

## Экспериментальное исследование усталостной прочности стекло-волоконного композита СТЭФ-1

А. Моваггар, Г. И. Львов

Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, Украина

*Экспериментально исследована усталостная прочность и оценены накопленные повреждения композита СТЭФ-1 со стеклянными волокнами и эпоксифенольным связующим. Исследования проводили на специальной установке типа ДП-5/3, которая используется для определения усталостного сопротивления при изгибе листовых образцов при симметричном цикле нагружения. Образцы вырезали вдоль основы и утка стеклоткани и доводили до разрушения при жестком режиме нагружения. Экспериментальные результаты по усталостному разрушению образцов обрабатывали методом наименьших квадратов. Определены параметры энергетической модели усталостного повреждения композиционного материала. Получено довольно хорошее согласование между теоретическими и экспериментальными данными.*

**Ключевые слова:** композиционные материалы, усталость, механика повреждения, разрушение.

**Введение.** Высокие прочностные и жесткостные характеристики новых композиционных материалов обеспечивают большие возможности выбора и совершенствования конструктивных решений, позволяют существенно снизить массу изделий и размеры их элементов. Применение композиционных материалов для изготовления разнообразных конструкций требует детального изучения их механических свойств.

Экспериментальное определение механических характеристик включает, собственно, выбор модели материала, испытания образцов и математическую обработку результатов. Полученные в процессе эксперимента данные используют в трех основных направлениях: для проверки гипотез, положенных в основу макромеханических теорий; как исходные данные для расчета и проектирования реальных конструкций и контроля качества материалов [1]. При экспериментальном изучении и описании механических свойств композитов приходится сталкиваться с трудностями, которые вызваны макроскопической анизотропией, неоднородностью, ростом (в зависимости от типа анизотропии) числа определяемых независимых характеристик, а также жесткими требованиями к выбору формы, размеров образцов и способа нагружения.

Усталостные характеристики композиционных материалов детально исследовались в течение последних лет, поскольку усталость является причиной большинства отказов ответственных элементов конструкций. При расчете на прочность элементов конструкций из композиционных материалов, работающих при повторно-переменных нагрузках, необходимо знать характеристики усталостной прочности, которые определяются методами лабораторных испытаний образцов в исходном состоянии и после предварительного воздействия различных факторов в обычных условиях и близких к эксплуатаци-

онным. Несмотря на то что композиционные материалы имеют неплохие характеристики усталостной долговечности, усталостные повреждения в них начинаются после нескольких сотен циклов нагружения. Например, при нагружении стеклопластиков отмечается тенденция к прогрессирующему и необратимому повреждению, и в некоторых случаях нагрузка при возникновении повреждений составляет всего 10% соответствующего статического предела прочности.

В данной работе представлены данные экспериментальных исследований усталостной прочности и оценки накопленных повреждений стекловолоконного композита СТЭФ-1. Экспериментальные результаты по усталостному разрушению образцов обрабатывали методом наименьших квадратов. Установлены параметры энергетической модели усталостного повреждения композиционного материала.

**Экспериментальное определение модулей упругости композита.** Материалом для исследования служил стеклотекстолит марки СТЭФ-1, представляющий собой слоистый листовый материал, который состоит из нескольких слоев стеклоткани, склеенных методом горячего прессования (рис. 1). Как связующее применяется термореактивная эпоксифенольная смола.

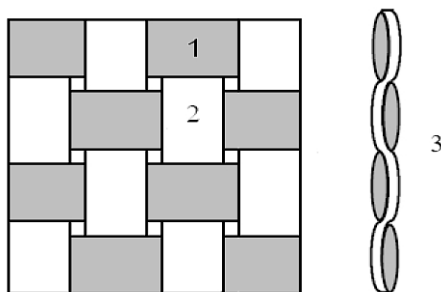


Рис. 1. Листовой стеклотекстолит: 1 – нить основы; 2 – нить утка; 3 – сечение вдоль утка.

