УДК 539.3.677.021

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ И ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ТЕКСТИЛЬНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

[1]Абдусаттаров А., [2]Василевич Ю. В.,[3]Даминов А. Д. [3]Матназаров Ю. О.

[1]Ташкентский государственный транспортный университет
[2]Белорусский национальный технический университет, Минск
[3]Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности

Введение. В последние годы интенсивно развивается подход к анализу длительной прочности композитных материалов, основанный на введение макроскопического параметра, характеризующего на макроуровне степень поврежденности материалов. Понятие повреждаемости введено в связи с исследованиями ползучести, длительной и циклической прочности материалов и элементов конструкций Л. М. Качановым, Ю. Н. Работновым, А. А. Ильюшиным, В. В. Москвитиным, В. В. Болотиным. Вопросы прогнозирования прочностных свойств и исследования процессов деформирования при постоянных и переменных нагрузках, повреждаемости и длительной прочности композитных материалов в том числе текстильных, разработка математических моделей и современных методов расчета на прочность являются актуальной задачей.

В монографии В. В. Москвитина [1] рассмотрены некоторые виды уравнения состояний, описывающие вязкоупругие и вязкопластические свойства материалов с учетом накопления повреждений, а также критерии длительной и малоцикловой прочности при исходном и переменном нагружении.

В работе [2] показана исключительная важность в процессе переработки нитей анализа причин обрыва нитей и их разрушения. Развивающийся во времени феноменологический процесс разрушения в данной работе рассматривается как некоторый процесс накопления повреждений, различных дефектов. Используя модель повреждаемости [1], им разработан теоретические основы переработки нитей и тканей с учетом вязкоупругих свойств материалов. В монографии [3] развивается теория деформирования нитей, основанная на наследственной теории вязкоупругости. Приведен обширный экспериментальный материал по ползучести и релаксации различных текстильных материалов.

В работе [4] на основе проведенных экспериментально-теоретических исследований определены основные параметры процессов деформирования и прочности нитей и пряжи. Выявлены изменения модуля деформаций с различными линейными плотностями. На основе использования модели структурно-линейного вязкоупругого тела предложен физически нелинейный закон деформирования нитей и пряжи при растяжении с учетом разгрузки. В исследованиях [5–8] экспериментально определены вязкоупругие параметры и коэффициенты ядра для натуральных и ряда химических текстильных нитей на основе критерия длительной прочности.

В работе [9] разработаны основы проектирования текстильных нитей и полотен, позволяющие прогнозировать их структуру и свойства путем направленного воздействия на технологический процесс, проанализированы топологические характеристики различных переходов текстиля. Экспериментально исследован характер изменения исходных свойств нитей и пряжи в технологическом процессе.

На основе уравнения наследственной теории вязко-упругости Больцмана-Вольтерра в работе [10] развиты линейные и нелинейные законы деформирования текстильных нитей и на их основе предложены методы определения и оценки прочностных характеристик текстильных материалов. Для определения механических характеристик вязкоупругих материалов был использован метод совмещений Николаева [6].

В работе [11] изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований по оптимизации физико-механических свойств тканых композиционных материалов и проектированию изделий из тканей с учетом заданных свойств. Описаны методы и результаты испытаний по оценке механических свойств армированных композиционных тканей.

Как отмечалось [9; 12–14], в процессе переработки нитей на технологическом оборудовании очень важно понимание причин повреждаемости материала, приводящих к их разрушению.

В книге [15] приведены сведения о длительной прочности конструкционных материалов, критериях длительно прочности при одноосном и сложном напряженном состояниях в условиях действия постоянных или меняющихся во времени нагрузок.

