

УДК 681.5

**Л.В. Кравцова, А.П. Пирог, А.В. Букетов**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ**  
**ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СТАТИЧЕСКОЙ**  
**НАГРУЗКИ**

*Данная работа является логическим продолжением исследований зависимости деформации образца эпоксидного композитного материала от продолжительности воздействия статической нагрузки. В работе предложен метод определения вероятности восстановления образца после снятия статической нагрузки, а также вероятности разрушения образца при достижении критического состояния пластичной деформации. Полученные результаты позволяют прогнозировать изменение свойств полимерных композитных материалов под воздействием статической нагрузки, и таким образом предотвратить разрушение.*

*Ключевые слова:* деформация, эпоксидный композитный материал, статическая нагрузка.

*Рис. 5. Табл. 5. Лит. 5.*

**Л.В. Кравцова, А.П. Пирог, А.В. Букетов**  
**ВИЗНАЧЕННЯ ЙМОВІРНОСТЕЙ ВІДНОВЛЕННЯ ТА РУЙНУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ**  
**КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ДІЄЮ СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

*Дана робота є логічним продовженням досліджень залежності деформації зразка епоксидного композитного матеріалу від тривалості впливу статичного навантаження. У роботі запропоновано метод визначення ймовірності відновлення зразка після зняття статичного навантаження, а також ймовірності руйнування зразка при досягненні критичного стану пластичної деформації. Отримані результати дозволяють прогнозувати зміну властивостей полімерних композитних матеріалів під дією статичного навантаження, і таким чином запобігти руйнуванню.*

*Ключові слова:* деформація, епоксидний композитний матеріал, статичне навантаження.

**L.V. Kravtsova, A.P. Pirog, A.V. Buketov**  
**DETERMINING THE PROBABILITY OF RECOVERY AND THE DESTRUCTION OF**  
**POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS UNDER STATIC LOAD**

*This work is a logical continuation of research deformation dependence epoxy composite material on the duration of exposure to static load. This paper presents a method for determining the probability of recovery of the sample after removal of the static load, as well as the probability of failure of the specimen when the critical state of plastic deformation. The obtained results allow to predict changes in the properties of polymer composites upon exposure to static loads, and thus prevent degradation.*

*Keywords:* deformation, epoxy composite material, static load.

Данная работа является логическим продолжением исследований зависимости деформации образца эпоксидного композитного материала от продолжительности воздействия статической нагрузки. В работе предложен метод определения вероятности восстановления образца после снятия статической нагрузки, а также вероятности разрушения образца при достижении критического состояния пластичной деформации. Полученные результаты позволяют прогнозировать изменение свойств полимерных композитных материалов под воздействием статической нагрузки, и таким образом предотвратить разрушение.

**Постановка задачи.** Композитные материалы находят широкое применение в инженерной практике, так как позволяют создавать конструкции с уникальными прочностными характеристиками, которых практически невозможно достичь использованием традиционных конструкционных материалов. Современные композитные материалы, помимо широкого спектра механических, физических и химических свойств, обладают способностью к специальному изменению этих свойств в зависимости от назначения конструкции. Решение этой задачи невозможно без комплексных теоретико-экспериментальных исследований, дающих достоверную картину состояния при предполагаемых эксплуатационных нагрузках [1]. Важным звеном в таких исследованиях является разработка математических моделей поведения полимерных композитных материалов (ПКМ) под воздействием нагрузок. Математическое моделирование свойств ПКМ является основой для изучения качества изготавливаемых конструкций и способствует как увеличению надежности, так и повышению их функциональности. При выборе компонентов композитов заданного функционального назначения целесообразно начинать с определения необходимых качественных характеристик [2]. При этом одним из важнейших свойств ПКМ является их способность восстанавливаться после снятия нагрузки.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Исследование закономерностей процессов деформации и разрушения материалов, находящихся под действием постоянного напряжения, способствует наиболее достоверному прогнозированию деформационных процессов, происходящих в материалах, в том числе и ПКМ. Полная деформация исследуемого образца под воздействием внешних сил формируется за определенный промежуток времени. Следовательно, с течением времени меняются физико-механические характеристики, а значит, необходимо установить зависимость этих изменений от параметров процесса деформации [3]. При исследовании случайных дискретных процессов систему делят на серию последовательных состояний, которые характеризуют происходящие изменения. Случайный дискретный процесс, протекающий в системе  $S$ , характеризуется не только возможными состояниями, в которых система может пребывать случайным образом, но и теми моментами времени, в которые могут происходить ее переходы из состояния в состояние. Эти моменты времени могут быть заранее известны или случайны [4].