Стеклотекстолит используется в качестве электроизоляционного материала, работающего при температуре  $-65...155^{\circ}\text{C}$  в электро- и радиотехнике, а также как подделочный материал для изготовления деталей автомобилей, корпусов приборов и других конструкций. Материал устойчив к атмосферным, химическим воздействиям, водостоек и обладает относительно однородной внутренней структурой. Армированные тканевым наполнителем пластики являются макроскопически ортотропными, имеют в плоскости укладки слоев две ортогональные оси симметрии механических свойств, совпадающие с направлениями укладки нитей основы и утка.

Для проведения механических испытаний использовали 30 плоских образцов, вырезанных вдоль основы, и 30 образцов, вырезанных вдоль утка стеклоткани из единого листа материала. Образцы имели прямоугольное поперечное сечение ( $2 \times 15$  мм) и длину 175 мм. Известно много работ, где рассматривались методы определения модуля упругости композиционных материалов. Сравнительная характеристика некоторых методов изложена в работе [2]. Поскольку упругие характеристики стеклопластиков могут иметь определенный разброс и отличаться от справочных данных, в настоящей работе

эти характеристики определяли динамическим методом: по величинам собственных частот изгибных колебаний образцов, используемых для усталостных испытаний.

Для определения модуля упругости образцов, вырезанных в разных направлениях, использовали вибростенд серии ВЭДС-10а, который предназначен для испытания изделий на вибрационную прочность в лабораторных и производственных условиях.

Технические характеристики вибростенда:

Максимальная возбуждаемая сила, Н .....	100
Рабочий диапазон частот, Гц	
номинальный .....	20...5000
расширенный .....	5...5000
Максимальное ускорение, $\text{м/с}^2$ .....	980
Максимальное перемещение стола, мм .....	16
Диаметр стола, мм .....	76
Максимальная масса груза, кг .....	1,9

Консольные образцы рабочей длиной  $l = 147$  мм с поперечным сечением  $2 \times 15$  мм с помощью зажимного устройства жестко прикрепляли к платформе вибростенда, амплитуду и частоту колебаний которой можно плавно изменять в определенном диапазоне посредством системы управления. Преимущество вибростенда – относительно простое управление амплитудой и частотой колебаний. При этом амплитудно-частотная характеристика в основном рабочем диапазоне практически является горизонтальной [3], что позволяет с высокой точностью определить первую собственную частоту образца. Крепление образца к платформе вибростенда показано на рис. 2.



Рис. 2. Крепление образца к платформе вибростенда.

Для первой формы колебаний стержня, жестко закрепленного одним концом ( $x = 0$ ) и свободного на другом ( $x = l$ ), собственная частота  $f$  и период колебаний  $T$  определяются как [4]

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{3,515} \sqrt{\rho \frac{Fl^4}{EI_z}}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости;  $I_z$  – момент инерции поперечного сечения;  $\rho$  – плотность;  $F$  – площадь поперечного сечения.

В результате испытаний 30 образцов, вырезанных вдоль основы стеклоткани, было определено среднее значение первой резонансной частоты  $\langle f_1 \rangle = \sum_{i=1}^{30} \frac{f_i}{30} = 26$  Гц, затем – значение модуля упругости образцов вдоль основы стеклоткани с помощью уравнения (2):

$$E_1 = \frac{4\pi^2 \langle f_1 \rangle^2 \rho Fl^4}{(3,515)^2 I_z} = 5,62 \cdot 10^9 \text{ Па.} \quad (2)$$

Аналогично найдено среднее значение первой резонансной частоты при испытаниях 30 образцов, вырезанных вдоль утка:  $\langle f_2 \rangle = \sum_{i=1}^{30} \frac{f_i}{30} = 23,5$  Гц.

