

УДК 539.376

Павлюк Я.В. к.т.н., Рагулина В.С., Фернати П.В. к.т.н.
 Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, г. Київ, Україна

ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ НЕЛИНЕЙНО-ВЯЗКОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Pavluk Ya., Ragulina V., Fernati P.
 Institute of Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

FORWARD AND THE RETURN CREEP NONLINEAR- VISCOELASTIC-PLASTIC MATERIALS AT MONOAXIAL LOADING

Рассматривается задача расчета деформаций прямой и обратной ползучести при одноосном растяжении нелинейно-вязкоупругих и нелинейно-вязкопластических материалов. Для описания процесса деформирования используется нелинейная модель ползучести с независимой от времени нелинейностью типа модели Ю.Н. Работнова. В качестве ядра наследственности используется дробно-экспоненциальная функция. Выполнена экспериментальная апробация результатов расчета на задачах прямой и обратной ползучести стеклопластика контактного формования и нейлона FM 10001.

Ключевые слова: нелинейная модель ползучести, обратная ползучесть, дробно-экспоненциальная функция, ядро наследственности, экспериментальная апробация, вязкопластичность.

Введение

Большинство феноменологических теорий ползучести строится, как известно, на основе обработки результатов испытаний образцов материала на одноосную ползучесть при нескольких уровнях постоянных напряжений. Простейшим способом проверки обоснованности получаемых таким путем уравнений ползучести является процедура экспериментальной апробации результатов расчета деформаций ползучести при ступенчатых режимах нагружения. В расчетах при этом используются значения параметров уравнений, найденных из опытов при постоянных напряжениях. В качестве одного из таких режимов нагружения рассматривается режим полной разгрузки, а процесс ползучести интерпретируется соответственно как обратная ползучесть.

Для решения задач ползучести конструкций из нелинейно-вязкоупругих материалов часто используется наследственная теория ползучести Работнова [1]. Определяющие уравнения теории получены исходя из условия подобия изохронных диаграмм ползучести и в режиме полной разгрузки апробированы экспериментально в [2, 3].

В работе [4] условие подобия изохронных диаграмм ползучести расширено за счет введения в условие подобия и соответственно в определяющие уравнения теории экспериментальной диаграммы мгновенного деформирования. Полученные в результате определяющие уравнения апробированы на задаче расчета деформаций ползучести ряда нелинейно-вязкоупругих композитов и их компонент при стационарном нагружении [5]. В настоящей работе решается задача расчета деформаций прямой и обратной ползучести нелинейно-вязкоупругих и нелинейно-вязкоупругопластических материалов при одноосном нагружении на основе модели построенной в [4].

1. Постановка задачи

Зависимость между деформациями, напряжением и временем нелинейно-вязкоупругих и нелинейно-вязкоупругопластических материалов исходя из расширенного условия подобия изохронных диаграмм ползучести, в одномерном случае задаются уравнениями [4,5]

$$\begin{aligned} \phi_0(\varepsilon(t)) &= \sigma(t) + \lambda \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau \\ \sigma(t) &= \phi_0(\varepsilon(t)) - \lambda \int_0^t R(t-\tau)\phi_0(\varepsilon(\tau))d\tau, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где первое уравнение описывает процесс ползучести, а второе - процесс релаксации. В (1.1) принято $\varepsilon(t)$, $\varepsilon(\tau)$ - полная деформация, которая включает упругую компоненту ε^e и деформацию ползучести ε^c в момент времени

развивается обратная ползучесть, что отвечает движению по кривой CD на протяжении времени t_r . В момент времени $t = t_r + t_1$ происходит возобновление деформации до величины $\varepsilon_r \approx 0$.

Вязкопластические материалы. В процессе вязкопластичного деформирования общая деформация задается соотношением

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_c(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_{ve}(t) + \varepsilon_{vp}(t), \quad (1.7)$$

где ε_e - упругая составляющая, $\varepsilon_c(t)$ - составляющая ползучести, $\varepsilon_{ve}(t)$ - вязкоупругая составляющая, $\varepsilon_{vp}(t)$ - вязкопластическая составляющая.

