

Моделирование процессов усталости конструкционных материалов реакторных установок в диапазоне долговечности $10^2 \dots 10^{12}$ цикл*

М. А. Большухин^а, М. Н. Ереев^а, А. В. Козин^а, В. А. Панов^а, А. В. Каплиенко^б

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

^б Госкорпорация “Росатом”, Москва, Россия

Представлена совместная модель эволюционного уравнения накопления усталостных повреждений в конструкционных материалах реакторных установок при мало- и многоциклового усталости. Достоверность предложенной модели обоснована путем сопоставления численных результатов с экспериментальными.

Ключевые слова: мало- и многоцикловая усталость, численный эксперимент, накопление повреждений.

Введение. Одними из основных характеристик объекта являются его прочность и долговечность. Исходная, заложенная при проектировании объекта, прочность снижается при его эксплуатации в результате развития в объеме материала конструктивных элементов деградиационных процессов, которые вызваны эксплуатационными воздействиями, имеющими, как правило, разные инкубационные периоды, протекающие скрытно для возможных средств эксплуатационного контроля состояния конструкционного материала. Общее свойство этих деградиационных процессов – зарождение и распространение в конструктивном элементе макроскопических трещин ввиду его недостаточной остаточной прочности. Момент снижения остаточной прочности до допустимого уровня определяет величину долговечности (ресурса) данного элемента. Одними из основных деградиационных механизмов конструктивных элементов реакторной установки являются механизмы много- и малоциклового усталости [1], особенность которых заключается в достаточно большом инкубационном периоде до зарождения усталостной трещины длиной 1-2 мм, которую можно обнаружить современными средствами неразрушающего контроля. Важной особенностью разрушения при усталости является локальный характер процессов накопления повреждений. Стадия роста усталостной макротрещины расширяет “область усталости”, но и в этом случае она ограничена окрестностью траектории развития трещины (в основном в области ее фронта). Поэтому такое обобщенное понятие, как ресурс конструктивного элемента, на практике определяется долговечностью совокупности отдельных критических областей материала элементов с наибольшей интенсивностью накопления усталостных повреждений, зависящей от режимов эксплуатации реакторной установки.

Для обоснования долговечности реакторных установок важными, с практической точки зрения, являются усталостные механизмы деградации прочностных характеристик конструкционных материалов, охватывающие две характерные области циклического деформирования – мало- ($N_f \leq 10^4$ цикл) и многоцикловую ($N_f > 10^5$ цикл) усталости. В интервале долговечности $10^4 \dots 10^5$ цикл расположена область, в которой одновременно действуют оба механизма. Учет их взаимодействия особенно необходим для анализа долговечности элементов конструкций при двухчастотном нагружении. Несмотря на многочисленные исследования закономерностей накопле-

* Доклад на Международной научно-технической конференции “Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций” (Киев, 2013).

ния усталостных повреждений, в настоящее время практически отсутствуют эффективные методы одновременного учета действия механизмов мало- и многоциклового усталости.

Эволюционное уравнение накопления усталостных повреждений. В работе [1] изложены основные положения математической модели малоциклового усталости конструкционных сталей и результаты ее верификации. В [2] предложена модель многоциклового усталости, основанная на энергетическом критерии, и приведены основные результаты ее экспериментального обоснования.

Постулируется, что структура эволюционного уравнения накопления повреждений при совместном действии механизмов мало- и многоциклового усталости имеет вид

$$\dot{\omega}_i = \frac{(\alpha_i + 1)}{(r_i + 1)} f(\beta) z_i^{\alpha_i} (1 - \omega_i)^{-r_i} \dot{z}_i, \quad i = e, p, \quad (1)$$

где α_i, r_i, k_i – материальные параметры, зависящие от температуры T ; $f(\beta) = \exp(-k_i \beta)$ – функция параметра напряженного состояния, $\beta = \sigma/\sigma_n$; σ_n – интенсивность амплитуды напряжений; $z_p = (W_p - W_a)/(W_p^f - W_a)$ – относительная энергия разрушения при малоциклового усталости.

Принимаем, что относительная “опасная” энергия, затрачиваемая на зарождение и развитие микродефектов при многоциклового усталости, составляет долю общей “упругой” удельной энергии W_e , которая определяется функцией $f(\gamma)$:

$$z_e = \frac{W_e}{W_e^f} [1 - f(\gamma)]; \quad (2)$$

$W_p, W_e[1 - f(\gamma)]$ – энергии, расходуемые на образование рассеянных усталостных повреждений при мало- и многоциклового усталости соответственно; W_a – значение W_p в конце фазы зарождения микродефектов при малоциклового усталости; W_p^f, W_e^f – значения энергий, соответствующих зарождению макроскопической трещины при мало- и многоциклового усталости соответственно.