Соответствующее значение модуля упругости определено как

$$E_2 = \frac{4\pi^2 \langle f_2 \rangle^2 \rho Fl^4}{(3,515)^2 I_z} = 4,59 \cdot 10^9 \text{ Па.} \quad (3)$$

Остальные физико-механические характеристики листового стеклотекстолита марки СТЭФ-1 таковы:  $\rho = 1860 \text{ кг/м}^3$ ; модуль упругости вдоль основы составляет 5620 МПа, вдоль утка – 4590 МПа, коэффициент Пуассона – соответственно 0,22 и 0,18. Плотность материала и коэффициент Пуассона приняты согласно справочным данным [5].

**Испытания на усталость.** Испытания проводили на специальной установке типа ДП-5/3, которая служит для определения усталостного сопротивления при изгибе листовых композиционных материалов (рис. 3). При этом допускается только жесткий режим нагружения.

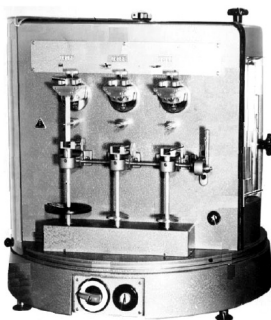


Рис. 3. Установка ДП-5/3 для определения усталостного сопротивления при изгибе листовых композиционных материалов.

Установка позволяет одновременно испытывать три образца при одинаковом угле изгиба и одинаковом или различном предварительном натяжении. При реализации жесткого режима нагружения в процессе испытаний на усталость образцов контролируемым параметром является угол поворота верхнего зажима, который изменяется по синусоидальному закону (рис. 4).

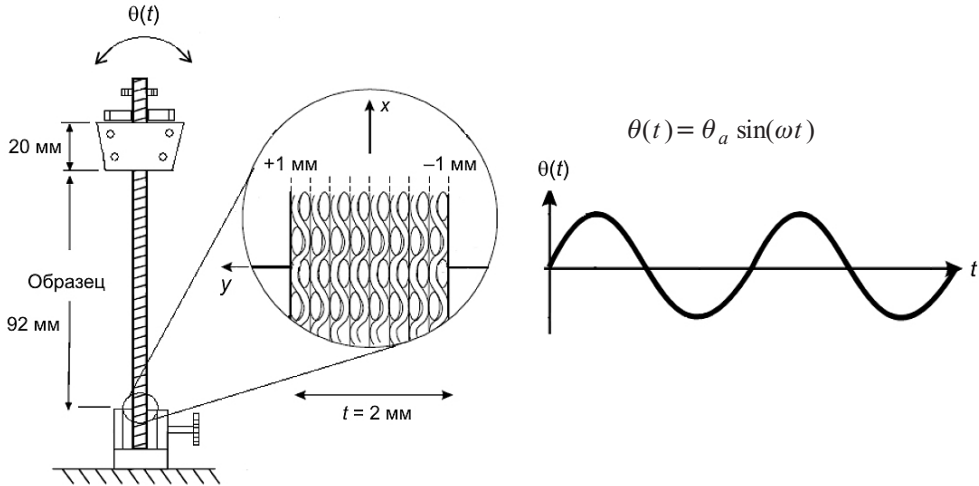


Рис. 4. Схема установки и закрепления образца и изменение величины угла поворота верхнего зажима при испытаниях.

Величина угла поворота может устанавливаться в широком диапазоне: 20...180°, а заданная частота перегибов – в двух режимах: 100 или 300 перегибов в минуту. Было выполнено серию испытаний по пять образцов, вырезанных вдоль основы и утка стеклоткани, при симметричном цикле нагружения и углах перегиба 60, 50, 45, 40, 35 и 30°. Образцы каждой серии нагружались одинаково, и испытания проводили на одной машине непрерывно до полного их разрушения с контролем стабильности задаваемых деформаций и температуры. Для сопоставления результатов одной серии образцов испытания проводили при одинаковой частоте. После автоматического выключения привода вследствие разрушения образцов устанавливали числа перегибов по счетчикам.

