

Г.П.Зайцев, В.М.Василевский, В.А.Пашков

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ  
В ЭЛЕМЕНТАХ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА  
АГ-4С ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Для широкого круга сосудов и трубопроводов характерными являются малоцикловые нагружения циклически изменяющимся давлением. Низкочастотные деформации вызываются также нестационарными тепловыми состояниями этих конструкций.

При эксплуатации изделий в композиционном материале под действием внешних сил происходит зарождение дефектов и их развитие, являющееся следствием выхода из строя отдельных волокон и нитей, а также растрескивания связующего, нарушения связей между волокнами и связующим, нарушением химических связей и т.д.

Для расчетов использована модель для описания накопления повреждений, предложенная в работе [2]. Принимается, что площадь отдельных элементарных площадок в первом приближении описывается нормальным законом. При нагружении напряжением  $\sigma_n$  часть волокон, прочность которых меньше прикладываемого напряжения  $\sigma_n$ , разрушается. Прирост напряжения  $\Delta\sigma$  во всех волокнах сечения одинаков, т.к. связующее перераспределяет усилие между оставшимися волокнами. При повторных нагружениях постепенно накапливаются дефекты, связанные с растрескиванием и разрушением связующего, с появлением и развитием трещин в волокнах, с разрушением волокон и т.д. Эта дефектность в поперечном сечении характеризуется потерей части несущей площади поперечного сечения, т.е. некоторым накопленным повреждением:

$$D_L = \frac{F_0 - F_L}{F_0} = \frac{\Delta F}{F_0}, \quad (I)$$

где  $\Delta F$  - площадь разрушенных элементарных площадок;  $F_0$  - первоначальная площадь.

Косвенная оценка накопленного повреждения может выполняться следующим путем. Первый метод - деформационный, заключающийся в том, что в процессе циклического нагружения образца замеряется деформация, соответствующая заданному уровню напряжений. Фиксируется "потеря жесткости" - разупрочнение или увеличение жесткости - упрочнение.

После определения разрушающего числа циклов подсчитываются отношения  $\frac{N_i}{N_p}$ , при которых производились замеры деформаций. Накопленное повреждение в этом случае определяется по формуле, преобразованной из (I), для имеющих элементарных значений замеренных деформаций

$$D_i = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_0}{\varepsilon_i}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0$  - относительная деформация при первоначальном нагружении данным уровнем нагрузки;  $\varepsilon_i$  - относительная деформация при "i"-ом нагружении (после наработки  $N_i$  числа циклов) тем же уровнем нагрузки.

Вид функции скорости накопления повреждений определяет характер кривой усталости. Так, например, зависимость затухающей скорости накопления повреждений (кривая 3 на рис. I) в несущей пло-

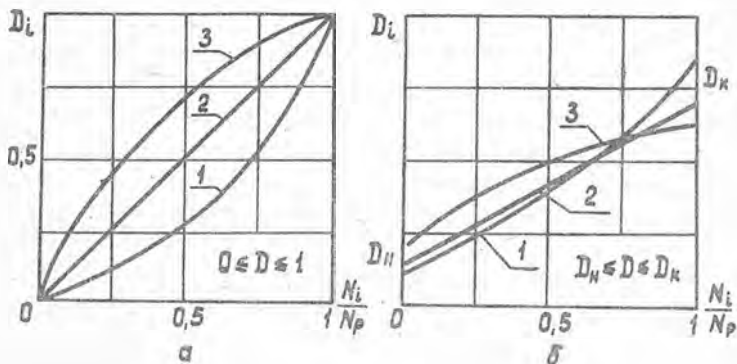


Рис. I

щадя от величины действующего напряжения и количества пройденных циклов [ 1 ] может быть принята в виде:

$$\frac{dD}{dN} = \frac{1}{(B - C\sigma)N}, \quad (3)$$

где  $D$  - относительное уменьшение несущей площади, являющееся функцией пройденного числа циклов;  $\sigma$  - максимальное напряжение цикла;  $B, C$  - параметры материала, зависящие от величины максимального напряжения цикла. Отсюда получаем выражение кривой усталости экспоненциального вида:

$$N_p = A e^{-\alpha \sigma}, \quad (4)$$

где  $N_p$  - число циклов до разрушения;  $A, \alpha$  - экспериментальные коэффициенты;  $\sigma$  - максимальное напряжение цикла.

