

## **Кратковременная ползучесть и прочность полипропиленовых волокнистых структур**

**Н. К. Кучер, М. П. Земцов, Е. Л. Данильчук**

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Исследуются кратковременная ползучесть и прочность полипропиленовых волокнистых структур. На основе полученных экспериментальных данных разработаны модели линейного и нелинейного вязкоупругого деформирования материалов. Определены области их применимости и рассмотрены критерии оценки статической прочности и долговечности таких композиций.*

**Ключевые слова:** кратковременная ползучесть, статическая прочность, долговечность, волокнистые структуры, модели вязкоупругого деформирования материалов, уравнения состояния.

**Введение.** Волокнистые структуры и каркасы, изготовленные по технологиям текстильной промышленности, все более широко применяются в различных отраслях народного хозяйства: в машиностроении, легкой промышленности, на транспорте, в строительстве, материаловедении при создании новых композиционных материалов, при производстве товаров широкого потребления и т.д. Изготовленные из них элементы деталей машин и механизмов позволяют снизить материало- и энергоемкость конструкций, улучшить их функциональные параметры, повысить надежность и долговечность и, как следствие, уменьшить себестоимость.

Исходным материалом большинства текстильных структур служат полиамидные (капроновые, анидные), полиэфирные (лавсановые) и штапельные комплексные нити, представляющие собой линейное соединение волокон (элементарных нитей), сформированное в непрерывную пряжу и имеющее характерные для текстильного материала свойства: высокую прочность при растяжении и гибкость. Комплексная нить может состоять из одного или множества непрерывных или прерывающихся волокон. Чтобы предотвратить проскальзывание волокон относительно друг друга и получить функциональную нить, волокна подвергаются определенной крутке или переплетаются.

Механические свойства нити зависят от ее структуры, свойств волокон или моноволокон. Работоспособность нити определяется такими параметрами, как плотность упаковки волокон, их геометрические размеры, длина сегмента волокна между точками зацепления и его подвижность, а также ориентация волокон относительно оси нити. Структура нити играет главную роль в механизме реализации свойств волокон в свойства нити.

Исследования структуры комплексных нитей и ее влияние на механические характеристики материалов при различных видах термосилового нагружения рассмотрены в работах [1–7]. При этом отмечалось, что для каждой комплексной нити в зависимости от ее назначения может быть выбрана оптимальная толщина элементарной нити, которая позволяет существенно повысить начальные модули продольной упругости и сдвига,

предел прочности и предельную деформацию разрушения, стойкость к истиранию, выносливость при многоцикловом нагружении и др.

Для прогнозирования диаграммы деформирования комплексной крученой нити, исходя из ее структуры и механических свойств составляющих компонентов, предложены различные модели [7], однако только для систем из непрерывных волокон имеет место удовлетворительное соответствие между расчетными и экспериментальными данными. Для нитей из коротких волокон или смешанных (состоят из двух и более типов элементарных нитей) такие расчеты возможны в предположении малости деформаций и выполнения закона Гука.

Многочисленные экспериментальные данные [1, 2, 4, 6, 7] свидетельствуют о том, что скорость деформации существенно влияет на механические параметры большинства текстильных структур. Следовательно, при разработке математических моделей, описывающих процессы деформирования в волокнистых системах, должны также учитываться имеющие место реологические эффекты.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании закономерностей кратковременной ползучести и прочности полипропиленовой комплексной нити LIPOLA/A-10 и разработке на их основе эффективных уравнений состояния наследственного типа. Поставленную задачу решали с помощью моделей линейной и нелинейной теории вязкоупругости, при этом определяли области их применимости.

Комплексная нить LIPOLA/A-10 состоит из 148 непрерывных элементарных волокон плотностью 111 текс и представляет собой некрученую нить. В Украине такие нити используются в основном для прошивки изделий, изготовления канатов и упаковочных средств.

**1. Методики испытаний и результаты экспериментов.** Для изучения реакции волокнистых структур при комнатной температуре в соответствии с нормативными документами [8] проводились экспериментальные исследования их механического поведения. При статических испытаниях образцов на испытательной машине “Instron-1126” деформации измерялись исходя из перемещений траверсы установки. Для уточнения эффективного мгновенного модуля продольной упругости  $E_0$ , предела прочности  $\sigma_B$  и соответствующей ему предельной деформации  $\varepsilon_B$ , а также ориентировочной диаграммы мгновенного растяжения комплексной нити испытания проводились на пяти образцах с усреднением полученных результатов. Отметим, что диаграмма мгновенного деформирования восстанавливалась из серии изохронных кривых ползучести. По данным испытаний на растяжение определялась только кривая “быстрого деформирования”, которая практически не зависит от скорости деформации и достаточно близко расположена к диаграмме мгновенного деформирования.