Теоретические оценки напряжений и изгибающих моментов основаны на классической теории балок. Композиционный образец рассматривается как балка, жестко закрепленная нижним концом и с заданным на верхнем конце углом поворота  $\theta(t)$ . Рабочая длина образца  $l = 92$  мм. Прогиб каждой точки изогнутой оси балки является функцией угла поворота и расстояния  $x$  от данного сечения до начала координат:

$$w = f(x, \theta). \quad (4)$$

Поскольку прогибы в процессе испытаний могут превышать толщину образцов, уточненное их значение в каждом рассматриваемом сечении можно найти с помощью нелинейного уравнения изгиба балок [6]:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} - \frac{3}{2} EA \left( \frac{dw}{dx} \right)^2 \left( \frac{d^2 w}{dx^2} \right) = 0, \quad (5)$$

где  $E$  – модуль упругости образца, вырезанного в соответствующем направлении.

В линейной постановке можно определить приближенное значение прогибов по уравнению

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = 0, \quad (6)$$

решение которого имеет вид

$$w(x) = c_1 + c_2 x + c_3 x^2 + c_4 x^3, \quad (7)$$

где  $c_1, c_2, c_3$  и  $c_4$  – постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий, устанавливаемых для нижнего зажима –  $w = 0, dw/dx = 0$  и для верхнего –  $w = 0, dw/dx = \theta$ .

После того как найдены прогибы, можно определить величины изгибающего момента и нормального напряжения:

$$\sigma_x = -zE \frac{d^2 w}{dx^2} = -zE \left[ -2 \frac{\theta}{l} + 6 \frac{\theta}{l^2} x \right]. \quad (8)$$

Точность полученных значений напряжений проверяли тестовым расчетом в пакете программы ANSYS. Для моделирования листового материала использовали оболочечный элемент Shell93 с шестью степенями свободы в каждом узле. Это 8-узловый элемент, который может применяться при больших прогибах также для ортотропных материалов.

Поскольку разница между напряжениями, определенными по формуле (8) и рассчитанными с использованием пакета программы ANSYS, не превышает 5%, можно ограничиться полученными по (8) напряжениями и построить с их помощью кривые усталости исследуемых материалов.

**Обработка результатов проведенных экспериментов.** Стеклотекстолит будем рассматривать как ортотропную однородную сплошную среду. При этом принимается гипотеза о том, что скорость накопления повреждений зависит от максимальной энергии упругого деформирования  $W_e$ , коэффициента асимметрии цикла  $R$  и текущего параметра поврежденности  $D$  [7]:

$$\frac{dD}{dN} = f(R, D, W_e). \quad (9)$$

В соответствии с концепцией континуальной механики повреждаемости, параметр  $D$  теоретически можно контролировать во времени по изменению модуля упругости. Вид функции  $f$ , определяющей скорость накопления повреждений, следует устанавливать по результатам экспериментов на уста-

лостную прочность. Очевидно, что в этом случае более предпочтительным является идентификация функциональной зависимости (9) на основе результатов усталостной прочности по  $S - N$  кривым Веллера.

Для одноосного напряженного состояния при стационарном цикле изменения напряжений зависимость параметра поврежденности от числа циклов имеет вид [7]

$$D = 1 - \left( - \frac{(n+1)mk(R)\sigma^{2n}}{2^n E^n} N + 1 \right)^{1/(n+1)}, \quad (10)$$

где  $E$  – модуль упругости образца в соответствующем направлении;  $k(R)$  – функция, зависящая от коэффициента асимметрии цикла.

В силу значительной нелинейности зависимости параметра поврежденности от числа циклов на стадии, предшествующей разрушению, скорость роста повреждаемости увеличивается и устремляется к бесконечности. Поэтому интервал изменения параметра поврежденности  $D_{кр}$  близок к единице,  $0,9 < D_{кр} < 1,0$  соответствует незначительному числу циклов. Это позволяет определять  $S - N$  зависимость, интегрируя соотношение (9) от нуля до единицы:

$$\sigma = \left( \frac{2^n E^n}{(n+1)mk(R)} \frac{1}{N_f} \right)^{1/2n}, \quad (11)$$

где  $N_f$  – число циклов до разрушения.