Процесс вязкопластического деформирования соответствующий (1.1) можно проследить следующим образом. Активному деформированию ($d\varepsilon(t)/dt > 0$) отвечает движение по кривой $\varphi(\varepsilon)$ (см. рис. 2)

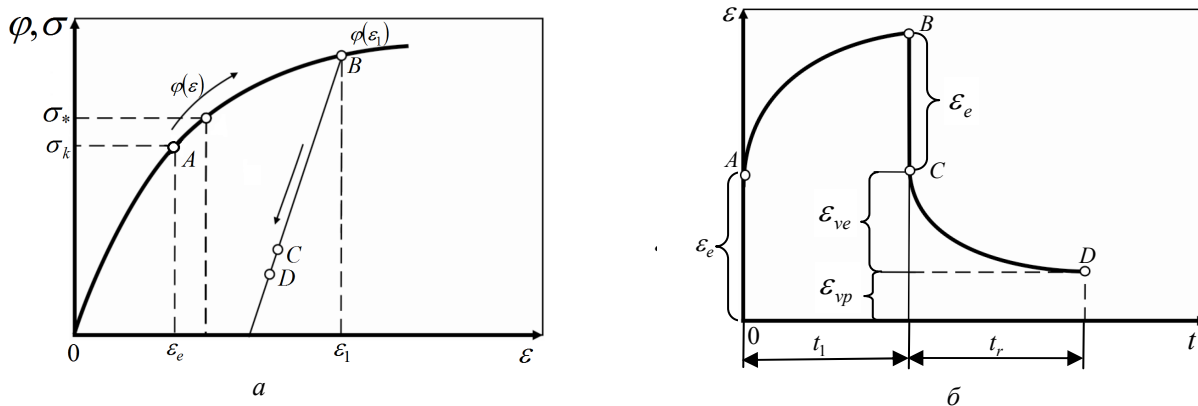


Рис. 2. Деформирование нелинейно-вязкопластических материалов в режиме нагружения и полной разгрузки в плоскости « $\sigma - \varepsilon$ » (а) и в плоскости « $\varepsilon - t$ » (б)

и по кривой $\varepsilon(t)$ вверх от точки 0 до точки А. Мгновенно приложенное напряжение σ_k вызывает мгновенную деформацию ε_e (точка А), величина которой определяется по диаграмме мгновенного деформирования. На протяжении времени t_1 развивается ползучесть по кривой АВ при постоянном напряжении. В момент времени $t = t_1$ напряжение снимается и процессу деформирования ($d\varepsilon(t) < 0$) отвечает движение по кривой $\varphi(\varepsilon)$ и по прямой $\varepsilon = \varepsilon(t_1)$ вниз от точки В до точки С. Упругое удлинение исчезает, а для всех $t > t_1$ развивается обратная ползучесть, что соответствует движению по кривой CD на протяжении времени t_r . В момент времени $t = t_r + t_1$ происходит возобновление деформации до величины $\varepsilon \approx \varepsilon_{vp}$.

Переход от вязкоупругого деформирования к вязкопластическому определяется из условия достижения критического значения пассивного нагружения σ_* . Величина нагружения σ_* определяется согласно методике изложенной в [7].

Целью работы является решение задачи расчета деформаций прямой и обратной ползучести нелинейно-вязкоупругих и нелинейно-вязкопластических материалов на основе нелинейной модели вязкоупругости (1.1). Для решения задачи необходимо определить на основе базовых экспериментальных данных параметры, входящие в определяющие уравнения модели, на основе определяющих уравнений (1.1) получить уравнения для расчета прямой и обратной ползучести нелинейно-вязкоупругих и нелинейно-вязкопластических материалов, произвести по ним расчеты деформаций, а также сравнить результаты расчетов с экспериментальными данными. В качестве объектов исследования выбраны нейлоновые волокна FM 10001 и стеклопластик контактного формования, экспериментальные данные которых заимствованы соответственно из [8, 9].

2. Определение параметров модели

Практическое применение модели (1.1) для решения поставленной задачи предполагает наличие значений параметров входящих в разрешающие уравнения. Параметры модели делятся на две группы: параметры кубического сплайна $a_{0,j}, a_{1,j}, a_{2,j}, a_{3,j}$ и $b_{0,j}, b_{1,j}, b_{2,j}, b_{3,j}$, входящие соответственно в функцию $\varphi_0(\varepsilon)$ и ее обращение $\psi_0(\sigma)$ и отвечающие за мгновенное деформирование и параметры α, β, λ , входящие в интегральный оператор и отвечающие за вязкоупругое деформирование. Перечисленные параметры определяются исходя из

базовых экспериментальных данных, включающих диаграмму мгновенного растяжения и несколько кривых ползучести при нескольких уровнях стационарного нагружения. Также необходимо определить область вязкоупругого и вязкопластического деформирования.