Анализ экспериментальной диаграммы мгновенного деформирования показал, что для исследуемых нитей при комнатной температуре в области малых деформаций (до 5%) характерна линейная диаграмма растяжения и они могут рассматриваться как линейный вязкоупругий материал. Мгновенный эффективный продольный модуль упругости  $E_0$  принимался равным 6208,2 МПа, предел прочности при растяжении  $\sigma_B$  – 629,7 МПа, соответствующая предельная деформации  $\varepsilon_B$  – 21,07%.

Для исследования длительных характеристик композиции проводились также испытания на одноосную ползучесть образцов при постоянной величине действующего напряжения. Перемещение реперных точек образцов в процессе деформирования измерялось на базе  $100 \pm 10$  мм с помощью катетометра КМ-8 с ценой деления 0,01 мм.

Испытания проводились при 10 постоянных значениях напряжений  $\sigma_k = p\sigma_B$ , где  $p = 0,16; 0,23; 0,30; 0,37; 0,40; 0,51; 0,58; 0,65; 0,70; 0,77$ . Полученные зависимости полной деформации  $\varepsilon(t, \sigma_k)$  от времени  $t$  для различных фиксированных значений напряжений  $\sigma_k$  приведены на рис. 1. В качестве аппроксимирующих функций, описывающих экспериментальные данные, использовались функции вида  $\varepsilon = ab^t t^d$ , где  $a, b, d$  – параметры кривой ползучести.

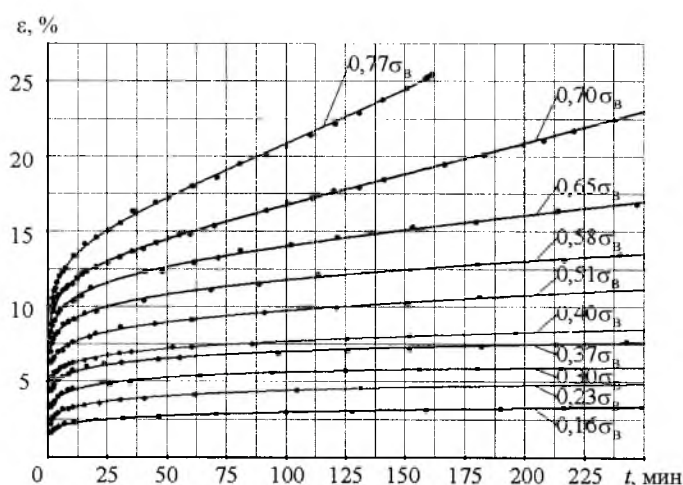


Рис. 1. Первичные кривые кратковременной ползучести комплексной нити LIPOLA/A-10 (точки – экспериментально полученные значения деформаций.)

Как видно из рис. 1, для кривых характерны две стадии: неустановившейся и установившейся ползучести. Отсутствие третьей стадии – ускоренной ползучести позволяет при формулировке уравнений состояния не использовать понятие поврежденности материала.

По результатам экспериментов для каждого действующего напряжения  $\sigma_k$  строили также функции податливости  $J_k(t)$ , определяемые с помощью соотношения

$$J_k(t) = \frac{\varepsilon(t, \sigma_k)}{\sigma_k}. \quad (1)$$

**2. Определение области линейности вязкоупругих деформаций комплексной нити.** Процессы деформирования волокнистых структур анализировали с использованием подходов линейной и нелинейной теории вязкоупругости [9, 10]. При выборе уравнений состояния и описания реологического поведения материалов важно определить область линейности вязкоупругих деформаций.

Уравнение состояния линейной теории вязкоупругости применительно к малым деформациям в одномерном случае определяется выражением

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_0} + \frac{1}{E_0} \int_0^t K_1(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – напряжение;  $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^c$  – полная деформация, включающая в себя упругую компоненту и компоненту ползучести;  $E_0$  – мгновенный модуль упругости;  $K_1(t)$  – ядро ползучести (функция влияния).

Проанализируем ползучесть комплексной нити, к которой мгновенно приложено растягивающее напряжение

$$\sigma(t) = \sigma_k h(t), \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где  $h(t)$  – единичная функция Хевисайда;  $\sigma_k = \text{const}$ .