Для практического использования энергетической теории необходимо идентифицировать параметры функциональной зависимости типа (9) на основании экспериментальных результатов. Поэтому экспериментальные данные по усталостному разрушению образцов из стеклотекстолита обрабатывали методом наименьших квадратов для определения параметров  $m$  и  $n$  кинетического уравнения. Эта задача сводится к нахождению численных значений параметров  $m$  и  $n$ , при которых функция  $Q$  достигает минимума:

$$Q(m, n, E_1, E_2) = \sum_{i=1}^n [\sigma_{i1}(N_{i1}) - F(N_i, E_1, m, n)]^2 + \sum_{i=1}^n [\sigma_{i2}(N_{i2}) - F(N_i, E_2, m, n)]^2. \quad (12)$$

В данном случае функция  $F$  представляет собой степенную зависимость. Тогда при фиксированном значении параметра цикла  $k(R)=1$  функция  $Q$  принимает вид

$$Q = \sum_{i=1}^{30} \left( \sigma_{i1} - \left( \frac{2^n E_1^n}{(n+1)m} \right)^{1/2n} N_1^{-1/2n} \right)^2 + \sum_{i=1}^{30} \left( \sigma_{i2} - \left( \frac{2^n E_2^n}{(n+1)m} \right)^{1/2n} N_2^{-1/2n} \right)^2. \quad (13)$$

Поскольку простейшим способом аппроксимации произвольных данных методом наименьших квадратов является использование полинома первой степени, прологарифмируем функцию  $F$  и введем новую переменную  $t = \ln N$ . Тогда  $Q$  будет функцией от  $t$ :

$$Q = \sum_{i=1}^{30} \left( \ln \sigma_{i1} - \left( \frac{1}{2} \ln E_1 + \frac{1}{2n} \ln \frac{2^n}{m(n+1)} - \frac{1}{2n} t_{i1} \right) \right)^2 + \sum_{i=1}^{30} \left( \ln \sigma_{i2} - \left( \frac{1}{2} \ln E_2 + \frac{1}{2n} \ln \frac{2^n}{m(n+1)} - \frac{1}{2n} t_{i2} \right) \right)^2, \quad (14)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – модули упругости образцов, вырезанных соответственно вдоль и поперек листа.

Обозначим  $a = \frac{1}{2n} \ln \left( \frac{2^n}{m(n+1)} \right)$  и  $b = -\frac{1}{2n}$ , тогда для функции остаточных ошибок имеем

$$Q = \sum_{i=1}^{30} \left( \ln \sigma_{i1} - \left( \frac{1}{2} \ln E_1 + a + b t_{i1} \right) \right)^2 + \sum_{i=1}^{30} \left( \ln \sigma_{i2} - \left( \frac{1}{2} \ln E_2 + a + b t_{i2} \right) \right)^2. \quad (15)$$

Условие минимума функции  $Q$  сводится к системе двух уравнений для определения неизвестных  $m$  и  $n$ :

$$\frac{\partial Q(m, n, E_1, E_2)}{\partial a} = 0; \quad \frac{\partial Q(m, n, E_1, E_2)}{\partial b} = 0. \quad (16)$$

Обработка результатов испытаний образцов дала следующие значения:

$$m = 1,034 \cdot 10^{-27} \text{ (Па)}^{-n}; \quad n = 3,521. \quad (17)$$

Поставляя полученные значения в кинетическое уравнение (11), получаем две  $S - N$  кривые для прогнозирования усталостной долговечности образцов, вырезанных вдоль основы и утка:

$$\sigma_1(N_1) = \left( \frac{2^n E_1^n}{(n+1)m} \frac{1}{N_{f1}} \right)^{1/2n}; \quad \sigma_2(N_2) = \left( \frac{2^n E_2^n}{(n+1)m} \frac{1}{N_{f2}} \right)^{1/2n}. \quad (18)$$

Теоретические  $S - N$  зависимости для образцов в этих направлениях показаны на рис. 5.

