

Ю. Н. КОРЫТКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ», Харьков

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ РАДИАЦИОННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР И НАПРЯЖЕНИЙ

В статье представлены уравнения состояния ползучести и связанного в ней накопления повреждаемости, показана их применимость для исследований напряженно-деформированного состояния конструкций при радиационной ползучести. Представлены результаты численных исследований выгородки атомного реактора ВВЭР-1000, показано влияние периодического изменения рабочих температур на процессы релаксации напряжений. Из.: 5. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: выгородка атомного реактора, радиационная ползучесть, температурное распределение, интенсивность напряжений.

Вступление. Многие конструктивные элементы атомной промышленности в период своего длительного срока эксплуатации подвергаются радиационному облучению - это ТВЭЛы, тепловыделяющие сборки, выгородки, элементы трубопроводов и другие. К таким элементам предъявляются повышенные требования безопасности, при этом высокая стоимость проведения экспериментальных исследований способствует развитию расчетных методов оценки долговечности, которые позволяли бы учитывать сложные эксплуатационные факторы. Такими факторами являются радиационное излучение, влияние периодического изменения напряжений в элементах конструкций и периодического изменения рабочих температур.

Анализ последних исследований и литературы. Исследования многих ученых посвящены влиянию радиационного облучения на материал конструктивных элементов атомной промышленности, а также изучению поведения элементов конструкций реакторов, которые работают в условиях радиационного излучения [1-5]. В данной работе представлена модель для проведения анализа длительной прочности конструктивных элементов в условиях радиационной ползучести при совместном действии периодически изменяющихся температур и напряжений, а

© Ю. Н. КОРЫТКО, 2012

также результаты проведенных исследований напряженно-деформированного состояния выгородки атомного реактора ВВЭР-1000 при длительном сроке эксплуатации.

Цель исследования, постановка проблемы. На данный момент разработаны уравнения состояния ползучести и связанного с ней накопления повреждаемости, учитывающие периодический характер действия нагрузок и температур [6, 7]. Для расчетных исследований элементов конструкций, которые работают при высокотемпературном циклическом нагружении, используется система уравнений вида [7]:

$$\begin{aligned} \mathcal{C}_{ij} &= \frac{3}{2} \frac{g_T(T) g_n(M_k^{\sigma_i}) \sigma_i^{n-1}}{(1-\omega)^m} s_{ij}, \quad c_{ij}(0) = 0, \\ \mathcal{C} &= g_r(M_k^{\sigma_e}) g_T^\omega(T) \frac{(\sigma_e)^r}{(1-\omega)^l}, \quad \omega(0) = \omega_0, \quad \omega(t_*) = 1, \\ g_T(T) &= b \int_0^1 \exp\left(-\frac{Q}{T} \left(1 + \sum_{i=1}^{\infty} M_i^T \sin(2\pi i \xi)\right)^{-1}\right) d\xi, \quad M_i^T = T_i^a / T, \\ g_n(M_k^{\sigma_i}) &= \int_0^1 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k^{\sigma_i} \sin(2\pi k \xi)\right)^n d\xi, \quad M_k^{\sigma_i} = \sigma_i^{ak} / \sigma_i, \\ g_r(M_k^{\sigma_e}) &= \int_0^1 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k^{\sigma_e} \sin(2\pi k \xi)\right)^r d\xi, \quad M_k^{\sigma_e} = \sigma_e^{ak} / \sigma_e, \\ g_T^\omega(T) &= d \int_0^1 \exp\left(-\frac{\bar{Q}}{T} \left(1 + M_i^T \sin(2\pi i \xi)\right)^{-1}\right) d\xi, \quad M_i^T = T_i^a / T, \end{aligned}$$

где c_{ij} , \mathcal{C} – компоненты тензора необратимой деформации ползучести и тензора скорости необратимой деформации ползучести соответственно;

$g_T(T)$, $g_T^\omega(T)$ – функции основной и амплитудной составляющих температуры;

$g_n(M_k^{\sigma_i})$, $g_r(M_k^{\sigma_e})$ – функции основной и амплитудной составляющих напряжения;

σ_i – интенсивность напряжений по Мизесу;

n , m , r , l – материальные постоянные;

s_{ij} – компоненты девиатора тензора напряжений;

ω , \mathcal{C} – параметр повреждаемости материала при ползучести и скорость его накопления соответственно;

σ_e – эквивалентные напряжения;

ω_0 – значение параметра повреждаемости при $t = 0$;

t_* – значения времени в момент окончания скрытого разрушения;

$Q = H / R$, $\bar{Q} = \bar{H} / R$, где H – энергия активации процесса ползучести, R – универсальная газовая постоянная, \bar{H} – энергия активации процесса повреждаемости при ползучести;

M_i^T – коэффициент асимметрии периодического изменения температуры;

σ^{ak} , T^a – амплитудные значения периодически изменяющихся составляющих напряжения и температуры;

$M_k^{\sigma_i}$, $M_k^{\sigma_e}$ – коэффициенты асимметрии циклической составляющей напряжения.