Соотношение (2) при действии постоянного напряжения  $\sigma_k$  приводится к определяющему уравнению ползучести линейного вязкоупругого материала:

$$\varepsilon(t, \sigma_k) = \frac{\sigma_k}{E_0} h(t) \left[ 1 + \int_0^t K_1(\tau) d\tau \right]. \quad (4)$$

Необходимым условием линейности вязкоупругих деформаций является инвариантность функции податливости относительно действующих напряжений  $\sigma_k$ . В этом случае условие линейности представляется выражением

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t, \sigma_1)}{\sigma_1} = \frac{\varepsilon(t, \sigma_2)}{\sigma_2} = \dots = \frac{\varepsilon(t, \sigma_n)}{\sigma_n}. \quad (5)$$

Однако вследствие статистической природы механических свойств материалов экспериментальные кривые податливости, построенные для каждого напряжения  $\sigma_k$ , согласно представлению (5) будут расслаиваться. В этом случае судить о совпадении функций податливости можно только с определенной погрешностью и вероятностью.

Следуя [11, 12] линейным вязкоупругим материалом с погрешностью  $2\delta = 10\%$  будем называть материал, для которого все экспериментальные кривые податливости попадают в интервал, ограниченный величинами  $\pm \delta$ , относительно ее выборочного среднего.

Выборочное среднее функции податливости  $\bar{J}(t_j)$  для малых объемов выборки ( $n < 50$ ), которая наиболее часто встречается на практике, определяется соотношением [13]

$$\bar{J}(t_j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n J_k(t_j), \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

где  $J_k(t_j)$  – значение функции податливости, определенной из эксперимента, в момент времени  $t_j$  при действии напряжения  $\sigma_k$ ;  $n$  – число кривых податливости;  $m$  – количество реперных точек на каждой кривой податливости. Тогда истинное значение функции податливости в момент времени  $t_j$  определяется выражением  $J(t_j) = \bar{J}(t_j)$ .

Кривые функций податливости нити LIPOLA/A-10 для значений напряжений, при которых проявляются линейные свойства относительно деформаций, приведены на рис. 2, где тонкими сплошными линиями представлены результаты аппроксимации экспериментальных данных  $J_k(t)$ . На основе этих аппроксимаций рассчитывали среднеквадратичные значения функции податливости  $\bar{J}(t_j)$ , которые показаны на рис. 2 жирной линией. Там же штриховыми линиями отмечены границы доверительного интервала, соответствующего величине максимальной погрешности  $\delta$  от значений  $\bar{J}(t_j)$ .

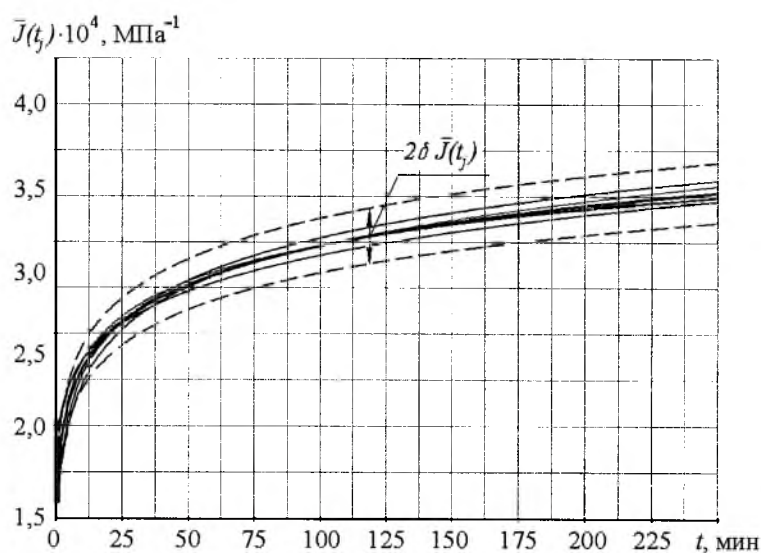


Рис. 2. Кривые функций податливости комплексной нити, их среднеквадратичные значения и границы доверительного интервала.

Видно, что при напряжениях, меньших  $0,4\sigma_B$ , характер исследуемой структуры аналогичен таковому линейного вязкоупругого материала. Такие же результаты относительно области линейности были получены при обработке изохронных кривых ползучести [12].

**3. Конкретизация определяющих уравнений линейной теории вязкоупругости.** Из представления (2) можно получить обратное соотношение для определения напряжений:

$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon(t) - E_0 \int_0^t R_1(t - \tau) \varepsilon(\tau) d\tau, \quad (7)$$

где  $R_1(t)$  – ядро релаксации материала, которое характеризует степень забывания предшествующих историй деформаций.

