

УДК 620.169.1

О.Г.ОСЯЕВ

## ЭМПИРИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Получен эмпирический критерий длительной прочности по предельным напряжениям для конструкционных полимерных композитных материалов, учитывающий фактор старения. Критерий соответствует виду Гольденבלата-Копнова. На основании данных экспериментального исследования процессов старения полимерных композитов получены эмпирические константы, входящие в критериальное выражение.

**Ключевые слова:** критерий прочности, полимерные материалы, длительная прочность.

**Введение.** В настоящее время все большее применение в технике находят несущие конструкции машиностроительного производства, изготовленные из полимерных композитов. Для выполнения расчетов на длительную прочность необходимо использовать достоверные критерии длительной прочности, учитывающие фактор старения конкретного материала. Задача исследования состоит в экспериментальном определении таких критериев для рассматриваемых конструкционных материалов.

**Основная часть.** Общее выражение критерия прочности для анизотропных полимерных материалов может быть записано в виде [1]:

$$\Psi(\Pi_{ik}\sigma_{ik}, \Pi_{iknm}\sigma_{ik}\sigma_{nm}, \dots) = 0, \quad (1)$$

где  $\Pi_{ik}$ ,  $\Pi_{iknm}$  – тензоры, учитывающие анизотропные свойства материала;  $\sigma_{ik}$ ,  $\sigma_{ik}$ ,  $\sigma_{nm}$  – компоненты тензора действующих напряжений.

Выражение (1), согласно [1], можно представить в виде суммы произведений тензоров прочности и тензоров напряжений второго, четвертого, шестого и более рангов:

$$(\Pi_{ik}\sigma_{ik})^\alpha + (\Pi_{iknm}\sigma_{ik}\sigma_{nm})^\beta + (\Pi_{iknmpq}\sigma_{ik}\sigma_{nm}\sigma_{pq})^\gamma + \dots = 1, \quad (2)$$

где  $\Pi_{ik}$ ,  $\Pi_{iknm}$ ,  $\Pi_{iknmpq}$  – тензоры прочности второго, четвертого, шестого и т.д. рангов;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – показатели степени полинома.

Исследования авторов [2,3] показали, что для практического использования достаточно использовать двухинвариантный критерий прочности, ограниченный двумя первыми слагаемыми в выражении (2). Конкретный вид общего критерия можно установить только экспериментально.

Приняв показатели степени полинома (2)  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 1/2$ , приходим к двухинвариантному критерию в форме Гольденבלата-Копнова:

$$\Pi_{ik}\sigma_{ik} + \sqrt{\Pi_{iknm}\sigma_{ik}\sigma_{nm}} = 1. \quad (3)$$

В случае постоянно действующих напряжений соответствующим подбором ядер операторов можно получить аналитическую запись критерия длительной прочности. При этом в левой части (3) остается выражение критерия кратковременной прочности, а в правой – затухающая функция времени. Тогда, по аналогии с критерием кратковременной прочности вида (3), можно записать критерий длительной прочности в виде [1]:

$$\Pi_{ik}\sigma_{ik} + \sqrt{\Pi_{iknm}\sigma_{ik}\sigma_{nm}} = f(t_*), \quad (4)$$

где  $f(t_*)$  – монотонно затухающая функция времени;  $i, k, n, m = 1, 2$  – при плоском напряженном состоянии;  $i, k, n, m = 1, 2, 3$  – при пространственном напряженном состоянии.

Многочисленными экспериментальными исследованиями [1, 4 – 6 и др.] установлено, что кривые длительной прочности  $f(t_*)$  имеют типичный характер, и для описания поведения конструкционных композитных материалов может быть использован вид экспоненциальной зависимости. Тогда выражение (4) примет вид

$$\Pi_{ik}\sigma_{ik} + \sqrt{\Pi_{iknm}\sigma_{ik}\sigma_{nm}} = \alpha + \beta e^{-\lambda t_*}, \quad (5)$$

где  $a, \beta, \lambda$  – эмпирические константы материала;  $t_*$  – долговечность,  $t_0$  – длительность кратковременного нагружения,  $\bar{t}_*$  – приведенное время до разрушения,  $\bar{t}_* = t_* / t_0 - 1$ .

Тогда компоненты тензоров прочности определяются из выражения (5):

$$\Pi_{ik}(t_*) = \Pi_{ik}(t_0)(\alpha + \beta e^{-\lambda \bar{t}_*}); \quad \Pi_{iknm}(t_*) = \Pi_{iknm}(t_0)(\alpha + \beta e^{-\lambda \bar{t}_*}). \quad (6)$$

Аналогичного вида соотношения справедливы и для составляющих тензоров прочности композитных ортотропных материалов – предельных напряжений на растяжение, сжатие и сдвиг, которые можно представить в наиболее общем виде:

$$\sigma_\epsilon(t_*) = \sigma_\epsilon(t_0)(\alpha + \beta e^{-\lambda \bar{t}_*}); \quad \tau_\epsilon(t_*) = \tau_\epsilon(t_0)(\alpha + \beta e^{-\lambda \bar{t}_*}). \quad (7)$$

Эмпирические константы  $a, \beta, \lambda$  определяются экспериментальным путем. Экспериментально также определяются пределы кратковременной  $\sigma_{\epsilon 1}(t_0)$  и длительной  $\sigma_{\epsilon 1}(t_* \rightarrow \infty)$  прочности. Согласно [1]:

$$\alpha = \frac{\sigma_\epsilon(t_* \rightarrow \infty)}{\sigma_\epsilon(t_0)}, \quad \beta = 1 - \alpha. \quad (8)$$

На основании результатов экспериментальных исследований определим эмпирическую зависимость связи кратковременной и длительной прочности в соответствии с (7) для наиболее распространенных конструкционных материалов, используемых в машиностроении. Примером таких материалов являются полимерные композиты, физико-механические свойства которых соответствуют свойствам герметика марки 15E15TY.

