

УДК 539.3

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕХАНИКИ ПОВРЕЖДЕННОЙ СРЕДЫ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИ ОБОСНОВАНИИ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

© 2011 г. *Ф.М. Митенков, В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких, В.А. Панов, В.А. Пахомов*

ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

kosay@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Рассматриваются проблемы, методология и технология обоснования на базе механики поврежденной среды прочности и ресурса конструктивных элементов оборудования и систем ядерных энергетических установок. Сформулированы основные уравнения и алгоритмы их интегрирования для анализа процессов неизотермического упругопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах оборудования и систем при термомеханических нагружениях, оценки их выработанного и остаточного ресурса.

Ключевые слова: механика поврежденной среды, накопление усталостных повреждений, конструкционный материал, конструктивный элемент, ядерная энергетическая установка, ресурс.

Приводятся основные положения формирования связанных уравнений механики поврежденной среды (МПС) для процессов упругопластического деформирования и накопления повреждений в материале конструкций при термомеханических режимах нагружения, алгоритмы их интегрирования при решении задач прочности и долговечности конструктивных узлов, оценки их выработанного и прогноза остаточного ресурса. Для формулировки эволюционных уравнений математической модели МПС применяется подход, согласно которому разработка модели осуществляется на основе макроскопических переменных, интегрально характеризующих структурные изменения материала в процессе деформирования и накопления повреждений. Процесс накопления усталостных повреждений в материале опасных зон оборудования и систем ядерных энергетических установок (ЯЭУ) по фактической истории их термосилового нагружения базируется на моделировании основных физических стадий процесса накопления усталостных повреждений: стадии зарождения и развития микродефектов и стадии их слияния с образованием макроскопической усталостной трещины. Для измерения усталостной долговечности (наработки) материала в данной зоне до наступления предельного состояния введено понятие «внутреннего времени», определяемое энергией, затраченной на образование и рост дефектов в рассматриваемом объеме материала. Энергетический подход, принятый для моделирования процессов накопления повреждений,

позволяет учитывать главные особенности упругопластического деформирования материала опасных зон конструктивных элементов ЯЭУ при сложном нестационарном термомеханическом нагружении, а именно: ярко выраженную локализацию критической напряженности в опасных зонах, обусловленную высоким градиентом нагрузок и конструктивно-технологической концентрацией напряжений; многоосность напряженно-деформированного состояния; вращение главных площадок тензоров напряжений и деформаций; нелинейное суммирование повреждений при изменении режимов нагружения.

Для оценки степени усталостной поврежденности материала введен макроскопический параметр λ , который является внутренним параметром состояния материала и представляет собой отношение текущей объемной доли микродефектов в некотором объеме материала к критической объемной доле дефектов, соответствующей образованию макроскопической трещины.

Разработаны алгоритмы и программы для ПЭВМ, позволяющие выполнять расчеты параметров процессов нестационарного упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в конструкционных материалах опасных зон оборудования и систем ЯЭУ при нерегулярных термомеханических нагружениях по заданной истории нагруженности данных зон, а также производить оценки в процессе эксплуатации выработанного и остаточного ресурса конструктивных элементов оборудования ЯЭУ с ис-

пользованием фактической модели эксплуатации.

Проведено сопоставление результатов численных расчетов с результатами экспериментальных исследований, которое показало дос-

точную точность расчетов с помощью данных программ и подтвердило адекватность моделирования этих процессов с помощью разработанных методик.

MAIN PROVISIONS OF DMM AND THEIR IMPLEMENTATION FOR THE VALIDATION OF THE STRENGTH AND ENDURANCE OF NPPS

F.M. Mitenkov, V.B. Kaidalov, Yu.G. Korotkikh, V.A. Panov, V.A. Pakhomov

Issues, methods and a procedure are investigated to validate strength and fatigue life of structural elements of nuclear power plant equipment and systems, based on damaged media mechanics (DMM). DMM basic equations and algorithms of their integration have been formulated in order to analyze non-isothermal elastic-plastic deformation and damage accumulation processes in structural materials of equipment and systems during thermomechanical loadings and in order to assess their exhausted and residual fatigue life.

Keywords: damaged media mechanics, accumulation of fatigue damage, structural material, design element, nuclear power plant, fatigue life.