

Методология оценки ресурса оборудования и систем реакторной установки на базе механики поврежденной среды

Ф. М. Митенков^а, М. А. Большухин^а, А. В. Козин^а, Ю. Г. Коротких^а,
В. А. Панов^а, В. А. Пахомов^а, А. В. Каплиенко^б

^а ОАО “ОКБМ Африкантов”, Нижний Новгород, Россия

^б Госкорпорация “Росатом”, Москва, Россия

Рассматриваются проблемы, методология и технология решения на базе механики поврежденной среды одной из основных задач современного машиностроения – обоснования прочности и ресурса конструктивных элементов оборудования и систем реакторных установок.

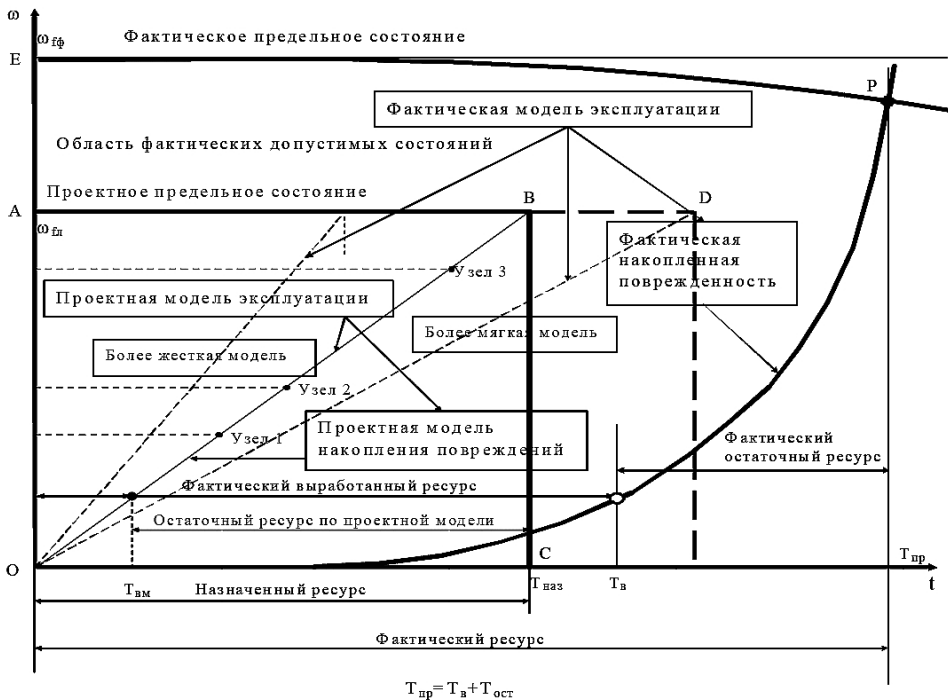
Ключевые слова: ресурс, конструктивные узлы, механика повреждающей среды.

Введение. Основными задачами современного машиностроения являются обоснование ресурса оборудования инженерных объектов на стадии их проектирования и изготовления, оценка выработанного и остаточного ресурса конструктивных узлов оборудования и систем на стадии эксплуатации, продление периода службы после отработки объектами нормативного времени. Особенно актуальны эти задачи для объектов, срок службы которых составляет несколько десятков лет. Эксплуатационные условия реакторных установок (РУ) характеризуются многопараметрическими нестационарными термомеханическими воздействиями, влиянием внешних полей разной природы, вследствие чего развиваются различные деградационные процессы в конструкционных материалах и исчерпывается назначенный ресурс конструктивных элементов.

Для решения этих задач на стадии эксплуатации объекта необходимо осуществлять контроль за исчерпанием индивидуального ресурса наиболее ответственных конструктивных элементов с учетом фактической истории их эксплуатации и изменения предельных состояний материала. В случае отсутствия или ограниченности доступа средств неразрушающего контроля к опасным зонам конструктивных элементов основным способом такого контроля является расчетная оценка выработанного и прогноз остаточного ресурса конструктивных элементов на базе математического моделирования процессов деградации при эксплуатации объекта. Для решения указанной задачи в ОАО “ОКБМ Африкантов” разрабатывается система эксплуатационного мониторинга ресурса (ЭМР), предназначенная для осуществления контроля за выработанным и остаточным ресурсом оборудования и систем ядерных энергетических установок (ЯЭУ) в процессе эксплуатации. Система базируется на данных о начальном состоянии металла, периодической диагностике его технического состояния в доступных местах, математическом моделировании механизмов развития повреждений в материале конструкций, а также о фактически реализуемых режимах эксплуатации.