Постановка задачи. Критерии длительной прочности. Согласно феноменологическому макроскопическому подходу, любой процесс разрушения можно рассматривать как некоторый процесс накопления повреждений во времени. Вводится функция повреждаемости $\eta = \eta(t)$, равная нулю в исходном состоянии и единице при разрушении. Предполагается, что скорость накопления повреждений зависит от функции повреждаемости $\eta(t)$, и еще от некоторого нелинейного функционала и представляется в виде $\Omega(t)$ [1]:

$$\frac{\mathrm{d}\eta}{\mathrm{d}t} = f(\eta)\Omega(t), \tag{1}$$

где

$$(0) = 0, \quad \eta(t_*) = 1, \tag{2}$$

функция $\Omega(\mathrm{t})$ определяется из соотношения

$$\Omega(t) = \int_{o}^{t} F(t-\tau)\varphi(\sigma(\tau)\mathrm{d}\tau;\;\; F(\xi) = F_o \xi^{-n} \tag{3}$$

Интегрируя кинетическое уравнение (1) и считая, что функция $\varphi(\sigma)$ определяется из результатов эксперимента, после некоторых преобразований получим следующее условие длительной прочности в виде:

$$1 = \frac{1+m}{B^{m+1}} \int_{0}^{t_*} (t_* - \tau)^m \sigma^{\alpha(1+m)}(\tau)\mathrm{d}\tau. \tag{4}$$

Отметим, что отличие условия (4) от соотношения Бейли (m = 0) в том, что здесь учитывается влияние истории нагружения на приращение повреждения в данный момент. Согласно критерию прочности (4) за характеристику степени накопления повреждений примем следующую функцию:

$$\eta(x_\alpha, t) = \frac{1+m}{B^{m+1}} \int_{0}^{t} (t-\tau)^m \sigma^{\alpha(1+m)}(\tau)\mathrm{d}\tau. \tag{5}$$

В частности, при $\sigma = \sigma_0 = \mathrm{const}$ из (5) получим следующее выражение для функции повреждаемости:

$$\eta = \frac{t^{m+1}\sigma_0^{(1+m)\alpha}}{B^{1+m}}, \tag{6}$$

а при постоянной скорости нагружения $\sigma = \dot{\sigma} \cdot t$,

$$\eta = \frac{1+m}{B^{1+m}} t^{m+1} \dot{\sigma}^{\alpha(1+m)} \frac{\Gamma(1+m)\Gamma(1+\beta)}{\Gamma(2+m+\beta)}. \tag{7}$$

Учитывая, что $\sigma_{\text{в}} = \dot{\sigma} t_*$, после некоторых преобразований, из (7) для определения параметра m получим:

$$\frac{B^{(1+m)}}{m+1} = \frac{\sigma_{\text{в}}^{(1+m)(1+\alpha)}}{\dot{\sigma}^{(1+m)}} \frac{\Gamma(1+m)\Gamma(1+\beta)}{\Gamma(2+m+\beta)}, \tag{8}$$

где Γ – гамма функция, α и B – параметры долговечности.

Приведем уравнение состояния вязкоупругих материалов, в которых функция повреждаемости $\eta(t)$ принимается за определяющий параметр и имеет вид:

$$\sigma = 2G\left\{\varepsilon(t) - \int_{0}^{t} R_\eta\left(t-\tau, \eta(t)\right)\varepsilon(\tau)\mathrm{d}\tau\right\}, \;\text{ где } G = G_0(1-\tilde{\beta}\eta). \tag{9}$$

Нелинейная связь между напряжениями и деформацией с учетом изменения модуля сдвига от функций повреждаемости $G = G_0(1-\tilde{\beta}\eta)$, может быть представлена следующим образом:

$$\sigma = 2G\left[\varepsilon\varphi(\varepsilon) - \int_0^t R(t'-\tau')\varphi(\varepsilon)\varepsilon(\tau)d\tau\right], \quad \varphi(\varepsilon) = B_0\varepsilon^{\delta-1}, \tag{10}$$

где $\varphi(\varepsilon)$ – функция, характеризующая степень физической нелинейности материала. Для построения решения используется метод последовательных приближений [12–14].

Анализ результатов эксперимента. В статье [13] приведены результаты экспериментов ряда авторов. Исходя из этого, представим анализ напряженно-деформированного состояния текстильных материалов из вязкоупругого композита. В работе [5] для оценки напряженно-деформированного состояния нитей на ткацком станке использованы линейно-вязкоупругие соотношения и критерий длительной прочности вида (4). Вычислены, параметры α, β и m из опытов по определению разрушения нитей и коэффициентов повреждаемости при различных нагрузках и времени (таблица 1). Для определения параметров сингулярного ядра и резольвенты, а также модуля упругости применяется методика С. Д. Николаева [3].