**Цель работы** – определение вероятностей восстановления образца эпоксидного композитного материала при снятии статической нагрузки, а также вероятности разрушения образца при достижении им критического состояния пластичной деформации.

**Обсуждение результатов.** Рассмотрим некоторую систему, которая определена совокупностью параметров и может изменять свое состояние в зависимости от воздействия внешних факторов. Если переходы системы из одного состояния в другое осуществляются непрерывно, мы имеем дело с непрерывным случайным процессом; в случае, когда переходы системы из одного состояния в другое осуществляются только в заранее определенные моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots$ , случайный процесс, протекающий в системе, называется процессом с дискретным временем.

Заметим, что воздействие внешних факторов может быть не только случайным, но и детерминированным; возможна также суперпозиция детерминированных и случайных факторов.

Случайная последовательность называется марковской цепью, если для каждого шага вероятность перехода из любого состояния  $S_i$  в любое состояние  $S_j$  не зависит от того, когда и как система  $S$  оказалась в состоянии  $S_i$ .

Так как система  $S$  в любой момент  $t$  может пребывать только в одном из состояний  $S_1, \dots, S_n$ , то при каждом  $k = 1, 2, \dots$  события  $S_1(k), \dots, S_n(k)$  несовместны и образуют полную группу.

В процессе длительной эксплуатации материалы, из которых изготовлены конструкции, подвержены изменению прочностных и деформационных свойств, что является следствием проявления ползучести и релаксации материала.

Известно [3], что ползучесть материалов – это изменение с течением времени деформации твёрдого тела под воздействием постоянной нагрузки или механического напряжения; релаксация – уменьшение напряжений при постоянной деформации. Поскольку физико-механические характеристики исследуемого объекта во времени меняются, учет временных процессов, протекающих в элементах конструкций в период действия внешних сил имеет важное значение в плане совершенствования методов их расчета. Явление ползучести в принципе присуще всем материалам, но не все они обладают им в одинаковой мере.

*Ползучесть* описывается кривой *ползучести*, которая представляет собой зависимость деформации от времени при постоянных температуре и приложенной нагрузке (или напряжении) (рис. 1).

Её условно делят на три участка или стадии:

- $AB$  – участок неустановившейся (или затухающей) *ползучести* (стадия I);
- $BC$  – участок установившейся *ползучести* – деформации, идущей с постоянной скоростью (стадия II);
- $CD$  – участок ускоренной *ползучести* (стадия III);
- $\Delta L_0$  – деформация в момент приложения нагрузки (стадия IV);
- точка  $D$  – момент разрушения.

На предварительном этапе в результате эксперимента была получена зависимость абсолютной деформации от продолжительности воздействия статической нагрузки эпоксидного композита, содержащего 50 масс.ч. наполнителя (электрокорунд) на 100 масс.ч. эпоксидной смолы.

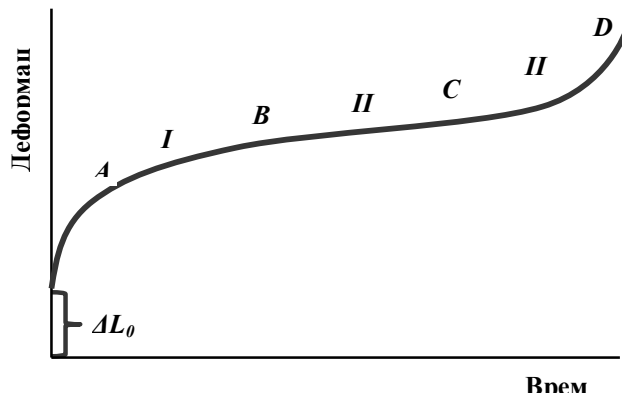


Рис. 1. Кривая ползучести [3]

Изменение абсолютной деформации ( $\Delta L$ ) под воздействием статической нагрузки эпоксидного композитного материала (ЭКМ) во времени ( $t$ ) позволяет установить следующую серию состояний:  $S_0$  – исходное состояние;  $S_1$  – работоспособное состояние;  $S_2$  – упругая деформация;  $S_3$  – пластичная деформация;  $S_4$  – разрушение (табл. 1).

