучести (см. рис. 3—*a*). Такое поведение описывается уравнением (8) и соответствует предположению о том, что обратная ползучесть обусловлена лишь вязкоупругой деформацией. Параметры k_1 , определенные путем линейной аппроксимации диаграмм ползучести и обратной ползучести уравнением (10) (см. рис. 3) для всех исследуемых нанокомпозитов, приведены на рис. 4. Как видно, k_1 (ползучесть) = k_1 (обратная ползучесть). Это свидетельствует о том, что вязкопластическая деформация, накопленная при ползучести, не оказыва-

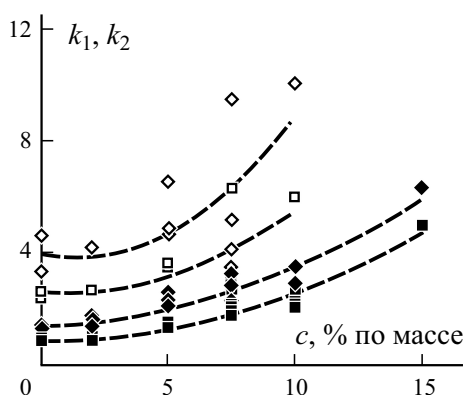


Рис. 5. Параметры k_1 (\diamond , \blacklozenge) и k_2 (\square , \blacksquare) аппроксимирующих уравнений (10), (11) нанокомпозитов при $\sigma = 0,25 \sigma_y$ (светлые значки) и $\sigma = 0,5 \sigma_y$ (темные значки) в зависимости от содержания нанонаполнителя c .

ет существенного влияния на скорость вязкоупругой деформации при обратной ползучести. Таким образом, получено подтверждение аддитивности вкладов вязкоупругой и вязкопластической деформации в общую деформацию ползучести, используемую в уравнении (4).

Значения параметров k_1 и k_2 , определенных путем аппроксимации линейных участков диаграмм $\ln \dot{\epsilon} - \epsilon$ уравнениями (10), (11), для нанокомпозитов в зависимости от степени наполнения для двух уровней напряжения представлены на рис. 5. Тенденция к увеличению значений k_1 и k_2 с увеличением содержания нанонаполнителя c обусловлена, вероятно, “задерживающим” влиянием нанонаполнителя на обратимые и необратимые процессы в ПЭВП.

Для проверки предложенного метода проведено сравнение рассчитанных с использованием уравнения (3) максимальных вязкопластических деформаций при ползучести ϵ_{vp}^{\max} и остаточных деформаций ϵ_{res} , определенных экспериментально из испытаний после завершения обратной ползучести. Результаты, приведенные на рис. 6 для нанокомпозитов с разным коэффициентом наполнения при разных уровнях напряжения, показывают достаточно удовлетворительное соответствие значений ϵ_{vp}^{\max} и ϵ_{res} . На рис. 7 величины ϵ_{vp}^{\max} и ϵ_{res} представлены в зависимости от общей деформации. Как видно из данных рисунка, зависимость вязкопластической деформации от напряжения и времени определяется величиной общей деформации ползучести. Вязкопластическая деформация является обобщенной функцией общей деформации ползучести для чистого ПЭВП и нанокомпозитов с разным коэффициентом наполнения при разных зна-

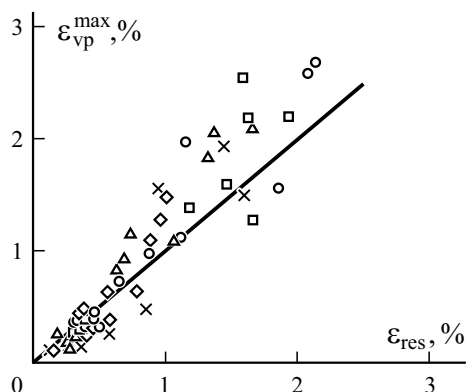


Рис. 6. Корреляция значений максимальной вязкопластической деформации ϵ_{vp}^{\max} при ползучести, вычисленной по уравнению (13), и остаточной деформации ϵ_{res} после обратной ползучести, определенной экспериментально, для нанокомпозитов при $c = 0$ (\circ); 2 (\square); 5 (Δ); 7,5 (\diamond); 10% по массе (\times) при разных уровнях напряжения и длительности испытаний на ползучесть. Линия — прямая пропорциональность.