Текущее значение накопленного повреждения в этом случае будет равно

$$D = D_n + (D_k - D_n) \frac{\ln N}{\ln N_p}, \quad (5)$$

где  $D_n, D_k$  - величины соответственно начального и конечного повреждений [ 1, 2 ];  $N$  - текущее число циклов.

Для ряда материалов в работах [ 1, 2, 3, 4 ] приводятся значения  $D_n$  и  $D_k$  в зависимости от уровня действующих напряжений.

Рассмотрим далее степенную зависимость скорости изменения несущей способности сечений от величины действующего напряжения в форме, предложенной Л.М. Качановым [ 5 ]:

$$\frac{dD}{dN} = B \left( \frac{\sigma}{1-D} \right)^m, \quad (6)$$

где  $B$  - величина, зависящая от максимального напряжения цикла  $\sigma$ ;  $m$  - характеристика материала.

Зависимость (6) приводит к уравнению усталости степенного вида

$$\sigma^m N_p = \text{const}. \quad (7)$$

Величина текущего повреждения в этом случае определяется по формуле

$$D = 1 - \sqrt[m+1]{(1-D_n)^{m+1} - [(1-D_n)^{m+1} - (1-D_k)^{m+1}] \frac{N}{N_p}} \quad (8)$$

В работе [ 7 ] показано, что интенсивность отказов определяет-

ся скоростью накопления повреждений. При этом аналитически устанавливается, что скорость накопления повреждений, зависящая только от величины повреждения (6) или от величины повреждения и числа пройденных циклов нагружения совместно, дает распределение долговечностей элементов на данном уровне напряжений в виде

$$P(N_p \leq N) = \Phi \left[ \frac{N^{\frac{1}{m+1}} \frac{(m+1)(D_K - D_N)}{(1-D_N)^{m+1} - (1-D_K)^{m+1}} - \frac{a}{S}}{S} \right] \quad (9)$$

Если в первом приближении полагать, что  $D_N = 0$  и  $D_K = 1$ , то распределение долговечностей получается в виде

$$P(N_p \leq N) = \Phi \left[ \frac{(m+1) N^{\frac{1}{m+1}} - \frac{a}{S}}{S} \right] \quad (10)$$

или

$$P(N_p \leq N) = \Phi \left( \frac{N_p^{\frac{1}{m}} - N_p^{-\frac{1}{m}}}{S} \right) \quad (11)$$

Накопление повреждений с убывающей скоростью по циклам по зависимости (3) приводит к логарифмически нормальному закону распределения, аналитически рассчитанному и экспериментально обоснованному Х.Б.Кордонским [6]:

$$P(N_p \leq N) = \Phi \left( \frac{\bar{\ln} N_p - \bar{\ln} N_p}{S} \right) \quad (12)$$

Линейное накопление повреждений (кривая 2 на рис. 1), т.е. накопление с постоянной скоростью, соответствует простому нормальному закону распределения разрушающего числа циклов (долговечности), т.е.

$$\frac{dD}{dN} = \text{const} \quad (13)$$

дает

$$P(N_p \leq N) = \Phi \left( \frac{N_p - \bar{N}_p}{S} \right) \quad (14)$$

Испытания, проведенные на стеклопластиковых трубах и кольцах из материала АГ-4с с замером деформаций в процессе циклического нагружения с постоянной амплитудой напряжения, позволяют построить

кривые накопления повреждений по мере карботки циклов. Нагружение осуществлялось по пульсирующему циклу окружного растяжения с частотой 1 цикл в минуту. Накопленное экспериментальное текущее повреждение подсчитывалось по формуле (2), замер деформаций в процессе циклического нагружения осуществлялся с помощью тензодатчиков омического сопротивления типа ДК и прибора АИД-1м.

