

А.В. Букетов, Л.В. Кравцова, А.П. Богдан

*Херсонская государственная морская академия, Украина
(E-mail: arundo.p@mail.ru)*

Прогнозирование разрушения образцов композитных материалов под действием повторно-переменных нагрузжений

В статье представлены результаты экспериментального исследования полимерных композитных материалов при воздействии повторно-переменных нагрузжений. На основе экспериментальных данных получены параметры аналитической взаимосвязи силы повторно-переменных нагрузжений и соответствующей деформации образцов, а также дан прогноз их разрушения с учетом остаточной деформации.

Ключевые слова: прогнозирование свойств, повторно-переменные нагрузжения, деформация, композитные материалы.

Композитные материалы (КМ), как правило, используют в агрессивных средах или при изготовлении конструкций, которые подвергаются повышенным механическим воздействиям [1]. Многие детали машин во время эксплуатации многократно подвергаются действию периодически изменяющихся во времени нагрузок. В общем случае нагрузки (напряжения) могут изменяться во времени по законам, аналитическое описание которых представляет определенные трудности. Переменные напряжения могут иметь установившийся и неустановившийся режимы. Однако при проведении исследований по воздействию нагрузки на материал можно установить закономерности изменения деформации материала в зависимости от силы нагрузжения. Следовательно, изучая поведение образцов под действием повторно-переменных нагрузок исследуемых материалов, можно обобщить результаты на случай поведения деталей из этих материалов в реальных конструкциях.

Как известно [2], одной из главных особенностей деформирования композитов является то, что уже на ранних этапах процесса нагрузжения (квазистатического или циклического) свойства композиционного материала существенно зависят от накопления повреждений в структуре композита. Одним из основных факторов, влияющих на долговечность полимерных композитов и конструкций из них, являются эксплуатационные нагрузки. Под действием этих нагрузок материал в течение времени получает так называемые усталостные микротрещины, которые могут быть причиной его разрушения. Образованию микротрещин способствует разрыв связей, вызванный одновременным развитием деформаций сжатия и растяжения полимерного композита. Если локальные напряжения в области скопления дислокаций превысят предел текучести композита, то возникают микроскопические трещины. Поэтому необходимы простые и надежные методы определения текущего состояния КМ как исходного материала для деталей конструкционного назначения.

Анализ последних исследований публикаций

Как показывает практика, повторно-переменные нагрузки, циклически изменяющиеся во времени величине или по величине и знаку, могут привести к разрушению конструкции при напряжениях, существенно меньших, чем предел текучести (или предел прочности). Чем глубже изучены закономерности, описывающие процессы изменения свойств и состояние материалов, тем достовернее можно предсказать поведение изделия в условиях эксплуатации и обеспечить сохранение показателей надежности в требуемых пределах. В работах [3–6] авторами проанализированы и исследованы вопросы зависимости абсолютной деформации образца КМ от продолжительности воздействия статической нагрузки, предложен метод определения вероятности восстановления образца после снятия статической нагрузки, что, в свою очередь, обеспечит надежность эксплуатации технологического оборудования в различных отраслях промышленности. Данная работа является логическим продолжением исследований. Цель работы — прогнозирование разрушения образцов КМ, подверженных действию повторно-переменных нагрузок с учетом остаточной деформации.

Результаты исследования

Определение реальных физических соотношений между напряжениями и деформациями КМ в зависимости от возможного их изменения в напряженно-деформированном состоянии в процессе эксплуатации, числа циклов нагружения, условий работы конструкции в высшей степени важно, чтобы достоверно прогнозировать работоспособность, надежность и долговечность конструкции, изготовленной с использованием КМ.

Для экспериментальных исследований были изготовлены две серии образцов КМ. Первая серия образцов хранилась в течение трех месяцев в нормальных температурно-влажностных условиях, образцы второй серии были выдержаны в пресной воде также в течение трех месяцев. Далее образцы обеих серий испытывали на четырёхточечный изгиб по ГОСТу 9550-81 многократно приложенной повторно-переменной нагрузкой. Параметры образцов: длина $l = 120 \pm 2$ мм, ширина $b = 15 \pm 0,5$ мм, высота $h = 10 \pm 0,5$ мм.

