

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

М. Н. Ереев, А. С. Марков, В. А. Панов

ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород

Основными факторами, влияющими на ресурсные отказы конструктивных элементов энергетического оборудования реакторной установки (РУ) в процессе эксплуатации, являются процессы теплообмена при изменении режимов нагружения и процессы накопления повреждений в результате многоцикловой и малоцикловой усталости. Дegrадация материала в процессе накопления повреждений при длительном термосиловом нагружении оборудования 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 усталостных 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.

Математическая модель расчета поврежденности конструкционных материалов, основана на совместном интегрировании эволюционных уравнений неизоотермического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений [1]. Данная математическая модель позволяет учитывать:

- монотонное и циклическое упрочнение конструкционного материала при неизоотермическом пропорциональном и непропорциональном нагружении (вращение главных площадок тензоров напряжений и деформаций);

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

- прогрессирующее изменение прочностных характеристик конструкционных материалов в процессе накопления усталостных повреждений;

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

- нелинейность процесса накопления повреждений;

- нелинейность суммирования повреждений при изменении режимов нагружения.

Алгоритм совместного интегрирования эволюционных уравнений упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений

реализован в коде программного средства «Ресурс-НН» [2], которое позволяет по заданной истории изменения компонент тензора полных деформаций и температуры рассчитывать параметры процессов неизоотермического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в данном объеме материала.

Математическое моделирование позволяет проводить анализ развития поврежденности в любой зоне конструктивного узла в зависимости от исходного состояния материала и конкретных параметров нагружения этой зоны. Точность прогноза зависит от адекватности применяемых моделей реальному процессу деградации материала и соответствия моделируемого режима нагружения в данной зоне фактическим условиям эксплуатации РУ, но требуется периодическая коррекция теоретических оценок ресурса материала в контролируемых зонах с помощью средств неразрушающего контроля при ремонтах или продлении назначенных сроков службы.

В статье [3] представлены результаты расчетного анализа процессов накопления усталостных повреждений в рабочей части стандартных цилиндрических образцов, изготовленных из стали 08X18H10T и сравнения полученных результатов с экспериментальными данными и с расчетом по «Нормам...» [4].

На рис. 1 представлены кривые накопления усталостных повреждений по «Нормам...» [4] (пунктирная кривая) и согласно методики [2] при регулярном циклическом нагружении цилиндрических образцов: кривая 1 – с амплитудой $\Delta\epsilon_{11} = 0,002$, кривая 2 – с амплитудой $\Delta\epsilon_{11} = 0,003$, кривая 3 – с амплитудой $\Delta\epsilon_{11} = 0,004$. По оси абсцисс отложено отношение N_i/N_{fi} , по оси ординат поврежденность ω .

На рис. 2 приведены результаты расчета усталостной долговечности при трехблочном нагружении с уменьшением амплитуд деформации: $0,004 \Rightarrow \Rightarrow 0,003 \Rightarrow 0,002$.

Пунктирная кривая – расчет по «Нормам...» [4]. Сплошные линии – расчет по методике. Точка А соответствует расчетной поврежденности материала в конце первого блока, точка В – поврежденности в конце второго блока, точка С – поврежденности в конце третьего блока. Поврежденность материала по «Нормам...» [4] измеряется количеством некоторых

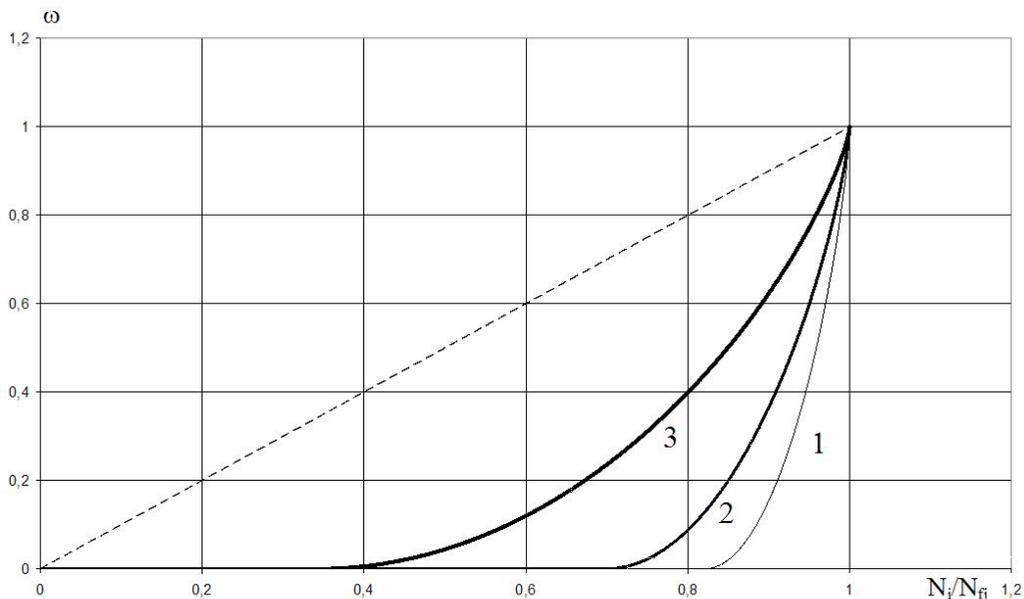


Рис. 1.

