

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ПО ОТРАБОТКЕ И ВЕРИФИКАЦИИ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА РЕСУРСА

М. Н. Ереев, А. В. Козин, В. А. Панов, В. А. Пахомов, А. С. Судаков

ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород

В настоящее время работа конструкций и аппаратов современного атомного машиностроения характеризуется увеличением величины рабочих параметров, нестационарных режимов нагружения, требований к надежности, длительности безаварийной эксплуатации. Современная мировая тенденция направлена на переход к управлению сроком эксплуатации ответственных инженерных объектов по фактическому техническому состоянию (ФТС). Для реализации управления сроком службы объектов по ФТС разрабатывается техническая система оперативного мониторинга за расходом ресурса оборудования и систем в процессе эксплуатации.

Эксплуатационный мониторинг ресурса (ЭМР) – это информационная система, позволяющая на базе:

- достоверных данных о конструктивном исполнении и начальном состоянии металла оборудования и систем РУ после изготовления и монтажа;
- результатов экспериментальных исследований изменения физико-механических свойств конструкционных материалов в эксплуатационных условиях;
- данных по фактической нагруженности и модели эксплуатации оборудования и систем РУ,

осуществлять постоянный контроль за величиной выработанного ресурса РУ путем математического моделирования процессов деформирования, накопления и развития повреждений в материале конструкций и периодического диагностирования их технического состояния в доступных местах.

В настоящее время при оценке усталостных повреждений в материале оборудования, работающего при термосиловом нагружении, в основном используется нормативный подход, основанный на условно-упругом расчете напряженно-деформированного состояния и линейном суммировании относительно числа циклов, полученных с применением метода «дождя». Основными факторами, влияющими на ресурсные отказы конструктивных элементов энергетического оборудования в процессе эксплуатации, являются процессы теплообмена при изменении режимов нагружения и процессы накопления повреждений в результате многоциклового и малоциклового усталости. Деградация конструкционного материала в процессе накопления усталостных повреждений при термосиловом нагружении проявляется в снижении пластических свойств и прочностных характеристик материала, что в конечном итоге приводит к образованию макроскопической трещины (длиной ~1–2 мм).

Математическое моделирование процессов накопления повреждений позволяет проводить анализ и прогнозирование развития поврежденности в любых доступных и недоступных для средств неразрушающего контроля зонах конструктивных элементов по фактической истории их термомеханического нагружения. В [1] описана математическая модель, позволяющая учитывать:

- монотонное и циклическое упрочнение конструкционных материалов;
- пластическую анизотропию;
- прогрессирующее изменение прочностных характеристик конструкционных материалов;
- влияние многоосности напряженного состояния и непропорциональности траектории деформирования;
- нелинейность процесса накопления повреждений;
- нелинейность суммирования повреждений.

В статье [2] представлены результаты расчетного анализа процессов накопления усталостных повреждений в рабочей части стандартных цилиндрических образцов, изготовленных из стали 08X18H10T, согласно математической модели [1], и сравнения полученных результатов с экспериментальными данными и с расчетом по нормативному подходу [3]. В статье [4] представлен расчет усталостных повреждений фланцевого соединения используемого в составе лабораторного образца системы эксплуатационного мониторинга.

При анализе оборудования и систем РУ были выделены основные конструктивные элементы, которые отвечают за ресурсные характеристики. Имитируя основные критические зоны конструктивных элементов оборудования и систем РУ, при термомеханических циклических и гидроциклических нагружениях, такие как:

- конструктивные геометрические концентраторы напряжений;
- зоны соединения патрубка с крышкой;
- щелевые концентраторы;
- различные виды сварных швов (катетный, стыковой, стыковой на подкладном кольце, усиковый);
- сварные соединения разнородных материалов (основные и сварочные материалы, применяемые в конструкциях оборудования РУ);
- полуэллиптические поверхностные дефекты, можно обеспечить представительность результатов математического моделирования с помощью экспериментальной информации.

Для математического моделирования процессов накопления повреждений были созданы расчетные модели, учитывающие данные критических зон. На рис. 1 представлена конечно-элементная модель (КЭМ) одной из моделей.

На рис. 2, 3 представлены изолинии поля температур и поля интенсивности напряжений в наиболее нагруженный момент времени.

После обработки результатов с помощью математической модели [1], заложенной в расчетный код, было получено значение усталостной долговечности данной испытательной модели. По аналогии были получены данные значения и для всех остальных моделей.

С целью верификации разработанных для системы эксплуатационного мониторинга ресурса математических моделей [1, 5], расчетных кодов, методов и средств неразрушающего контроля был создан так называемый лабораторный образец системы ЭМР.