Таблиця 1. Зависимость абсолютной деформации от времени воздействия нагрузки ЭКМ

Параметр	Состояния системы														
	$S_0$	$S_1$		$S_2$				$S_3$						$S_4$	
$t, \text{ч}$	0,01	2	4	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72
$\Delta L \times 10^{-4}, \text{м}$	68	71	74	76	79	80	81	83	84	84,6	85	86	87	88	90

Здесь  $\Delta L$  – абсолютная деформация в каждый момент времени  $t$ .  
Построим график деформации образца.

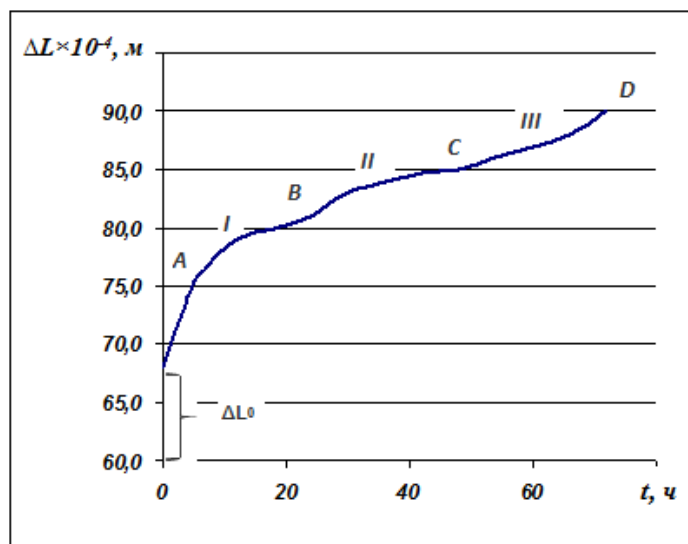


Рис. 2. Зависимость деформации образца от времени воздействия статической нагрузки [экспериментальные данные]

Очевидно, вид точечного графика (рис. 2), построенного по данным табл. 1, совпадает с классической кривой ползучести, приведенной на рис. 1. Учет фактора ползучести имеет существенное значение для правильной работы конструкций при действии внешних сил.

Для описания кривых ползучести наиболее часто используют наследственную теорию Больцмана-Вольтерры, уравнение которой имеет вид интегрального уравнения Вольтерры 2-го рода:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_0} + \int_{t_0}^t \frac{K(t-t_0)}{E_0} \sigma(t) dt,$$

где  $\varepsilon(t)$  – деформация ползучести;  $\sigma(t)$  – напряжение в момент наблюдения;  $E_0$  – мгновенный модуль упругости;  $K(t-t_0)$  – ядро интегрального уравнения ползучести.

Предположим, что в начальный момент времени деформация имеет значение  $\Delta L_0$ , равное упругой деформации или суммарной упругой и пластической деформации. Обычно считается, что время нагружения (или разгрузки) образца пренебрежимо мало по сравнению со временем проведения эксперимента, в связи с чем можно положить, что напряжение и деформация  $\Delta L_0$  появляются мгновенно.

С увеличением времени  $t$  наблюдается возрастание деформации. Если процесс сопровождается уменьшением скорости деформирования  $\dot{\varepsilon}$  (точкой обозначена производная по времени  $t$ ) и при  $t \rightarrow \infty, \dot{\varepsilon} \rightarrow 0$ , то эта стадия ползучести называется *установившейся*. Если деформация ползучести имеет тенденцию к беспредельному увеличению и в итоге сопровождается разрушением материалов конструкции, то эта стадия ползучести называется *неустановившейся*.

Полная деформация в произвольный момент времени определяется как сумма начальной деформации  $\Delta L_0$  и деформации ползучести  $\varepsilon_{II}$ , т.е.  $\varepsilon = \Delta L_0 + \varepsilon_{II}$ .