Таблица 1 – Определение параметров долговечности в зависимости от нагрузки, напряжения и времени нагружения

Вид нити	Нагрузка, Н			Напряжение, Н/мм^2			Время нагружения, с			Параметры долговечности		
	P_1	P_2	P_3	σ_1	σ_2	σ_3	t_1	t_2	t_3	α	B	m
Углерод, 410 текс	50	40	30	17,26	13,81	10,36	93,13	160,90	325,58	2,45	10000	-0,095

В работе [6] на основе экспериментальных данных приведены значения вязкоупругих параметров арамидной пряжи различной линейной плотности (таблица 2).

Таблица 2 – Вязкоупругие параметры пряжи различной линейной плотности

Линейная плотность пряжи, текс	Вязкоупругие параметры			Модуль упругости Е, Н/мм^2
	A	β	α	
30×2	0,0227	0,601	0,294	1749
60×2	0,0207	0,493	0,261	1755
83,3×2	0,0223	0,586	0,289	1750

При определении параметров функции влияния используется трех параметрическая ядра Ржаницына-Колтунова. Отмечается, что вязкоупругие параметры и модуль упругости нитей определяют поведение нитей основы и утка в различных зонах ткацкого станка. Изменение модуля упругости во времени показывает наличие релаксационных процессов, которые положительно виляют на технологический процесс ткачества.

В статьях [7; 8] приведены результаты расчета повреждаемости нитей основы при изготовлении тканей различного переплетения. На основе результатов расчета и исследования технологических процессов установлено, следующее: если значение повреждаемости $\eta < 0{,}25$ – процесс протекает в спокойных условиях; при $\eta = 0{,}25–0{,}5$ – процесс происходит в довольно напряженных условиях; при $\eta = 0{,}5–0{,}75$ – процесс возможен, но наблюдается увеличение обрывности нитей (примерно в 2 раза); при $\eta = 0{,}75–1$ – процесс возможен, но резко увеличивается обрывность нитей (примерно в 5 раз); при $\eta > 1$ – процесс практический невозможен.

В работе [4] приведены законамерности изменения деформационных параметров хлопковой пряжи в зависимости от значений линейной плотности при растяжении ее до обрыва (таблица 3).

Таблица 3 – Изменение значения деформации и модуля упругости в зависимости от линейной плотности пряжи

№ группы	1	2	3	4	5	6
$T_{ср}$ текс	17,0	28,95	49,32	71,42	99,17	162,13
ε_k	0,0635	0,0732	0,0836	0,0812	0,0953	0,1342
E_k	3513,71	2307,18	2285,46	2273,63	1674,13	1382,22

В работе [11] отмечено, что исследование физико-механических свойств тканых композитных материалов и проектирование тканей под заданные свойства весьма важно для их применения в современной технике. Варьирование структуры (топологии переплетения) ткани – эффективный путь оптимизации текстильного армирования. Исходными данными для моделирования являются: линейная плотность нитей, их поперечное сечение в свободном состоянии, диаграммы сжатия и изгиба, топология переплетения, плотность ткани.

Таблица 4 – Физико-механические показатели тканей

Марка ткани	Поверхностная плотность, г/м^3	Номинальная толщина ткани, мм	Разрывная нагрузка, не менее, Н	
			основа	уток
Т-10	290	0,23	2450	1323
Т-13	285	0,27	1764	1176
Т-41	330	0,26	1764	1764
Т-33	110	0,11	588	588
Т-СУ (ВМ)	320	0,27	2156	2842

В таблице 4 приведены физико-механические показатели для различных марок тканей из эксперимента.

В таблице 5 приведены параметры углеродной ткани УТ-900. Углеродную ткань вырабатывают по основе и утку из углеродной нити УКН-П или УКН-М, применяемой для полимерных композиционных материалов.

Таблица 5 – Параметры углеродной ткани УТ-900

Марка ткани	Поверхностная плотность, г/м^3	Количество нитей на 10 см	Ширина ткани, мм	Толщина ткани в пластине со связующим марки ЭНФБ
		Уток		
УТ-900–240	240±20	60+20	900+7	0,2±0,02
УТ-900–260	260±20	65+20	900+7	0,22+0,02
УТ-900–280	280±20	70+20	90±7	0,25±0,02

В таблице 6 приведены структурные параметры конструкционных стеклосинтетических тканей, предназначенных для изготовления высокопрочных органопластиков на основе эпоксидных и фенольных смол. Данные ткани относятся к классу гибридных тканей, в которых по основе уложены арамидные нити НСВМ, Армос, Русар с линейной плотностью 58,8 текс.

