

УДК 621.039.53

**ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ
В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ**

© 2013 г. **В.В. Банкрутенко, М.А. Большухин, В.В. Киселев,
Ю.Г. Коротких, В.А. Панов, В.А. Пахомов**

ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

varanov@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию 28.01.2013

Рассмотрены математическая модель накопления усталостных повреждений в металлах при нестационарных термосиловых нагрузках и вопросы ее программной реализации.

Ключевые слова: математическая модель, конструктивный элемент, конструкционный материал, упругопластическое деформирование, поврежденность, выработанный и остаточный ресурс.

Введение

Одной из основных задач современного машиностроения является обоснование ресурса оборудования и систем инженерных объектов на стадии их проектирования, оценка выработанного и прогноз остаточного ресурса конструктивных узлов в процессе их эксплуатации, продление срока службы после отработки объектами нормативного срока. Особенно актуальны эти задачи для объектов, срок службы которых составляет несколько десятков лет (атомные энергетические установки, нефтехимическое оборудование, резервуары для хранения газообразных и сжиженных химических продуктов, магистральные газо- и нефтепроводы и т.п.). Это вынуждает разработчиков более тщательно исследовать поведение конструкционных материалов в эксплуатационных условиях, добиваться лучшего понимания разнообразных процессов развития поврежденности в объеме конструктивного узла при различных режимах эксплуатации объекта, адекватно моделировать развитие связанных процессов вязкоупругопластического деформирования материала и процессов накопления повреждений в зависимости от параметров нагружения конструктивного узла.

Процессы накопления повреждений являются многомасштабными и многостадийными кинетическими процессами, которые развиваются одновременно на разных масштабных уровнях: атомных, дислокационных, структурных и субструктурных, что означает необходимость совмещения микроскопических, мезоскопических и макроскопических моделей. Многостадийность процессов накопления повреждений означает, что развитие поврежденности проходит последовательно через несколько качественно отличных стадий, каждая из которых характеризуется

своими физическими закономерностями и своей энергетикой. Вследствие этого указанные процессы являются сильно нелинейными и зависящими от истории нагружения конструктивного элемента.

Надежное прогнозирование ресурса конструктивных узлов объекта на стадии проектирования, оценка выработанного и прогноз остаточного ресурса на стадии эксплуатации невозможны без разработки адекватных математических моделей доминирующих процессов развития поврежденности и программных средств их реализации.

Методы, используемые в механике поврежденной среды (МПС), являются достаточно адекватными, но сложными и трудоемкими, требующими большой экспериментальной и теоретической программы исследований. Трудоемкость их определяется сложностью реальных процессов, протекающих в конструкционных материалах. Развитие экспериментальной и вычислительной техники, методов решения нелинейных краевых задач на ЭВМ открывает перспективные возможности использования методов МПС для оценки выработанного и прогноза остаточного ресурса машиностроительных объектов в процессе эксплуатации.

1. Математическая модель процессов накопления усталостных повреждений

Для теоретического анализа процессов развития микродефектов и поведения материала в объеме рассматриваемого конструктивного узла с позиций МПС необходимо [1]:

- сформулировать уравнения состояния, описывающие процессы деформирования поврежденной среды;
- описать процессы накопления повреждений (развитие микродефектов) через параметры поврежденности;
- разработать алгоритмы и программные средства их реализации.

Относительную меру поврежденности материала ω в элементарном объеме материала можно представить в виде [1, 2]:

$$d\omega = f_1(\beta) f_2(\omega) f_3(z) dz, \quad (1)$$

$$\omega = \int d\omega,$$

где функции f_i описывают: $f_1(\beta)$ – влияние вида («жесткости») напряженного состояния; $f_2(\omega)$ – влияние накопленной поврежденности; $f_3(z)$ – влияние накопленной относительной энергии z , затраченной на образование дефектов:

$$z = \frac{W_p - W_a}{W_{pf} - W_a}, \quad (2)$$

где W_p – текущее значение энергии; W_a – значение этой энергии, соответствующее окончанию инкубационной стадии процесса накопления повреждений (при симметричном циклическом деформировании – количеству циклов N_a), W_{pf} – предельное значение W_p , соответствующее зарождению макроскопической трещины.

Уравнение (1) интегрируется совместно с уравнениями термопластичности вдоль траектории деформирования. Влияние многоосности и непропорциональности нагружения учитывается этими уравнениями при вычислении энергии W_p [1, 2].

Одно из простейших конкретных представлений выражения (1) при упруго-пластическом деформировании имеет вид [1, 2]:

$$d\omega = \frac{\alpha + 1}{r + 1} f(\beta) z^\alpha (1 - \omega)^{-r} dz \quad (3)$$

или

$$\Delta\omega = \frac{\alpha + 1}{r + 1} f(\beta) z^\alpha (1 - \omega)^{-r} \langle \Delta z \rangle, \quad (4)$$

где α, r – экспериментально определяемые параметры материала.