Считается, что материал ведет себя как нелинейно-упругий при напряжениях σ , которые не превышают некоторой критической величины σ_* . Величина σ_* отвечает ординате точки на диаграмме „ $\sigma-\varepsilon$ ”, для которой касательный модуль $\bar{E}(\varepsilon)$ удовлетворяет условию [7]

$$\bar{E}(\varepsilon) = \frac{1}{2 \ln 2} E, \quad (2.1)$$

где E – модуль линейной упругости и равен коэффициенту $a_{1,1}$ сплайн аппроксимации мгновенной диаграммы деформирования. В этом случае траектория разгрузки совпадает с траекторией нагружения. При напряжениях $\sigma > \sigma_*$ материал ведет себя, как упругопластический, так, что траектория нагружения и разгрузки не совпадают.

Дифференцируя функцию $\varphi_0(\varepsilon)$, которая задана кубичным сплайном (1.3), по ε , для величины $\bar{E}(\varepsilon)$ получаем соотношение

$$\bar{E}(\varepsilon) = \frac{d\varphi_0(\varepsilon)}{d\varepsilon} = a_{1,1} + a_{2,1}\varepsilon + a_{3,1}\varepsilon^2, \quad (2.2)$$

которое, с учетом (2.1), приводится к квадратичному уравнению

$$a_{1,1} + a_{2,1}\varepsilon + a_{3,1}\varepsilon^2 = \frac{1}{2 \ln 2} E. \quad (2.3)$$

Тут коэффициенты $a_{1,1}$, $a_{2,1}$ и $a_{3,1}$ определяются по результатам аппроксимации уравнением (1.3) диаграммы мгновенного деформирования $\varphi_0(\varepsilon)$ во всем диапазоне значений ε .

Корнями уравнения (2.3) являются два значения ε_* . Подставляя наибольшее значение ε_* в (1.3), получаем уравнение

$$\varphi_0(\varepsilon_*) = \sigma_* = a_{1,1}\varepsilon_* + a_{2,1}\varepsilon_*^2 + a_{3,1}\varepsilon_*^3, \quad (2.4)$$

которое позволяет рассчитать величину σ_* и определить по напряжению область нелинейно-вязкоупругого деформирования материала.

В Таблице 1 приведены значения параметров $a_{i,j}$ и $b_{i,j}$ кубических сплайнов (1.3) и (1.4) для исследованных материалов для одного из интервалов разбиения аргумента сплайна.

Таблица 1

Параметры аппроксимации диаграммы мгновенного деформирования

| Материал | $a_{0,3}$, МПа | $a_{1,3}$, МПа | $a_{2,3}$, МПа | $a_{3,3}$, МПа |
|--------------------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| | $b_{0,3}$ | $b_{1,3}$ | $b_{2,3}$ | $b_{3,3}$ |
| Стеклопластик контактного формования | 18,996 | $3,657 \cdot 10^3$ | $-9,666 \cdot 10^4$ | $1,027 \cdot 10^6$ |
| | -0,2021 | $1,095 \cdot 10^{-2}$ | $-1,957 \cdot 10^{-4}$ | $1,241 \cdot 10^{-6}$ |
| нейлон 10001 | 0,02245 | $2,298 \cdot 10^3$ | $-6,490 \cdot 10^4$ | $3,788 \cdot 10^6$ |
| | $-2,3 \cdot 10^{-7}$ | $8,090 \cdot 10^{-6}$ | $4,230 \cdot 10^{-4}$ | $8,63 \cdot 10^{-7}$ |

Таблица 2

Значения параметров модели

| Материал | E , МПа | $\bar{E}_*(\varepsilon_*)$, МПа | ε_* | σ_* , МПа | α | β , $\psi^{-(1+\alpha)}$ | λ , $\psi^{-(1+\alpha)}$ |
|--------------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------------|------------------|----------|--------------------------------|----------------------------------|
| Стеклопластик контактного формования | 8855 | 6387 | 0,00203 | 15,35 | -0,620 | 0,378 | 0,849 |
| нейлон FM 10001 | 1463 | 1055 | 0,01010 | 13,65 | -0,555 | 0,662 | 0,873 |

Значения модуля линейной упругости E , а также значения констант $\bar{E}_*(\varepsilon_*)$, ε_* , σ_* рассчитанных по выше изложенной методике приведены в табл. 2. Также в таблице 2 приведены значения реологических параметров найденных по методике, изложенной в [5].