Данная система должна осуществлять контроль за выработанным и остаточным ресурсом на любой стадии эксплуатации РУ, выявлять потенциальные возможности по долговечности оборудования и систем для обоснования продления их назначенных срока службы и ресурса, оптимизировать при необходимости модель эксплуатации РУ с целью снижения темпов накопления повреждений в ее наиболее нагруженных конструктивных узлах, снижать степень опасности возникновения внезапных отказов и аварийных ситуаций [1].

1. Методология оценки кинетики повреждений в конструкционных материалах. На рисунке представлена схема, иллюстрирующая влияние учета фактической модели эксплуатации РУ и процесса накопления усталостных повреждений на расчетную оценку выработанного и остаточного ресурса. По вертикальной оси отложена текущая поврежденность ω некоторой зоны конструктивного узла, соответствующая наработке t (горизонтальная ось). Прямые линии OB , OD соответствуют линейному закону накопления повреждений $\omega_n = \sum(N_i/N_{fi})$ в соответствии с [2], кривая OP – фактическому физическому закону накопления повреждений $\omega = V/V_f$, где V – текущая объемная доля дефектов; V_f – критическая объемная доля дефектов. Линия AB соответствует критическому значению ω_{fl} с проектными коэффициентами запаса прочности, линия BC – проектному назначенному ресурсу $T_{наз}$ по проектной модели эксплуатации, которой отвечает расчетное линейное накопление повреждений ω_{fl} согласно [2] по линии OB . Физический процесс накопления повреждений ω в этой зоне соответствует линии OC . Учет фактической модели эксплуатации позволяет на базе расчетов в соответствии с [2] при более мягкой фактической модели эксплуатации увеличить назначенный ресурс на наработку (отрезок BD) с сохранением проектных коэффициентов запаса прочности.



Концепция оценки выработанного и остаточного ресурса.

Физическая поврежденность материала ω за назначенный ресурс $T_{\text{наз}}$ из-за нелинейности процесса для фактической модели эксплуатации будет меньше расчетной линейной $\omega_{\text{л}}$. Информация о фактическом изменении начального предельного состояния элементов оборудования и систем в результате деградиционных процессов (кривая EP) при фактических темпах накопления повреждений (кривая OCP) по ФМЭ с коррекцией результатов расчетов неразрушающими методами контроля позволяет установить фактический выработанный ресурс $T_{\text{в}}$, остаточный ресурс ($T_{\text{пр}} - T_{\text{в}}$), фактический коэффициент запаса прочности до наступления предельного состояния (по отношению к верхней ограничивающей кривой EP) и обоснованно продлить назначенный ресурс и срок службы на следующий временной интервал.

Для элементов энергетического оборудования при нестационарных термомеханических нагружениях в диапазоне температур 20...450°C основным деградиционным механизмом является механизм накопления усталостных повреждений, включающий многоцикловую усталость (МнЦУ) при квазиупругой работе материала (пластические деформации в пределах допуска 0,002) и малоцикловую усталость (МЦУ) при нестационарном упругопластическом деформировании материала, где одновременно действуют оба механизма.

2. Моделирование процессов накопления повреждений в конструкционных материалах на базе механики поврежденной среды. Моделирование процессов накопления повреждений в конструкционных материалах основано на введении меры поврежденности на масштабном уровне 10^{-3} ... 10^{-2} м, интегральных параметров механики поврежденной среды (внутренние переменные) и эволюционных уравнений их развития, а также описании механических эффектов влияния поврежденности через внутренние параметры на базе реальных испытаний лабораторных образцов, разработке методов расчета связанных процессов кинетики напряженно-деформированного состояния и накопления повреждений в элементах конструкций по заданной истории эксплуатационных воздействий, методов оценки выработанного и прогноза остаточного ресурса конструктивных элементов на данный момент эксплуатации, установлении корреляции между результатами моделирования и неразрушающего контроля [1].

