

## МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ИСТОРИИ НАПРЯЖЕНИЙ: ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ

А.А. Абызов, О.С. Садаков, Н.О. Фельк

Концепция накопления усталостного повреждения в связи с эволюцией микропластических деформаций (ЭМД) позволяет унифицировать представления о природе много- и малоциклового усталости и получить инструмент для расширения области моделируемых ситуаций. Для анализа ЭМД удобно использовать структурную модель, обобщающую модель Мазинга на случай сложного напряженного состояния. Для упрощения анализа используется модифицированный принцип Мазинга. Кроме того, учитывается влияние шаровой части тензора напряжений в духе критерия Колмогорова. Приводятся результаты проверки модели при плоском напряженном состоянии.

С развитием вычислительной техники все более широкое применение находят методики расчетной оценки усталостной долговечности ответственных деталей на ранних стадиях проектирования. Наибольшие трудности при этом возникают в случаях многопараметрического нагружения, здесь отсутствуют стандартные методики. В работе [1] было предложено распространить модель накопления повреждений [2], первоначально разработанную для случая малоциклового усталости, на случай многопараметрического многоциклового нагружения. Исходная идея модели состоит в том, что чисто обратимое деформирование не вносит повреждений, а усталость связана с микропластическими деформациями.

Циклические диаграммы деформирования  $\sigma_a(p_a)$  конструкционных сталей хорошо описываются формулой Рамберг–Осгуда [3]

$$\sigma_a = A p_a^m, \quad (1)$$

где  $\sigma_a$  и  $p_a$  – амплитуды напряжений и пластической деформации;  $A$  и  $m$  – постоянные (характеристики материала). Это выражение позволяет рассчитать величину пластической деформации при любой, самой малой амплитуде напряжений. Здесь предполагается регулярное циклическое нагружение при произвольном напряженном состоянии;  $\sigma$  и  $p$  – интенсивности напряжений и деформаций:  $\sigma \equiv \sqrt{s_{ij}s_{ij}}$ ;  $p \equiv \sqrt{p_{ij}p_{ij}}$ ;  $s_{ij}$  и  $p_{ij}$  – компоненты девиаторов напряжений и пластических деформаций. Применив дополнительно формулу Коффина

$$N_f p_a^\alpha = C, \quad (2)$$

где  $N_f$  – число циклов до разрушения;  $\alpha$  и  $C$  – характеристики материала, получим усталостную диаграмму во всем диапазоне чисел циклов – от малоциклового до обычной усталости. Естественно, что при переходе от одного диапазона чисел циклов к другому могут включаться дополнительные механизмы, влияющие на повреждаемость, и для надежного моделирования параметры соответствующего математического описания следует определять в нужном диапазоне чисел циклов. Ниже мы будем рассматривать многоцикловую усталость.

В отличие от анализа малоциклового усталости, в случае микропластического деформирования решение краевой задачи производится в рамках теории упругости. По найденной истории деформаций в опасной точке следует определять историю микропластических деформаций. Это можно сделать лишь на основании модели среды, учитывающей ее микронеоднородность. Наиболее удобной нам представляется структурная модель среды, обобщающая модель Мазинга на непропорциональное нагружение.

Приведенные в [8, 9] экспериментальные данные были сопоставлены с расчетными оценками числа циклов до разрушения, полученными по предлагаемой методике. Результаты для некоторых случаев представлены в табл. 2 и 3. Анализ этих данных показывает, что расхождение расчетной и средней экспериментальной долговечности не превышает 50 %, что является вполне удовлетворительным.

### Литература

1. Абызов А.А., Садаков О.С. Применение структурной модели для оценки усталости при многопараметрическом случайном воздействии// Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика, физика, химия». – 2005. – Вып. 5. – № 2(42). – С. 73–79.
2. Gokhfeld D.A., Kononov K.M., Poroshin V.B., Sadakov O.S. Coupled Mathematical Models for Cyclic Inelastic Deformation and Damage Accumulation Processes// Trans. 10-th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (Anaheim, USA, 1989). – V. L. – P. 19–24.
3. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении: Справочник// Д.А. Гохфельд, Л.Б. Гецов, К.М. Кононов и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 408 с.
4. Гохфельд Д.А., Садаков О.С. Пластичность и ползучесть при переменных нагружениях. – М.: Машиностроение, 1984. – 325 с.
5. Гохфельд Д.А., Садаков О.С. Модификации деформационной теории. Принцип подобия при непропорциональном нагружении// Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2001. – Вып. 1. – № 6(06). – С. 16–24.
6. Абызов А.А., Садаков О.С. О влиянии первого инварианта напряжений на малоцикловую усталость// Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика, физика, химия». – 2005. – Вып. 5. – № 2(42). – С. 69–72.
7. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1993. – 363 с.
8. Павлов П.А., Маликбеков А.К. Многоцикловая усталость углеродистых сталей при плоском напряженном состоянии. Сообщение 1// Проблемы прочности. – 1986. – № 1. – С. 55–60.
9. Павлов П.А., Маликбеков А.К. Многоцикловая усталость углеродистых сталей при плоском напряженном состоянии. Сообщение 2// Проблемы прочности. – 1986. – № 8. – С. 41–45.

*Поступила в редакцию 1 ноября 2005 г.*