Конкретизация определяющих соотношений (2) и (7) сводится к выбору вида ядер наследственности и определению их параметров. Вышеуказанные ядра должны быть [9, 10] положительными, монотонными и интегрируемыми функциями на интервале  $[0, \infty)$ .

В качестве ядер ползучести  $K_1(t)$  и релаксации  $R_1(t)$  воспользуемся дробно-экспоненциальными ядрами Ржаницина [9, 10], эффективность которых была проиллюстрирована при расчете деформации ряда материалов. Примем

$$R_1(t) = A_1 e^{-\beta_1 t} t^{\alpha_1 - 1}; \quad K_1(t) = \frac{e^{-\beta_1 t}}{t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[A_1 \Gamma(\alpha_1)]^n t^{\alpha_1 n}}{\Gamma(\alpha_1 n)}, \quad (8)$$

где  $\Gamma(\alpha_1)$  – гамма-функция Эйлера;  $A_1, \alpha_1, \beta_1$  – характеристики материала, подлежащие определению.

Детально останавливаться на методиках определения параметров слабо сингулярных ядер не будем, поскольку они изложены в ряде работ, например [14–17]. В частности, искомые характеристики могут быть вычислены при аппроксимации кривой податливости, записанной в логарифмической системе координат, линейной функцией и учете коэффициента линейного сдвига по отношению к эталонной кривой [14]:

$$A_1 = 0,04696; \quad \alpha_1 = 0,35; \quad \beta_1 = 0,01665.$$

Эффективность таких уравнений состояния может быть проиллюстрирована при описании ползучести комплексной полипропиленовой нити под действием постоянных растягивающих напряжений  $\sigma_k$ , которые не превышают  $0,4\sigma_B$  (рис. 3).

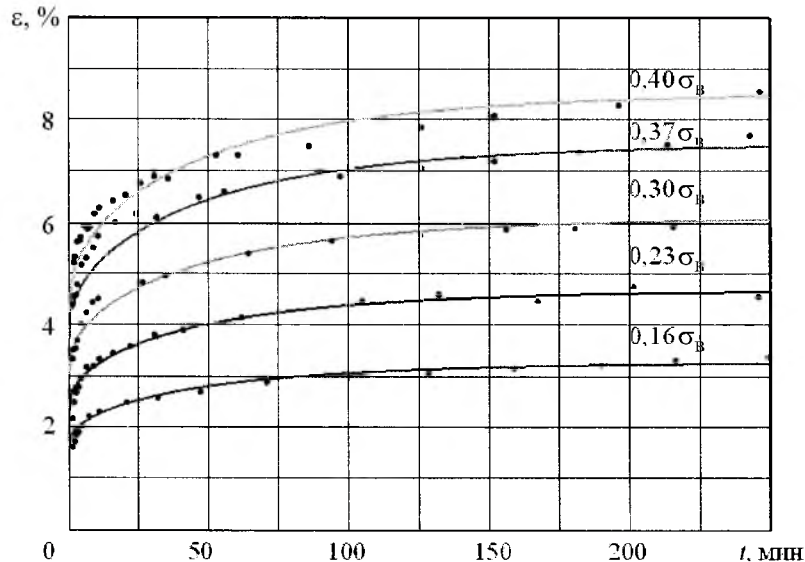


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных (точки) и расчетных (линии) деформаций ползучести, вычисленных на основе линейной модели вязкоупругости.



Прогнозируемые деформации ползучести  $\varepsilon(t, \sigma_k)$  определяли с помощью выражений (2), учитывая вышеприведенные значения параметров ядра Ржаницина. Для вычисления определенных интегралов от подынтегральных функций со слабой особенностью использовали вычислительную процедуру [17], которая позволяла исключить эту особенность.

Из рис. 3 видно, что хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными наблюдается для всего рассматриваемого диапазона действующих напряжений как на начальных стадиях вязкоупругого деформирования, так и на установившихся участках при значительных деформациях, которые могут достигать 8,5%.

**4. Определение параметров уравнений состояния нелинейной теории вязкоупругости для исследуемой нити.** Как отмечалось выше, при напряжениях более  $0,4\sigma_b$  в исследуемой структуре проявляются нелинейные эффекты, которые могут быть описаны с помощью моделей нелинейной теории вязкоупругости [9, 10].

Уравнения состояния нелинейной теории вязкоупругости могут быть представлены с использованием различных интегро-дифференциальных соотношений [8, 9, 17, 18].