Измеряли силу воздействия на образец в моменты деформации от 0 до 3,00 мм с шагом 0,05 мм. При этом для образцов, выдержанных в течение длительного времени в нормальных температурно-влажностных условиях, наблюдали в среднем девять этапов последовательного нагружения с последующим снятием нагрузки, а для образцов, выдержанных в воде, — 16 этапов.

Для определения взаимосвязи между силой воздействия на образец и его деформацией аппроксимировали зависимость, полученную в результате эксперимента в табличной форме, следующей функцией:

$$y_t = f(x_t, b) + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где y_t — значение деформации; x_t — средняя сила воздействия на каждом этапе деформации образца; ε_t — случайные ошибки модели; b — параметры, подлежащие определению и минимизирующие случайные ошибки модели ε_t . В качестве метода аппроксимации использовали метод наименьших квадратов, сущность которого может быть выражена следующим образом:

$$\sum_i \varepsilon_i^2 = \sum_i (y_i - f_i(x_i, b))^2 \rightarrow \min_x \quad (2)$$

(сумма квадратов отклонений табличных и аппроксимирующих значений функции должна быть минимальной). Количество подлежащих определению параметров b зависит от вида аппроксимирующей функции.

Как известно, экстремум функции нескольких переменных определяют из условия равенства нулю частных производных по каждому из параметров. Это приводит к системе уравнений

$$\sum_{t=1}^n (y_t - f(x_t, b)) \frac{\partial f(x_t, b)}{\partial b} = 0, \quad (3)$$

решив которую, находим значения параметров аппроксимации (n — количество узлов (точек измерения)).

По исходным данным, представляющим таблицы соответствия деформации образца силе нагружения (воздействия на образец), было рассчитано приращение нагрузки на каждые 0,05 мм деформации. Для начальных замеров от 0,15 мм приращение составило 10 ... 12 Н. Для начальных замеров от 0,6 мм приращение составило 14 ... 15 Н на каждые 0,05 мм деформации. Для каждого этапа нагружения рассчитана средняя нагрузка на 1 мм деформации с учетом остаточной деформации при полном снятии нагрузки с образца.

Исследования проводили для образцов, выдержанных в течение трех месяцев как в нормальных температурно-влажностных условиях, так и в воде. В каждой серии (содержание в нормальных условиях и в воде) испытывали по девять образцов. Обработка сгруппированных результатов испытаний показала, что достаточно рассмотреть по два образца, имеющих типовые показатели, каждой серии.

Сначала рассмотрим результаты расчетов для двух образцов, выдержанных в нормальных температурно-влажностных условиях (табл. 1).

Таблица 1

Значения средней нагрузки при деформации на 1 мм для серии нагружений на образцы, выдержанные в лабораторных условиях

Деформация, мм	0,20	0,35	0,50	0,70	0,80	1,00	1,10	1,25	1,40	1,55	1,70	1,85
Средняя нагрузка при деформации $\Delta l = 1$ мм, первый образец	300	276	265	241	238	221	236	223	При последующем нагружении образец разрушился			
Средняя нагрузка при деформации $\Delta l = 1$ мм, второй образец	Первоначальное нагружение до деформации 0,70			318	290	283	279	265	256	221	244	237

Анализ среднеквадратической погрешности для определения вида зависимости, минимизирующей случайные ошибки модели, показал, что оптимальной является полиномиальная зависимость четвертого порядка

$$y = b_4x^4 + b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0. \quad (4)$$

Таким образом, определению подлежат параметры b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 . Подставим (4) в (2) и приравняем частные производные в системе уравнений (3) к нулю (условие минимизации ошибки модели). Полученную линейную систему пяти уравнений с пятью неизвестными решаем любым удобным методом. В нашем случае использовали матричный метод решения систем, в результате чего нашли оптимальные значения параметров аналитической зависимости.