3. Вязкоупругие материалы

Решая первое уравнение в (1.1) относительно $\varepsilon(t)$, для величины деформации ползучести с учетом (1.2), (1.4) и (1.5) получаем уравнение

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=0}^3 b_i \left(\sigma_1 h(t) \left(1 + \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n t^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1 + (1+\alpha)(1+n)]} \right) - \sigma_1 h(t-t_1) \left(1 + \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n (t-t_1)^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1 + (1+\alpha)(1+n)]} \right) \right)^i, \quad (3.1)$$

используемое в дальнейшем для расчетов деформаций прямой и обратной ползучести нелинейно-вязкоупругих материалов.

Результаты расчетов деформаций прямой и обратной ползучести для нейлона FM 10001, выполненных по уравнению (3.1) сопоставлены на рис. 3 с экспериментальными данными. Расчеты показаны линиями, а экспериментальные данные точками.

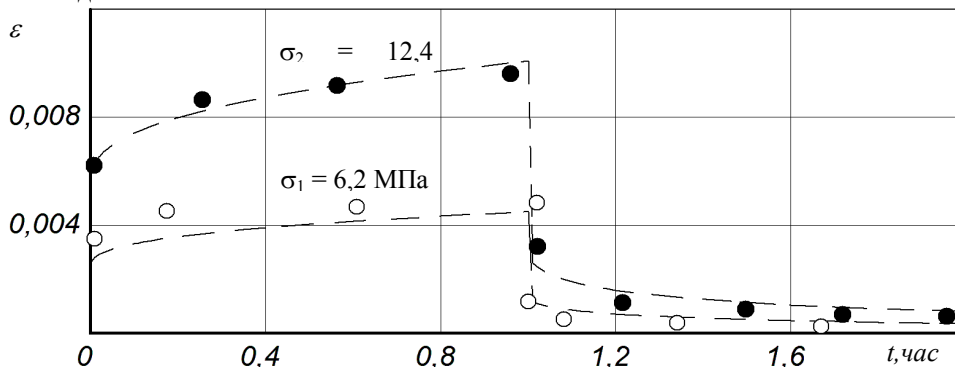


Рис. 3. Прямая и обратная ползучесть нейлона FM 10001

4. Вязкоупругопластические материалы

Исходя из инвариантности характера нелинейности модели вязкоупругости (1.1) относительно времени, для процессов, которые происходят в условиях уменьшения деформации уравнение ползучести записывается в виде

$$\zeta_0(\varepsilon_r(t), \varepsilon^*) = \sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau, \quad \frac{d\varepsilon(t)}{dt} < 0, \quad (4.1)$$

а с учетом условия нагружения (1.5) – в виде

$$\zeta(\varepsilon_r(t), \varepsilon^*) = h(t)\sigma_k \left\{ \int_0^t K(t-\tau)d\tau - \int_0^{t-t_*} K(t-t_*-\tau)d\tau \right\}. \quad (4.2)$$

Тут ε^* – максимальная деформация, которая достигнута на протяжении прямой ползучести за промежуток времени t_* ; t_* – момент разгрузки; $\zeta(\cdot)$ – функция, которая задает диаграмму мгновенной разгрузки.

Диаграммы мгновенной разгрузки в большинстве случаев являются нелинейными и должны строиться экспериментально для каждого из значений $\varphi(\varepsilon^*)$. В работе [1] описана методика построения диаграмм мгновенной разгрузки на основе серии кривых обратной ползучести с использованием параметров ядра (1.2) найденных по данным прямой ползучести. При использовании такой методики кривые обратной ползучести не могут быть использованы как тестовые для экспериментальной апробации рассмотренной в работе модели вязкоупругости.