Основными положениями моделирования процессов накопления усталостных повреждений являются: совместное интегрирование уравнений термопластичности и накопления усталостных повреждений; моделирование двух основных физических стадий процесса накопления усталостных повреждений; введение адекватного “внутреннего времени” процессов (энергии, затраченной на образование и рост дефектов) для измерения наработки материала и установления критерия их эквивалентности; учет влияния вида траектории деформирования и вида напряженного состояния на темпы накопления повреждений; учет нелинейного суммирования повреждений; формулировка на основе энергетического подхода принципов эквивалентности процессов для различных режимов нагружения и напряженно-деформированного состояния.

Методы, основанные на адекватном математическом моделировании физических процессов дегградации материала, позволяют проанализировать и спрогнозировать развитие поврежденности в любой зоне конструктивных

элементов по фактической истории их нагруженности с учетом конструктивных, технологических, эксплуатационных и физических особенностей каждой зоны. Точность расчетных оценок выработанного ресурса зависит от точности регистрации фактической истории нагруженности этих зон. Полученные расчетные значения поврежденности материала должны корректироваться путем периодического неразрушающего контроля состояния материала в доступных зонах современными физическими методами.

При разработке адекватных математических моделей накопления усталостных повреждений необходимо [1]: ввести физическую меру поврежденности материала, которая поддается измерению физическими неразрушающими методами контроля состояния материала, и меру наработки материала, справедливую для любого характера нагружения данной критической зоны; учитывать многоосность напряженно-деформированного состояния и вращение главных площадок тензоров напряжений и деформаций, а также нелинейный характер процесса накопления повреждений и нелинейное суммирование повреждений при изменении режима нагружения рассматриваемой зоны материала; установить принцип эквивалентности процессов накопления повреждений при различных видах нагружения исследуемой зоны материала.

Простой скалярной физической мерой поврежденности материала ω является относительная объемная доля дефектов в эталонном элементарном объеме материала:

$$\omega = \frac{V}{V_f}; \quad \Delta\omega = \frac{\Delta V}{V_f}; \quad \omega = \sum \Delta\omega; \quad 0 \leq \omega \leq \omega_f \leq 1, \quad (1)$$

где V – текущая объемная доля дефектов; V_f – критическая объемная доля, соответствующая зарождению макроскопической трещины (полной потере несущей способности материала в данном объеме). Текущая объемная доля дефектов V достаточно хорошо контролируется новыми физическими методами неразрушающего контроля [1].

Адекватной мерой наработки материала в процессе накопления усталостных повреждений является плотность энергии (часть полной удельной энергии в рассматриваемом объеме материала), затраченная на образование дефектов в данном объеме [1]. Предельное состояние последнего наступает по достижении энергией, затраченной на образование дефектов, критической величины. На базе энергетического подхода возможно объединение данных на микро- и макроскопическом уровнях и формирование многоосных моделей усталости материала [1].

В работе [3] было показано, что при малоциклового усталости энергия, затраченная на образование дефектов при нестационарном упругопластическом деформировании, хорошо коррелирует с работой W_p тензора микронапряжений (координата центра поверхности текучести F) ρ_{ij} на пластических деформациях e_{ij}^p :

$$W_p = \int \rho_{ij} de_{ij}^p; \quad (2)$$

$$F = [(\sigma'_{ij} - \rho_{ij})(\sigma'_{ij} - \rho_{ij})]^{1/2} - C_p = 0, \quad (3)$$

где σ'_{ij} – компоненты девиатора напряжений; e_{ij}^p – компоненты тензора пластических деформаций; C_p – радиус поверхности текучести.

Многоосность напряженного состояния существенно влияет на усталостную долговечность, причем это проявляется двояко: влияние, собственно, многоосности при пропорциональном нагружении и вращения главных площадок тензора деформаций (когда компоненты напряжений меняются не в фазе) [3].

В инженерных расчетах в качестве эквивалентных напряжений или деформаций, как правило, рекомендуется выбирать интенсивности соответствующих тензоров [1]:

$$\sigma_{\text{и}} = (\sigma'_{ij}\sigma'_{ij})^{1/2}; \quad e_{\text{и}} = (e'_{ij}e'_{ij})^{1/2}. \quad (4)$$

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что эти параметры играют важную роль в зарождении усталостных трещин.

