

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ АЭС С ПОЗИЦИИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Докт. техн. наук, проф. ЛЕОНОВИЧ С. Н.

Белорусский национальный технический университет

В связи со строительством в Республике Беларусь атомной электрической станции особую актуальность приобретает расчетное обоснование ресурса и безопасной эксплуатации несущих конструкций АЭС.

Количественный анализ условий прочности, долговечности, живучести при возникновении и развитии аварийных ситуаций потенциально опасных элементов атомных станций проводят для таких стадий жизненного цикла, как [1–3]:

- проектирование;
- изготовление;
- испытания и доводка;
- эксплуатация.

Состояние вопроса. Основы оценки ресурса работы элементов атомных станций заложены в [3, 4]. Расчетное обоснование ресурса и безопасной эксплуатации несущих конструкций АЭС нужно проводить поэтапно с учетом непрерывного развития традиционных инженерных подходов: на прочность, жесткость и устойчивость (с применением методов сопротивления материалов); на прочность и циклический ресурс, долговечность (с применением методов теории много- и малоциклового усталости); на прочность и временной ресурс – долговечность (с применением методов теории ползучести и длительной прочности); на сопротивление хрупкому разрушению и радиационный ресурс (с учетом изменения физико-механических свойств под действием облучения); на динамическую прочность и ресурс (с применением методов динамики деформирования и разрушения); на трещиностойкость (с применением методов линейной и нелинейной механики разрушения) [3, 4].

Механика разрушения применительно к несущим конструкциям АЭС. Базовые соотношения механики деформирования и разрушения, а также механики катастроф в общем случае можно записать в виде

$$\{S, R_{t,N}, P, R_{\sigma}\} = F\{f^{\circ}(P^{\circ}, t, N, \tau, \Phi) f_{\sigma} \times \\ \times (\sigma_b, \sigma_T, \sigma_{bT}, \sigma_{-1}, E, \lambda, H_B, m, \psi, K_{lc}) f_l(l, \alpha_{\sigma}, F_i)\}, \quad (1)$$

где S – характеристики безопасности; $R_{t,N}$ – то же ресурса; P – то же надежности; R_{σ} – то же прочности (сопротивления разрушению); f° – функционал эксплуатационной нагруженности; P° – параметры эксплуатационной нагруженности в нормальных и аварийных ситуациях; t – температура в данный момент времени; N – число циклов нагружения; τ – время эксплуатации; Φ – параметры полей физических воздействий (радиация, среда, магнитные поля); f_{σ} – функционал физико-механических свойств конструкционных материалов; σ_b – предел прочности; σ_T – то же текучести; σ_{bT} – то же длительной прочности; σ_{-1} – то же выносливости; E – модуль упругости; λ – коэффициент теплопроводности; H_B – твердость (микротвердость); m – показатель упрочнения в упруго-пластической области; ψ_c – предельная пластичность материала; K_{lc} – характеристика трещиностойкости; f_l – функционал конструктивных форм несущего элемента конструкции; l – размер дефекта; α_{σ} – теоретический коэффициент концентрации напряжений; F_i – характеристика поперечного сечения в рассматриваемой зоне.

Расчеты живучести несущих элементов АЭС необходимо проводить по критериям трещиностойкости. Эти расчеты отражают способность сопротивляться действию механических, тепловых, гидродинамических, электромагнитных нагрузок при наличии в элементах дефектов (исходных технологических или возникающих при эксплуатации). Наиболее опасными из дефектов являются микро- и макротрещины, создающие предельно высокую концентрацию

напряжений и деформаций. Характеристиками живучести для поврежденных дефектами элементов могут являться ресурс, прочность и надежность

$$\{R_{\tau, N}, P, R_{\sigma}\} = F\{f^{\sigma}(P^{\sigma}, t, N, \tau, \Phi) f_{\sigma} \times \\ \times (\sigma_b, \sigma_T, \sigma_{bt}, \sigma_{-1}, E, \lambda, H_B, m, \psi, K_{Ic}) f_l(l, \alpha_{\sigma}, F_i)\}. \quad (2)$$

Основные расчетные уравнения для нормальных условий эксплуатации (когда номинальные и местные напряжения находятся в пределах упругости $\{\sigma_n^{\sigma}, \sigma_{\max, k}^{\sigma}\} \leq \{\sigma_T\}$) могут быть получены на базе линейной механики разрушения – при однократном нагружении, действии длительных и циклических нагрузок [5].