Интеграл выражения (3) вдоль траектории деформирования имеет вид:

$$\omega = 1 - \left\{ 1 - (\alpha + 1) \int_0^z f(\beta) z^\alpha dz \right\}^{1/(r+1)} \quad (5)$$

или

$$\omega = 1 - \left\{ 1 - (\alpha + 1) \sum_{j=1}^n f_j(\beta_j) z_j^\alpha \Delta z_j \right\}^{1/(r+1)}, \quad (6)$$

где суммирование проводится по этапам нагружения ($j = 1, \dots, n$).

Для адекватного решения практически важных технических задач в связи с нелинейностью процессов упругопластического деформирования и накопления повреждений в элементах конструкций необходимо учитывать фактическую историю их термомеханического нагружения. При решении таких задач проблема моделирования указанных процессов приводит к необходимости интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений с начальными условиями. Выбор эффективного алгоритма численного интегрирования этих уравнений имеет решающее значение для обеспечения устойчивости процесса вычисления искомых параметров и сокращения времени счета. Многими исследователями были предложены специальные схемы интегрирования. В результате численных экспериментов [3, 4] было установлено, что простая явная схема Эйлера может успешно применяться, несмотря на то, что она является лишь условно устойчивой, при условии правильно выбранной величины шага интегрирования. Главное преимущество явной схемы – простота ее реализации при минимизации времени вычислений. Успешное применение явной схемы в значительной степени, если не полностью, определяется выбором размера шага интегрирования Δt_n . Для этого необходима методика, позволяющая следить за скоростями изменения интегрируемых величин, определять шаг интегрирования Δt_n . Авторы работы [3] предлагают выбирать шаг интегрирования на интервале $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$ в зависимости от величины скорости изменения искомой величины $\dot{y}_n = F(y, t)$. На шаге интегрирования Δt_n

$$y_{n+1} = y_n + \Delta t_n F_n. \quad (7)$$

Шаг интегрирования Δt_n и ошибка интегрирования ERRORe определяются по формулам [3]:

$$\Delta t_n = \frac{e_{\max}}{|\nabla F_n|} \max [|F_n|, |F_{n-1}|], \quad (8)$$

$$\text{ERRORe} = \frac{\Delta t_n |\nabla F_n|}{\max [|F_n|, |F_{n-1}|]}, \quad (9)$$

где $\nabla F_n = F_k - F_{k-1}$, а e_{\max} есть верхняя граница ERRORe.

Сглаживание численных результатов достигается за счет прямого ограничения скоростей изменения вычисляемых величин $\dot{y}_n = F(y, t)$. Опыт применения явной схемы типа (7) и выбора шага интегрирования (8) для решения вязкопластических задач показал удовлетворительные результаты [1–4] как по точности и устойчивости расчета процессов деформирования, так и по временным затратам.

2. Функциональное и системное наполнение программы «Ресурс-НН»

В ОАО «ОКБМ Африкантов» разработана программа «Ресурс-НН» [5], которая позволяет по заданной истории изменения компонент тензора полных деформаций $e_{ij}(t)$ и температуры $T(t)$ рассчитывать параметры процессов упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в конструктивных элементах при термомеханических воздействиях. Используя сервисные средства программы, можно создавать и редактировать файлы баз данных, осуществлять сопровождение работы процессора и проводить постпроцессорную обработку результатов счета. На рис. 1 приведено окно постпроцессора для построения графиков.