Экспериментальные и теоретические исследования по оценке влияния многоосности напряженных состояний (двухосное растяжение–сжатие, трехосное растяжение) [3] свидетельствуют о существенном влиянии на усталостную долговечность “жесткости” напряженного состояния, для характеристики которой часто используется параметр β , определяемый интенсивностью тензора напряжений $\sigma_{\text{и}}$ и его шаровой (гидростатической) компонентой σ :

$$\beta = \frac{\sigma}{\sigma_{\text{и}}}; \quad \sigma = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} = \frac{\sigma_{ii}}{3}. \quad (5)$$

Экспериментальный и теоретический анализ процессов повреждаемости материала с позиции физики твердого тела показал, что характеристики напряженного состояния σ и $\sigma_{\text{и}}$ играют определяющую роль при зарождении и накоплении дефектов. Процессы зарождения и накопления дефектов в твердом теле могут протекать только в том случае, если девиаторная часть тензора напряжений $\sigma_{\text{и}}$ отличается от нуля [1].

Обобщая известные из литературных источников данные [1, 3, 4], можно утверждать, что скорость процесса накопления усталостных повреждений $\dot{\omega}$ зависит от жесткости напряженного состояния, характеризующегося некоторой функцией $f_1(\beta)$: $\dot{\omega}$ увеличивается при $\beta > 0$ и $\beta \rightarrow +\infty$ (всестороннее трехмерное растяжение) и уменьшается при $\beta < 0$ и $\beta \rightarrow -\infty$. При $\beta = 0$ (чистый сдвиг, $\sigma = 0$) нормированная функция $f_1(\beta)$ должна равняться единице.

Влияние непропорциональности нагружения, при котором компоненты тензоров напряжений и деформаций меняются не в фазе (главные площадки тензоров вращаются), а тензора напряжений и пластических деформаций не соосны, заключается в следующем [3]:

форма траектории деформирования существенно влияет на усталостную долговечность [1, 3];

для конструкционных материалов отмечается сложное циклическое поведение в условиях многоосного непропорционального нагружения;

при непропорциональном циклическом нагружении критерии (4) не являются критерием эквивалентности и могут привести к неконсервативным оценкам.

Экспериментально установлено, что процесс накопления усталостных повреждений до образования макроскопической трещины состоит из стадии зарождения и роста пор и стадии развития поврежденности путем слияния образовавшихся микропор в микроскопические трещины, при которой наблюдается прогрессирующее влияние поврежденности на физико-механические характеристики материалов.

Суммирование приведенных выше результатов позволяет общую структуру эволюционного уравнения накопления усталостных повреждений в элементарном объеме материала представить в виде [1, 3]

$$d\omega = f_1(\theta)f_2(\beta)f_3(\omega)f_4(z) < \Delta z >; \quad \omega = \int d\omega. \quad (6)$$

Здесь функции f_i описывают: $f_1(\theta)$ – влияние кривизны траектории деформирования; $f_2(\beta)$ – влияние вида (жесткости) напряженного состояния; $f_3(\omega)$ – влияние накопленной поврежденности; $f_4(z)$ – влияние накопленной на второй стадии относительной энергии W_p , затраченной на образование дефектов:

$$z = \frac{W_p - W_a}{W_f - W_a}, \quad (7)$$

где W_p – текущее значение энергии; W_a – значение этой энергии, соответствующее окончанию первой стадии процесса накопления повреждений.

Уравнение (6) интегрируется совместно с уравнениями термопластичности вдоль траектории деформирования. При вычислении энергии W_p [1, 3] эти уравнения позволяют учитывать влияние многоосности и непропорциональности нагружения.

Одно из простейших конкретных представлений уравнения (6) при упругопластическом деформировании имеет вид [3, 4]

$$d\omega = \psi \frac{(\alpha + 1)}{(r + 1)} f(\beta) z^\alpha (1 - \omega)^{-r} dz \quad (8)$$

или

$$\Delta\omega = \psi \frac{(\alpha + 1)}{(r + 1)} f(\beta) z^\alpha (1 - \omega)^{-r} < \Delta z >; \quad (9)$$

$$\omega = \sum \omega;$$

$$\psi = [\cos \theta - (1 - \cos \theta)b]; \quad 1 \leq b \leq 10; \quad (10)$$

$$\cos \theta = \frac{e'_{ij} \Delta e'_{ij}}{(e'_{ij} e'_{ij})^{1/2} (\Delta e'_{ij} \Delta e'_{ij})^{1/2}}, \quad (11)$$

где α, r, b – экспериментально определяемые параметры материала; $e'_{ij}, \Delta e'_{ij}$ – девиаторные компоненты и приращения девиаторных компонент тензора полных деформаций.