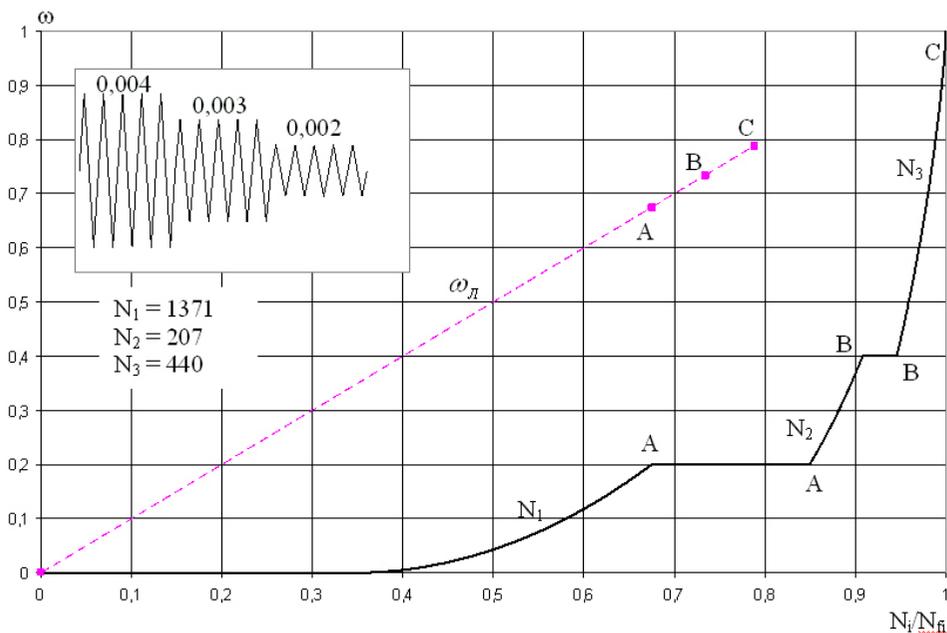


Рис. 2.

приведенных регулярных циклов $\omega_d = \sum \frac{N_i}{N_{fi}}$, где

N_i – количество циклов с некоторой i -ой постоянной амплитудой интенсивности по Мизесу условно-упругих напряжений, N_{fi} – количество предельных циклов при данной амплитуде. Предельное значение $\omega_d = 1$.

На рис. 3 приведены аналогичные результаты при трех блочном нагружении с увеличивающейся амплитудой деформаций $0,002 \Rightarrow 0,003 \Rightarrow 0,004$.

В табл. 1 приведены результаты расчета циклической прочности по энергетическому критерию [2] и по «Нормам...» [4] для данных видов нагружений,

с коэффициентами запаса по напряжениям $n_\sigma = 1$ и по числу циклов $n_N = 1$.

Из анализа результатов видно:

1. Для первого варианта нагружения согласно нелинейного принципа суммирования повреждений

$\omega_f = \sum \frac{N_i}{N_{fi}} = 0,78$, что соответствует результатам

экспериментов при блочном нагружении с уменьшением амплитуды деформаций. При данной истории нагружения образца «Нормы...» [2] согласно критерию $\sum \frac{N}{N_f} = 1$ дают неконсервативную погрешность

долговечности $\sim 22\%$.

