

УДК 539.43

КРИТЕРИЙ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Р. Арутюнян

Представлено академиком РАН Н.Ф. Морозовым 14.03.2019 г.

Поступило 24.05.2019 г.

Первые исследования по усталости композиционных материалов были выполнены при циклическом растяжении пластмасс, армированных стекловолокном. С этого времени началось интенсивное исследование усталости композиционных материалов. Полученные экспериментальные данные для различных типов композиционных материалов показывают, что основные процессы усталостного разрушения вызваны накоплением дефектов различной природы. Основными механизмами, определяющими долговечность композитов, является кинетика развития повреждённого состояния вплоть до окончательного разрушения. При этом, согласно экспериментальным результатам, кривая накопления суммарной величины повреждений является возрастающей функцией времени (числа циклов нагружения) до момента макроразрушения. В данной работе на основе этих исследований и концепции рассеянного повреждения и разрушения сформулирован критерий усталостной прочности. Конкретизированы коэффициенты критерия усталости и построены кривые накопления повреждений в зависимости от числа циклов нагружения и уровня напряжений. Дано сравнение с результатами экспериментов по усталости стеклопластиков и углепластиков.

Ключевые слова: композиционные материалы, циклические нагружения, сплошность, повреждённость, накопление повреждений, эффективное время, эффективное напряжение, критерий усталостной прочности.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524885488-492>

Многочисленные экспериментальные исследования показывают, что композиционные материалы при циклических нагружениях деформируются и разрушаются вследствие накопления в них многочисленных дефектов различной природы. На основе этих исследований и концепции рассеянного повреждения и разрушения сформулирован критерий усталостной прочности. Конкретизированы коэффициенты критерия усталости и построены кривые накопления повреждений в зависимости от числа циклов нагружения и уровня напряжений. Дано сравнение с результатами экспериментов по усталости стеклопластиков и углепластиков.

ВВЕДЕНИЕ

Первые исследования по усталости композиционных материалов были выполнены в 1964 г. Боллером [1]. В этой работе представлены результаты циклического растяжения пластмасс, армированных стекловолокном. С этого времени началось интенсивное исследование усталости композитов, которое продолжается и в настоящее время. Накоплен значительный объём экспериментальных данных для различных типов композиционных материалов [2–8]. Согласно этим исследованиям основные про-

цессы усталостного разрушения вызваны накоплением повреждённости. При этом мера повреждения определяется различными процессами деградации материала: разрушение волокон, расслоение, разрушение матрицы, совместное разрушение матрицы и волокон, отрывы на поверхности раздела, повторные включения. До того как произойдёт полное разрушение материала, последовательность указанных повреждений может быть самой разнообразной. В отличие от металлов, для которых образование и развитие трещин являются основными механизмами, определяющими долговечность материала, для композитов эти механизмы определяются кинетикой развития повреждённого состояния вплоть до окончательного разрушения. При этом, как показывают опыты [2], кривая накопления суммарной величины повреждений является возрастающей функцией времени (числа циклов нагружения) до момента макроразрушения. В данной работе обращается внимание на возможности описания этих процессов и формулировки критерия усталостной прочности методами механики материалов на основе концепции повреждённости [9–15].

КОНЦЕПЦИЯ ПОВРЕЖДЁННОСТИ

В общей постановке кинетическое уравнение для параметра повреждённости рассматривалось в работах [9, 10]. В соответствии с представлениями

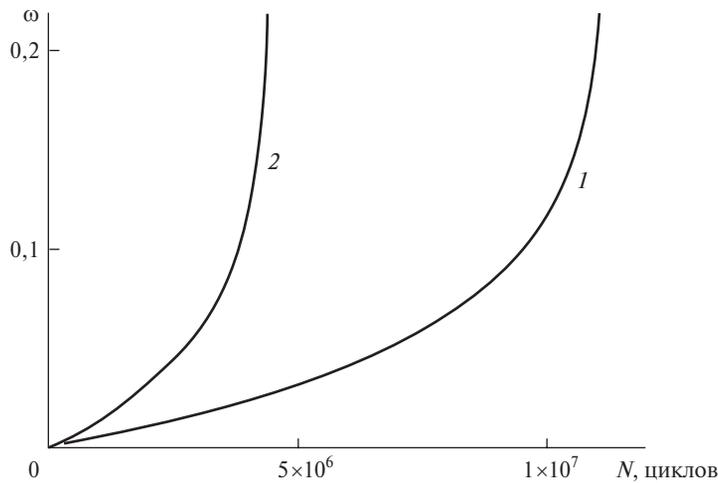


Рис. 1. Кривые повреждённости согласно формуле (5) для стеклопластика для различных значений σ_a : $\sigma_a = 54$ МПа (кривая 1), $\sigma_a = 57$ МПа (кривая 2).

