

УДК 539.43

ПРИЛОЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

© 2011 г.

А.Р. Арутюнян, Р.А. Арутюнян

Санкт-Петербургский госуниверситет

Robert.Arutyunyan@paloma.spbu.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Предложен энергетический метод построения критерия усталости, основанный на результатах исследований по скрытой энергии деформации. Подобный подход в мировой литературе ранее не рассматривался и, на наш взгляд, может оказаться наиболее перспективным при расчетах на усталостную прочность высокопрочных малодеформируемых металлических сплавов, когда безопасность определяется гигацикловой и терацикловой усталостью. Исходя из экспериментальных исследований, кинетика накопления скрытой энергии деформации задается в виде уравнения, решением которого является логистическая функция. При формулировке критерия многоциклового усталости предполагается, что скрытая энергия деформации в момент разрушения достигает критической величины согласно логистической функции на участке насыщения. Исходя из этих положений, конкретизированы функции и параметры логистической функции и критерия усталости, выполнены расчеты по прогнозированию усталостной прочности в области многоциклового усталости.

Ключевые слова: критерий усталостной прочности, скрытая энергия деформации, энергетический параметр поврежденности, логистическая функция.

Несмотря на многочисленные исследования, проблема усталостных разрушений остается до сих пор не решенной. В последние десятилетия, в связи с многочисленными случаями эксплуатационных разрушений в различных областях инженерной практики, возникающих при низких, но длительно действующих циклических нагрузках, выполнены многочисленные исследования в области многоциклового усталости [1]. Возрос также интерес к изучению закономерности изменения скрытой энергии деформации в условиях статических и циклических нагружений. При формулировке критерия усталости принимались во внимание следующие соображения.

В настоящее время для разработки общей теории недостаточно информации об усталости именно в тех условиях, которые наиболее важны для практики, например, для высокопрочных материалов, работающих в условиях воздействия относительно малых напряжений. Проведенные фундаментальные исследования механизмов зарождения усталостных трещин относятся к высокопластичным металлам, деформация которых связана с чрезвычайной локализацией процесса усталости. Чем менее пластичен материал, тем степень локализации выше. Таким образом, методы оптической и электронной микроскопии, которые приемлемы для исследования чистых

металлов и мягких сплавов, часто оказываются неприемлемы в случае высокопрочных материалов. Поэтому энергетические методы могут оказаться наиболее перспективными для решения проблемы усталости. Эти методы, основанные на концепции скрытой энергии деформации [2, 3], разрабатываются в наших исследованиях. Данная работа является развитием этих исследований.

Исходя из результатов многочисленных опытов [3], кинетика накопления скрытой энергии деформации задается в виде уравнения, решением которого является логистическая функция [4]. Подобная закономерность изменения скрытой энергии деформации наблюдается в опытах над различными металлами.

При формулировке критерия усталости предполагается, что циклическая прочность определяется количеством накопленной в образце скрытой энергии деформации, которая в момент разрушения достигает критической величины согласно логистической функции на участке насыщения. Соответствующее кинетическое уравнение принимается в следующем виде:

$$\frac{dW}{d\varepsilon} = AW(W_* - W), \quad (1)$$

где W – величина скрытой энергии деформации, ε – деформация, A , W_* – постоянные.

Решение уравнения (1) при начальном условии $\varepsilon = 0$ $W = W_0$ имеет вид:

$$W = \frac{W_*}{1 + (W_*/W_0 - 1)e^{-A\varepsilon W_*}}. \quad (2)$$

Принимая условие разрушения в виде $W = kW_*$, где $0 < k < 1$, из (2) получим

$$\varepsilon_* = \frac{1}{AW_*} \ln \left(\frac{k}{1-k} \left(\frac{W_*}{W_0} - 1 \right) \right). \quad (3)$$