Применительно к наиболее опасному хрупкому разрушению имеем

$$\{P, R_{\sigma}\} = F\{f^{\sigma}(P^{\sigma}, t, \Phi) f_{\sigma}(K_{Ic}) f_l(l)\}. \quad (3)$$

Расчеты прочности R_{σ} по критериям трещиностойкости сводятся к определению расчетных дефектов l , выбору наибольших эксплуатационных нагрузок P^{σ} и соответствующих им минимальных температур t , учету воздействий физических полей Φ и специальному экспериментальному определению показателей трещиностойкости конструкционных материалов (критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic}) [6]. При этом параметры вероятности хрупкого разрушения P могут быть оценены с учетом рассеяния характеристик P^{σ} , Φ , K_{Ic} и l .

Сопrotивление хрупкому разрушению можно свести к удовлетворению соотношений

$$K_I^{\sigma} = f(P_{\max}^{\sigma}, t_{\min}, l) \leq [K_I] = \frac{K_{Ic}}{n_k}, \quad (4)$$

где $[K_I]$ – допустимое значение коэффициента интенсивности напряжений с учетом минимальной температуры эксплуатации t_{\min} ; n_k – запас по критическому коэффициенту интенсивности напряжений K_{Ic} , определяемому при температуре t_{\min} .

С учетом выраженной зависимости K_{Ic} от t_{\min} конструкционных сталей расчет по K_I^{σ} можно дополнять расчетом по критическим температурам хрупкости

$$t_{\min}^{\sigma} = f(l, F) \geq [t] = t_c + [\Delta t_c], \quad (5)$$

где $[t]$ – допустимая минимальная температура эксплуатации; t_c – критическая температура хрупкости, соответствующая резкому снижению K_{Ic} ; $[\Delta t_c]$ – запас по критическим температурам хрупкости.

Поскольку номинальные напряжения при хрупких разрушениях по уравнениям линейной механики разрушения зависят от размеров дефектов l и размеров поперечных сечений F_i , расчеты живучести по критериям трещиностойкости можно сводить к расчетам допустимых размеров дефектов $[l]$

$$l_{\max}^{\sigma} = f(K_{Ic}, F, \Phi, P_{\max}^{\sigma}) \leq [l] = \frac{l_c}{n_l}, \quad (6)$$

где l_{\max}^{σ} – максимальный размер дефекта при эксплуатации, устанавливаемый средствами дефектоскопии; l – критический размер дефекта; n_l – запас по размеру дефекта.

Ресурс $R_{\tau, N}$ на стадии развития дефектов при нормальных условиях эксплуатации по критериям трещиностойкости определяют в соответствии с (2) на основе диаграмм разрушения при длительном статическом или циклическом нагружении, связывающих скорости роста трещин l (по времени τ или по числу циклов N):

$$\{R_{\tau, N}\} = F\{f^{\sigma}(P^{\sigma}, t, N, \tau, \Phi) f_{\sigma}(K_{Ic}) f_l(l, F_i)\} = \\ = f\left(\frac{dl}{d\tau}, \frac{dl}{dN}, K_{Ic}\right). \quad (7)$$

При этом ресурс получают путем интегрирования уравнения для диаграммы разрушения по текущему размеру дефекта

$$\{R_{\tau, N}\} = \int_{l_0}^{l_c} dl_{\tau, N} \leq [\tau, N] = \left\{ \frac{\tau_c}{n_{\tau}}, \frac{N_c}{n_N} \right\}, \quad (8)$$

где l_c – критический размер дефекта, устанавливаемый по соотношениям (3), (6); l_0 – исходный (начальный) дефект на данной стадии эксплуатации; $[\tau, N]$ – допустимое время или число циклов эксплуатационного нагружения; n_{τ} , n_N – запасы по ресурсу.