Лабораторный образец системы ЭМР состоит из стенов для проведения термоциклического и гидроциклического нагружения и моделей, состоящих из основных критических зон конструктивных элементов оборудования и систем РУ. На стендах можно проводить:

- ресурсные испытания моделей критических зон конструктивных элементов оборудования и систем РУ с параметрами нагружения, близкими к эксплуатационным;
- периодический контроль технического состояния материала;
- периодический контроль топологии и геометрии развивающихся дефектов;
- контроль нагруженности.

При испытаниях предусматривается два направления испытаний моделей:

- нагружение моделей термомеханическими циклическими нагрузками: изменением температуры рабочей среды – воды от 20 до 350 °С внутри модели на фоне постоянно действующего внутреннего давления рабочей среды до 16 МПа;
- нагружение моделей гидроциклическими нагрузками внутренним и наружным давлением рабочей среды до 40 МПа при температуре от 10 до 30 °С.

Для проведения исследования температурного поля производится изготовление одной модели в трех экземплярах. Первый – с установкой всех датчиков (за исключением тензодатчиков на внутренней поверхности) для получения истинного распределения температурных полей, второй – с установкой датчиков только на наружной поверхности, третий – для проведения испытаний при гидроциклическом нагружении. Остальные модели изготавливаются в двух экземплярах.

Все модели выполняются по технологиям, применяемым при изготовлении оборудования и систем РУ, из следующих конструкционных материалов: из коррозионно-стойкой стали аустенитного класса – 08Х18Н10Т и легированной хромомолибденованадиевой стали перлитного класса – 15ХЗНМФА.

При изготовлении моделей применяются методы контроля, используемые при изготовлении оборудования и систем РУ: ультразвуковой, радиографический, капиллярный (II класс чувствительности), и заполняется технический паспорт в соответствии с требованиями стандарта СТО СМК-214-2009 [6]. В случае обнаружения дефектов, превышающих допускаемые, решение о допуске модели к испытанием принимается отдельно в каждом случае.

На рис. 4 представлена одна из испытательных моделей с указанием мест установки термодатчиков и тензодатчиков.

Из той же партии материала, применяемого для изготовления моделей, изготавливаются образцы для определения фактических физико-механических свойств (в соответствии с требованиями [7, 8]) и материальных параметров уравнений термопластичности (в т. ч. и для сварных швов) [2]. Эскиз образца для определения материальных параметров термопластичности приведен на рис. 5 [9].

При экспериментальных исследованиях по верификации лабораторного образца системы эксплуатационного мониторинга ресурса проводится:

- измерение задержки акустических импульсов на рабочей части модели при помощи спектрально-акустической системы в процессе циклических испытаний для различных амплитуд пластической деформации образца;

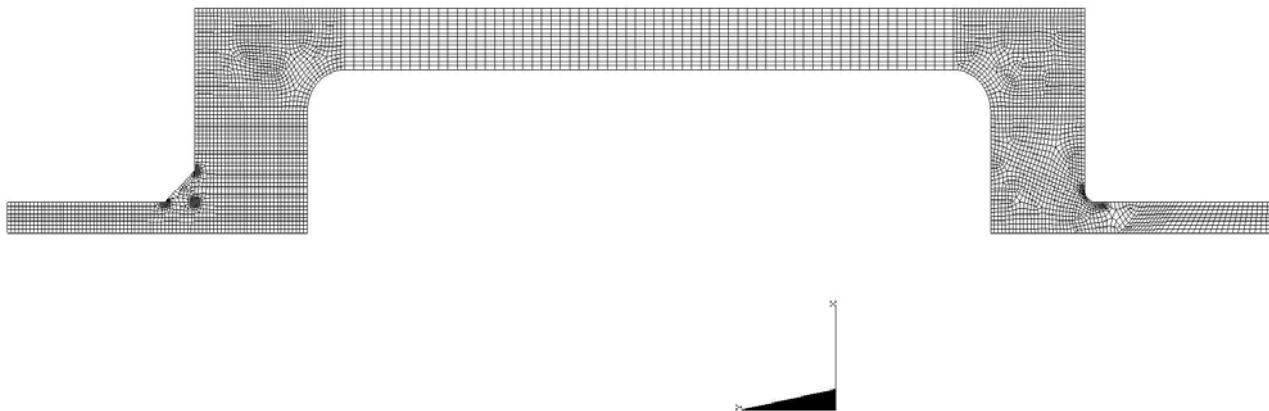
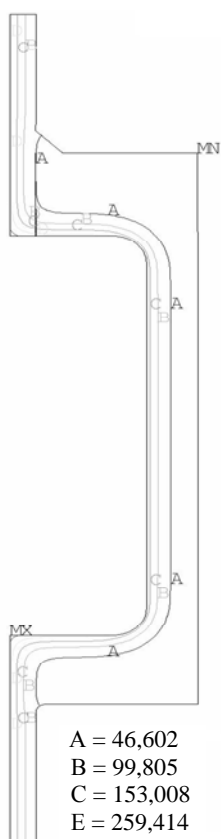
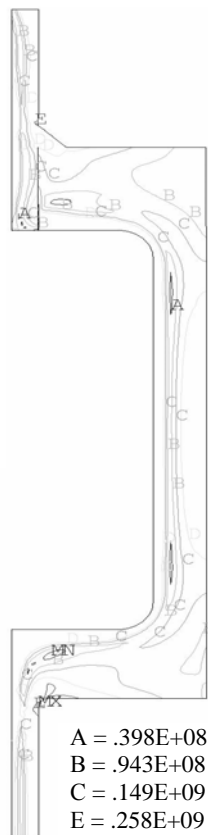