Заметим, что характер ползучести во времени очень чувствителен к интенсивности напряжений и температуры. Увеличение интенсивности напряжений или градиента температуры, как правило, приводит к возрастанию деформаций ползучести. Процесс ползучести завершается разрушением материала. Сопrotивление материала такому разрушению называется длительной прочностью.

Испытания на длительную прочность проводятся аналогично испытаниям образцов на ползучесть и на том же испытательном оборудовании. Отличие заключается в том, что при испытаниях на длительную прочность не существенно изменение деформации образца в процессе его нагружения постоянной нагрузкой, а фиксируют лишь время до его разрушения и деформацию при разрушении.

Процесс ползучести следует рассматривать как процесс накопления повреждений, приводящий к полному разрушению материала. За меру повреждения можно принять отношение  $\varepsilon_i / \varepsilon_k$ , где  $\varepsilon_i$  – накопленная деформация ползучести при заданном режиме нагружения и продолжительности эксплуатации,  $\varepsilon_k$  – деформация разрушения при заданном режиме нагружения. Тогда кривые ползучести фактически отражают условия накопления повреждений материала во времени.

По данным эксперимента, представляющим зависимость деформации образца композитного материала от времени воздействия установленной статической нагрузки ( $F = 50 \text{ H}$ ), по приведенной формуле  $\varepsilon_i / \varepsilon_k$  вычислим меру повреждения образца. Приращение деформации за время  $t$  с шагом  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  вычисляли по формуле:

$$\Delta L^* = \Delta L_{i+1} - \Delta L_i$$

Таблица 2. Показатели меры повреждения образца под воздействием нагрузки ЭКМ

Характеристика	S0		S2					S3							S4
	S1	S1	S2	S2	S2	S2	S3	S3	S3	S3	S3	S3	S3		
$\Delta L \times 10^{-4}, \text{ м}$	68	71	74	76	79	80	81	83	84	84,6	85	86	87	88	90
$\Delta L^* \times 10^{-4}, \text{ м}$	0	3	3	2	3	1	1	2	1	0,6	0,4	1	1	1	2
$\varepsilon_i \times 10^{-4}, \text{ м}$	0	3	6	8	11	12	13	15	16	16,6	17	18	19	20	22
$t, \text{ ч}$	0,1	2	4	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72
$\varepsilon_i / \varepsilon_k$	0	0,14	0,27	0,36	0,5	0,55	0,59	0,68	0,73	0,75	0,77	0,82	0,86	0,91	1

Здесь  $\Delta L$  – деформация образца;  $\Delta L^*$  – абсолютная деформация;  $\varepsilon_i$  – накопленная деформация ползучести;  $t$  – время нагружения;  $\varepsilon_i / \varepsilon_k$  – мера повреждения.

Результаты расчетной зависимости меры повреждения образцов от времени нагружения представлены на рис. 3.

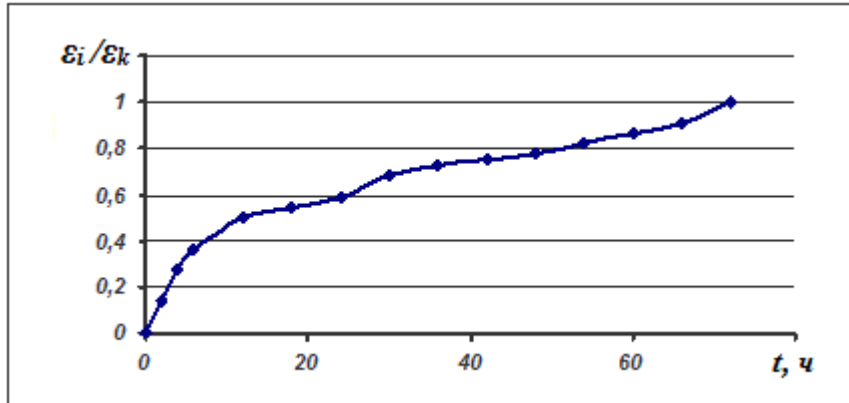


Рис. 3. Зависимость меры повреждения образцов от времени нагружения

По величине накопленной деформации определяли степень поврежденности и, следовательно, долю исчерпания заданного ресурса. Упругие деформации продолжают некоторое время возрастать после завершения нагружения. После разгрузки эта часть деформации исчезает не мгновенно, а постепенно, в течение некоторого времени. Упругие деформации обычно невелики и проявляются, если образец нагружен до предела пропорциональности и длительное время находится под этой нагрузкой.