Таблица 6. Структурные параметры стекло синтетических тканей

Марка ткани	Количество нитей на 1 см		Поверхностная плотность, г/см^2	Толщина, мм	Разрывная нагрузка полоски шириной 25 мм, Н	
	Основа	Уток			Основа	Уток
Т-42	18^{+1}–0,5	20±1	280±20	0,32±0,03	3240–	1960–2160
ТСА-3	20+1	21±1	190±20	0,23±0,03	2060	1470
ТСР-3	То же	То же	То же	То же	2450	1470

Из вышеприведенных экспериментальных результатов следует, что необходимо пересмотреть технологический процесс при выработке текстильных композитных материалов и определить такой оптимальный режим и соответствующих параметров, где повреждаемость материалов будет минимальной с использованием критериев длительной прочности.

Примеры расчета. Определение напряженно-деформированного состояния.

1. В качестве примера рассмотрим задачу о движении нити при петлеобразовании с учетом вязкоупругих свойств. Предположим, что величины сил, действующих на нить в процессе петлеобразования, неизвестны. Следуя работе [2], можем определить законы смещения сечений нити и скорости перемещения этих сечений в некоторый начальный момент времени. Затем, решая задачи динамического нагружения нити с учетом вязкоупругих свойств, находим распределение напряжений и скоростей частиц в любой момент времени.

Используя соотношения (9), напишем следующее уравнение движения нити, описывающее вязкоупругие свойства материалов с учетом повреждаемости:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{1}{a^2}\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \int_0^t R_\eta(t-\tau, \eta(t))\frac{\partial^2 U(x,\tau)}{\partial x^2}\mathrm{d}\tau, \tag{11}$$

где $u(x, t)$ – продольное перемещение поперечного сечения нити, $a^2 = E/\rho$.

Для решения краевой задачи к уравнению (11) необходимо присоединить соответствующие начальные и граничные условия. Для решения задачи используется разложение ядра в следующем виде:

$$R_\eta(t-\tau, \eta(\xi)) = \sum_{k=1}^{n} R_k(t-\tau)\eta^k(t).$$

Следуя экспериментальным результатам [2], предположим, что скорость ведущего конца нити V_0 сохраняется постоянной, и движение осуществляется по закону $U(l,t) = V_0 t$, а другой конец нити закреплен: $U(0,t) = 0$. В результате получим следующую краевую задачу:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{1}{a^2}\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \int_0^t R(t'-\tau')\frac{\partial^2 U(x,\tau)}{\partial x^2}\mathrm{d}\tau + \int_0^t R_1(t'-\tau')\cdot\eta(\xi)\frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial x^2}\mathrm{d}\xi; \tag{12}$$

$$U(0,t) = 0; \qquad U(\ell,t) = V_0 t; \tag{13}$$

$$U(x,0) = 0; \qquad \frac{\partial U(\ell,t)}{\partial t} = V_0. \tag{14}$$

Система уравнений (12)–(14) решается методом последовательных приближений. Для первого приближения предположим, что повреждаемость $\eta(\xi)=0$ и $R(t'-\tau')=\varepsilon R(t-\tau)$. Граничные условия являются неоднородными. Поэтому решение уравнения (12) представим в виде

$$U(x,\ t) = u(x,t) + v(x,t). \qquad (15)$$

Вспомогательная функция $u(x,\ t)$ выбирается из условия

$$u(x,\ell)=\frac{x}{\ell}V_0 t\ . \qquad (16)$$

Неизвестная функция $V(x,t)$ определяется как решение следующего уравнения [1]:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}=\frac{1}{a^2}\frac{\partial^2 V}{\partial t^2}+\varepsilon\int_0^t R(t-\tau)\frac{\partial^2 V(x,t)}{\mathrm{d}x^2}\mathrm{d}\tau \qquad (17)$$