Рассмотрим возможность прогнозирования процессов ползучести для вышеуказанного диапазона напряжений в рамках кубической теории вязкоупругости, уравнение состояния которой имеет вид [10, 18]

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_0} \left[ \sigma(t) + \int_0^t K_1(t-\tau)\sigma(\tau) d\tau \right] + h \int_0^t K_3(t-\tau)\sigma^3(\tau) d\tau, \quad (9)$$

где  $K_1(t)$ ,  $K_3(t)$  – функции влияния, определяемые по выражениям

$$K_i(t) = \frac{e^{-\beta_i t}}{t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[A_i \Gamma(\alpha_i)]^n t^{\alpha_i n}}{\Gamma(\alpha_i n)}, \quad i = 1, 3. \quad (10)$$

Как отмечалось в [10, 14], ряд в формуле (10) сходится равномерно по  $t$  на любом конечном интервале времени. Для больших значений  $t$  ядра  $K_i(t)$  имеют асимптотику

$$K_i(t) \approx \frac{1}{\alpha_i} [A_i \Gamma(\alpha_i)]^{\alpha_i^{-1}} e^{([A_i \Gamma(\alpha_i)]^{\alpha_i^{-1}} - \beta_i)t}. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что для достаточно больших значений  $t$  возможны два варианта развития деформаций:

$$\text{если } \frac{\beta_i^{\alpha_i}}{A_i \Gamma(\alpha_i)} > 1, \text{ то } K_i(t) \rightarrow 0, \quad (12)$$

$$\text{если } \frac{\beta_i^{\alpha_i}}{A_i \Gamma(\alpha_i)} < 1, \text{ то } K_i(t) \rightarrow \infty. \quad (13)$$

В первом варианте скорость деформации ползучести при постоянном напряжении стремится к нулю, что соответствует случаю ограниченной ползучести, когда деформация стремится к некоторому постоянному значению. Во втором случае скорость деформации стремится к бесконечности. Это значит, что имеет место неограниченная ползучесть, когда, начиная с некоторого значения  $t$ , скорость ползучести остается постоянной, а участок кривой ползучести представляет собой прямую линию. Следовательно, соотношение (9) может описывать как ограниченную, так и неограниченную ползучесть, а также обе стадии кривых ползучести в зависимости от выбранных параметров ядра.

Как видно из рис. 1, при действующих постоянных напряжениях  $\sigma_k$  из диапазона  $[0,4\sigma_b; 0,77\sigma_b]$  скорость деформации ползучести вначале убывает до определенного значения, а потом стремится к некоторой величине, которая отличается от нуля.

Задача конкретизации определяющих соотношений в этом случае состоит в том, чтобы по семейству кривых ползучести определить восемь параметров  $A_i, \alpha_i, \beta_i, E_0, h$  двух функций влияния.

Уравнение (9) для построенных кривых податливости при  $\sigma = \sigma_k H(t)$  принимает вид

$$\frac{\varepsilon(t)}{\sigma_k} = \frac{1}{E_0} \left[ 1 + \int_0^t K_1(t-\tau) d\tau \right] + h\sigma_k^2 \int_0^t K_3(t-\tau) d\tau. \quad (14)$$

Рассмотрим кривые податливости, которые укладываются в узкий пучок при  $0 \leq \sigma_k \leq 0,4\sigma_b$ . Для них соотношение (14) имеет вид линейного уравнения

$$\frac{\varepsilon^{\text{л}}(t)}{\sigma_k^{\text{л}}} = \frac{1}{E_0} \left[ 1 + \int_0^t K_1(t-\tau) d\tau \right], \quad (15)$$

где  $\varepsilon^{\text{л}}, \sigma_k^{\text{л}}$  – деформация и напряжения в линейной области. Параметры такой модели определены выше по методу совмещений (п. 3). Зная  $E_0$  и  $K_1(t)$ , представим уравнение ползучести (9) в нелинейной области ( $\sigma > 0,4\sigma_b$ ) в форме

$$E_0 \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_k} = 1 + \int_0^t K_1(\tau) d\tau + hE_0\sigma_k^2 \int_0^t K_3(\tau) d\tau, \quad (16)$$

или

$$E_0 \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_k} - \left[ 1 + \int_0^t K_1(\tau) d\tau \right] = hE_0\sigma_k^2 \int_0^t K_3(\tau) d\tau. \quad (17)$$



Выражение в левой части последнего соотношения обозначим как  $I(t)$ :

$$I(t) = E_0 \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_k} - \left[ 1 + \int_0^t K_1(\tau) d\tau \right]. \quad (18)$$