В работе в качестве диаграммы мгновенной разгрузки используется график линейно-упругой разгрузки как первое приближение, которое позволяет значительно сократить объем базовых экспериментов. Линейно-упругий закон разгрузки записывается в виде

$$\zeta(\varepsilon, \varepsilon^*) = E_r(\varepsilon - \varepsilon^*) + \varphi_0(\varepsilon^*) \quad (4.3)$$

где E_r – мгновенный модуль упругости при разгрузке; ε^* – деформация в момент разгрузки. Далее считается, что модуль упругости при нагружении E и разгрузке E_r совпадают и равны коэффициенту $a_{1,1}$ в (1.3).

Подставляя (4.3) в (4.2) для деформации обратной ползучести ε_r нелинейно-вязкопластических материалов при полной разгрузке получаем уравнение

$$\varepsilon_r(t) = \varphi_0(\varepsilon(t), t_*) + \frac{\sigma_k}{E} \left[\int_0^t K(\tau) d\tau - \int_0^{t-t_*} K(t-\tau) d\tau - \int_0^{t_*} K(\tau) d\tau - 1 \right], \quad (4.4)$$

которое, с учетом ядра наследственности (1.2) и (1.4), сводится к уравнению

$$\varepsilon_r(t) = \sum_{i=0}^3 b_{i,j} \sigma_k h(t) \left\{ \left[1 + \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n t_*^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1 + (1+\alpha)(1+n)]} \right]^i + \right. \\ \left. + \frac{\sigma_k}{E_p} \left[\lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n t^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1 + (1+\alpha)(1+n)]} - \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n (t-t_*)^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1 + (1+\alpha)(1+n)]} - \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n t_*^{(1+\alpha)(1+n)}}{\Gamma[1 + (1+\alpha)(1+n)]} - 1 \right] \right\}, \quad (4.5)$$

которое позволяет рассчитывать деформацию обратной ползучести нелинейно-вязкопластических материалов с линейной разгрузкой и с учетом истории нагружения.

На рис. 4 а представлены изохронные кривые ползучести стеклопластика контактного формования