Рис. 1. КЭМ



A = 46,602
 B = 99,805
 C = 153,008
 E = 259,414

Рис. 2.



A = .398E+08
 B = .943E+08
 C = .149E+09
 E = .258E+09

Рис. 3

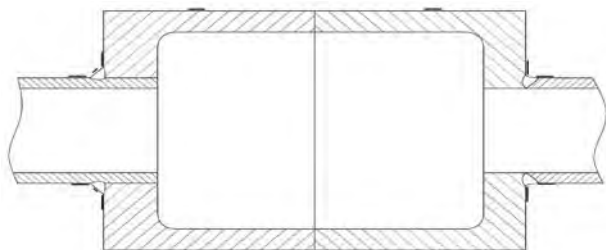


Рис. 4. Испытательная модель

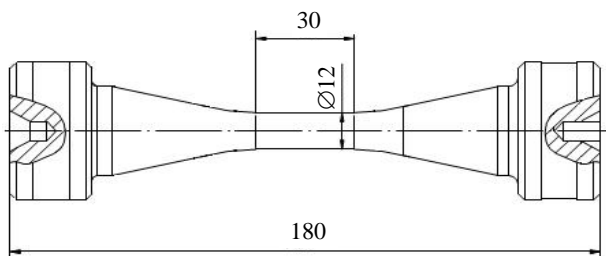


Рис. 5. Эскиз образца для определения материальных параметров уравнений термопластичности

- проведение термо- и тензометрирования при нагружении моделей;
- периодические исследования состояния материала моделей неразрушающими методами контроля;
- периодический контроль акустико-эмиссионным методом при гидропрессовке;

– определение экспериментальной поврежденности по измеренным задержкам акустических импульсов объемных и поверхностных волн;

– сравнение экспериментально полученных значений степени поврежденности с результатами расчетного анализа.

Заключение

Разработана экспериментально-теоретическая методика по отработке и верификации методов и средств системы эксплуатационного мониторинга ресурса РУ. Результаты верификации позволят внедрить данную систему проектируемых и строящихся РУ и обеспечить представительность контроля истощения ресурса в процессе их эксплуатации.

Литература

1. Митенков Ф. М., Кайдалов В. Б., Коротких Ю. Г. и др. Методы обоснования ресурса оборудования ЯЭУ. М.: Машиностроение, 2008.
2. Ереев М. Н., Марков А. С., Панов В. А. Применение энергетического принципа для анализа термоусталостной долговечности конструкционных материалов ЯЭУ // Сб. докладов седьмой научно-технической конференции «Молодежь в науке» (Саров, 28–30 октября 2008 г.), 2009. С. 485–487.
3. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Ереев М. Н., Марков А. С., Панов В. А. Моделирование накопления усталостных повреждений в материале оборудования реакторных установок // Сборник докладов девятой научно-технической конференции «Молодежь в науке» (Саров, 26–28 октября 2010 г.), 2011.
5. Большухин М. А., Зверев Д. Л., Кайдалов В. Б. и др. Оценка долговечности конструкционных материалов при совместных процессах малоциклового и многоциклового усталости // Сборник научных трудов «Проблемы прочности и пластичности». 2010. № 72. С. 28–35.
6. СТО СМК-214-2009 Организация сбора информации для базы данных системы эксплуатационного мониторинга ресурса.
7. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 1984–07–16. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2008.
8. ГОСТ 9651-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах. Введ. 1984–07–16. М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1986.
9. Волков И. А., Коротких Ю. Г., Шишулин Д. Н. Принципы и методы определения скалярных материальных параметров теории пластического течения с кинематическим и изотропным упрочнением // Сб. научных трудов «Вычислительная механика сплошных сред». 2010. Т. 3, № 3. С. 46–57.