Теперь функцию  $I(t)$  полагаем известной, поскольку  $\varepsilon(t)/\sigma_k$  – измеряемые величины из экспериментальной кривой податливости, остальные параметры определены в п. 3. Соотношение (17) можно записать в виде

$$I(t) = hE_0\sigma_k^2 \int_0^t K_3(\tau) d\tau. \quad (19)$$

Исходя из представления (18) построим зависимость  $y = I(t)$  в логарифмической системе координат. Константу  $h$  и параметры  $A_3$ ,  $\alpha_3$ ,  $\beta_3$  определим с помощью графиков функций  $y_i = \int_0^t K_3(\tau) d\tau$ , которые построены также в логарифмической системе координат для различных значений параметров ядра. Совмещая экспериментально построенный график  $y = I(t)$  с “теоретическими” кривыми, в том числе путем горизонтального сдвига одного относительно другого, найдем тот, который совпадает с искомым. Сдвиг графиков по оси абсцисс обозначает преобразование шкалы времени

$$\lg(t_m) - \lg(t_3) \equiv \lg(k) \quad \text{или} \quad t_m = kt_3. \quad (20)$$

Параметры полученной подобной теоретической кривой припишем “экспериментальному” ядру  $K_3(t)$  в соотношении (19). Тогда величина параметра  $h$  определяется по выражению

$$h = \frac{I(t_3)}{E_0\sigma_k^2 \int_0^{t_3} K_3(\tau) d\tau}. \quad (21)$$

В результате получим:  $A_3 = 0,025$ ;  $\alpha_3 = 0,3$ ;  $h = 5,8 \cdot 10^{-10}$  МПа<sup>-3</sup>;  $\beta_3 = -0,008$ . Таким образом, определены все параметры уравнения состояния (9). Другие подходы для вычисления параметров уравнений состояния теории вязкоупругости рассмотрены в работах [9, 12, 15, 19, 20].

На рис. 4 показаны прогнозируемые зависимости общей деформации  $\varepsilon$  от времени  $t$ , вычисленные с использованием определяющих соотношений кубической теории вязкоупругости, для различных фиксированных значений напряжений  $\sigma_k$ . Видно, что имеет место несколько худшее соответствие между расчетными и экспериментальными данными, хотя основные тенденции процесса деформирования учитываются в уравнениях состояния. Про-

гнозируемые распределения деформаций для линейных областей деформирования не приводятся, поскольку они практически совпадают с результатами, полученными при использовании более простых определяющих соотношений (рис. 3). Корреляция расчетных и экспериментальных данных может быть несколько лучшей, если учитывать также мгновенную пластическую деформацию, которая легко определяется по данным рис. 4. По-видимому, для более точного описания таких процессов деформирования необходимо использовать конечные деформации, что вызывает определенные трудности при конкретизации уравнений состояния.

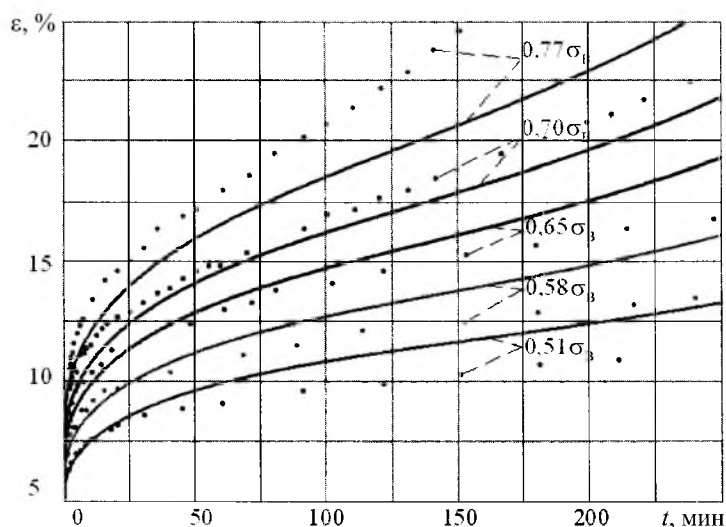


Рис. 4. Сопоставление экспериментальных данных (точки) с расчетными (сплошные линии) на основе нелинейной модели вязкоупругости.

**5. Упрощенное соотношение для описания установившейся ползучести полипропиленовой нити.** Анализ экспериментальных данных (рис. 1) показал, что начальная стадия диаграмм, которая характеризуется убывающей скоростью ползучести от времени, для рассматриваемого диапазона напряжений занимает не более 10–15 мин, после чего наблюдается стабилизация процесса. Скорость деформации установившейся ползучести зависит от напряжения и слабо зависит от предыстории деформации. Для данных волокнистых структур на кривых ползучести отсутствует третья стадия с ускоренной ползучестью, что позволяет легко спрогнозировать разрушение композиции. Кроме того, по достижении деформаций, величины которых больше 10% (см. напр., рис. 3), необходимо принимать во внимание также мгновенную пластическую деформацию, что не учитывалось в пп. 3 и 4.