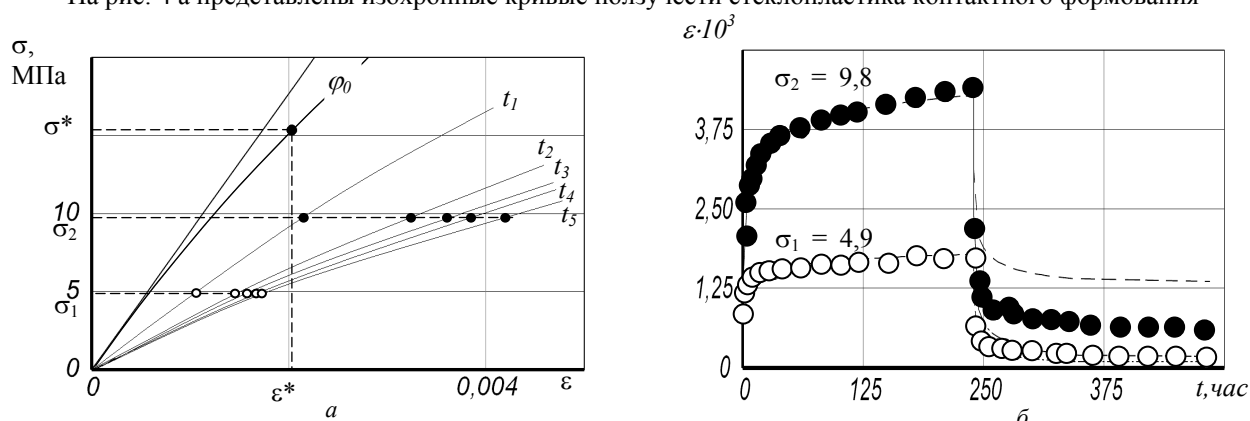


Рис. 4. Прямая и обратная ползучесть стеклопластика контактного формования

[9] (сплошные тонкие линии) для времен $t_1 = 2,8$, $t_2 = 16$, $t_3 = 52$, $t_4 = 172$, $t_5 = 240$ часов. Также на этом рисунке представлена диаграмма мгновенного деформирования φ_0 и прямая, которая соответствует модулю линейной упругости $E = 8855$ МПа. Из рисунка видно, что процесс ползучести при $\sigma_2 = 9,8$ МПа, обозначенный темными точками, на начальной стадии попадает в пределы нелинейно-вязкоупругого деформирования, о чем свидетельствует уровень приложенного напряжения σ_2 и уровень начальных деформаций $\varepsilon(t)$, которые значительно ниже критических значений ($\sigma^* = 15,35$ МПа, $\varepsilon^* = 0,002$) и соответственно пластическая деформация практически равна нулю. Со временем, в процессе прямой ползучести уровень деформаций выходит за пределы вязкоупругого деформирования и появляются необратимые во времени деформации, которые можно наблюдать в процессе полной разгрузки (рис. 4.б). Как видно из экспериментальной кривой разгрузки на рис. 4.б (темные точки) со временем вязкопластическая деформация не исчезает.

На рис. 4.б представлены экспериментальные кривые прямой и обратной ползучести стеклопластика контактного формования. В режиме прямой ползучести уровень напряжения удерживался постоянным на протяжении 240 часов и составлял $\sigma_1 = 4,9$ (○) МПа, $\sigma_2 = 9,8$ (●) МПа. Также на рис. 4.б представлены результаты расчетов (пунктирная линия) деформаций обратной ползучести выполненные по уравнению (4.6). Штрихпунктирной линией выполнены расчеты по уравнению (3.1).

5. Обсуждение результатов

В целом, как видно из данных представленных на рис. 3,5 получено вполне удовлетворительное согласование результатов расчетов с экспериментальными данными прямой и обратной ползучести, что подтверждает эффективность использования рассмотренной в работе нелинейной модели вязкоупругости для решения задач нестационарной ползучести нелинейно-вязкоупругих и нелинейно-вязкопластических материалов.

Задание нелинейности в модели (1.1) нелинейностью диаграммы мгновенного деформирования с использованием сглаживающих кубических сплайнов позволило удовлетворительно рассчитать прямую и обратную ползучесть с единых позиций. В расчетах, как в режиме прямой, так и обратной ползучести использовалось одно и тоже ядро ползучести и одни и те же параметры ядра. Известны другие варианты нелинейной теории вязкоупругости, в которой использовалось два ядра и соответственно два набора параметров ядер. Одно ядро использовалось для описания прямой, а другое, для обратной ползучести.

В случае, когда уровень напряжений не превышал σ_* , а в процессе ползучести деформации выходили за пределы вязкоупругого деформирования, как у стеклопластика контактного формования рис. 4, у материала

появляється необратима во времени вязкопластическая составляющая деформации. В работе, для расчета деформаций обратной ползучести нелинейно-вязкопластических материалов использовалось уравнение (4.5), которое построено исходя из инвариантности характера нелинейности модели ползучести (1.1) относительно времени. При этом, как видно из данных представленных на рис. 5 расчеты качественно согласуются с экспериментальными данными. Количественное расхождение между расчетами и экспериментальными данными связаны в первую очередь с несоответствием закона разгрузки линейному. Линейный закон разгрузки в работе использовался как первое приближение, которое позволяет уменьшить количество базовых экспериментов.

В случае, когда уровень приложенных напряжений превышает σ_* , как у стеклопластика СВМ (рис. 5.а), материал проявляет пластические свойства. Исследование такого вида деформирования не является целью данной работы. Однако, в качестве численного эксперимента для стеклопластика СВМ и ряда других материалов были рассчитаны деформации прямой и обратной ползучести согласно уравнения (4.5). На рис. 5.б результаты расчетов (пунктирные линии) деформаций прямой и обратной ползучести стеклопластика СВМ сопоставлены с экспериментальными данными (точки) [11]. Режим нагружения для стеклопластика СВМ состоял из нагружения напряжениями