Для образцов, выдержанных в нормальных температурно-влажностных условиях, получены следующие зависимости (см. рис. 1)

$$y = 415,29x^4 - 1989,6x^3 + 3459,5x^2 - 2660,1x + 1056,1 \text{ (первый образец);}$$

$$y = -432,1x^4 - 1203x^3 + 1042,4x^2 - 215,1x + 288,44 \text{ (второй образец).}$$

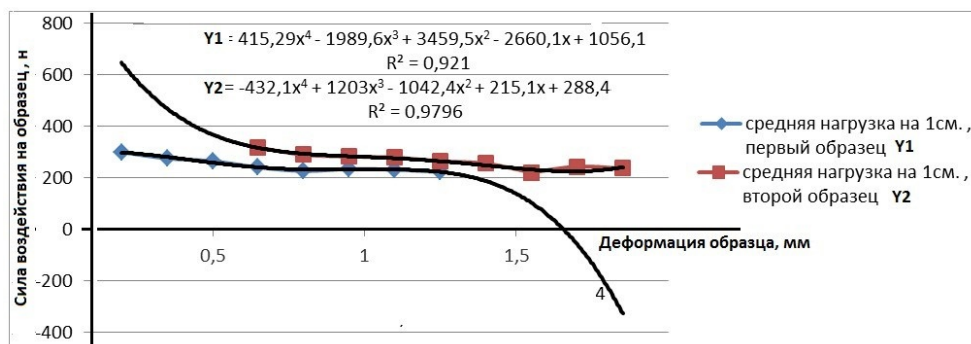


Рисунок 1. Графики зависимости деформации образца от нагружения для образцов, выдержанных в нормальных температурно-влажностных условиях

Средневзвешенные значения коэффициентов аналитической зависимости приводят к уравнению (см. рис. 2)

$$y = -8,5x^4 - 393x^3 + 1208,5x^2 - 1222,5x + 672. \quad (5)$$

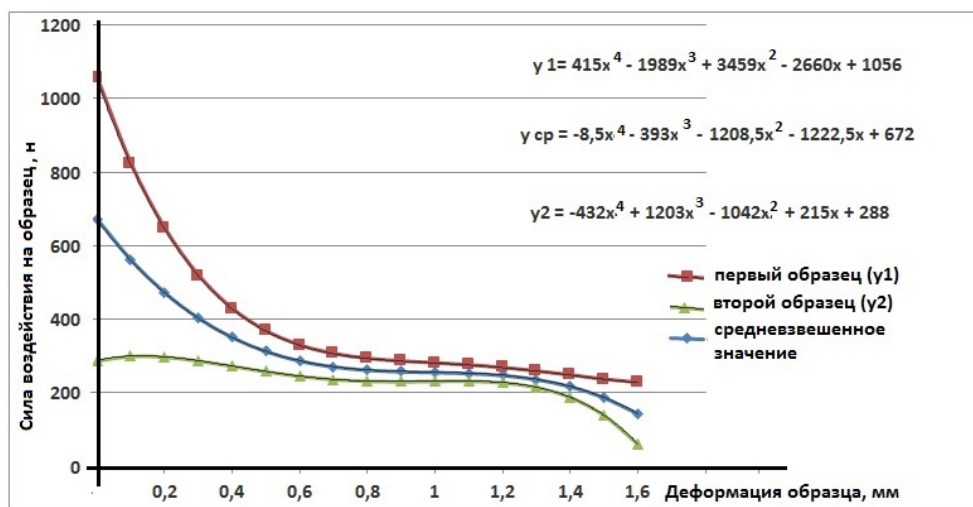


Рисунок 2. Графики аналитической и табличных зависимостей деформации от нагружения первого и второго образца для образцов, выдержанных в нормальных температурно-влажностных условиях

Получение параметров аналитической зависимости позволяет оценивать зависимость деформации образца от нагружения как в межузловых точках внутри таблицы, так и вне таблицы (прогнозирование поведения образца).