При описании стадии установившейся ползучести [21, 22] можно ограничиться более простыми уравнениями состояния, при этом полагаем [21, 22], что общая деформация может быть представлена в виде  $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon^c$ , где  $\varepsilon_0$  – мгновенная деформация, включающая в себя упругую и пластическую составляющие. Кроме того, в мгновенную деформацию  $\varepsilon_0$  включим и деформацию ползучести, накопленную на первой стадии (рис. 5).

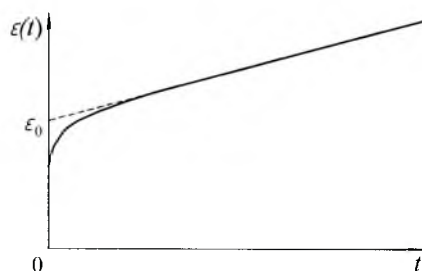


Рис. 5. Расчетная схема для выбора параметров упрощенной модели.

Тогда деформация на стадии установившейся ползучести определяется соотношением

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0(\sigma) + v(\sigma)t, \quad (22)$$

где  $v(\sigma)$  – скорость деформации ползучести, которая зависит только от напряжения.

В данном случае имеем

$$\varepsilon_0(\sigma) = (-4,753 + 0,2905\sigma)10^{-3}; \quad v(\sigma) = (29,0894 - 0,0511\sigma)^{-1,7428} \text{ мин}^{-1}.$$

Полученные аппроксимации для вычисления деформаций практически полностью совпадают с распределениями деформаций на стадии установившейся ползучести. На их основе можно достаточно точно рассчитать разрушение волокнистой структуры при наличии кривых длительной прочности данного материала.

**6. Оценка прочности полипропиленовой нити при наличии процессов ползучести.** Под кратковременной ползучестью материалов, как правило, понимают такие процессы ползучести, при которых часть деформации, нарушающей конструктивную целостность изделия, накапливается за относительно короткое время. С точки зрения конструктора максимально допустимая деформация для металлов составляет 1-2% и редко приближается к 5% [21]. Рассматриваемый диапазон времени может составлять примерно от 2-3 с до 20 мин. Для текстильных изделий, хотя это нигде не оговаривается, такой диапазон деформаций, по-видимому, может быть несколько шире.

В представленных расчетах деформаций, описывающих ползучесть нити, ограничивались временем в 250 мин. Эксперименты на ползучесть для выбранных фиксированных напряжений проводили до полного разрушения образцов. Рис. 6 в логарифмической системе координат иллюстрирует зависимость действующих напряжений  $\sigma_k$  от времени до разрушения  $t_*$  исследуемой структуры.

Как видно, для рассматриваемого диапазона напряжений все экспериментальные точки практически лежат на одной прямой линии. Следовательно, диаграмма длительной прочности нити описывается соотношением

$$\lg \sigma_k = \frac{1}{m} \lg t_* + \lg n, \quad (23)$$

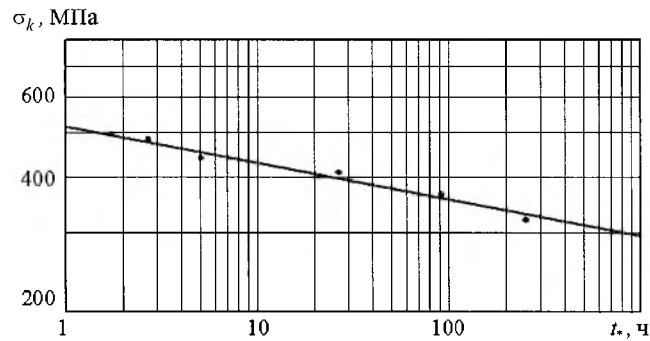


Рис. 6. Диаграмма длительной прочности полипропиленовой нити.

где  $m = 0,08116$ ;  $n = 517,07472$  МПа. После потенцирования последнего выражения получим представление

$$t_* = 10^{m \lg(\sigma_k / n)}, \quad (24)$$

позволяющее вычислить время до разрушения (в часах) элемента нити при наличии процессов ползучести.

## Выводы

1. Установлено, что комплексная некрученная полипропиленовая нить LIPOLA/A-10 имеет линейную диаграмму растяжения, и в области малых деформаций (до 8,5%) может рассматриваться как линейный вязкоупругий материал.

