

УДК 539.3

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ СРЕД С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ В ЗАДАЧАХ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2011 г.

И.А. Волков, И.С. Тарасов, М.Н. Ереев

Волжская государственная академия водного транспорта, Нижний Новгород

pmpmvgavt@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Для оценки напряженно-деформированного состояния и усталостной долговечности ответственных инженерных объектов развита модель поврежденной среды (МПС), состоящая из трех взаимосвязанных составных частей: соотношений, определяющих упругопластическое поведение материала, кинетических уравнений накопления повреждений и критерия прочности поврежденного материала. В целях качественной и количественной оценки определяющих соотношений МПС при малоцикловых режимах нагружения проведена оценка усталостной долговечности полосы с вырезом при циклическом нагружении. Показано, что развитый вариант определяющих соотношений адекватно отражает основные эффекты упругопластического деформирования и процессы малоциклового усталости материалов и конструкций.

Ключевые слова: напряжение, прочность, долговечность, деформация, разрушение, накопление повреждений, малоцикловая усталость.

С позиции механики поврежденной среды моделируются связанные процессы неизотермического упругопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах (металлах и их сплавах) при произвольных нестационарных режимах термосилового нагружения. Модель поврежденной среды состоит из трех взаимосвязанных составных частей [1]:

- соотношений, определяющих упругопластическое поведение материала с учетом зависимости от процесса разрушения;
- уравнений, описывающих кинетику накопления повреждений;
- критериев прочности поврежденного материала.

Вариант соотношений упругопластичности основан на представлении о поверхности текучести и ее трансформации в зависимости от параметров процесса упругопластического деформирования. Данный вариант уравнений состояния отражает основные эффекты процесса пластического деформирования металлов и их сплавов при монотонных и циклических, пропорциональных и непропорциональных, изотермических и неизотермических режимах нагружения и как частный случай содержит все основные известные формы уравнений теории пластического течения.

Построение кинетических уравнений накопления повреждений базируется на энергетичес-

ких принципах, учитывает основные стадии процесса накопления повреждений, нелинейное суммирование повреждений, влияние вида траектории деформирования, параметров напряженно-деформированного состояния и уровня накопленной поврежденности на процессы образования, роста и слияния микродефектов.

Сформирован критерий потери устойчивости процесса накопления повреждений, являющийся окончанием стадии развития рассеянных микроповреждений (образование макротрещины).

Обсуждается проблема, связанная с определением материальных параметров и функций развитых определяющих соотношений по результатам испытаний на лабораторных образцах по специальным режимам нагружения с последующей обработкой экспериментальных данных на ЭВМ. Разработана методика определения материальных параметров эволюционных уравнений накопления повреждений, заключающаяся в том, что все отклонения результатов численного моделирования процессов деформирования без учета влияния поврежденности от экспериментальных на стадии слияния рассеянных микроповреждений, с которой начинается влияние поврежденности на физико-механические характеристики материала, приписывается влиянию поврежденности (уменьшение модуля упругости, падение амплитуды напряжений при постоянной амплитуде деформа-

ций, возрастание амплитуды деформаций при постоянной амплитуде напряжений и т.д.).

Проведена оценка степени адекватности развитаго варианта модели поврежденной среды путем проведения численных исследований процессов циклического упругопластического деформирования и разрушения ряда конструкционных материалов и сопоставлении полученных результатов с данными натурных экспериментов и результатами, полученными другими исследователями.

Программа оценки адекватности включала:

- моделирование процессов циклического пропорционального и циклического непропорционального деформирования по плоским многозвенным траекториям различного вида и плоским криволинейным траекториям постоянной кривизны;
- моделирование циклических неизотермических процессов деформирования при различных режимах совместного действия механической деформации и температуры;
- моделирование процессов накопления повреждений при пропорциональных и непропорциональных режимах малоциклового нагружения;
- моделирование нелинейного суммирования повреждений при блочных циклических режимах нагружения.