Моделирование процесса накопления усталостных повреждений при многоциклового усталости основано на гипотезе Трощенко, на базе которой предложен критерий определения “опасной” энергии (2).

Функция $f(\gamma)$ в формуле (2) учитывает степень влияния механизма многоциклового усталости на долговечность конструкционного материала. Предлагается аппроксимация данной функции системой уравнений, графически представленной на рис. 1:

$$f(\gamma) = \begin{cases} 1, & \gamma < 1; \\ 1 - b^* \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma^* - 1} \right)^m, & 1 \leq \gamma \leq \gamma^*; \\ 1 - b^*, & \gamma \geq \gamma^*, \end{cases} \quad (3)$$

где $\gamma = \sigma_n/\sigma_n^y$; $b^*, \gamma^* = \sigma_n^*/\sigma_n^y, m, \sigma_n^y$ – экспериментально определяемые материальные параметры; σ_n^* – интенсивность амплитуды напряжений, выше которой вклад многоциклового усталости в усталость постоянен.

При определении материального параметра γ^* значение σ_n^* принимается равным $\sigma_n^* = \sigma_{nT}$, а σ_n^y соответствует принятому пределу выносливости материала (в

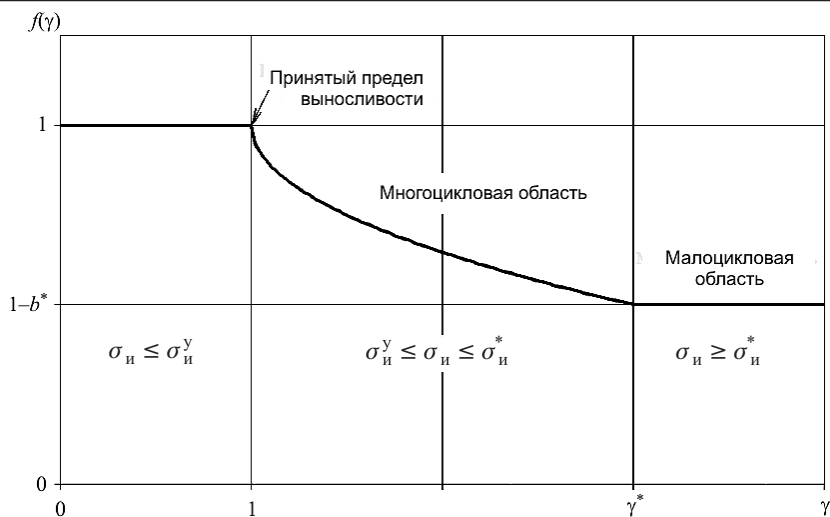


Рис. 1. Графическое представление функции $f(\gamma)$.

предварительных расчетах σ_n^y отвечает напряжению, при котором число циклов до разрушения $N_{fy} \approx 10^{12}$). Изменяя предел выносливости материала σ_n^y , можно контролировать предельное число циклов до разрушения.

Интервал $\gamma \in (0, 1)$ (ниже назначенного предела выносливости) соответствует области отсутствия условий зарождения усталостной трещины, интервал $\gamma \in (1, \gamma^*)$ – области образования усталостной трещины по механизму многоциклового усталости, а $\gamma > \gamma^*$ – области образования усталостной трещины по совместному механизму мало- и многоциклового усталости.

Оценка достоверности. Для оценки достоверности эволюционного уравнения накопления усталостных повреждений использовалась экспериментальная информация о кривой усталости стали 08X18H12T (исходное состояние) [3] в диапазоне долговечности $10^2 \dots 10^6$ цикл. Сопоставление результатов численного эксперимента с натурным показывает адекватность математического моделирования накопления усталостных повреждений при совместном действии механизмов мало- и многоциклового усталости.

В работе [3] представлены экспериментальные данные о циклическом неупругом деформировании и усталостном разрушении гладких цилиндрических образцов из конструкционных сталей – среднеуглеродистой стали 20 (состояние поставки), аустенитной стали 08X18H12T в исходном состоянии и после эксплуатационной наработки при одночастотном (мало- и многоцикловое) нагружении.