Характеристики надежности P по параметрам временного или циклического ресурса мо-

гут быть найдены так же, как для случая хрупкого разрушения, по формулам (3)–(6) при введении в расчет функций распределения для P^0 , t , Φ , K_{Ic} , l . Эти расчеты можно сводить к установлению запасов по минимально допустимым (для заданной вероятности) K_{Ic} и максимально возможным (для той же вероятности) скоростям трещин (dl/dt и dl/dN) и уровням нагрузок P^0 .

Для аварийных ситуаций расчеты живучести по критериям трещиностойкости проводят в соответствии с (2)–(8). При этом для данного момента развития аварийной ситуации следует использовать соответствующие экстремальные уровни нагрузок P_{\max}^0 , минимальные и максимальные уровни температур t , максимальные размеры дефектов l и минимальные характеристики механических свойств. Для анализа живучести в аварийных ситуациях следует использовать уравнения нелинейной механики разрушения с полным набором расчетных параметров (2). Базовые характеристики линейной механики разрушения – коэффициенты интенсивности напряжений K_I и K_{Ic} заменяют на характеристики нелинейной механики разрушения: δ – раскрытие трещин; J – интеграл; I – предел трещиностойкости; T – критерий.

Для обеспечения сопоставимости результатов анализа живучести в нормальных условиях эксплуатации и при аварийных ситуациях рекомендуется использовать условные значения коэффициентов интенсивности напряжений, определяемых через коэффициенты интенсивности деформаций

$$K_I^* = f(K_{Ic}, E, m, \sigma_n^0 / \sigma_T). \quad (9)$$

Нелинейную механику деформирования и разрушения, а также механику катастроф как фундаментальную научную дисциплину следует рассматривать в качестве научной основы анализа источников возникновения и процессов развития аварийных и катастрофических ситуаций в сложных технических системах с повышенной потенциальной опасностью; проектирования по традиционным и новым критериям живучести и безопасности; принятия решений о допустимости реализации проектов, возможной эксплуатации и продлении ресурса безопасной эксплуатации.

Механика разрушения и механика катастроф позволяют назначить показатели ресурса и безопасности с использованием расчетно-экспериментального обоснования прочности, ресурса, надежности и живучести для всех стадий жизненного цикла конструкций.

ВЫВОДЫ

Безопасность АЭС с позиций механики катастроф следует рассматривать как комбинированную способность несущих элементов потенциально опасных технических систем противостоять всем неблагоприятным наиболее вероятным факторам экстремально высоких внешних и внутренних воздействий при наиболее вероятных пониженных характеристиках сопротивления деформациям и разрушению.

Безопасность S в нормальных условиях и при возникновении аварийных ситуаций можно считать обеспеченной, если удовлетворяется комплекс требований не только к запасам прочности, но и трещиностойкости в наиболее опасные моменты возникновения и развития аварий.

Разработанные базовые подходы прошли многоуровневую проверку во время длительной стажировки автора на атомной станции в г. Бушер (Исламская Республика Иран).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Нормы** расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
2. **Исследования** напряжений и прочности ядерных реакторов. – М.: Наука, 1987–1990. – Т. 1. – 232 с. – Т. 2. – 312 с. – Т. 3. – 296 с.
3. **Прочность** конструкций при малоцикловом нагружении / Н. А. Махутов [и др.]. – М.: Наука, 1983. – 272 с.
4. **Mahoutov, N. A.** Bases for estimation of power stations elements service life / N. A. Mahoutov, M. M. Gadenin // Diagnostics, prediction and improvement of structural element durability. Edit. V.V. Panasyuk. – Lviv: Physico-mechanical institute, 1999. – P. 15–25.
5. **Леонович, С. Н.** Прочность конструкционных бетонов при циклическом замораживании-оттаивании с позиции механики разрушения / С. Н. Леонович. – Брест: БрГТУ, 2006. – 380 с.
6. **Гузеев, Е. А.** Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики / Е. А. Гузеев, С. Н. Леонович, К. А. Пирадов. – Брест: БПИ, 1999. – 215 с.

Поступила 17.07.2008