Таблица 2

Зависимость деформации образца от нагружения

Деформация, мм	Среднее нагружение на первый образец, Н	Среднее нагружение на второй образец, Н	Прогнозирование значения нагружения на единицу деформации, Н
0	1056	88	672
0,1	822,6425	300,2398	561,442
0,2	647,112	298,2598	472,6824
0,3	518,9685	287,7018	403,3352
0,4	428,768	273,2128	350,9904
0,5	368,0625	258,375	313,2188
0,6	329,4	245,7408	287,5704
0,7	306,3245	236,8258	271,5752
0,8	293,376	232,1088	262,7424
0,9	286,0905	231,0318	258,5612
1,0	281	232	256,5
1,1	275,6325	232,3818	254,0072
1,2	268,512	228,5088	248,5104
1,3	259,1585	215,6758	237,4172
1,4	248,088	188,1408	218,1144
1,5	236,8125	139,125	187,9688
1,6	227,84	60,8128	144,3264
1,7	224,6745	-55,6482	84,51315
1,8	231,816	-220,147	5,8344

Прогноз разрушения образца с учетом остаточной деформации показывает, что максимальная деформация для образца, выдержанного в нормальных температурно-влажностных условиях, составляет 1,6 мм, при этом средняя сила воздействия на единицу деформации образца при последнем нагружении

составляет 144 Н. Из таблицы 2 также видно, что деформацию 1,7 мм выдерживают не все образцы (образец №2 разрушен).

Для образцов, выдержанных в воде, получены следующие аналитические зависимости (см. рис. 3)

$$y = 6,435x^4 - 54,115x^3 + 155,63x^2 - 218,16x + 375,97 \text{ (первый образец);}$$

$$y = -29,26x^4 + 203,63x^3 - 517,79x^2 + 540,14x + 48,074 \text{ (второй образец).}$$

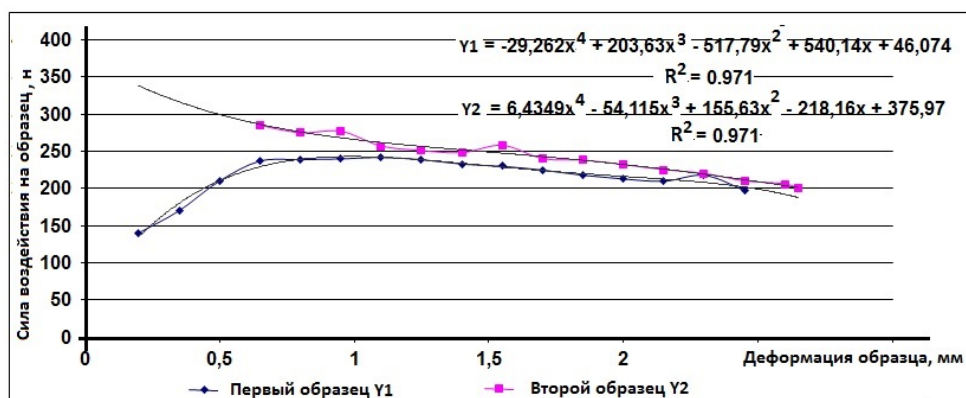


Рисунок 3. Графики зависимости деформации образца от нагружения для образцов, выдержанных в воде

Средневзвешенные значения коэффициентов аналитической зависимости в этом случае приводят к уравнению (см. рис. 4)