Критерий (3) связывает предельную величину деформации с критической величиной скрытой энергии деформации и используется далее для формулировки критерия усталости. С этой целью привлекаются опытные данные по накоплению деформации в процессе циклического нагружения при заданной амплитуде напряжения σ . Согласно этим данным, в процессе циклических нагружений происходит накопление пластической деформации от цикла к циклу. При этом кривые накопления деформации от числа циклов нагружения N на установившейся стадии выражаются в виде линейной зависимости. В то же время закономерность накопления деформации от напряжения имеет немонотонный характер. С учетом этих положений кинетическое уравнение накопления деформации задается в виде

$$d\varepsilon / dN = B\sigma^m e^{-\alpha\varepsilon}, \quad (4)$$

где B , α , m – постоянные. Принимая приближенно условие постоянства напряжения в пределах одного цикла, равного амплитуде напряжения σ , решение (4) при начальном условии $N = 0$, $\varepsilon = 0$ и при $\varepsilon = \varepsilon_*$ в момент разрушения, имеет вид

$$\varepsilon_* = B\sigma^m e^{-\alpha\varepsilon_*} N. \quad (5)$$

Сравнивая (3) и (5), получим критерий усталостного разрушения:

$$\sigma^m N = \frac{e^{\alpha\varepsilon_*}}{ABW_*} \ln \left(\frac{k}{1-k} \left(\frac{W_*}{W_0} - 1 \right) \right). \quad (6)$$

Из опытов по измерению скрытой энергии деформации [5] следует, что точка перегиба на логистической кривой соответствует деформации на пределе текучести материала ($W = 0.5W_*$ при $\varepsilon = \varepsilon_T = \sigma_T/E$, σ_T – предел текучести, E – модуль Юнга). Используя это условие, определяем постоянную A и, подставляя ее в формулу (6), приходим к критерию усталости в виде

$$\sigma^m N = \frac{\sigma_T e^{\alpha\varepsilon_*}}{BE} \left[\ln \left(\frac{k}{1-k} \right) \left(\ln \left(\frac{W_*}{W_0} - 1 \right) \right)^{-1} + 1 \right]. \quad (7)$$

В приложении, исходя из данных экспериментальных исследований, конкретизированы функции и параметры логистической зависимости и критерия усталости и выполнены расчеты по прогнозированию усталостной прочности в области многоциклового (гигациклового) усталости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №11-08-00763).

Список литературы

1. Schijve J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art // International J. Fatigue. 2003. V. 25. P. 679–702.
2. Большанина М.А., Панин В.Е. Скрытая энергия деформации // Исследование по физике твердого тела. М.: Изд-во АН СССР, 1957. С. 193–234.
3. Bever M.B., Holt D.L., Titchener A.L. The stored energy of cold work // Progress in Materials Science. 1973. V. 17. P. 5–177.
4. Alexander R. Arutyunyan, Robert A. Arutyunyan. The fatigue fracture criterion based on energy approach // Engineering. 2010. V. 2, No 5. P. 318–321.
5. Плехов О., Саинтьев Н., Наймарк О. Экспериментальное исследование процессов накопления и диссипации энергии в железе при упругопластическом переходе // ЖТФ. 2007. Т. 77, №9. С. 135–137.

USING ENERGY METHODS FOR THE SOLUTION OF A HIGH-CYCLE FATIGUE PROBLEM

A.R. Arutyunyan, R.A. Arutyunyan

The energy approach to the formulation of the fatigue strength criterion is proposed. The criterion is based on the latent energy investigations. This conception has not been applied previously to the fatigue problem, but can be the most perspective one for fatigue strength predictions of high-strength metallic alloys which work in the high-cycle fatigue regime. On the basis of experimental investigations the logistic function is used to describe the kinetics of latent energy accumulation as a function of irreversible deformation. When the high-cycle fatigue criterion is formulated, it is assumed that the cyclic strength of metals is defined by the latent energy, stored in a specimen, when it is reached the critical value in accordance with the logistic curve in the saturation zone. Using the experimental results, the functions and parameters of logistic function and criterion are concretized, and fatigue strength in gigacycle regime is predicted.

Keywords: fatigue strength criterion, latent energy, power damage parameter, logistic function.