Увеличение деформаций ползучести  $\varepsilon_{II}$  приводит к снижению упругой деформации, причем скорость снижения напряжений во времени зависит от скорости деформации ползучести:

$$\frac{d\Delta L_0}{dt} = \frac{d\sigma(t)}{Edt} + \dot{\varepsilon}_{II}(t) = 0 \quad \text{и} \quad \frac{d\sigma(t)}{dt} = -\dot{\varepsilon}_{II}(t) \cdot E$$

Здесь  $\Delta L_0$  – начальная деформация,  $\varepsilon_{II}$  – деформация ползучести,  $\sigma(t)$  – напряжение,  $\dot{\varepsilon}_{II}$  – скорость изменения деформации.

Полная деформация в произвольный момент времени определяется как сумма начальной деформации  $\Delta L_0$  и деформации ползучести  $\varepsilon_{II}$ , т.е.  $\varepsilon = \Delta L_0 + \varepsilon_{II}$ .

В общем случае, когда переменными являются как напряжение, так и деформация, соотношения между ними с учетом свойства наследственности и строения в рамках линейной теории записывается в виде:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} + \int_{t_0}^t K(t, \tau) \sigma(\tau) d\tau,$$

где  $t$  – время определения деформации;  $t_0$  – момент времени приложения нагрузки;  $\tau$  – момент времени приращения нагрузки; функция  $K(t, \tau)$  указывает на приращение деформации от напряжения  $\sigma_\tau$  за время  $d\tau$ .

Если в некоторый момент времени  $t_1 > 0$  производить разгрузку, то накопленная деформация ползучести начинает уменьшаться, асимптотически стремясь к некоторому пределу (рис. 4) [3]. Такое явление носит название *обратной ползучести*. Частным случаем обратной ползучести является рост необратимых и обратимых деформаций при постоянном напряжении. Это явление носит название – *последствие*.

Для условий эксплуатации изделий в течение длительного времени под постоянными нагрузками необходимо учитывать явление *упругого последствия*, которое заключается в том, что упругие деформации продолжают некоторое время возрастать после завершения нагружения. Восстановление образца при снятии нагрузки является важной практической задачей.

Поставим задачу: найти вероятность восстановления образца при снятии нагрузки, а также вероятность разрушения образца в случае достижения им состояния пластической деформации.

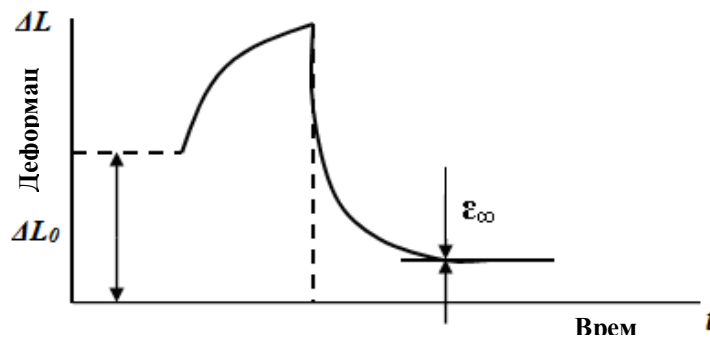


Рис. 4. Восстановление образца при снятии нагрузки [3]

В работе [5] на основе результатов эксперимента (деформация образца ПКМ под действием статической нагрузки) установлены состояния системы, которые приведены в виде графа состояний случайного дискретного процесса (рис. 5), а так же методами, используемыми в теории марковских процессов, получена зависимость абсолютной деформации образца эпоксидного композитного материала от продолжительности воздействия статической нагрузки и вычислены вероятности пребывания системы в различных состояниях.

Поставим следующую задачу: вычислить вероятности перехода, т.е. вероятности возврата в предыдущее состояние после снятия нагрузки с образцов.

Рассмотрим три смежных состояния системы:

$S_0$  – исходное состояние;

$S_1$  – работоспособное состояние;

$S_2$  – упругая деформация.