Каждый из вышеперечисленных материалов исследовали при следующих режимах нагружения:

№ 1 – одночастотное высокочастотное нагружение при симметричном цикле (рис. 2,а). Частота нагружения 34 Гц;

№ 2 – одночастотное высокочастотное нагружение при асимметричном цикле (рис. 2,б). Среднее напряжение цикла $\sigma_m = 50$ МПа. Частота нагружения 34 Гц;

№ 3 – одночастотное низкочастотное (малоцикловое) нагружение (рис. 2,в). Среднее напряжение цикла $\sigma_m = 50$ МПа. Частота нагружения 0,082 Гц.

Для оценки достоверности предложенной модели проводилось численное моделирование указанных экспериментальных процессов для аустенитной стали 08X18H12T (исходное состояние), механические свойства которой при температуре

20°С следующие: $\sigma_B = 555$ МПа; $\sigma_{0,2} = 275$ МПа; $\delta = 66\%$; $\psi = 50\%$ [3]. Поскольку имеющейся информации о физико-механических характеристиках материала недостаточно [3], при расчетах использовались данные о стали аустенитного класса 08X18H10T [1].

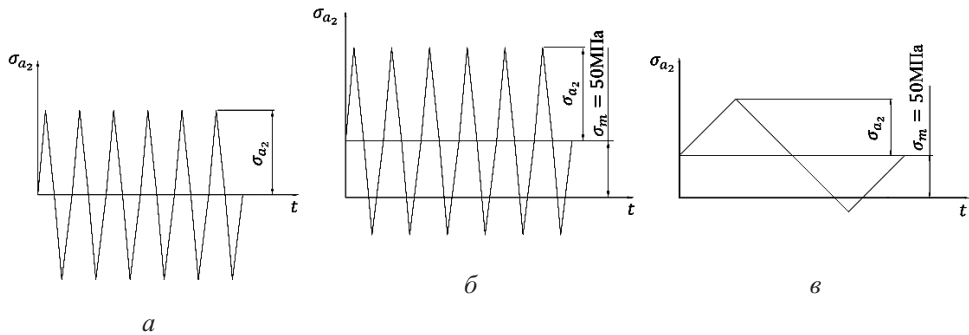


Рис. 2. Режимы нагружения.

Для данной конструкционной стали были получены следующие материальные параметры математической модели многоциклового усталости: $b^* = 0,3$; $\gamma^* = 1$; $m = 8$; $\sigma_{и}^y = 180$ МПа; $W_e^f = 1000$ МДж/м³.

Основные результаты расчетов величины усталостных повреждений в зависимости от числа циклов нагружения приведены на рис. 3.

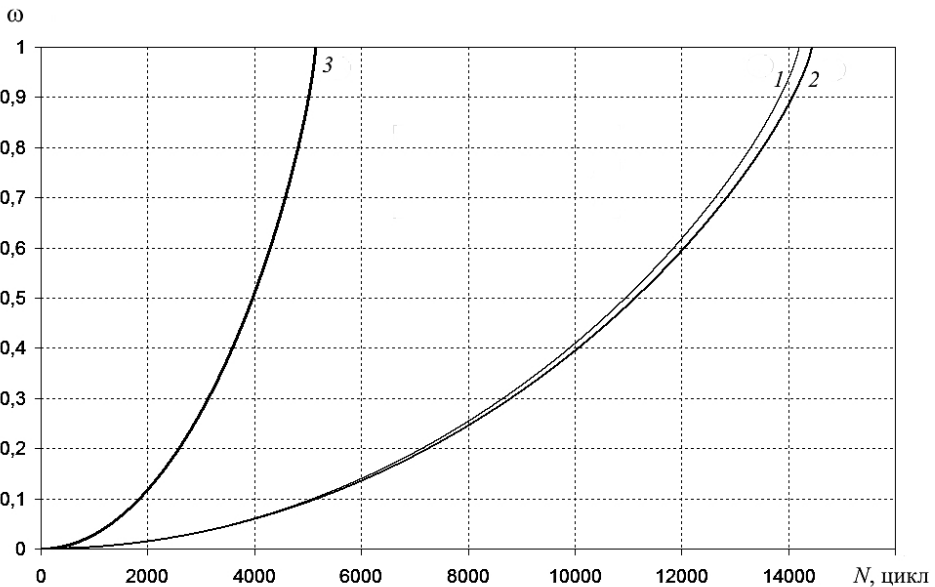


Рис. 3. Расчетные процессы накопления усталостных повреждений: 1 – режим № 1, амплитуда полных деформаций $\Delta e_{11} = 0,0018$; 2 – режим № 2, $\Delta e_{11} = 0,0018$; 3 – режим № 3, $\Delta e_{11} = 0,0034$.