при нулевых начальных и граничных условиях. Уравнение (17) допускает разделение переменных. Частные решения представим в виде

$$V(x,\ t) = X(x)T(t). \qquad (18)$$

Подставляя (18) в (17) для определения функций $X(x)$ и $T(t)$, имеем два независимых уравнения:

$$X''(x)+\left(\frac{\lambda}{a}\right)X=0, \qquad (19)$$

$$T''(t)+\lambda^2 T''(t)=\varepsilon\lambda^2\int_0^t R(t-\tau)T(\tau)\mathrm{d}\tau\ . \qquad (20)$$

Решая уравнение (19) с граничными условиями, найдем координатные функции $X_к(x)$ и собственные значения λ_k:

$$X_K(x)=\sin\frac{\lambda_K}{a}x;\quad \lambda_K=\frac{k\pi a}{l}. \qquad (21)$$

Решение уравнения (20) можно найти используя метод усреднения Ильюшина:

$$T_0(t)=\exp\left(-\frac{1}{2}\varepsilon\omega_s\lambda t\right)\left[\overset{\circ}{c_1}\cos\left[\left(\frac{\varepsilon\omega_c}{2}-1\right)\lambda t\right]-\overset{\circ}{c_2}\sin\left[\left(\frac{\varepsilon\omega_c}{2}-1\right)\lambda t\right]\right]. \quad (22)$$

Здесь c_1^0 и c_2^0 – произвольные постоянные, определяемые из начальных условий; ω_S и ω_C – синус и косинус–преобразования ядра $R(t\text{-}\tau)$. Общее решение уравнения (17) записывается в виде суммы (22) и (16).

Аналогичным образом строятся последующие приближения. Анализ решения показывает, что смещения, представленные в виде простого бесконечного ряда с экспоненциально убывающими коэффициентами, являются затухающими колебаниями.

2. Теперь в качестве второго примера приведем точное решение задачи об изгибе вязкоупругого изделия – кольцевого элемента с прямоугольным поперечным сечением [12]. Предположим, что кольца закручиваются равномерно распределенными парами сил. Примем цилиндрическую систему координат $r\theta z$, плоскость ($z=0$) которой совпадает со средней плоскостью кольца, а ось z направлена вниз. Предположим, что основной компонентой напряжения является $\sigma_\theta=\sigma$, а деформации $\varepsilon_\theta=\varepsilon$. Поэтому при малых значениях угла поворота ω деформация ε выражается так:

$$\varepsilon(t)=\omega(t)\frac{z}{r}. \quad (23)$$

Запишем соотношения вязкоупругости типа (9), учитывающие влияние степени накопления повреждений [1]:

$$\varepsilon=\int_0^t J(t'-\tau')\mathrm{d}\sigma(\tau), \quad (24)$$

где

$$(t'-\tau')=\int_\tau^t\frac{\mathrm{d}\xi}{a_\eta(\eta(\xi))}; \qquad a_\eta=\frac{1}{b\eta^\delta+1}; \qquad J=J_0\xi^{-\gamma}. \quad (25)$$

Точное решение данной задачи ищем в виде

$$\sigma\left(\frac{z}{r},t\right)=\bar{\sigma}\left(\frac{z}{r}\right)M(t); \qquad \varepsilon\left(\frac{z}{r},t\right)=\bar{\varepsilon}\left(\frac{z}{r}\right)\omega(t). \quad (26)$$

При этом функции накопления повреждаемости η представляются так:

$$\eta\left(t,\frac{z}{r}\right)=\bar{\sigma}^{\alpha(1+m)}\left(\frac{z}{r}\right)\eta_1(t); \quad \eta_1(t)=\frac{1+m}{B^{1+m}}\int_0^t(t-\tau)^m M^{\alpha(1+m)}(\tau)\mathrm{d}\tau. \quad (27)$$

Модифицированное время $t' - \tau'$ согласно (23) будет

$$t' - \tau' = \overline{\sigma}^{\alpha(1+m)\delta}\left(\frac{z}{r}\right) \quad \Phi(t,\tau); \quad \Phi(t,\tau) = b\int_{\tau}^{t} \eta_1^{\delta}(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon. \tag{28}$$