По данным таблицы вычислим абсолютную деформацию, возникшую в результате воздействия статической нагрузки ( $F = 50$  Н) в композитах, содержащих 50 мас.ч. наполнителя на 100 мас.ч. эпоксидной смолы, а также относительную деформацию по смежным состояниям системы, рассчитанную следующим образом. За период от 0 до 24 ч деформация изменилась от  $L = 68 \times 10^{-4}$  м до  $L = 81 \times 10^{-4}$  м, т.е. абсолютная деформация составила  $\Delta L = 13 \times 10^{-4}$  м. Вычислим абсолютную деформацию за каждый период времени измерения, после чего находим отношение абсолютной деформации за каждый период к деформации за весь период.

Таблица 3. Расчет относительной деформации ПКМ под воздействием нагрузки

Характеристика	$S_0$		$S_1$		$S_2$				$\Sigma$
	68	71	74	76	79	80	81		
$\Delta L \times 10^{-4}, м$	68	71	74	76	79	80	81		
$\Delta L^* \times 10^{-4}, м$	0	3	3	2	3	1	1	13	
$\Delta L_i^* / \Sigma \Delta L^*$	0	0,2308	0,23077	0,15385	0,2308	0,07692	0,07692	1	

Очевидно, чем дольше воздействие нагрузки, тем меньше вероятность восстановления. Используем известную формулу теории вероятностей:  $p + q = 1$ , где  $p$  – вероятность того, что событие произойдет;  $q$  – вероятность того, что событие не произойдет; сумма этих событий является достоверным событием, вероятность которого равна 1; тогда  $q = 1 - p$ .

Далее будем считать, что  $p$  – вероятность того, что система пребывает в текущем состоянии, тогда  $q$  – вероятность того, что система покинет это состояние при снятии нагрузки.

По формуле  $q = 1 - p$  вычислим вероятности возврата из состояния  $S_1$  в состояние  $S_0$ : после трех часов воздействия  $q = 0,7692$ , после шести –  $q = 0,5385$ . Поскольку наблюдается марковский процесс, из состояния  $S_2$  – упругая деформация можно вернуться в  $S_1$  – работоспособное состояние с вероятностями:

- из  $S_{21}$  в  $S_1$ :  $q_{21} = 0,7143$ ;

- из  $S_{22}$  в  $S_1$ :  $q_{22} = 0,2857$ ;

- из  $S_{23}$  в  $S_1$ :  $q_{23} = 0,1429$ .

Вероятность возврата из состояния  $S_{24}$  (пограничное состояние между упругой и пластичной деформацией) в состояние  $S_1$  практически равна нулю.

Граф состояний системы можно представить в следующем виде (рис. 5).

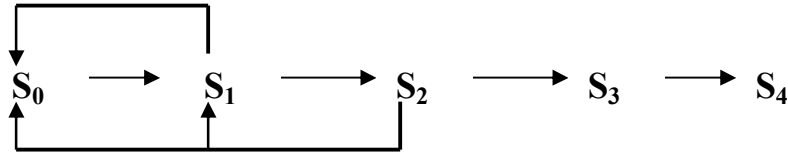


Рис. 5. Граф состояний системы

Тогда по физическому смыслу процесса возврат из состояния  $S_3$  (пластичная деформация) в состояние  $S_2$  (упругая деформация) невозможен. Также невозможен переход из состояния  $S_4$  (разрушение) в состояние  $S_3$  (пластичная деформация). Поэтому вероятности этих переходов равны нулю.

Однако, граф состояний системы предполагает возможность возврата системы из состояния  $S_2$  в исходное состояние  $S_0$  (восстановление). Используя результаты вычисления относительной деформации по состояниям возможных переходов, получим:

- после  $t = 8$  ч воздействия нагрузки вероятность возврата из состояния  $S_{21}$  в состояние  $S_0$ :  $q = 0,3846$ ;
- после  $t = 11$  ч воздействия нагрузки вероятность возврата из состояния  $S_{22}$  в состояние  $S_0$ :  $q = 0,1539$ ;
- после  $t = 12$  ч воздействия нагрузки вероятность возврата из состояния  $S_{23}$  в состояние  $S_0$ :  $q = 0,0769$ .