$$y = -11,43x^4 + 74,76x^3 - 181,1x^2 + 161x + 211,1. \tag{6}$$

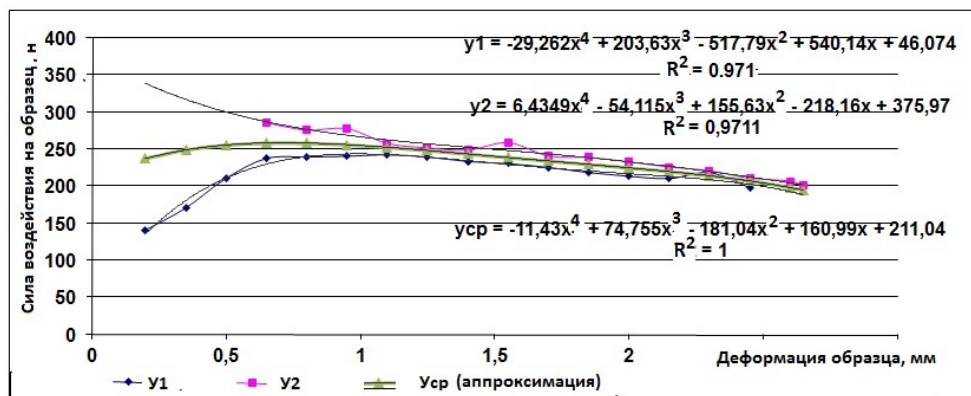


Рисунок 4. Графики аналитической и табличных зависимостей деформации от нагружения первого и второго образца для образцов, выдержанных в воде

Соответственно, прогноз разрушения образца представлен в таблице 3.

Прогноз разрушения образца с учетом остаточной деформации

Деформация, см	Среднее нагружение на первый образец, Н	Среднее нагружение на второй образец, Н	Прогнозирование значения нагружения на единицу деформации, Н
0	356	47	201,5
0,2	327,7155	134,6994	231,2074
0,4	305,8894	192,4618	249,1756
0,6	289,1689	227,2242	258,1965
0,8	276,3425	245,0442	260,6933
1	266,34	251,1	258,72
1,2	258,2324	249,6906	253,9615
1,4	251,2323	244,2354	247,7338
1,6	244,6932	237,2746	240,9839
1,8	238,1104	230,469	234,2897
2	231,12	224,6	227,86
2,2	223,4998	219,5698	221,5348
2,4	215,1688	214,401	214,7849
2,6	206,1872	207,237	206,7121
2,8	196,7566	195,3418	196,0492
3	187,22	175,1	181,16
3,2	178,0616	142,017	160,0393
3,4	169,9068	90,71856	130,3127
3,6	163,5227	14,95136	89,23702
3,7	161,2728	-34,3027	63,48508

Прогноз разрушения образца с учетом остаточной деформации показывает, что максимальная деформация для образца, выдержанного в воде, составляет 3,6 мм, при этом средняя сила воздействия на единицу деформации образца при последнем нагружении составляет 90 Н. Из таблицы 3 видно, что образец №2 разрушается при деформации 3,7 мм.

Коэффициент корреляции деформации образца и средней нагрузки на 1 мм для первого образца, выдержанного в нормальных температурно-влажностных условиях, вычисленный по формуле

$$\rho(\Delta, f) = \frac{cov(\Delta, f)}{\sqrt{D[\Delta] \cdot D[f]}} = \frac{E[\Delta f] - E\Delta \cdot Ef}{\sqrt{(E[\Delta^2] - (E\Delta)^2) \cdot (E[f^2] - (Ef)^2)}}, \quad (7)$$

где cov обозначает ковариацию; D — дисперсия; E — математическое ожидание; Δ — деформация; f — действующая на образец нагрузка.

Для первого образца $\rho(\Delta, f) = 0,916$; для второго образца $\rho(\Delta, f) = 0,912$. Это свидетельствует о сильной зависимости деформации от нагрузки. Особое внимание стоит обратить на коэффициент корреляции $\rho(f1, f2)$ между образцами, который составил $\rho(f1, f2) = 0,822$, что говорит об устойчивой тенденции разрушения, т.е. максимальное количество этапов нагружения равно 9.

Аналогичные расчеты проведены для образцов, выдержанных в воде. Коэффициент корреляции деформации образца и средней нагрузки на 1 мм для первого образца, выдержанного в воде, составил $\rho(\Delta, f) = 0,981$, для второго — $\rho(\Delta, f) = 0,979$. Коэффициент корреляции $\rho(f1, f2)$ между образцами, выдержанными в воде, составил $\rho(f1, f2) = 0,983$, что говорит об устойчивой тенденции разрушения, т.е. максимальное количество этапов нагружения до момента разрушения равно 17.