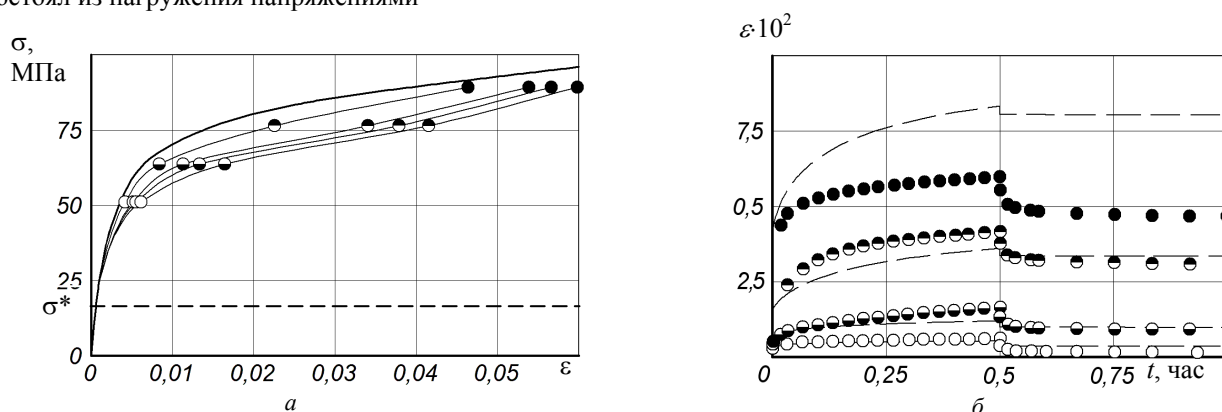


Рис. 5. Прямая и обратная ползучесть стеклопластика СВМ

$\sigma_1 = 51$ (○), $63,74$ (◐), $76,5$ (●), $89,24$ (●) МПа в течении получаса и полной разгрузки. Данные, представленные на рис. 5.б, свидетельствуют об удовлетворительном согласовании результатов расчетов прямой и обратной ползучести с экспериментальными данными при низких уровнях напряжений от 51 до 76,5 МПа. При напряжении 89,24 МПа наблюдаются значительные погрешности в расчетах деформаций прямой и обратной ползучести. По-видимому, при относительно малых уровнях напряжений материал проявляет незначительные пластические свойства, а при более высоких напряжениях эти свойства проявляются в большей степени, что и вызвало увеличенные погрешности расчетов.

Возможность применения модели (1.1) для описания процессов деформирования с начальной пластической компонентой деформации является целью дальнейших исследований.

Заклучение

Задачи расчета деформаций прямой и обратной ползучести нелинейно-вязкоупругих и нелинейно-вязкопластических материалов могут быть решены с помощью, рассмотренной в работе нелинейной модели вязкоупругости. Линейное приближение закона разгрузки в координатах « $\sigma - \varepsilon$ » является достаточно грубым и приводит к увеличению погрешности расчетов деформаций обратной ползучести нелинейно-вязкопластических материалов.

Анотація. Розглядається задача розрахунку деформацій прямої та зворотної повзучості за умов одновісного розтягу нелінійно-в'язкопружних та нелінійно-в'язкопластичних матеріалів. Для опису процесу деформування використовується нелінійна модель повзучості з незалежною в часі не лінійністю типу моделі Ю.Н. Работнова. В якості ядра спадковості використовується дробово-експоненційна функція. Виконана експериментальна апробація результатів розрахунку на задачах прямої та зворотної повзучості склопластику контактного формування і нейлону FM 10001.

Ключові слова: нелінійна модель повзучості, зворотна повзучість, дробово-експоненційна функція, ядро спадковості, експериментальна апробація, в'язкопластичність.

Abstract. The problem of the calculation of deformations of forward and the return creep nonlinear- viscoelastic -plastic materials at monoaxial loading is considered. For the description of process of deformation the nonlinear model of creep with nonlinearity independent of time like Yu. N. Rabotnov's model is used. Nonlinearity of model is set by the tensile stress-strain diagram which is set

by a smoothing cubic spline. The exponential-fractional function as kernel of heredity is used. The loading behaviours are given by the Heviside's function. The constructed equations allow to consider irreversible in time viscoplastic deformation. Parameters of the equations are defined from the basic experiments including the tensile stress-strain diagram and some curves of creep at a constant tension. The area of viscoelastic and viscoelastic-plastic deformation is determined by the tensile stress-strain diagram. Experimental approbation of the results of calculation on problems of forward and the return creep of fibreglass of contact modeling and nylon fibers FM 10001 is executed.

Keywords: nonlinear model of creep, return creep, exponential-fractional function, heredity kernel, experimental approbation, viscoplasticity.