Окончательно матрица переходных состояний будет иметь следующий вид (табл. 4).

Таблица 4. Матрица переходных состояний восстановления образца

Состояния	$S_0$	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{21}$	$S_{22}$	$S_{23}$	Вероятности
$S_0$	0	0,76923	0,53846	0,38462	0,1538	0,07692	вероятность восстановления из $S_1$ и $S_2$ в $S_0$
$S_1$	0	0	0	0,71429	0,2857	0,14286	вероятность восстановления из $S_2$ в $S_1$

Практически важным является вопрос о том, сколько шагов сможет пройти система до остановки процесса, то есть поглощения в том или ином состоянии.

Очевидно, согласно построенному графу состояний системы, состояние  $S_3$  является невозвратным множеством, так как система может покинуть это множество, но не может в него вернуться; состояние  $S_4$  является поглощающим множеством.

Таблица 5. Матрица переходных вероятностей из невозвратного множества в поглощающее

$S_3$							$S_4$	состояния
$S_{31}$	$S_{32}$	$S_{33}$	$S_{34}$	$S_{35}$	$S_{36}$	$S_{37}$	$S_4$	этапы состояний
83	84	84,6	85	86	87	88	90	деформация
30	36	42	48	54	60	66	72	время воздействия
2	1	0,6	0,4	1	1	1	2	абсолютная деформация за период
0,222	0,111	0,067	0,044	0,111	0,111	0,111	0,2222	относительная деформация
0,000	0,222	0,333	0,400	0,444	0,556	0,667	0	вероятность поглощения

Таким образом, получена возможность оценить вероятность разрушения образца под воздействием фиксированной нагрузки, и на основе этих результатов предотвратить разрушение.

Построим матрицу переходных вероятностей из невозвратного множества  $S_3$  в поглощающее множество  $S_4$ . В таком случае возможно оценить вероятность разрушения материала после длительного (от 30 до 70 ч) воздействия нагрузки. Расчеты показали, что вероятность перехода системы в поглощающее состояние (из  $S_{32}$  в  $S_4$ ) после 36 ч воздействия нагрузки составляет  $q = 0,22$ ; после 42 ч –  $q = 0,34$ ; после 48 ч –  $q = 0,4$ ; после 54 ч –  $q = 0,44$ ; после 60 ч –  $q = 0,56$ ; после 66 ч –  $q = 0,67$ . Результаты расчета вероятности поглощения для разных состояний системы приведены в табл. 5

**Выводы.** На предварительном этапе методами, используемыми в теории марковских процессов, получена зависимость абсолютной деформации образца эпоксидного композитного материала от продолжительности воздействия статической нагрузки. Установлены состояния системы, которые приведены в виде графа состояний случайного дискретного процесса, а также вероятности пребывания системы в различных состояниях. Данная работа является логическим продолжением исследований. В работе предложен метод определения вероятности восстановления образца после снятия статической нагрузки, а также вероятность разрушения образца при достижении критического состояния пластической деформации. Полученные результаты позволяют прогнозировать изменение свойств полимерных композитных материалов при воздействии статической нагрузки, и таким образом предотвратить разрушение.

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. Пособие / [М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин и др.; под ред. А.А. Берлина]. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с., ил.
2. Аскадский А.А. Компьютерное материаловедение полимеров. Т. 1. Атомно-молекулярный уровень / А.А. Аскадский, В.И. Кондращенко. – М.: Научный мир, 1999. – 544 с.
3. Макаров А.Г., Ростовцева Н.Г. Моделирование деформационных свойств полимерных материалов // Дизайн. Материалы. Технология, 2008, № 1 (4), – С. 140-145.
4. Букетов А.В. Ідентифікація і моделювання технологічних об'єктів та систем: Посібник / А.В.Букетов.- Тернопіль: СМП "Тайп", 2009. – 260 с.
5. Кравцова Л.В. Определение вероятностей напряженного состояния эпоксидных композитных материалов под воздействием статической нагрузки / Л.В. Кравцова, А.В. Букетов, А.П. Пирог // Искусственный интеллект – Донецк, 2013 – № 3 (61). – С. 355-363.

Стаття надійшла до редакції 04.09.2013.