После определения параметров, входящих в кинетическое уравнение, модель [7] может использоваться для количественной оценки повреждаемости элементов конструкций. На рис. 6 приведено изменение параметра поврежден-



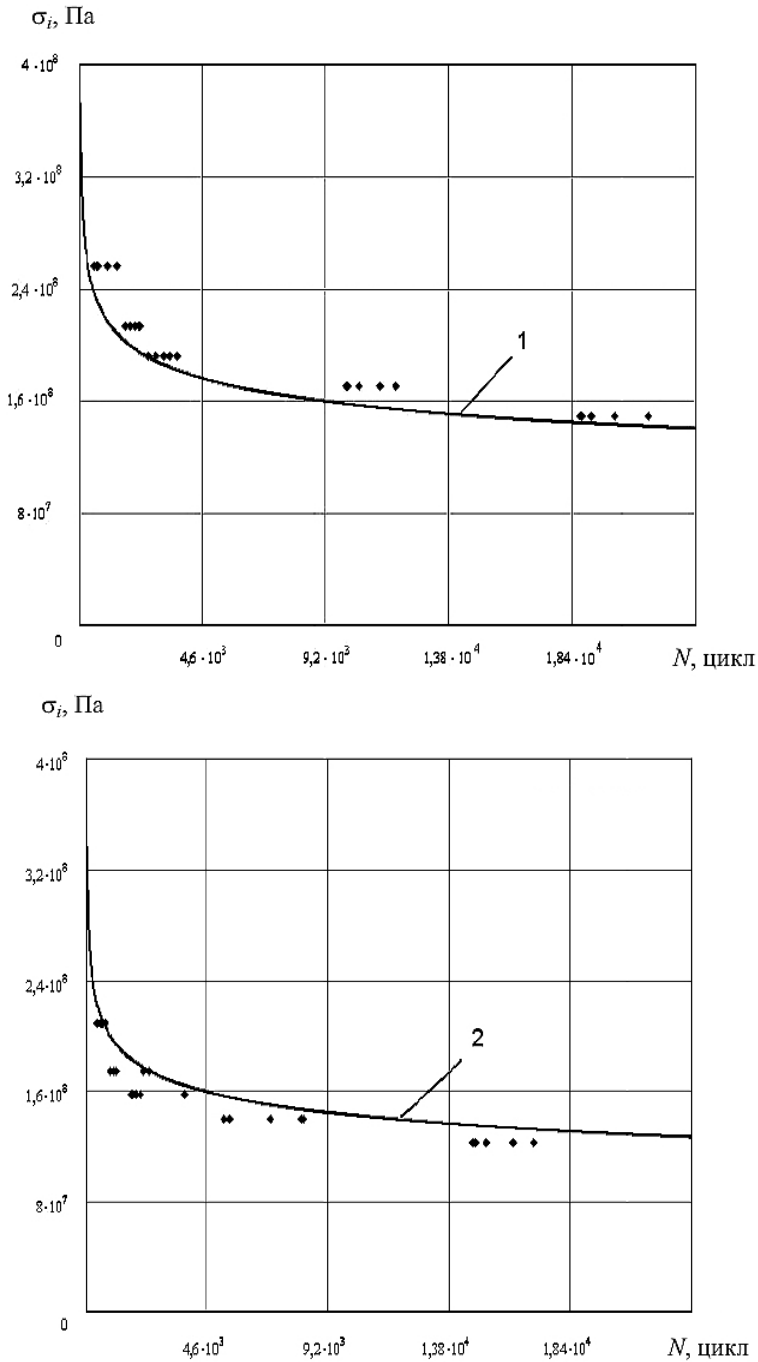


Рис. 5. Кривые усталости образцов, вырезанных вдоль основы (1) и утка (2). (Точки – экспериментальные данные.)