Интегрируя уравнение (8) вдоль траектории деформирования, получаем

$$\omega = 1 - \left\{ 1 - (\alpha + 1) \int_0^z \psi f(\beta) z^\alpha dz \right\}^{1/(r+1)}, \quad (12)$$

или

$$\omega = 1 - \left\{ 1 - (\alpha + 1) \sum_1^n \psi_j f_j(\beta_j) z_j^\alpha \Delta z_j \right\}^{1/(r+1)}, \quad (13)$$

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

Введем новую переменную

$$y = Az, \quad (14)$$

где

$$A = \left\{ \frac{\alpha + 1}{z^{(\alpha+1)}} \int_0^z \psi f(\beta) z^\alpha dz \right\}^{1/(\alpha+1)}, \quad (15)$$

или

$$A = \left\{ \frac{\alpha + 1}{z_j^{(\alpha+1)}} \sum_1^n \psi_j f_j(\beta_j) z_j^\alpha < \Delta z_j > \right\}^{1/(\alpha+1)}, \quad (16)$$

и представим уравнения (12), (13) в обобщенном виде, справедливом для любого неизотермического процесса накопления усталостных повреждений:

$$\omega = 1 - [1 - y^{\alpha+1}]^{1/(r+1)}. \quad (17)$$

Для пропорциональных процессов (траектории деформирования близки к прямым, $f_k(\beta_k) = \text{const}$, $\cos \theta = 1$) имеем

$$A = f(\beta); \quad y = f(\beta)z; \quad y_f = f(\beta). \quad (18)$$

При чистом кручении ($f(\beta) = 1$) запишем $y = z$.

При регулярном циклическом нагружении уравнение (17) принимает вид

$$\omega = 1 - \left[1 - \left(\frac{N}{N_f} \right)^{\alpha+1} \right]^{1/(r+1)} \quad (19)$$

и при $\alpha = 0$, $r = 0$ соответствует правилу линейного суммирования повреждений.

Параметр A является обобщенной относительной энергетической характеристикой данного процесса накопления повреждений и показывает, во сколько раз темп накопления повреждений в этом случае отличается от такового при чистом кручении. Процессы с равными значениями $y(W_p)$ эквивалентны, кривая $\omega(y)$ – обобщенная кривая для исследуемого материала, которая может быть построена по результатам испытаний лабораторных образцов на одноосное растяжение–сжатие. Параметр y является относительным “внутренним временем” данного процесса, в котором измеряется физическая наработка материала рассматриваемого элементарного объема.

На базе данного математического подхода разработан метод, позволяющий контролировать выработанный и прогнозировать остаточный ресурс в контролируемых зонах конструктивных узлов ЯЭУ в процессе эксплуатации. Этот метод по сравнению с “Нормами расчета ...” [2] учитывает физическую меру поврежденности материала (относительную долю образовавшихся дефектов в объеме материала), которая может контролироваться современными методами неразрушающего контроля состояния материала, физические процессы неизотермического упругопластического деформирования материала, нелинейные многоосные процессы накопления и суммирования усталостных повреждений.

Адекватное моделирование указанных процессов позволяет надежно контролировать выработанный и прогнозировать остаточный ресурс критических конструктивных элементов оборудования и систем ЯЭУ с учетом обоснованных коэффициентов запаса прочности на базе накапливающейся при мониторинге ресурса информации об истории их эксплуатационной нагруженности.

Резюме

Розглядаються проблеми, методологія і технологія розв'язку на базі механіки пошкодженого середовища однієї з основних задач сучасного машинобудування – обґрунтування міцності і ресурсу конструктивних елементів обладнання і систем реакторних установок.

1. Митенков Ф. М., Кайдалов В. Б., Коротких Ю. Г. и др. Методы обоснования ресурса ЯЭУ. – М.: Машиностроение, 2007. – 445 с.
2. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
3. Волков И. А., Коротких Ю. Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. – М.: Физматлит, 2008. – 424 с.
4. Митенков Ф. М., Коротких Ю. Г., Кайдалов В. Б. Методология, методы и средства управления ресурсом ядерных энергетических установок. – М.: Машиностроение, 2006. – 596 с.

Поступила 03. 10. 2012