Для расчетов радиационной ползучести будем применять приведенные соотношения, которые при значениях $n=2$ и $m=0$ могут быть использованы для ползучести материалов в условиях радиационного облучения [2].

Материалы исследований. В работе [2] представлены результаты исследований напряженно-деформированного состояния выгородки атомного реактора ВВЭР-1000. Выгородка изготовлена из аустенитной нержавеющей стали 08X18H10T. Физико-механические свойства стали 08X18H10T: модуль упругости $E=1.8 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\eta = 0.318$, коэффициент линейного расширения $\alpha = 1.75 \cdot 10^{-5}$ 1/град [3]. Температура материала составляет около 573К на охлаждающих поверхностях и 723К в местах, отдаленных от охлаждающих поверхностей.

Выгородка является одним из важнейших элементов атомного реактора, защитным барьером между активной зоной и корпусом реактора, препятствует выходу нейтронного потока и гамма-излучения из активной зоны, способствует прохождению теплоносителя через активную зону и формированию поля энерговыделений. Выгородка реактора ВВЭР-1000 представляет собой монолитную цилиндрическую конструкцию с внешним диаметром 3470 мм, внутренний диаметр повторяет конфигурацию активной зоны. Конструкция имеет 90 продольных каналов для охлаждения. Общая высота выгородки составляет 4070 мм.

Задача исследования влияния периодического изменения температуры на напряженно-деформированное состояние выгородки может быть рассмотрена в рамках модели плоской деформации, так как из-за достаточно большой высоты конструкции на удалении от торцевых поверхностей будет наблюдаться плоское деформированное состояние. Для уменьшения размерности конечноэлементных расчетов геометрическая и конечноэлементная модели были построены для четверти поперечного сечения выгородки. Количество конечных элементов составило 6034, узлов 3580.

Результаты исследований. В результате решения задачи теплопроводности было получено распределение температуры по сечению выгородки (рис. 1), а также

распределение интенсивностей напряжений, вызванное таким температурным распределением (рис. 2).

Результаты проведенных исследований радиационной ползучести показывают, что во время первого этапа эксплуатации выгородки (17 лет) термоупругие напряжения существенно уменьшаются вследствие релаксации. Распределение напряжений после 17 лет работы выгородки представлено на рис. 3.

Выполнены исследования длительной прочности выгородки атомного реактора ВВЭР-1000 с учетом

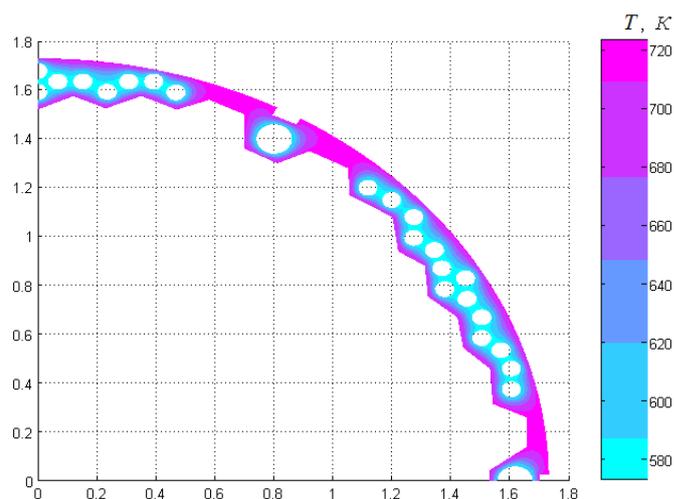


Рис. 1. Распределение температуры по сечению выгородки

изменения рабочих температур. Количество эффективных часов работы реактора в год составляет примерно 7000 часов, оставшиеся 1760 часов температура выгородки равномерна по сечению. Полученные результаты расчетных исследований показали существенное ускорение процессов релаксации напряжений в выгородке по сравнению с результатами, полученными при неизменном по времени температурном распределении.

Так, к концу первого этапа эксплуатации максимальное значение интенсивности напряжений составило 109 МПа (рис. 4) при учете влияния периодического изменения температурного поля и 200 МПа при игнорировании такого влияния.