статистической физики повреждённость системы протекает со скоростью, зависящей от некоторых внешних факторов (механических, физических, химических и др.), а также от величины накопленной повреждённости. При рассмотрении этой концепции исходят из следующих положений. Так как реальные материалы имеют случайную структуру, то параметр сплошности ψ или повреждённости $\omega = 1 - \psi$ является статистическим показателем, который может быть задан с помощью некоторого кинетического уравнения, базирующегося на двух гипотезах. Согласно первой гипотезе скорость хрупкого разрушения зависит только от величины напряжения

$$\frac{d\psi}{dt} = -f[\sigma(t)]. \tag{1}$$

Согласно второй гипотезе и в соответствии с представлениями статистической физики скорость хрупкого разрушения зависит от напряжения и величины накопленной повреждённости:

$$\frac{d\psi}{dt} = -f[\sigma(t), \psi]. \tag{2}$$

В уравнениях (1), (2) $\sigma(t)$ – напряжение, зависящее от времени t .

Данная концепция была использована в работах Качанова–Работнова [11, 12], и на её основе был сформулирован критерий хрупкого разрушения в условиях высокотемпературной ползучести. Вводятся параметр сплошности ψ или повреждённости ω ($\psi = 1 - \omega$, $d\psi = -d\omega$), зависящие от времени t . Причём при $t = 0$, $\omega = 0$, т.е. в начальном состоянии система не повреждена. Система разрушается при условии $\omega = 1$. Таким образом, параметр ω меняется от $0 \leq \omega \leq 1$, соответственно, параметр сплошности

ψ меняется от $1 \leq \psi \leq 0$. Используется кинетическое уравнение (2), правая часть которого задаётся в виде степенной зависимости от величины эффективного напряжения и для этого простого случая формулируется критерий длительной прочности. Далее воспользуемся этим подходом при формулировке критерия усталостной прочности композиционных материалов.

ФОРМУЛИРОВКА КРИТЕРИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ

Введём следующие два обобщённых понятия: эффективное время [13] $z = tf^{-\alpha}$ (α – постоянная, $f = \frac{N}{t}$ – частота нагружения, N – число циклов нагружения) и эффективное напряжение $\frac{\sigma_a}{1-\omega}$ (σ_a – амплитуда напряжения цикла).

Кинетическое уравнение для параметра повреждённости зададим в виде

$$\frac{d\omega}{dz} = A \left(\frac{\sigma_a}{1-\omega} \right)^n, \tag{3}$$

где A, n – постоянные.

Учитывая принятые обозначения, уравнение (3) можно записать через число циклов нагружения

$$\frac{d\omega}{dN} = Af^{-(1+\alpha)} \left(\frac{\sigma_a}{1-\omega} \right)^n. \tag{4}$$

Решение уравнения (4) при начальном условии $N = 0, \omega = 0$ имеет вид

$$\omega = 1 - \left[1 - (n+1)Af^{-(1+\alpha)}\sigma_a^n N \right]^{\frac{1}{n+1}}. \tag{5}$$

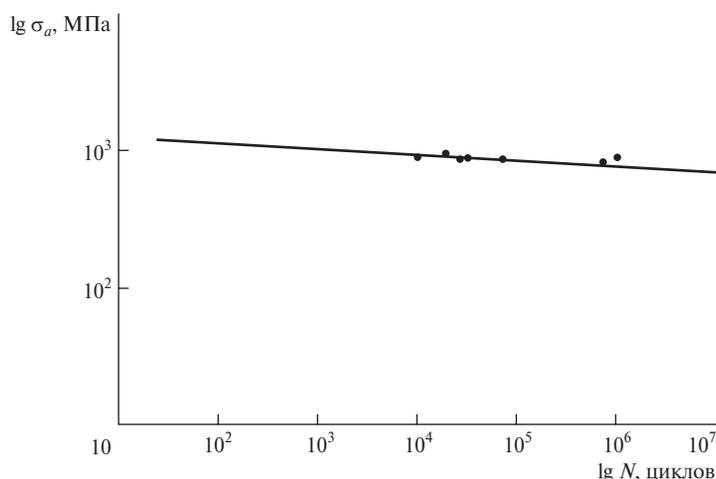


Рис. 2. Кривая усталости согласно критерию (7) и экспериментальные точки для однонаправленного углепластика при осевом пульсирующем растяжении [6].