Точки на рис. 2 иллюстрируют характер накопления повреждений, полученный при испытании отдельных колец из стеклопластика АГ-4с

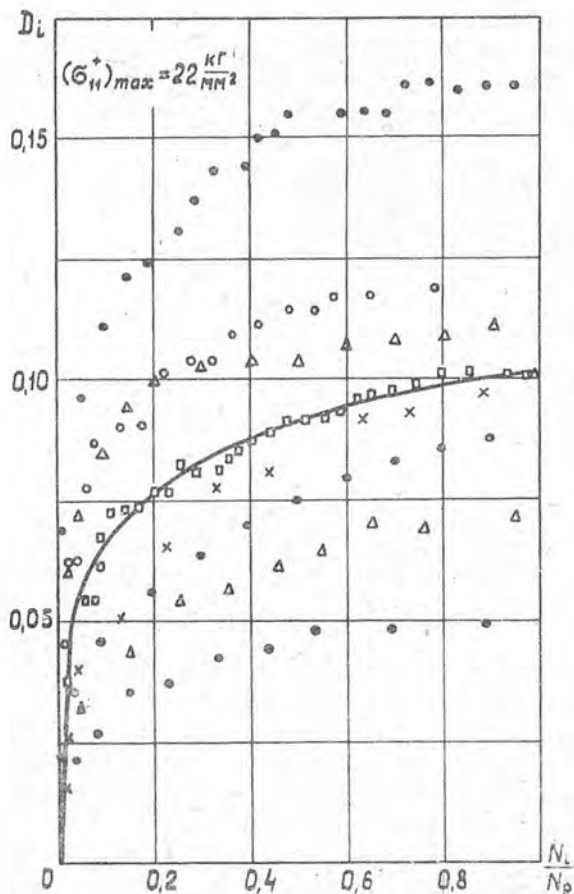


Рис. 2

на уровне растягивающих окружных напряжений  $(\sigma_{11}^+)_{\max} = 22 \text{ кг/мм}^2$ .  
Здесь же показана кривая, построенная по зависимости (5).

На рис. 3 представлены кривые накопления повреждений, рассчитанные по зависимости (5), и нанесены точки средних экспериментальных значений для различных уровней максимальных напряжений  $(\sigma_{11}^+)_{\max}$ .

Экспериментальные данные, представленные на рис. 2 и 3, дают

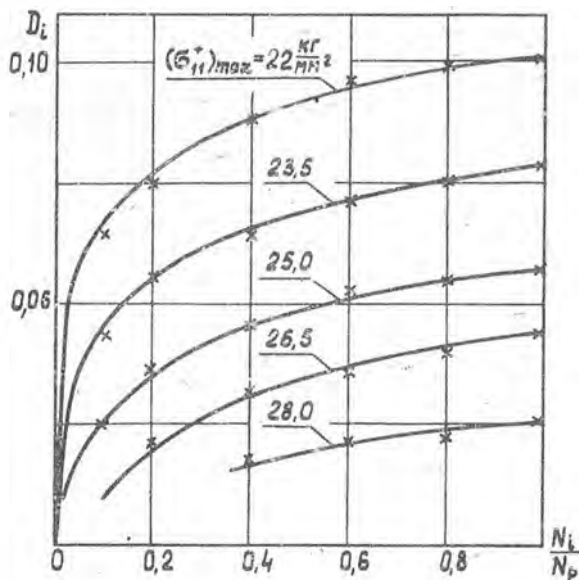


Рис. 3

основание сделать вывод, что скорость накопления повреждений для материала АГ-4с имеет затухающий характер (3).