В результате экспериментальных испытаний на старение в течение 20 лет эксплуатации для данных материалов при  $T=20^\circ\text{C}$  установлены значения начальной прочности:  $\sigma_{\epsilon 1}(t_0)=0,41$  МПа и прочности за предполагаемый период эксплуатации:  $\sigma_{\epsilon 1}(t_*)=0,32$  МПа. Тогда в соответствии с выражениями (8) для эмпирических констант имеем:

$$\alpha = \frac{\sigma_\epsilon(t_*)}{\sigma_\epsilon(t_0)} = \frac{0,32}{0,41} = 0,78, \quad \beta = 1 - \alpha = 1 - 0,78 = 0,22. \quad (9)$$

Параметр  $\lambda$  определяется из выражения (7), переписанного в виде

$$\alpha + \beta e^{-\lambda \bar{t}_*} = \frac{\sigma_\epsilon(t_*)}{\sigma_\epsilon(t_0)}. \quad (10)$$

Тогда

$$\lambda = -\frac{1}{\bar{t}_*} \ln \left[ \frac{1}{\beta} \left( \frac{\sigma_\epsilon(t_*)}{\sigma_\epsilon(t_0)} - \alpha \right) \right] = -\frac{1}{\bar{t}_*} \ln A. \quad (11)$$

Коэффициент  $\lambda$  представляет собой угловой коэффициент прямой в полулогарифмических координатах  $\ln A, \bar{t}_*$ . Однако использование такой системы координат неудобно, так как время  $\bar{t}_*$  варьируется в пределах нескольких порядков. Поэтому удобнее перейти к двойным логарифмическим координатам.

После логарифмирования (11) получим уравнение прямой в двойных логарифмических координатах:

$$\lg \lambda = -\lg \bar{t}_* + \lg \left( -\ln \left[ \frac{1}{\beta} \left( \frac{\sigma_\epsilon(t_*)}{\sigma_\epsilon(t_0)} - \alpha \right) \right] \right) = -\lg \bar{t}_* + \lg(-\ln A), \quad (12)$$

где  $\lg \lambda$  – отрезок, отсекаемый на осях  $\lg(-\ln A), \lg \bar{t}_*$  экспериментальной прямой.

Приняв допущение о том, что конструкция из полимерного композита эксплуатируется при постоянном уровне тепловой и механической нагрузки, определим значения коэффициента  $\lambda$  при условии, что для стандартизированных испытаний  $t_0=0,025$  ч;  $\sigma_B(t_0) = 0,42$  МПа, а при длительности нагружения  $t_*=61320$  ч;  $\sigma_B(t_*) = 0,40$  МПа. В этом случае

$$\lambda = -\frac{0,025}{61320} \ln \left[ \frac{1}{0,22} \left( \frac{0,4}{0,42} - 0,78 \right) \right] = 10^{-7}. \quad (13)$$

Такой же порядок величины получаем при условии  $t_*=87600$  ч;  $\sigma_B(t_*) = 0,38$  МПа и прочих соотношениях, полученных опытным путем. Тогда эмпирический критерий длительной прочности для рассматриваемого материала примет вид

$$\sigma_B(t_*) = \sigma_B(t_0) \left( 0,78 + 0,22 e^{-10^{-7} t_*} \right). \quad (14)$$

**Заключение.** Полученный критерий позволяет определять прочность рассматриваемого материала с учетом старения в процессе эксплуатации и может быть использован для расчета прочностной надежности как одноосного, так и сложного напряженно-деформированного состояния полимерных материалов и конструкций.

#### Библиографический список

1. Гольденблат И.И. Длительная прочность в машиностроении / И.И. Гольденблат, В.Л. Бажанов, В.А. Копнов. – М.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
2. Гольденблат И.И. Критерий прочности анизотропных материалов / И.И. Гольденблат, В.А. Копнов // Изв.АН СССР. Механика. – 1965. – № 6. – С.77-83.
3. Гольденблат И.И., Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов / И.И. Гольденблат, В.А. Копнов. – М.: Машиностроение, 1968. – 192 с.
4. Бокшицкий М.Н. Длительная прочность полимеров / М.Н. Бокшицкий. – М.: Химия, 1978. – 297 с.
5. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
6. Малмейстер А.К. Сопротивление полимерных и композитных материалов / А.К. Малмейстер, В.П. Тамуж, Г.А. Тетерс. – Рига: Зинатне, 1980. – 400 с.

Материал поступил в редакцию 15.02.10.

#### O.G. OSYAEV

#### EMPIRICAL STRENGTH CRITERION OF COMPOSITE MATERIALS

Empirical long-term strength criterion in terms of limit stress for constructive polymer materials considering ageing factor is found. The criterion corresponds to the type of Goldenblat - Kopnov. On the grounds of the given experimental research of the ageing processes of the polymeric composites, empirical constants falling into criterion expression are received.

**Keywords:** strength criterion, polymeric materials, long-term strength.

**ОСЯЕВ Олег Геннадьевич** (р.1963). Окончил Ростовское высшее военное командно-инженерное училище ракетных войск (1985). Кандидат технических наук (1995), доцент (2003), старший преподаватель кафедры материаловедения Ростовского военного института ракетных войск. Область научных интересов: численные и экспериментальные методы исследования прочностной надежности несущих конструкций летательных аппаратов. Имеет более 100 публикаций.

osyevog@mail.ru