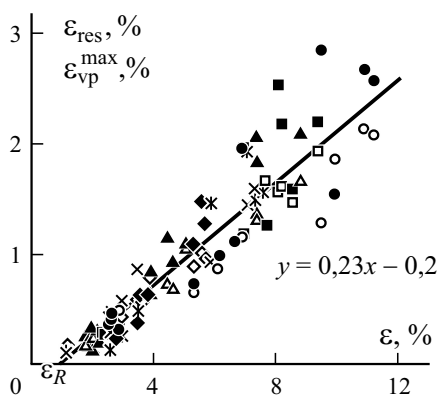


Рис. 7. Зависимость максимальной вязкопластической деформации ε_{vp}^{\max} при ползучести (темные значки), вычисленной по уравнению (13), и остаточной деформации ε_{res} после обратной ползучести (светлые значки), определенной экспериментально, от общей деформации ползучести для нанокompозитов при $c = 0$ (\circ , \bullet); 2 (\square , \blacksquare); 5 (\triangle , \blacktriangle); 7,5 (\diamond , \blacklozenge); 10% по массе (\times , $+$) при разных уровнях напряжения и длительности испытаний на ползучесть. Линия — линейная аппроксимация.

чениях напряжения и времени ползучести. Введение нанонаполнителя в ПЭВП приводит к уменьшению деформации ползучести, и, следовательно, к уменьшению вязкопластической деформации. Величина $\varepsilon_R \approx 0,9\%$ на рис. 7, определенная линейной аппроксимацией $\varepsilon_{vp}^{\max} = 0,23\varepsilon - 0,2$, соответствует обратимой деформации в уравнении (4). С ростом общей деформации ползучести разброс данных для ε_{res} и ε_{vp}^{\max} увеличивается, что, очевидно, определяет предел применимости предложенного метода и использованных упрощений в виде линейной зависимости $\ln \dot{\varepsilon} - \varepsilon$ в области II (см. рис. 1—б). Это в свою очередь приводит к некоторой неопределенности при нахождении параметров аппроксимации уравнений (10), (11). Несмотря на это и учитывая достаточно большую область изменений деформации ползучести в экспериментальных данных, используемых для проверки соотнесенности значений ε_{vp}^{\max} и ε_{res} , предложенный метод может рассматриваться как полезный инструмент для простейшей оценки вязкопластической деформации, накапливаемой при ползучести. Основным преимуществом метода является то, что он не требует проведения длительных испытаний на обратную ползучесть. Более того, зависимость $\varepsilon_{vp}(\varepsilon)$ может быть построена на основе относительно небольшого количества испытаний, а величина ε_{vp} рассчитана для произвольного уровня напряжения, времени ползучести и/или воздействия какого-либо внешнего фактора [25]. Конечно, для подтверждения кинетики накопления вязкопластической деформации необходимо добавить физические методы регистрации необратимых изменений структуры материал. Целесообразно проверить и применимость этого метода на других материалах.

Выводы

Предложен новый полуэмпирический метод выделения вязкопластической компоненты из общей деформации ползучести. Метод основан на анализе результатов экспериментов на ползучесть с использованием уравнения Эйринга. Вязкопластическая деформация вычислена с использованием четырех коэффициентов аппроксимации, определенных из экспериментальных данных. Установлено общее линейное соотношение между вязкопластической компонентой и общей деформацией ползучести для ПЭВП с разной степенью наполнения многостенными углеродными нанотрубками, испытанного при разных уровнях напряжения и времени ползучести. Применимость метода подтверждена достаточно удовлетворительной корреляцией результатов вычислений максимальной вязкопластической деформации и полученными экспериментальными значениями остаточных деформаций после разгрузки и обратной ползучести для всех исследуемых нанокомпозитов. Введение в ПЭВП нанонаполнителя приводит к уменьшению деформации ползучести и, следовательно, к уменьшению вязкопластической составляющей деформации.

Используемые в настоящей работе экспериментальные данные получены в рамках проекта ERDF No. 1.1.1.1/16/A/141.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ward I. M., Sweeney J.* An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers. — John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, 2004. — 394 p.
2. *Aniskevich K., Starkova O., Jansons J., Aniskevich A.* Long-Term Deformability and Aging of Polymer Matrix Composites. — Nova Sci. Publ., 2011. — 190 p.
3. *Megnig M., Varna J.* Nonlinear viscoelastic, viscoplastic characterization of uni-directional GF/EP composite // Mech. Time-Dependent Mater. — 2003. — No. 7. — P. 269—290.
4. *Dasappa P., Lee-Sullivan P., Xiao X.* Development of viscoplastic strains during creep in continuous fibre GMT composites // Composites: Part B. — 2010. — Vol. 41. — P. 48—57.
5. *Zaoutsos S. P., Papanicolau G. C.* On the influence of preloading in the nonlinear viscoelastic—viscoplastic response of carbon—epoxy composites // Compos. Sci. Technol. — 2010. — Vol. 70. — P. 922—929.
6. *Pupure L., Saseendran S., Varna J.* Effect of degree of cure on viscoplastic shear strain development in layers of [45/-45]_s GF/EP composites // J. Compos. Mater. — 2018. — Vol. 52, No. 24. — P. 3277—3288.
7. *Хохлов А. В.* Индикаторы применимости и способы идентификации нелинейной модели типа Максвелла для реономных материалов по кривым нагружения и разгрузки // Механика композит. материалов. — 2019. — Т. 55, № 2. — С. 277—302.