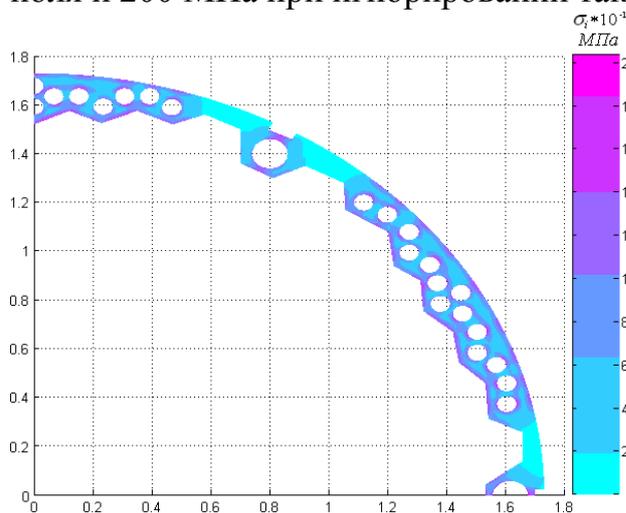


Рис. 3. Распределение интенсивности напряжений по сечению выгородки после 17 лет эксплуатации без учета циклического изменения температур

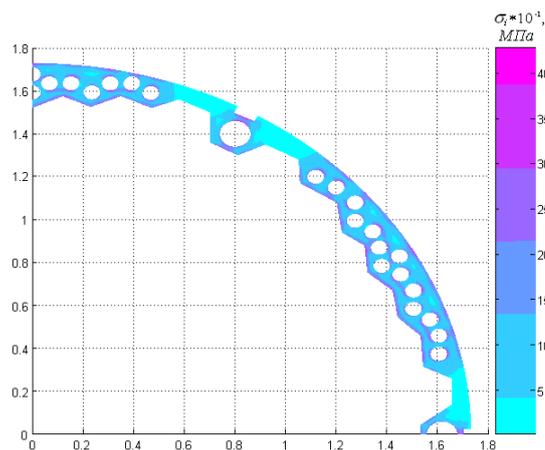


Рис. 2. Распределение интенсивности температурных напряжений

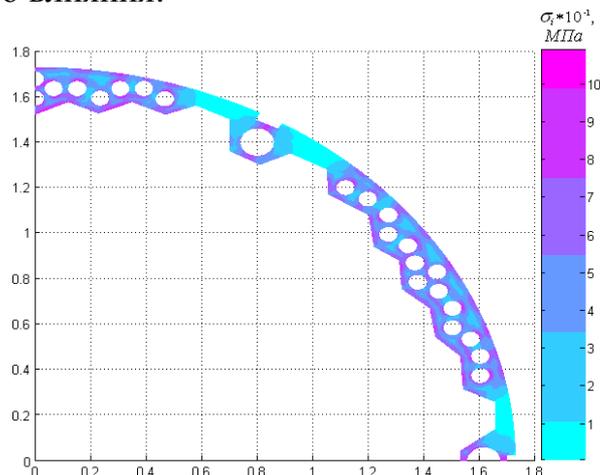


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений по сечению выгородки после 17 лет эксплуатации с учетом циклического изменения температур при 7000 часов эффективной работы реактора в год

Были также проведены исследования циклической радиационной термоползучести, в которых количество эффективных часов работы реактора в год составляло 4380 часов. При этом считалось, что в период эффективной работы реактора температурное поле изменяется от 573K до 723K по сечению выгородки. В оставшееся время температурное распределение равномерно. В этом случае также можно говорить о существенном ускорении процессов перераспределения напряжений по сравнению с таким, где влияние изменения температуры не учитывалось.

На рис. 5 представлено изменение интенсивности напряжений, полученное при использовании различных подходов к учету влияния изменения температуры. Кривая 1 рис. 5 представляет результаты, полученные при

использовании предложенной модели исследований при игнорировании влияния изменения температуры на напряженно- деформированное состояние выгородки. Кривая 2 – это результаты, представленные в работе [2] для данной выгородки. Кривая 3 показывает, как релаксировали бы напряжения при 4380 часах эффективной работы реактора в год

с учетом влияния изменения температурного поля. Кривая 4 характеризует изменение интенсивности напряжений при реальном режиме работы реактора (7000 часов эффективной работы в год) с учетом влияния изменения температуры на напряженно- деформированное состояние.