Кривые поврежденности согласно формуле (5) для стеклопластика с матами из рубленой пряжи и полиэфирной смолой без добавления пластификатора для различных значений σ_a представлены на рис. 1 (кривая 1 – $\sigma_a = 54$ МПа, кривая 2 – $\sigma_a = 57$ МПа). При расчётах приняты следующие значения коэффициентов: $n = 17$, $\alpha = 0$, $f = 1,667$ Гц, $A = 2,93 \cdot 10^{-38}$ [Гц][МПа] $^{-17}$.

Принимая условие разрушения $N = N_f$, $\omega = 1$, из (5) получим следующий критерий усталости:

$$\sigma_a^n N_f = \frac{f^{(1+\alpha)}}{(n+1)A}. \quad (6)$$

В реальных условиях в момент разрушения величина параметра поврежденности не достигает нулевого значения. Разрушение наступает при некоторой критической величине $\omega = \omega_*$. Принимая в (5) условие разрушения в виде $N = N_f$, $\omega = \omega_*$ ($\omega_* \neq 0$), получим следующий критерий усталости:

$$\sigma_a^n N_f = \frac{[1 - (1 - \omega_*)^{n+1}] f^{(1+\alpha)}}{(n+1)A}. \quad (7)$$

В двойных логарифмических координатах $\lg \sigma_a - \lg N_f$ критерии (6) и (7) выражаются в виде прямой линии (рис. 2, 3), что согласуется с результатами многочисленных опытов на усталость, например, образцов из углепластика и стеклопластика [6, 7].

Кривая усталости согласно критерию (7) для однонаправленного углепластика с необработанными высокомодульными волокнами и изофталевой полиэфирной смолой (объёмное содержание волокон 60%) представлена на рис. 2. При расчётах приняты

следующие значения коэффициентов: $n = 23$, $A = 3,57 \cdot 10^{-74}$ [Гц][МПа] $^{-23}$, $\alpha = 0$, $f = 116,67$ Гц, $\omega_* = 0,8$.

Кривая усталости согласно критерию (7) для стеклопластика с матами из рубленой пряжи и полиэфирной смолой без добавления пластификатора представлена на рис. 3. При расчётах приняты следующие значения коэффициентов: $n = 17$, $A = 2,93 \times 10^{-38}$ [Гц][МПа] $^{-17}$, $\alpha = 0$, $f = 1,667$ Гц, $\omega_* = 0,8$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты обзорных исследований усталости композиционных материалов показывают, что в процессе длительного циклического нагружения таких материалов, в частности стеклопластиков и углепластиков, основным механизмом деформирования и разрушения можно считать различного рода повреждения, которые описываются с помощью параметра поврежденности, кинетическое уравнение для которого разработано методами механики рассеянного повреждения и разрушения.

В качестве условия разрушения рассматривается критическая величина повреждений и на этой основе сформулирован критерий усталостной прочности. Конкретизированы коэффициенты критерия и дано сравнение с результатами опытов по усталости стеклопластиков и углепластиков. Построены кривые накопления повреждений в зависимости от числа циклов нагружения и уровня напряжений.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18–01–00146).