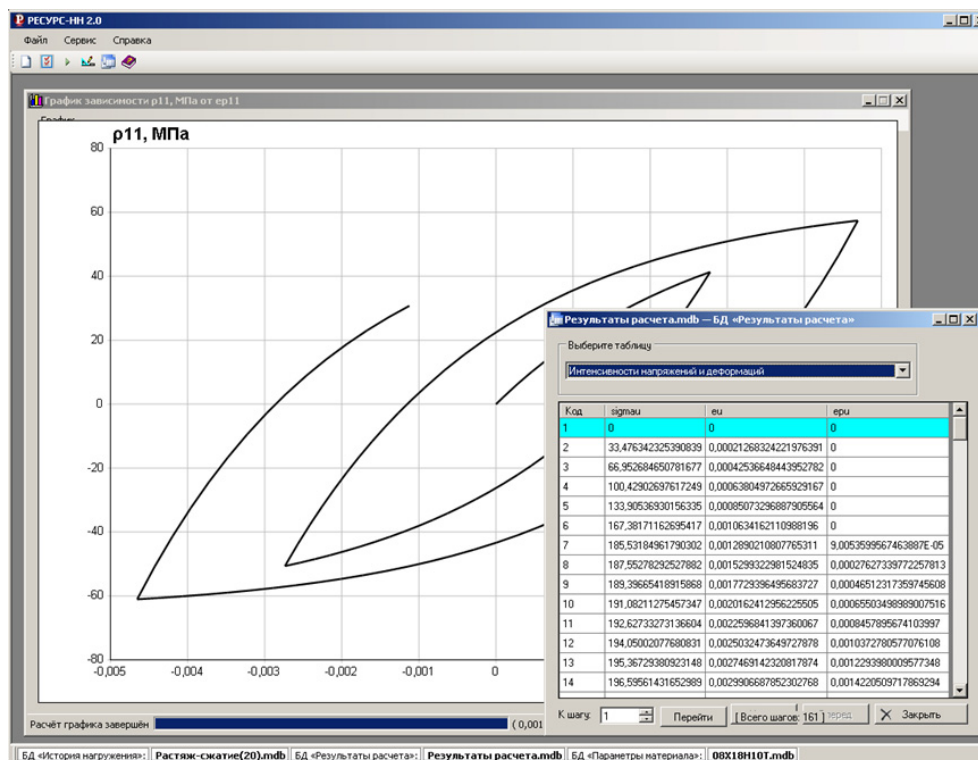


Рис. 1

С помощью этой программы для ряда конструкционных материалов была проведена верификация предложенной модели (1)–(6) для различных изотермических и неізотермических пропорциональных и непропорциональных процессов [1, 2]. Оценка адекватности проводилась путем сопоставления результатов расчетного анализа с результатами экспериментов и результатами других авторов.

Ограничения на применение разработанного программного средства (ПС):

- материал считается упруго-изотропным;

– предполагается, что деформации, возникающие в конструкционных материалах от внешних воздействий, малы;

– влияние внешних сред на накопление усталостных повреждений учитывается приближенно через их влияние на физико-механические характеристики материалов.

Практическая точность расчетов кинетики напряженного состояния в конструкционных материалах по заданной истории изменения деформаций и температуры порядка 15% (по результатам сопоставления расчетов с экспериментальными значениями при одноосном растяжении-сжатии, при совместном растяжении-сжатии и знакопеременном кручении лабораторных образцов по различным программам, а также по сопоставлению расчетных и экспериментальных данных по количеству относительных циклов $\sum N_i/N_{fi}$ при циклическом блочном нагружении образцов с различными заданными амплитудами деформаций в блоках, где N_{fi} – число циклов до зарождения макроскопической трещины размером ~ 1 мм при регулярном циклическом растяжении-сжатии с заданной амплитудой деформации в i -м блоке нагружения, N_i – некоторое количество отработанных циклов нагружения с заданной амплитудой деформации в i -м блоке нагружения).

Все основные уравнения математической модели программы сформулированы в приращениях соответствующих величин на этапе нагружения $\Delta t_n = \Delta t_{n+1} - t_n$ ($n = 0, 1, 2, \dots, N$). Приращения величин определяются как скорости их изменения, умноженные на Δt_n .

Расчет кинетики напряженно-деформированного состояния в рамках ПС «Ресурс-НН» может осуществляться в упругопластической одномерной, двумерной и трехмерной постановках путем совместного интегрирования эволюционных уравнений термопластичности и накопления усталостных повреждений для элементарного объема материала опасной зоны конструктивного элемента по заданной истории изменения тензора полных деформаций и температуры. Для численного моделирования процессов деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах (сталях) при произвольном нерегулярном термомеханическом нагружении задается закон изменения компонент тензора полных деформаций $e_{ij}(t)$ и температуры $T(t)$ во времени.

История изменения компонент тензора деформаций $e_{ij}(t)$ и температуры $T(t)$ определяется из решения соответствующих краевых задач аттестованными программными средствами для конструктивных элементов по заданной модели их эксплуатации.

Программа «Ресурс-НН» позволяет учитывать:

– монотонное и циклическое упрочнение конструкционных материалов при неизотермическом пропорциональном и непропорциональном нагружении (вращение главных площадок тензоров напряжений и деформаций);

– пластическую анизотропию (изменение модулей упрочнения) при изменении направления деформирования;

– влияние многоосности напряженного состояния и непропорциональности нагружения (траектории деформирования) на темпы накопления повреждений;

– нелинейность процесса накопления повреждений;

– нелинейность суммирования повреждений при изменении режимов нагружения.