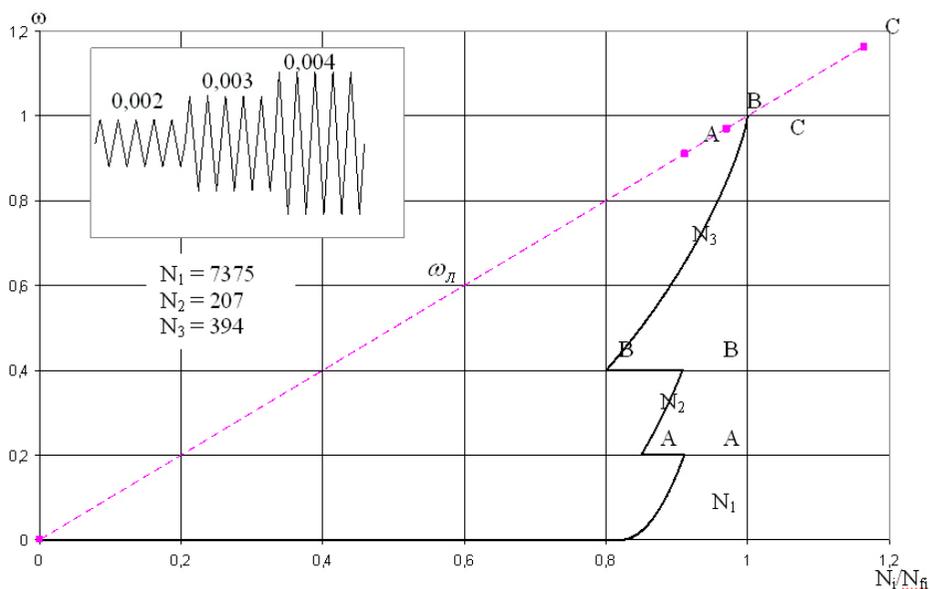


Рис. 3.

Таблица 1

Вариант нагружения	Расчетный подход	Количество циклов при амплитуде деформаций до образования трещины длиной 1мм		
		$\Delta e_{11} = 0,004$	$\Delta e_{11} = 0,003$	$\Delta e_{11} = 0,002$
1	Энергетический	1371	207	440
	Нормативный	1371	207	2153
2	Энергетический	394	207	7375
	Нормативный	61	207	7375

Таблица 2

Номер расчетного узла	Величина поврежденности расчетных узлов		
	по «Нормам...» [4] $n_{\sigma} = 2, n_N = 10$	по «Нормам...»[4] $n_{\sigma} = 1, n_N = 1$	«Ресурс-НН» (ω)
2085	9,75	0,97	0
1675	12,2	1,21	0
1444	17,4	1,745	0
34	10,4	1,04	0
1385	0,06	0,001	0,18
1590	–	–	0,00025

2. Для второго варианта нагружения согласно линейном суммировании повреждений $\sum \frac{N_i}{N_{fi}} = 1,16$.

При данной истории нагружения образца согласно критерию $\sum \frac{N}{N_f} = 1$ «Нормы...» дают консерватив-

ную погрешность долговечности ~ 16 %.

В ОАО «ОКБМ Африкантов» ведется работа по созданию моделей для верификационных испытаний лабораторного образца системы эксплуатационного мониторинга ресурса (ЭМР) РУ. Для данной работы был проведен расчет фланцевого соединения при действии термосилового нагружения. На рис. 4 представлена расчетная конечно-элементная модель с номерами расчетных узлов в наиболее напряженных зонах конструкции. В зонах конструктивных неоднородностей и концентраторов конечно-элементная сетка имеет оптимальное, для обеспечения приемлемой точности вычисления, сгущение.

Было проведено два расчетных анализа данной конструкции в условно-упругой и упругопластической постановке с фактическими свойствами конструкционных материалов. На рис. 5–6 представлены изолинии распределения интенсивности напряжений в момент времени соответствующий максимальному напряжению конструкции.

В табл. 2 представлены результаты расчета величины поврежденности в расчетных узлах КЭС после нагружения определенным количеством термоциклов.

Из анализа результатов расчета по двум подходам можно сделать следующие выводы:

1. Согласно методике «Норм ...» [4] требуемый ресурс данного фланцевого соединения не обеспечен.

2. Согласно методике «Норм ...» [4] требуемый ресурс данного фланцевого соединения не обеспечен.