Учитывая (23), (25) и (28), из соотношения (24) получим

$$\frac{z}{r}\omega(t) = \int_0^t J_0 \sigma^{-\gamma\delta\mu+1}\left(\frac{z}{r}\right)\Phi^{\gamma}(t,\tau)\mathrm{d}M(\tau).$$

Отсюда следует

$$\omega(t) = \int_0^t J_0\, \Phi^{\gamma}(t,\tau)\mathrm{d}M(\tau); \ \overline{\sigma} = A_1\left(\frac{z}{r}\right)^{\nu}; \quad \nu = \frac{1}{1+\mu\delta\gamma},$$

где A_1 определяем из условия

$$2A_1\int_0^h\int_a^b\left(\frac{z}{r}\right)^{\nu} z\mathrm{d}z\mathrm{d}r = 1.$$

Таким образом, искомое решение задачи ε, σ, η имеет вид:
величина деформации

$$\varepsilon = \frac{z}{r}\int_0^t J_0\Phi^{\gamma}(t,\frac{z}{r})\mathrm{d}M(\tau), \tag{29}$$

где

$$\Phi(t,\frac{z}{r}) = \int_{\tau}^{t} b\eta_1^{n}(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon; \qquad \eta_1(t) = \frac{1+m}{B^{1+m}}\int_0^t (t-\tau)^m M^{\alpha(1+m)}(\tau)\,\mathrm{d}\tau;$$

для напряжений

$$\sigma = \frac{(\nu+2)(1-\nu)M(t)}{2h^{\nu+2}(b^{1-\nu}-a^{1-\nu})}\left(\frac{z}{r}\right)^{\nu}, \tag{30}$$

функция повреждаемости

$$\eta(t) = \frac{1+m}{B^{1+m}}\left\{\frac{(\nu+2)(1-\nu)}{2h^{\nu+2}(b^{1-\nu}-a^{1-\nu})}\left(\frac{z}{r}\right)^{\nu}\right\}\int_0^t (t-\tau)^m M^{\alpha(1+m)}(\tau)\,\mathrm{d}\tau. \tag{31}$$

Рассмотрим один частный случай нагружения кольца изгибающим моментом. Пусть $M(t) = M_0 h(t),\ h(t)$ –функция Хевисайда, тогда

$$\eta_1(t) = \frac{M_0^{\alpha(1+m)}}{B^{1+m}} t^{1+m}.$$

Для определения ε, σ, η из (29–31) имеем:

$$\begin{gathered}\varepsilon = D^{+\mu\gamma\delta}\left(\frac{z}{r}\right) A_2 t^{\beta_1{}^t M_0^{1+\gamma\sigma}}; \quad \sigma = D\left(\frac{z}{r}\right)^{\nu} M_0 h(t);\\ \eta = \left\{D\left(\frac{z}{r}\right)^{\nu}\right\}^{\alpha(1+m)} \frac{M_0^{\alpha(1+m)}}{B^{1+m}} t^{1+m},\end{gathered} \tag{32}$$

где $D = \dfrac{(\nu+2)(1-\nu)}{2h^3\left(\dfrac{a}{h}\right)^{1-\nu}\left[\left(\dfrac{b}{a}\right)^{1-\nu} - 1\right]};\quad \beta_1 = (1+m)^{\delta+1}.$

Примем, что кривая длительной прочности представлена в виде [1]

$$t_*\left(\sigma_u^0\right)^{\alpha} = B. \tag{33}$$

Уравнения (32) с учетом (33) при $\dfrac{z}{r} = \dfrac{1}{2}$ приобретет следующий вид:

$$\eta(t) = D_2\left(\frac{t}{t_*}\right)^{1+m}; \quad D_2 = \left\{D_1\left(\frac{1}{2}\right)^{\nu}\right\}^{\alpha(1+m)} \left(\frac{M_0}{h^3\sigma_u^0}\right)^{\alpha(1+m)}. \tag{34}$$

Предположим, что изгибающий момент изменяется со временем по следующей программе: $M = M_0 = \text{const}$ при $0 \le t \le t_1$, $M = 0$ при $t > t_1$. Находим изменение со временем функции накопления повреждений:

$$\begin{gathered}\frac{\eta(t)}{D_2} = \left(\frac{t}{t_1}\right)^{1+m}, \quad t \le t_1\\ \frac{\eta(t)}{D_2} = \left(\frac{t}{t_1}\right)^{1+m} - \left(\frac{t}{t_1} - 1\right)^{1+m}, \quad t > t_1\end{gathered} \tag{35}$$