8. *Zapas L. J., Crissman J. M.* Creep and recovery behaviour of ultra-high molecular weight polyethylene in the region of small uniaxial deformations // *Polymer*. — 1984. — Vol. 25. — P. 57-62.
9. *Varna J., Pupure L.* Characterization of viscoelasticity, viscoplasticity, and damage in composites // *Guedes R.* Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites. — 2nd ed. — Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2019. — P. 497—530.
10. *Качанов Л. М.* О времени разрушения при ползучести // *Изв. АН СССР. Отд. техн. наук*. — 1958. — С. 26—31.
11. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкций. — М.: Наука, 1966. — 752 с.
12. *Kim J.-S., Muliana A. H.* A combined viscoelastic—viscoplastic behavior of particle reinforced composites // *Int. J. Solids Struct.* — 2010. — Vol. 47. — P. 580—594.
13. *Muliana A.* Nonlinear viscoelastic-degradation model for polymeric based materials // *Int. J. Solids Struct.* — 2014. — Vol. 51, No. 1. — P. 122—132.
14. *Shapery R. A.* On the characterization of nonlinear viscoelastic materials // *Polym. Eng. Sci.* — 1969. — Vol. 9, No 4. — P. 295—310.
15. *Krausz A. S., Eyring H.* Deformation Kinetics. — N. Y.: John Wiley & Sons, 1975. — 398 p.
16. *Eyring H.* Viscosity, plasticity, and diffusion as examples of absolute reaction rates // *J. Chem. Phys.* — 1963. — No. 4. — P. 283—295.
17. *Spathis G., Kontou E.* Creep failure time prediction of polymers and polymer composites // *Compos. Sci. Technol.* — 2012. — Vol. 72. — P. 959—964.
18. *Kontou E.* Creep analysis of polymer matrix composites using viscoplastic models // *Guedes R.* Creep and fatigue in polymer matrix composites. — 2nd ed. — Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2019. — P. 215—248.
19. *Altenbach H., Kutschke A., Girchenko A., Naumenko K.* // Creep behavior modeling of polyoxymethylene (POM) applying rheological models // *Altenbach H., Brünig M.* Inelastic Behavior of Materials and Structures under Monotonic and Cyclic Loading. — Springer Int. Publ. 2015. — P. 1—16.
20. *Voight B.* A relation to describe rate-dependent material failure // *Science*. — 1989. — Vol. 243, No. 4888. — P. 200—203.
21. *Corcoran J., Davies C. M.* Monitoring power-law creep using the failure forecast method // *Int. J. Mech. Sci.* — 2018. — P. 179—188.
22. *Sherby O. D., Dorn J. E.* Anelastic creep of polymethyl methacrylate // *Mech. Phys. Solid*. — 1958. — No. 6. — P. 145—162.
23. *Erartsin O., van Drongelen M., Govaert L. E.* Identification of plasticity-controlled creep and fatigue failure mechanisms in transversely loaded unidirectional thermoplastic composites // *J. Compos. Mater.* — 2021. — Vol. 55, No. 14. — P. 1947—1965.
24. *van Erp T. B., Reynolds C. T., Peijs T., van Dommelen J. A. W., Govaert L. E.* Prediction of yield and long-term failure of oriented polypropylene: kinetics and anisotropy // *J. Polymer Sci., Part B: Polym. Phys.* — 2009. — Vol. 47. — P. 2026—2035.
25. *Starkova O., Aniskevich K., Sevchenko J., Bulderberga O., Aniskevich A.* Relationship between the residual and total strain from creep- tests of polypropylene/multiwall carbon nanotube composites // *J. Appl. Polym. Sci.* — 2021. — Vol. 138, No. 10. — P. 49—57.

26. *Starkova O., Sevchenko J., Stankevich S., Bulderberga O., Aniskevich A.* Creep of high density polyethylene filled with multiwall carbon nanotubes // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2020. — No. 1431, 012005.

27. *Starkova O., Sevchenko J., Stankevich S., Bulderberga O., Aniskevich A.* // Creep and recovery of high density polyethylene filled with multiwall carbon nanotubes. — *Mendeley Data.* — 2020. — V1. — <http://dx.doi.org/10.17632/685rrk6tnn.1>

Поступила в редакцию 22.02.2021

Окончательный вариант поступил 08.04.2021

Received Feb. 22, 2021 (Apr. 8, 2021)