С целью проверки правильности выбранного подхода к построению аналитической взаимосвязи нагружения и деформации образца полученные результаты были проверены на всех девяти образцах каждой серии.

Выводы

На основе экспериментальных данных установлены параметры аналитической взаимосвязи силы повторно-переменных нагружений и соответствующей деформации образцов. Снижение прочности образцов КМ при повторно-переменном воздействии нагрузок происходит гораздо интенсивнее, чем под воздействием статической нагрузки. Это объясняется тем, что при таком силовом воздействии происходит накопление остаточных деформаций и микроразрушений, вызванных естественной неоднородностью материала, что приводит к снижению прочности наиболее слабых частиц, а значит, к разрушению всего образца. Результаты расчетов показали, что образцы композитных материалов, выдержанные в течение продолжительного времени в воде, более устойчивы к деформации, чем аналогичные по структуре образцы, выдержанные в нормальных условиях.

Список литературы

- 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. — С. 560.
- 2 Макаров А.Г., Ростовцева Н.Г. Моделирование деформационных свойств полимерных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. — 2008. — № 1(4). — С. 140–145.
- 3 Букетов А.В. Ідентифікація і моделювання технологічних об'єктів та систем: посібник. Тернопіль: СМП «Тайп», 2009. — С. 260.
- 4 Кравцова Л.В., Букетов А.В., Пирог А.П. Определение вероятностей напряженного состояния эпоксидных композитных материалов под воздействием статической нагрузки // Искусственный интеллект. — 2013. — № 3 (61). — С. 355–363.
- 5 Кравцова Л.В., Букетов А.В., Пирог А.П. Определение вероятностей восстановления и разрушения полимерных композитных материалов под действием статической нагрузки // Наукові нотатки. — 2013. — № 43. — С. 126–133.
- 6 Кравцова Л.В., Букетов А.В., Пирог А.П. Прогнозування деформаційних властивостей епоксидних композитних матеріалів // А.В. Букетов, Л.В. Кравцова, А.П. Пірог // Вісн. Житомир. державного техн. ун-ту. — 2013. — № 4(67). — С. 7–11.

А.В. Букетов, Л.В. Кравцова, А.П. Богдан

Қайта-ауыспалы жүктеме әсерінен композиттік материалдар үлгілерінің қирауын болжау

Мақалада қайта айнымалы жүктеменің әсерінен полимерлік композициялық материалдардың тәжірибелік зерттеу нәтижелері көрсетілген. Тәжірибедегі негізгі деректерді ескере отырып, қайта айнымалы жүктеменің кіші және сәйкес келетін деформацияның үлгісінің аналитикалық параметрмен өзара байланысы, сондай-ақ олардың сынған қалдық деформациясының болжамы алынды.

A. V. Buketov, L.V. Kravtsova, A.P. Bogdan

Prediction of fracture samples of composite materials under the influence of cyclic loading

The article presents the results of an experimental study of polymer composite materials when exposed to cyclic loading. On the basis of experimental data obtained by the analytical parameters of the relationship strength cyclic loading and corresponding deformation of the samples, as well as forecast their destruction taking into account the residual strain.

References

- 1 *Polymer composite materials: structure, properties, technology: tutorial*/M.L. Kerber, V.M. Vinogradov, G.S. Golovkin and other; edit. by A.A. Berlin, Saint Petersburg: Professia, 2008, p. 560.
- 2 Makarov A.G., Rostovtseva N.G. *Design. Materials. Technology*, 2008, 1(4), p. 140–145.
- 3 Buketov A.V. *Identification and modeling of technological objects and systems: manual / Ternopil: SMP «Тіар»*, 2009, p. 260.
- 4 Kravtsova L.V., Buketov A.V., Pirog A.P. *Artificial Intelligence*, 2013, 3(61), p. 355–363.
- 5 Kravtsova L.V., Buketov A.V., Pirog A.P. *Interuniversity collection «Research notes»*, 2013, 43, p. 126–133.
- 6 Kravtsova L.V., Buketov A.V., Pirog A.P. *Journal of Zhytomyr State Technical University*, 2013, 4(67), p. 7–11.