Из анализа (35) следует, что при $m = 0$ (по критерию Бейли) повреждения, накопившиеся к моменту снятия нагрузки ($t = t_1$), сохраняются неизменными все последующее время $t > t_1$. Если же $m < 0$, то при $t > t_1$ накопленные повреждения усиливаются и при $t > t_1$ они исчезают полностью. При $m > 0$ повреждения будут продолжать накапливаться и после снятия нагрузки, хотя и значительно медленнее, чем при наличии изгибающего момента M_0.

Выводы. Сформулирована постановка задачи и приведены основные соотношения для определения напряженно-деформированного состояния текстильных материалов с учетом накопления повреждений и вязкоупругих свойств, а также анализ результатов экспериментальных данных.

В качестве примера рассмотрена методика решения задач о движении нити при петлеобразовании. Построено точное решение при изгибе вязкоупругого изделия-кольцевого элемента с учетом повреждаемости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Москвитин, В. В. Сопротивление вязкоупругих материалов / В. В. Москвитин – М. : «URSS.», 2019. – 328 с.
2. Щербаков, В. П. Основы теории деформирования и прочности текстильных материалов / В. П. Щербаков, Н. С. Скурланова – М. : МГТУ имени А. Н. Косыгина, 2008. – 332 с.
3. Методы и средства исследования технологических процессов в ткачестве / С. Д. Николаев [и др.]. – М. : МГТУ, 2003. – 470 с.
4. Султанов, К. С. Структурная прочность текстильных нитей / К. С. Султанов, С. И. Исмаилова. – Ташкент : ФАН, 2017. – 256 с.
5. Гречухин, А. П. Совершенствование способа формирования ткани на бесчелночных ткацких станках с товарным регулятором периодического действия : дис... канд. техн. наук / А. П. Гречухин. – М.: 2008. – 159 с.
6. Поликарпов, А. В. Разработка метода проектирования тканей из арамидной пряжи : дис… канд. техн. наук / А. В. Поликарпов. – М. : 2005. – 159 с.
7. Слугин, А. И. Оценка напряженности заправки тканей из арамидной пряжи на ткацком станке / А. И. Слугин // Технология текстильной промышленности. – 2008. – № 2. – С. 70–73.
8. Назарова, М. В. Оценка напряженности заправки ткацкого станка при изготовлений тканей различного переплетения / М. В. Назарова, В. Ю. Романов // Технология текстильной промышленности. – 2013. – № 2. – С. 63–66.
9. Даминов, А. Д. Основы прогнозирования структуры и проектирования текстильных полотен : автореф. дис... д-ра техн. наук / А. Д. Даминов. – Ташкент, 2006. – 42 с.

10. Макаров, А. Г. Прогнозирование деформационных процессов в текстильных материалах / А. Г. Макаров. – СПб. : СПГУТД, 2002. – 220 с.

11. Механика препрегов – расчет изделий из армированных композиционных материалов / Ю. В. Василевич [и др.]. – Минск : БНТУ, 2016. – Ч. 1 – 295 с.

12. Абдусаттаров, А. Циклическое деформирование вязкоупругопластических систем с учетом упрочнения-разупрочнения и накопления повреждений / А. Абдусаттаров, А. Д. Даминов. – Ташкент : Фан, 1996. – 162 с.

13. Абдусаттаров, А. К определению повреждаемости и длительной прочности нитей и тканей с учетом вязкоупругих свойств / А. Абдусаттаров, Б. Боймуротов, А. Мурадов // Узбекский текстильный журнал. – 2022. – № 3. – С. 40–48.

14. Абдусаттаров, А. Методы решения задач механики композитных материалов и неупругих элементов конструкций при циклических нагружениях / А. Абдусаттаров, А. М. Каримов. – Ташкент : Узбекистан, 2020. – 198 с.

15. Гольденблат, И. И. Длительная прочность в машиностроении / И. И. Гольденблат, В. Л. Бажанов, В. А. Копнов. – М. : Машиностроение, 1977. – 248 с.

Поступила: 18.01.2024