Представлены результаты численного моделирования процессов циклического упругопластического деформирования и усталостной долговечности конструкций в ряде прикладных задач. В первом примере методом численного моделирования на ПЭВМ была решена задача усталостной долговечности полосы с отверстием при малоциклового нагружении ее концов (Н.И. Ishikawa, К. Sasaki). Расчеты проводились для трех вариантов циклического нагружения, в которых максимальные и минимальные нагрузки цикла (кН) имели следующие значения: цикл $a - (20; -20)$, цикл $b - (20; -10)$ и цикл $c - (20; 0)$.

Уточненный расчет данного конструктивно-го узла проводили в два этапа.

На первом этапе проводилась оценка кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС) с учетом упругопластического деформирования материала с целью выявления наиболее нагруженных зон и определения истории изменения тензоров напряжений и пластических деформаций в этих зонах.

На втором этапе была проведена оценка усталостной долговечности полосы с вырезом с использованием вышеописанных уравнений модели поврежденной среды (МПС).

Показано, что максимальная величина интенсивности пластических деформаций для всех трех вариантов расчета наблюдается у основания от-

верстия.

Интегрирование кинетических уравнений накопления усталостных повреждений в данной точке по модели МПС с использованием информации об истории НДС, полученной при решении краевой задачи, позволило прогнозировать циклическую долговечность конструкций.

В следующем примере проведена оценка усталостной долговечности компактного образца с затупленным вырезом при блочных циклических режимах нагружения (N.E. Dowling). Выявлены некоторые характерные особенности разрушения данного конструктивного узла, связанные с чередованием блоков нагружения.

В третьем примере методом численного моделирования на ЭВМ проведена оценка усталостной долговечности конструктивного узла соединения патрубка со сферической крышкой с дефектом типа трещины при малоциклового нагружении.

Проведенный упругопластический расчет показал, что наибольшее напряжение возникает в районе щелевого концентратора. История изменения компонент тензоров σ_{ij} и e_{ij}^p в этой зоне показала, что процесс деформирования является существенно непропорциональным, а тензоры, определяющие НДС – несоосными, что диктует использование при решении краевой задачи физических соотношений, адекватно описывающих закономерности упругопластического деформирования материала при сложном нагружении.

Расчет усталостной долговечности конструкции с использованием определяющих соотношений МПС и информации об истории НДС, полученной из решения краевой задачи, позволил определить число циклов до образования макроскопической трещины и нашел экспериментальное подтверждение. Сравнение усталостных долговечностей, полученных с использованием ряда деформационно-кинетических критериев (Л. Коффина, А.Н. Романова, ASME и др.), показало их значительный разброс в консервативную сторону.

Таким образом, проведенные численные исследования и их сравнение с опытными данными показали, что используемый подход позволяет прогнозировать усталостную долговечность опасных зон конструктивных элементов ответственных инженерных объектов с учетом конкретной истории деформирования материала даже при сильно непропорциональных режимах малоциклового нагружения.

Список литературы

1. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнение состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит, 2008. 424 с.

**EQUATION OF STATE ELASTOPLASTIC MEDIA WITH DAMAGE AND THEIR IMPLEMENTATION
IN PROBLEMS OF FATIGUE DURABILITY OF STRUCTURES UNDER LOW-CYCLE LOADING**

I.A. Volkov, I.S. Tarasov, M.N. Ereev

To evaluate the stress-strain state and the fatigue life of critical engineering structures developed a model of damaged media (MDM) consisting of three interrelated components: relations defining the elastoplastic behavior of the material, the kinetic equations of damage accumulation and strength criterion damaged material. In order to qualitative and quantitative evaluation of constitutive relations at MDM low-cycle loading conditions evaluated fatigue life of the band with a cut under cyclic loading. Shown that the development version of the constitutive relations adequately reflects the main effects of elastic deformation and the processes of low-cycle fatigue of materials and structures.

Keywords: stress, strength, durability, deformation, fracture, damage accumulation, low-cycle fatigue.