Библиографический список использованной литературы

1. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю.Н. Работнов // - Москва : Наука, 1977.- 384 с.
2. Суворова Ю.В. Нелинейные эффекты при деформировании наследственных сред / Ю.В. Суворова // Механика полимеров.- 1977, №6, сс. 976-980.
3. Суворова Ю.В. Исследование процессов деформирования органотекстолитов / Ю.В. Суворова, А.Е. Васильев, Г.П. Машинская, Г.Н. Финогенов // Механика композитных материалов.- 1980.- №3, сс. 538-556.
4. Голуб В.П. Об одном методе построения определяющих уравнений в теории нелинейной ползучести / В.П. Голуб // Теоретическая и прикладная механика.- 2002.- Вып.36, сс. 23-29.
5. Голуб В.П. Нелинейная ползучесть вязкоупругих органических волокон при растяжении / В.П. Голуб, Ю.М. Кобзарь, П.В. Фернати // Прикл. механика.-2005.-Том 41, №7, С. 102-115.
6. Голуб В.П. О применении сглаживающих сплайн-аппроксимаций в задачах идентификации параметров ползучести / В.П. Голуб, А.Д. Погребняк, И.Б. Романенко // Прикл. механика.- 1997.- Том 33, № 6, сс. 52-61.
7. Джонсон Ю. Теория пластичности для инженеров / Ю. Джонсон, П.Б. Меллор // Пер. с англ.- Москва : Машиностроение, 1979.- 567 с.
8. Marin J. Creep-time relations for nylon in tension, compression, bending, and torsion / J. Marin, A.C. Webber and G.F. Weissmann // Proc. ASTM.- 1954.- Vol. 54, pp.1313-1343.
9. Керштейн И.М. Область линейности деформационных свойств стеклопластика контактного формирования / И. М. Керштейн, Р. Д. Степанов, П. М. Огибалов // Механика Полимеров. — 1970. — №3.—С. 404 – 410.
10. Мартиросян М.М. О кратковременной ползучести стеклопластика СВАМ./ М.М. Мартиросян // Механика полимеров, 1965, 2, С. 47-54.

References

1. Rabotnov Ju.N. Elements of hereditary mechanics of solids. Ju.N. Rabotnov. Moskva: Nauka, 1977. 384 p.
2. Suvorova Ju.V. Nelinejnyje jeffekty pri deformirovanii nasledstvennyh sred. Ju.V. Suvorova. Mehanika polimerov. 1977, no 6, p. 976-980.
3. Suvorova Ju.V. Issledovanie processov deformirovanija organotekstolitov. Ju.V. Suvorova, A.E. Vasil'ev, G.P. Mashinskaja, G.N. Finogenov. Mehanika kompozitnyh materialov. 1980. No 3, p. 538-556.
4. Golub V.P. Ob odnom metode postroenija opredel'ajushhhij uravnenij v teorii nelinejnoj polzuchesti. V.P. Golub. Teoreticheskaja i prikladnaja mehanika. 2002. Vyp.36, p. 23-29.
5. Golub V.P. Nelinejnaja polzuchest' v'jazkouprugih organicheskij volokon pri rastjazhenii. V.P. Golub, Ju.M. Kobzar', P.V. Fernati. Prikl. mehanika. 2005. Tom 41, no 7, p. 102-115.
6. Golub V.P. O primenении sglazhivajushhhij splajn-approksimacij v zadachah identifikacii parametrov polzuchesti. V.P. Golub, A.D. Pogrebnyak, I.B. Romanenko. Prikl. mehanika. 1997. Tom 33, no 6, p. 52-61.
7. Dzhonson Ju. The plasticity theory for engineers. Ju. Dzhonson, P.B. Mellor. Per. s angl. Moskva: Mashinostroenie, 1979. 567 p.
8. Marin J. Creep-time relations for nylon in tension, compression, bending, and torsion. J. Marin, A.C. Webber and G.F. Weissmann. Proc. ASTM. 1954. Vol. 54, pp.1313-1343.
9. Kershtejn I.M. Oblast' linejnosti deformacyonnyh svojstv stekloplastika kontaktnogo formirovanija. I. M. Kershtejn, R. D. Stepanov, P. M. Ogibalov. Mehanika Polimerov. 1970. No 3.p. 404 – 410.
10. Martirosjan M.M. O kratkovremennoj polzuchesti stekloplastika SVAM. M.M. Martirosjan. Mehanika polimerov, 1965, 2, p. 47-54.

Подана до редакції 08.11.2013