2. Определены закономерности кратковременного и длительного деформирования волокнистых структур. Показано, что при напряжениях, меньших  $0,4\sigma_B$ , процессы неупругого деформирования могут быть рассчитаны в рамках линейной вязкоупругой модели. При напряжениях, больших  $0,4\sigma_B$ , проявляются нелинейные эффекты ползучести, для прогнозирования которых необходимо использовать более сложные модели нелинейной теории наследственных сред.

3. Конкретизированные уравнения состояния линейной и нелинейной теорий вязкоупругости позволяют достаточно эффективно описывать активные процессы деформирования исследуемых полимерных волокнистых структур. Предложенные аппроксимации диаграмм длительной прочности нити дают возможность прогнозировать их прочность для достаточно широких диапазонов напряжений и деформаций.

## Резюме

Досліджується короткочасна повзучість і міцність поліпропіленових волокнистих структур. На основі отриманих експериментальних даних розроблено моделі лінійного і нелінійного в'язкопружного деформування мате-

ріалів. Визначено області їх застосування та розглянуто критерії оцінки статичної міцності і довговічності таких композицій.

1. *Белицин М. Н.* Синтетические нити (структура, свойства, методы расчета). – М.: Легкая индустрия, 1970. – 192 с.
2. *Мортон В. Е., Херл Д. В.* Механические свойства текстильных волокон. – М.: Легкая индустрия, 1971. – 182 с.
3. *Матуконис А. В.* Строение и механические свойства неоднородных нитей. – М.: Легкая индустрия, 1971. – 184 с.
4. *Кудряшова Н. И., Кудряшов Б. А.* Высокоскоростное растяжение текстильных материалов. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 272 с.
5. *Соловьев А. Н., Кукин Г. Н.* Свойства химических волокон и нитей // Свойства и особенности переработки химических волокон. – М.: Химия, 1975. – С. 401 – 486.
6. *Жимялис Р. Ф.* Механические свойства химических комплексных нитей при высокоскоростных испытаниях и прогнозирование качества текстильных материалов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Каунас, 1984. – 36 с.
7. *Хирл Дж.* Механика нитей и нетканых материалов // Тканые конструкционные композиты / Под ред. Т.-В. Чу и Ф. Ко. – М.: Мир, 1991. – С. 46 – 89.
8. *ГОСТ 25552-82.* Изделия крученые и плетеные. Методы испытаний. – Введ. 24. 12. 82.
9. *Работнов Ю. Н.* Элементы наследственной механики твердых тел. – М.: Наука, 1977. – 384 с.
10. *Кристенсен Р.* Введение в теорию вязкоупругости. – М.: Мир, 1974. – 338 с.
11. *Голуб В. П.* Экспериментальные исследования высокотемпературных процессов ползучести, усталости и поврежденности. I. Методы исследований // Прикл. механика. – 2001. – 37, № 4. – С. 3 – 38.
12. *Голуб В. П., Кобзарь Ю. М., Фернати П. В.* Нелинейная ползучесть вязкоупругих органических волокон при растяжении // Там же. – 2005. – 41, № 7. – С. 102 – 115.
13. *Степнов М. Н.* Статистические методы обработки результатов механических испытаний. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
14. *Колтунов М. А.* Ползучесть и релаксация. – М.: Высш. шк., 1976. – 278 с.
15. *Ферри Дж.* Вязкоупругие свойства полимеров. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 535 с.
16. *Розовский М. И.* Ползучесть и длительное разрушение материалов // Журн. техн. физики. – 1951. – 21, № 11. – С. 21 – 29.
17. *Крылов В. И.* Приближенное вычисление интегралов. – М.: Наука, 1967. – 500 с.

18. *Огибалов П. М., Победря Б. Е.* О нелинейной механике полимеров // *Механика полимеров.* – 1972. – № 1. – С. 12 – 23.
19. *Шестериков С. А., Юмашева М. А.* Конкретизация уравнений состояния теории ползучести // *Изв. АН СССР. Механика твердого тела.* – 1984. – № 1. – С. 86 – 94.
20. *Altenbach H.* Topical problems and applications of creep theory // *Int. Appl. Mech.* – 2003. – **39**, No. 6. – P. 631 – 656.
21. *Работнов Ю. Н., Милейко С. Т.* Кратковременная ползучесть. – М.: Наука, 1970. – 224 с.
22. *Гудрамович В. С.* Теория ползучести и ее применения к расчету элементов тонкостенных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2005. – 221 с.

Поступила 31. 01. 2007