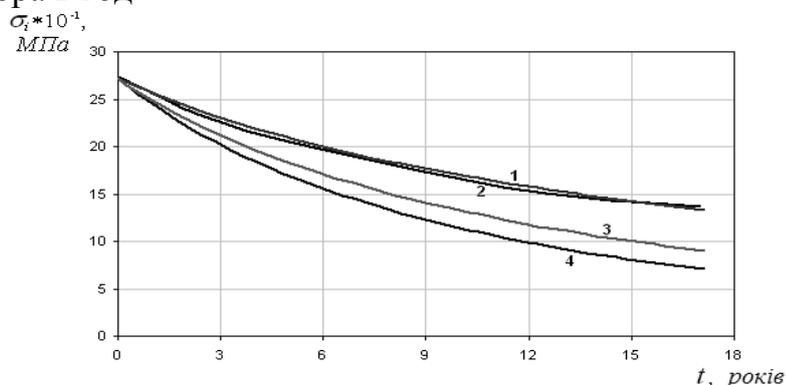


Рис. 5. Изменение интенсивности напряжений в выгородке

Заключение. Полученные результаты показывают, что периодический характер изменения температуры при радиационной ползучести существенно ускоряет процессы перераспределения, в данном случае, релаксации напряжений. Данный эффект при анализе длительной прочности ответственных элементов атомного машиностроения существенно влияет на прогнозируемый срок безопасной эксплуатации, а также на картину напряженно- деформированного состояния конструктивных элементов атомного машиностроения. Можно также говорить о применимости предложенных подходов анализа ползучести и длительной прочности конструктивных элементов к задачам радиационной ползучести. Эффекты изменения скорости и характера перераспределения напряжений, связанные с учетом периодического изменения воздействующего температурного поля, воспроизводятся в задачах радиационной ползучести, а значит должны учитываться при исследованиях долговечности ответственных элементов конструкций.

Список литературы: 1. Воеводин В. Н. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов / В. Н. Воеводин, И. М. Неклюдов. - К.: Наукова Думка, 2006. – 376 с. 2. Троянов В. М. Оценка и анализ термомеханического поведения элементов ВКУ реакторов ВВЭР с учетом эффектов облучения / В. М. Троянов, И. М. Лихачев, М. Я. Хмелевский, В. И. Цофин, Н. В. Шарый, В. П. Юреченко, В. К. Шамардин, В. С. Неустроев, В. И. Прохоров // Сборник докладов пятой межотраслевой конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 8-12 сентября 1997 г. – Димитровград, 1998. – Т. 2, часть 1. – С. 3 - 18. 3. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с. 4. Шамардин В. К. Оценка и анализ термомеханического поведения элементов ВКУ реакторов ВВЭР с учетом эффектов облучения (обзор экспериментальных результатов) // В. К. Шамардин, В. С. Неустроев, В. И. Прохоров, И. М. Лихачев, В. М. Троянов, М. Я. Хмелевский, В. И. Цофин, Н. В. Шарый, В. П. Юреченко // Сборник докладов пятой межотраслевой конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 8-12 сентября 1997 г. – Димитровград, 1998. – Т. 2, часть 1. – С. 19 - 39. 5. Бирюков О. В. Длительная прочность элементов кассеты насыпного типа для быстрого газоохлаждаемого реактора // О. В. Бирюков, А. А. Золочевский, А.

Г. Лаврук, О. К. Морачковський, С. М. Школьный. – М.: ЦНИИ атоминформ, 1985. – 39 с. **6.** Бреславський Д. В. Модель циклічної термоповзучості для тіл обертання/ Д. В. Бреславський, Ю. М. Коритко, О. К. Морачковський // Проблемы прочности. – 2011. - №2. – С. 33 – 46. **7.** Коритко Ю. М. Розробка методу розрахунку довговічності елементів конструкцій при періодичній зміні температур і навантажень: дис. канд.техн.наук: 05.02.09 / Коритко Юлія Миколаївна. – Харків, 2011. – 206 с.

УДК 539.3

Аналіз напружено-деформованого стану при радіаційній повзучості з урахуванням впливу періодичної зміни температур та навантажень/ Коритко Ю. М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях - Харків: НТУ «ХПІ». - 2012.- №50(956).. - С.28-33

У статті наведені рівняння стану повзучості та пов'язаного з нею накопичення пошкоджуваності, показана їх придатність у дослідженнях напружено-деформованого стану конструкцій при радіаційній повзучості. Представлені результати чисельних досліджень вигородки атомного реактору ВВЕР-1000, продемонстрований вплив періодичної зміни робочих температур на процеси релаксації напружень. Іл.: 5. Бібліограф.: 7 назв.

Ключові слова: вигородка атомного реактору, радіаційна повзучість, температурний розподіл, інтенсивність напружень.

UDC 539.3

Analysis of strain-stress state of structural elements under radiation creep and periodically varying temperatures and loading / Korytko Yu. M. // Bulletin of NTU "KhPI". Subject issue: New decisions of modern technologies. - Kharkov: NTU "KhPI". - 2012. - №50(956). – P. 28-33.

Creep-damage constitutive equations are presented in the paper, their adaptability for strain-stress state analysis of structural elements under irradiation creep is shown. The results of numerical investigations of reflection shield of water-cooled power reactor are described. The influence of periodically varying temperatures on processes of stress relaxation was obtained. Im.: 5. Bibliogr.: 7.

Key words: reflection shield of nuclear reactor, radiation creep, temperature distribution, stress intensity.

Поступила в редакцію 20.09.2012