Для установления вида экспериментальных кривых малоциклового усталости определялись корреляционные уравнения согласно [8], выражающие зависимость между максимальными напряжениями цикла и разрушающим числом циклов нагружения.

Вычисление критерия линейности и его основной ошибки дает основание считать линейной как функцию  $\sigma_{\max} - \lg N_p$ , так и

функцию  $\lg \sigma_{\max} - \lg N_p$ , что соответствует кривым усталости экспоненциального (4) и степенного (7) вида. Вычисленные в этих случаях согласно [ 8, 9 ] коэффициенты корреляции

$$r(\text{для } \sigma_{\max} - \lg N_p) = 0,9985 \quad \text{и} \quad r(\text{для } \lg \sigma_{\max} - \lg N_p) = 0,9964$$

показывают, что функция  $\sigma_{\max} - \lg N_p$ , соответствующая кривой усталости экспоненциального вида (4), дает более высокую степень линейной корреляции.

Эксперименты, проведенные на 5I кольце из АГ-4с при малоцикловом пульсирующем окружном растяжении с  $(\sigma_{11}^*)_{\max} = 25 \text{ кг/мм}^2$ , дают возможность рассмотреть получившуюся экспериментально функцию распределения долговечностей. С этой целью была проведена проверка с помощью критерия  $\chi^2$  [ 9 ] соответствия полученных экспериментально долговечностей нормальному закону распределения величин  $N_p$ ,  $\lg N_p$  и  $N_p^{\frac{1}{m}}$ . Полученное значение  $n\chi^2 = 1,1978$  ( $\chi^2_{\alpha=0,001} = 1,1679$ ) говорит о том, что предположение о нормальности закона распределения  $N_p$  противоречит опытным данным. Полученные значения  $n\chi^2 = 0,0644$  и  $n\chi^2 = 0,0585$  ( $\chi^2_{\alpha=0,5} = 0,1184$ ) говорят о том, что предположение о степенном нормальном законе распределения долговечностей ( $N_p^{\frac{1}{m}}$ ) и логарифмически - нормальном законе распределения долговечностей ( $\lg N_p$ ) не противоречит опытным данным с уровнем значимости  $\alpha > 0,5$ . Причем логарифмически нормальный закон распределения долговечностей показывает несколько лучшую сходимость с опытными данными.

Таким образом, проведенные опыты подтверждают предположение о справедливости модели накопления повреждений в форме (3), которой соответствует кривая усталости экспоненциального вида (4) и функция распределения долговечностей в виде логарифмически - нормального закона (12).

### Л и т е р а т у р а

1. Зайцев Г.П., Тимофеев А.Ф. Накопление повреждений при программном длительном статическом нагружении стеклопластиков. "Механика полимеров", № 5, 1967.
2. Серенсен С.В., Зайцев Г.П. Разрушение стеклопластиков при кратковременном нагружении. "Механика полимеров", № 2, 1965.

3. Серенсен С.В., Зайцев Г.П. Длительная прочность стеклопластиков в аспекте накопления повреждений. "Вестник машиностроения", № 2, 1965.
4. Стреляев В.С., Зайцев Г.П., Махов Л.С. Накопление повреждений и прогнозирование остаточной долговечности при длительном статическом нагружении в стеклопластиках. Сб. "Надежность и долговечность полимерных материалов и изделий из них". Материалы конференции. М., МДНТИ, 1969.
5. Качанов Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести. Известия АН СССР, ОТН, № 8, 1958.
6. Кордонский Х.Б. Приложение теории вероятностей в инженерном деле. М.-Л. Физматгиз, 1963.
7. Серенсен С.В., Зейцев Г.П. Некоторые вопросы усталости стеклопластиков в статистическом аспекте. Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического совещания "Совершенствование расчетов прочности и надежности машин на основе статистических методов". Ленинград, НТО МАШПРОМ, октябрь 1972г.
8. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. М., "Наука", 1971.
9. Степнов М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. М., Машиностроение, 1972.