ности в зависимости от числа циклов до разрушения. Кривые построены в результате интегрирования кинетического уравнения (9) при одинаковом значении амплитудного напряжения  $\sigma = 0,85 \cdot 10^8$  Па и фиксированном параметре цикла  $k(R) = 1$  для образцов, вырезанных вдоль основы и утка стеклоткани.

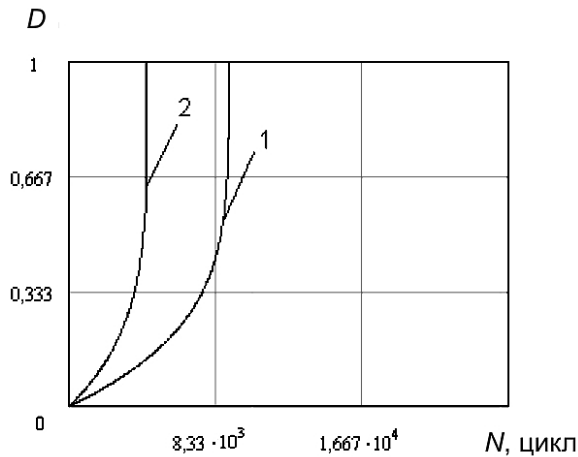


Рис. 6. Изменение параметра поврежденности образцов, вырезанных вдоль основы (1) и утка (2).

## Выводы

1. Приведены результаты экспериментальных исследований образцов, вырезанных вдоль основы и утка из листового стеклотекстолита марки СТЭФ-1.

2. Полученные результаты использовали для идентификации параметров энергетической модели усталостного разрушения, разработанной в рамках концепции континуальной механики повреждаемости.

3. Установлено довольно хорошее соответствие между теоретическими и экспериментальными данными.

## Резюме

Експериментально досліджено міцність від утомленості та оцінено накопичені пошкодження композита СТЕФ-1 зі скляними волокнами й епоксифенольним зв'язуючим. Дослідження проводили на спеціальній установці, що використовується для визначення втомного опору при згині листових зразків за симетричного циклу навантаження. Зразки вирізали вздовж основи й утоку склотканини та доводили до руйнування за жорсткого режиму навантаження. Експериментальні результати щодо руйнування зразків від утоми обробляли методом найменших квадратів. Визначено параметри енергетичної моделі втомного пошкодження композиційного матеріалу. Отримано досить хороше узгодження між теоретичними й експериментальними даними.

1. Гузь А. Н., Игнатов И. В., Гирченко А. Г. и др. Механика композитных материалов и элементов конструкций. В 3 т. Т. 3. Прикладные исследования. – Киев: Наук. думка, 1983. – 264 с.
2. Кучер М. К., Заразовський М. М. Оцінка мікромеханічних моделей прогнозування ефективних констант пружності волокнистих композитів // Вісн. НТУУ “КПІ”. Сер. Машинобудування. – 2010. – Вип. 58. – С. 127 – 135.

3. Писаренко Г. С., Стрижало В. А. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела. – Киев: Наук. думка, 1986. – 264 с.
4. Бабаков И. М. Теория колебаний. – М.: Гостехиздат, 1958. – 628 с.
5. Композиционные материалы. В 8 т. / Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. Т. 2. Механика композиционных материалов / Под ред. Дж. Сендецки. – М.: Мир, 1978. – 564 с.
6. Reddy J. N. An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis. – Oxford University Press, 2004.
7. Моваггар А., Львов Г. И. Энергетическая модель усталостной прочности композиционных материалов // Вест. НТУ “ХПИ”. – 2010. – № 4. – 210 с.

Поступила 20. 10. 2010