

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОВТОРНО-ВРЕМЕННЫХ НАГРУЖЕНИЙ

Кравцова Л.В., Богдан А.П.

*Херсонская государственная морская академия (Украина)*

**Введение.** На сегодняшний день композитные материалы (КМ) нашли широкое применение во всех отраслях народного хозяйства и, как правило, используются в агрессивных средах или при изготовлении конструкций в случае повышенных механических воздействиях на них. Многие детали машин за время своей службы 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 неустойчивый режимы. Однако, при проведении исследований по воздействию нагрузки на материал можно установить закономерности изменения деформации материала в зависимости от силы нагружения. Следовательно, изучая поведение образцов под действием повторно-переменных нагрузок исследуемых материалов, можно обобщить результаты на случай поведения деталей из этих материалов в реальных конструкциях.

**Актуальность исследования.** Как показывает практика, повторно - переменные нагрузки, циклически изменяющиеся во времени по величине или по величине и по 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 его показателей надежности в требуемых пределах.

**Цель работы** прогнозирование разрушения образцов КМ, подверженных действию повторно – переменных нагрузок с учетом остаточной деформации.

**Результаты исследования.** 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 испытывались на четырёхточечный изгиб по ГОСТ 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.

Проведено измерение силы 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, наблюдалось 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 деформацией этого образца аппроксимируем зависимость, полученную в результате эксперимента в табличной форме, некоторой функцией, так что

$$y_i = f(x_i, b) + \varepsilon_i \quad (1)$$

где  $y_i$  – значение деформации,  $x_i$  – средняя сила воздействия на каждую единицу деформации образца,  $\varepsilon_i$  – случайные ошибки модели,  $b$  – параметры, подлежащие определению и минимизирующие случайные ошибки модели  $\varepsilon_i$ .

В качестве метода аппроксимации применен 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 определяется из условия равенства нулю частных производных по каждому из параметров. Это приводит к системе уравнений, решив которую, находим значения параметров аппроксимации ( $n$ –количество узлов (точек измерения):

$$\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, b)) \frac{\partial f(x_i, b)}{\partial b} = 0. \quad (3)$$

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 проводились 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) испытывалось по девять образцов. Обработка сгруппированных результатов испытаний показала, что достаточно рассмотреть по два образца, имеющих типовые показатели, каждой серии.

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

$$y = b_4 x^4 + b_3 x^3 + b_2 x^2 + b_1 x + b_0 \quad (4)$$

Таким образом, определению подлежат параметры  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4$ . Подставив (4) в (2) и приравняв частные производные в системе уравнений (3) к нулю (условие минимизации ошибки модели) получили линейную систему пяти уравнений с пятью неизвестными решение которой осуществлялось матричным методом решения систем, в результате найдены оптимальные значения параметров аналитической зависимости.

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

$$\rho(\Delta, f) = \frac{\text{cov}(\Delta, f)}{\sqrt{D[\Delta] \cdot D[f]}} = \frac{E[\Delta f] - E\Delta \cdot Ef}{\sqrt{E[\Delta^2] - (E\Delta)^2 \cdot (E[f^2] - (Ef)^2)}}, \quad (5)$$

где  $\text{cov}$  обозначает ковариацию,  $D$  – дисперсию,  $E$  – математическое ожидание,  $\Delta$  - деформация,  $f$  – действующая на образец нагрузка.

**Выводы.** На основе экспериментальных данных установлены параметры аналитической взаимосвязи силы повторно-переменного нагружения и соответствующей деформации образцов. Снижение прочности образцов КМ при повторно-переменном воздействии нагрузок происходит гораздо интенсивнее, чем при статическом воздействии. 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.