На рис. 4 и в таблице представлены расчетные значения усталостной долговечности при действии совместно механизмов мало- и многоциклового усталости (темные точки) и экспериментальные данные (светлые точки) [3].

Расчетное и экспериментальное число циклов до разрушения стали 08X18H12T

Число циклов при Δe_{11}	Расчет	Эксперимент
0,000997	> 1000000	> 1000000
0,001115	577470	393000
0,001175	107511	192000
0,00180	14195	14000
0,00340	5148	5084
0,00925	31	31

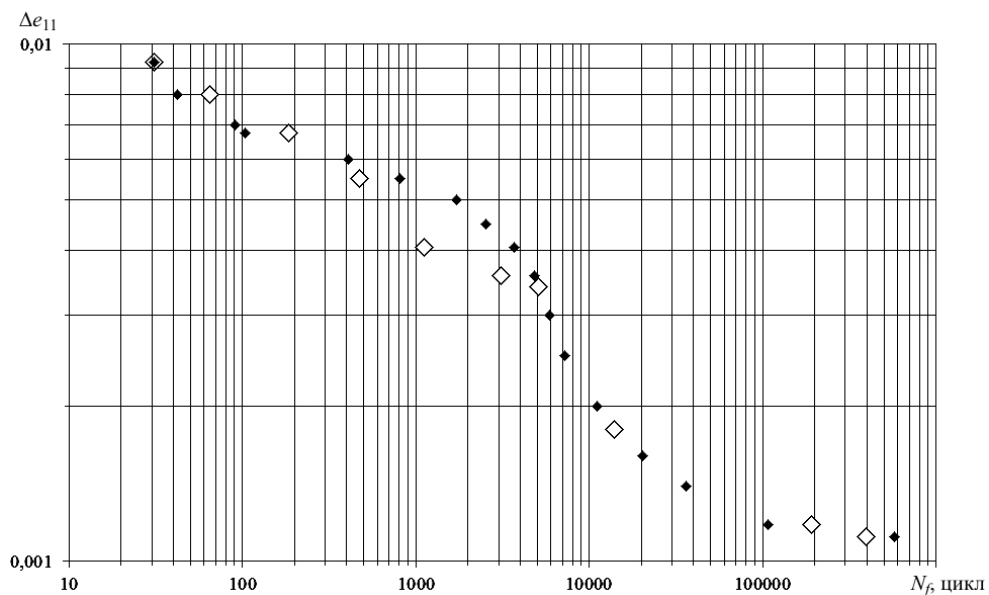


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные данные по усталости стали 08X18H12T.

Выводы

1. Математическое моделирование процессов накопления усталостных повреждений, основанное на базе эволюционного уравнения накопления повреждений при совместном действии механизмов мало- и многоциклового усталости, в конструкционных материалах позволяет определить выработанный и спрогнозировать остаточный ресурс оборудования и систем реакторных установок.

2. Сопоставление результатов численных исследований при одноосном растяжении-сжатии с экспериментальными данными [3] показывает, что использование предложенного эволюционного уравнения позволяет достоверно моделировать процессы накопления усталостных повреждений при совместном действии механизмов мало- и многоциклового усталости, при этом погрешность расчета находится в диапазоне 0...44%.

Резюме

Представлено спільну модель еволюційного рівняння накопичення пошкоджень від втоми в конструкційних матеріалах. Вірогідність запропонованої моделі обґрунтовано шляхом порівняння чисельних результатів з експериментальними.

1. *Митенков Ф. М., Кайдалов В. Б., Коротких Ю. Г.* Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок. – М.: Машиностроение, 2007. – 448 с.
2. *Троценко В. Т., Фомичев Л. А.* Энергетический критерий усталостного разрушения // Пробл. прочности. – 1993. – № 1. – С. 3 – 10.
3. *Хамаза Л. А., Коваленко В. А.* Методика и результаты исследования усталости и неупругости металлов при двухчастотном циклическом нагружении. Сообщ. 1. Сопротивление металлов усталостному разрушению и деформированию при двухчастотном нагружении // Там же. – 1989. – № 10. – С. 7 – 13.

Поступила 14. 11. 2013