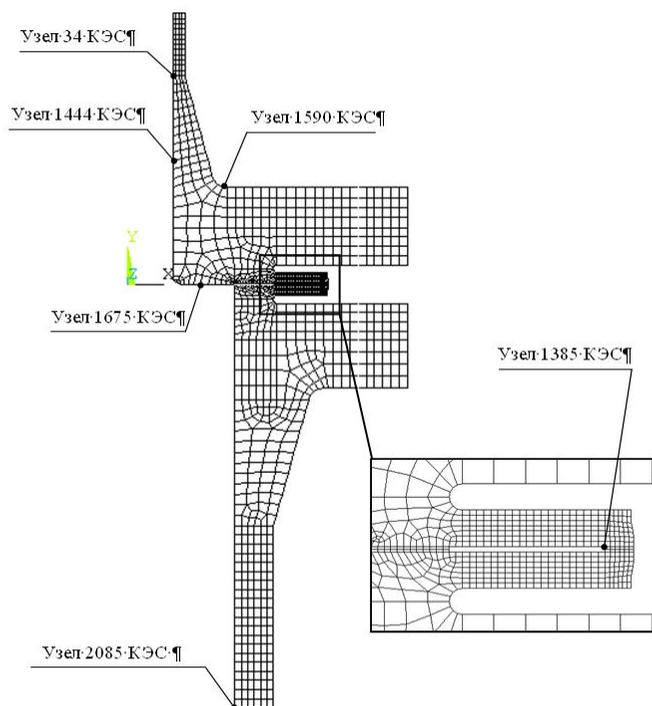


Рис. 4

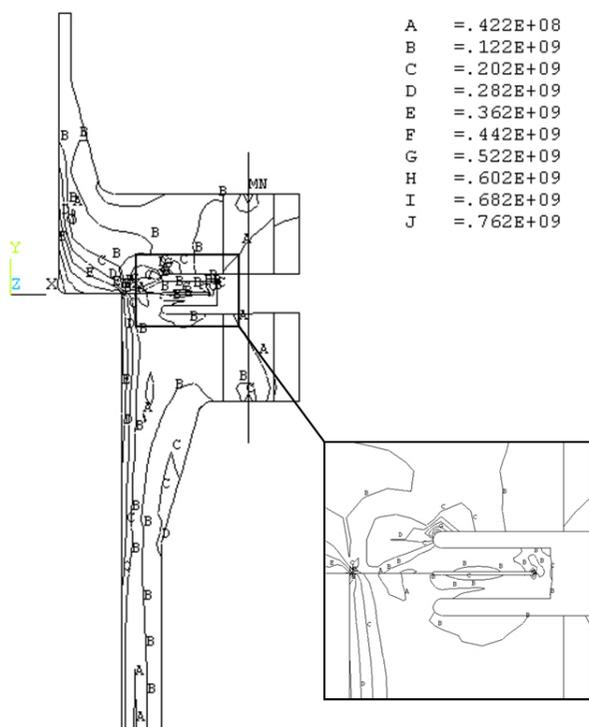


Рис. 5. Изолинии распределение интенсивности напряжений в условно-упругой задаче

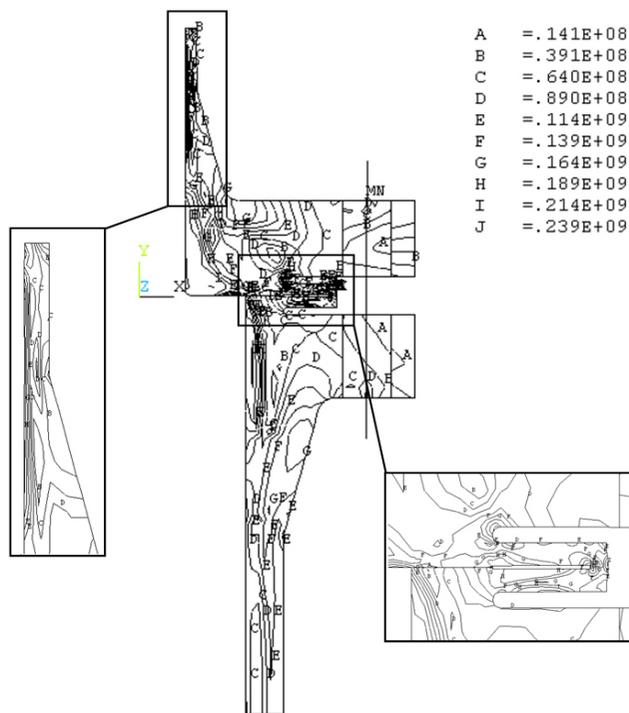


Рис. 6. Изолинии распределение интенсивности напряжений в упругопластической задаче

печивается даже без использования нормативных коэффициентов запаса циклической прочности по напряжениям и числу циклов. В данном случае оценку циклической прочности требуется проводить по результатам ресурсных испытаний.

2. На основании результатов упругопластического расчета показано, что наиболее нагруженной

зоной данного соединения является сварной шов (узел 1385 КЭС) и он будет определять ресурс конструкции в целом. Использование энергетического критерия накопления усталостных повреждений, реализованного в коде программного средства «Ресурс-НН» [2], показало, что ресурс данного фланцевого соединения превышает требуемый на ~ 30 %.

3. Окончательное сопоставление результатов расчета по данным подходам будет проведено после испытания лабораторного образца системы эксплуатационного мониторинга ресурса (ЭМР) РУ.

Литература

1. Митенков Ф. М., Кайдалов В. Б., Коротких Ю. Г., Панов В. А., Пичков С. Н. Методы обоснования ресурса оборудования ЯЭУ. М.: Машиностроение. 2008.

2. Программа Ресурс-НН. Расчет параметров неизотермического деформирования и накопления по-

вреждений в конструкционных материалах оборудования и систем ЯЭУ. Верификационный отчет. Инв. № 11579/10от по учету ОАО «ОКБМ Африкантов».

3. Доклад «Применение энергетического принципа для анализа термоусталостной долговечности конструкционных материалов ЯЭУ» // Сборник докладов седьмой научно-технической конференции «Молодежь в науке». 2009.

4. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / ПНАЭ Г-7-002-86.