Значения физико-механических характеристик конструкционных материалов и материальных параметров моделей для расчетов по программе «Ресурс-НН» выби-

раются из специальной базы данных (БД) MATERIAL, которая является формально независимой программной единицей и представляет собой каталог, в котором содержатся файлы с именами марок конструкционных материалов (08X18H10T, 10X18H10T, 12X18H10T, 15X2MФА, 15X3НМФА и др.). Каждый из этих файлов содержит совокупность таблиц различной размерности, служащих для хранения, просмотра и редактирования содержащейся в этих таблицах информации. Указанные файлы являются базами данных в формате Microsoft Access 2000 (XP). Файловая структура БД позволяет проводить ее расширение и включать в ее состав новые конструкционные материалы. Правила работы с БД (создание, копирование, редактирование и т.д.) подчиняются общим правилам работы с БД. Структура БД MATERIAL приведена на рис. 2.

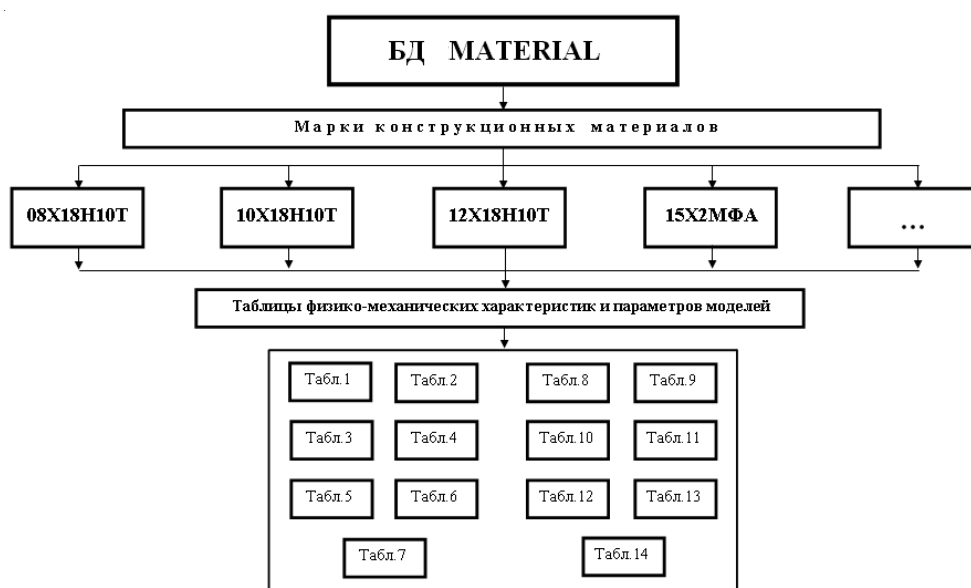


Рис. 2

Заключение

На базе математических моделей неізотермического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в конструкционных материалах разработана программа «Ресурс-НН» для моделирования процессов накопления усталостных повреждений в элементах машиностроительных конструкций. Алгоритм интегрирования определяющих соотношений основан на линеаризации нелинейных процессов на шаге интегрирования, явной схеме интегрирования с автоматическим контролем шага интегрирования, что позволяет с заданной точностью осуществлять расчет усталостной долговечности рассматриваемой зоны конструктивного элемента в приемлемое время и оптимизировать шаг интегрирования.

Список литературы

1. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок / Ф.М. Митенков, В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких, В.А. Панов, С.Н. Пичков / Под общ. ред. Ф.М. Митенкова. М.: Машиностроение, 2007. 448 с.
2. Обоснование структуры эволюционного уравнения для неізотермических пропорцио-

нальных процессов накопления усталостных повреждений / А.В. Денисов, Ю.Г. Коротких, В.А. Панов, В.А. Пахомов // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2004. Вып. 66. С. 35–50.

3. Бантхья, Мукерджи. Об усовершенствованной схеме интегрирования по времени для систем определяющих соотношений неупругой деформации с нелинейностью жесткого типа // Теоретические основы инженерных расчетов: Труды Американ. об-ва инженеров-механиков. М.: Мир, 1985. №4. С. 54–60.

4. Кумар, Морджариа, Мукерджи. Численное интегрирование связанных определяющих моделей неупругой деформации // J. of Eng. Mater. Technol. 1980. №1. P. 97–100.

5. Аттестационный паспорт программного средства «Ресурс-НН» №323 от 18.04.2013 г.

SOFTWARE REALIZATION OF THE MODELING OF ELASTOPLASTIC DEFORMATION AND DAMAGE ACCUMULATION PROCESSES IN STRUCTURAL MATERIALS

**V.V. Bankrutenko, M.A. Bol'shukhin, V.V. Kiselyov, Yu.G. Korotkikh,
V.A. Panov, V.A. Pakhomov**

A mathematical model of fatigue damage accumulation in metals under non-stationary thermal-stress loading and some issues of its software realization are considered.

Keywords: mathematical model, structural element, structural material, elastoplastic deformation, damage degree, service and residual life.