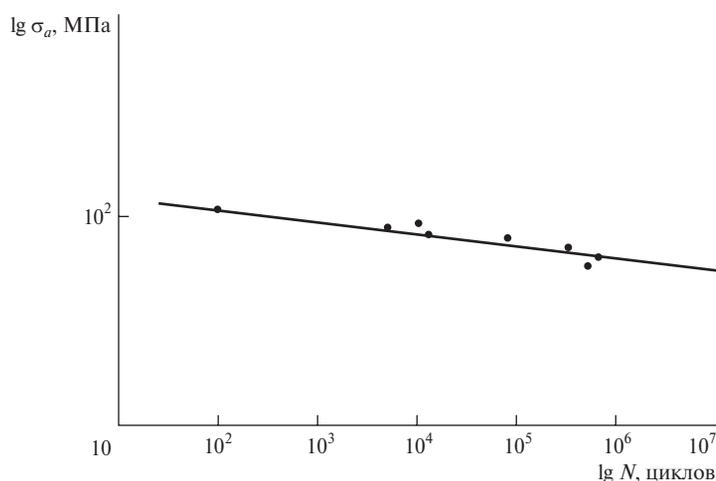


Рис. 3. Кривая усталости согласно критерию (7) и экспериментальные точки для стеклопластика при осевом пульсирующем растяжении [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boller K.H.* Composite Materials: Testing and Design. ASTM STR 460. 1969. 217 p.
2. *Salkind M.J.* Fatigue of Composites. Composite Materials: Testing and Design. ASTM STR 497. 1972. P. 143–169.
3. *Dew-Hughes D., Way J.L.* Fatigue of Fibre-Reinforced Plastics: a Review. Composites. 1973. V. 4. № 4. P. 167–173.
4. *Фудзии Т., Дзако М.* Механика разрушения композиционных материалов. М.: Мир, 1982. 232 с.
5. *Нарисава И.* Прочность полимерных материалов. М.: Химия, 1987. 398 с.
6. *Оуен М.Дж.* Усталостное повреждение стеклопластиков. Глава 7, 8 / В кн.: Композиционные материалы. Т. 5. Разрушение и усталость / Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. М.: Мир, 1978. С. 333–393.
7. *Philippidis Th.P., Vassilopoulos A.P.* Fatigue Design Allowables for GRP Laminates Based on Stiffness Degradation Measurements // Composites Science and Technology. 2000. V. 60. P. 2819–2828.
8. *Philippidis Th.P., Vassilopoulos A.P.* Complex Stress State Effect on Fatigue Life of GRP Laminates. P I, Experimental // Intern. J. Fatigue. 2002. V. 24. P. 813–823.
9. *Haward R.N.* The Extension and Rupture of Cellulose Acetate and Celluloid // Trans. Farad. Soc. 1942. V. 38. P. 394–400.
10. *Бокшицкий М.Н.* Длительная прочность полимеров. М.: Химия, 1978. 310 с.
11. *Качанов Л.М.* О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. ОТН. 1958. № 8. С. 26–31.
12. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций М.: Наука, 1966. 752 с.
13. *Arutyunyan A.R., Arutyunyan R.A.* The Frequency Dependence of the Fatigue Fracture Criterion // Proc. XXXIII Summer School-Conference “Advanced problems in mechanics”. June 28 – July 5, 2005. St.-Petersburg (Repino). St.-Petersburg: IPME RAS, 2005. P. 7–8.
14. *Arutyunyan R.A.* High-Temperature Embrittlement and Long-term Strength of Metallic Materials // Mechanics of solids. 2015. V. 50. I. 2. P. 191–197.
15. *Арутюнян Р.А.* Проблема деформационного старения и длительного разрушения в механике материалов. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 252 с.

FATIGUE FRACTURE CRITERION OF COMPOSITE MATERIALS**A. R. Arutyunyan***Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS N.F. Morozov March 14, 2019

Received May 24, 2019

The first investigations on the fatigue strength of composite materials were carried out on cyclic tension of plastics reinforced by fiberglass. Since that time, intensive studies of fatigue strength of composite materials were begun. The experimental data obtained for different types of composite materials shown, that the fatigue fracture processes are governed by the accumulation of defects of different nature. The main mechanisms that determine the durability of composites is the kinetics of the damaged state development until the final fracture. At the same time, according to the experimental results, the damage accumulation curve of the total damage is defined by increased function of the time (number of loading cycles) until to the moment of macro fracture. In this paper, based on these studies and the conception of scattered damage and fracture, fatigue strength criterion is formulated. Fatigue criterion coefficients are concretized and damage accumulation curves are plotted, which depends on the number cycles and stress level. The comparison with experimental results on fatigue of glass-reinforced plastics and carbon fiber reinforced plastics is given.

Keywords: composite materials, cyclic loadings, continuity, damage, damage accumulation, effective time, effective stress, fatigue fracture criterion.