

УДК 620.19; 004.942

И. В. БИБЛИК*Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Украина***КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ОСТАТОЧНОЙ ДЕФЕКТНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ**

В рамках специального расчетно-экспериментального метода, основанного на компьютерном моделировании процесса разрушения материалов и элементов конструкций, проведено статистическое моделирование роста остаточной дефектности для определения показателей надежности элементов конструкций в процессе их эксплуатации. Разработан алгоритм для оценки влияния остаточной дефектности на вероятность разрушения элементов конструкций. Показано, что вероятностная методика моделирования повреждаемости элементов конструкций, состоящая из восстановления исходной дефектности, с учетом эффективности выявления дефектов средствами неразрушающего контроля, позволяет моделировать процессы зарождения новых трещин, их докритического подрастания, а также критического развития в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: *исходная дефектность, остаточная дефектность, компьютерное моделирование, вероятность разрушения, показатели надежности.*

1. Введение и постановка задачи

Эксплуатация целого ряда металлических конструкций недопустима при наличии в них макроскопических трещин. Ресурс таких конструкций будет лимитироваться временем развития малых трещин до образования одной или нескольких макротрещин длиной, достаточной для их надежной идентификации методами неразрушающего контроля (НК).

В соответствии с существующей практикой в современной технике проводится НК ответственных изделий после изготовления, перед началом эксплуатации и во время эксплуатации. При этом предполагается, что в результате НК выявляются все дефекты, доступные для данного метода контроля. Все несплошности, неоднородности и т.п., если они превышают допустимые размеры, классифицируются как дефекты и устраняются ремонтом. При этом подразумевается, что после НК и ремонта выявленных дефектов других дефектов в изделии нет [1].

В то же время известно [2], что практически во всех случаях НК имеется существенная вероятность пропуска дефекта больших размеров, превышающих допустимые.

Совокупность дефектов, не обнаруженных в материале конструкции после изготовления, контроля и ремонта, определяется термином - остаточная дефектность. Именно эти дефекты в конечном итоге оказывают влияние на надежность и работоспособность изделия.

Вероятность пропустить в эксплуатацию изделие с дефектом сплошности металла допускает возможность достижения этим дефектом критических размеров и, как следствие, возможность внезапного

разрушения всей конструкции или её элемента. Следовательно, проблема получения информации о характеристиках остаточной дефектности является принципиально важной, т.к. это дает возможность определить фактический уровень надежности и безопасности изделия до того, как оно разрушится или повредится в эксплуатации.

Обеспечение безопасной эксплуатации ответственных элементов конструкций основано на применении средств технической диагностики, которые позволяют с достаточной точностью выявлять расположение, тип и размер имеющихся дефектов. Однако вопросы, связанные с определением реальной опасности обнаруженных дефектов, пока разработаны не в полной мере.

Все проектные расчеты прочности проводятся для бездефектного оборудования. Возникновение аварий по причине трещинообразования объясняется вероятностной природой зарождения и развития трещин из-за существенной пространственной неоднородности механических характеристик [3]. Поэтому при моделировании процессов накопления повреждений и роста макротрещин в элементах конструкций представляется целесообразным использовать не только детерминированные представления о развитии дефекта, но и вероятностные модели, учитывающие неоднородность исходных данных, погрешность средств и методов НК.

Вследствие этого исследование вероятностных закономерностей достижения предельных состояний элементами оборудования является актуальной задачей, прежде всего в связи с возможным повышением их безопасности во время эксплуатации.

2. Алгоритм расчета

Для оценки фактического уровня надежности элементов конструкций на заданном сроке эксплуатации применялось статистическое моделирование случайного процесса роста остаточной дефектности.

В рамках специального расчетно-экспериментального метода (РЭМ) [4], основанного на компьютерном моделировании процесса разрушения конструктивных материалов, проводился вероятностный анализ роста трещин в элементах конструкций до достижения ими предельного состояния.

Как и в традиционной модели прочностной надежности [5], в разработанном методе также используются четыре частные модели (модель материала, формы, нагружения и разрушения). При этом, если раньше модель материала в РЭМ рассматривалась как бездефектная, то для целей настоящей работы был применен подход [6], предполагающий наличие в материале конструкции остаточной (технологической) дефектности.

При компьютерном моделировании роста остаточной дефектности проводится анализ работы элемента конструкции, определяются действующие напряжения в различных сечениях, по которым выявляются наиболее вероятные места возникновения дефектов (сварные швы, места максимальных эксплуатационных воздействий и т.п.).

При создании компьютерной модели материала используются функции исходной и остаточной дефектности. Функция исходной дефектности $N_{исх}(a)$ определяется как отношение количества обнаруженных применяемым методом НК дефектов к вероятности их обнаружения [7]:

$$N_{исх}(a) = \frac{N_{обн}(a)}{W(a)}, \quad (1)$$

где a – размер дефекта;

$N_{обн}(a)$ – функция распределения выявляемых в результате контроля дефектов;

$W(a)$ – функция вероятности обнаружения дефектов.

Как правило, для функции выявляемости дефектов обычно используется следующее уравнение:

$$W(a) = 1 - \exp(-\lambda(a - a_0)), \quad (2)$$

где a_0 – граничный наименьший размер выявляемого дефекта, зависящий от чувствительности метода НК;

λ – постоянная.

Функция остаточной дефектности, $N_{ост}(a)$, определяется как разность между исходной дефектностью и количеством обнаруженных дефектов:

$$N_{ост}(a) = N_{исх}(a) - N_{обн}(a), \quad (3)$$

или
$$N_{ост}(a) = N_{исх}(a)[1 - W(a)]. \quad (4)$$

Разработанный в рамках РЭМ алгоритм для оценки влияния остаточной дефектности на вероятность разрушения элементов конструкций выглядит следующим образом:

- создается бездефектная (традиционная) модель материала;
- генерируется некоторая последовательность дефектов с заданным распределением (используется функция остаточной дефектности), дефекты в модели материала располагаются случайным образом, с использованием генератора случайных чисел;
- предполагается, что рост начальных дефектов происходит независимо;
- принимается модель эксплуатационного нагружения и производится компьютерное «нагружение» модели материала;
- через определенное число шагов, выбранных в соответствии с моделью нагружения, осуществляется имитация каждого i -го контроля, в результате чего определяется функция остаточной дефектности $N_{ост}(a)$;
- исходными распределениями размеров и количества дефектов для $N_{ост}(a)$ являются распределения размеров и количества дефектов, определенные после $(i-1)$ -го контроля с учетом зарождения и роста дефектов к моменту проведения i -го контроля;
- после каждого контроля осуществляется сравнение результатов, полученных применяемыми методами НК, с результатами компьютерного моделирования.

В результате расчета получается набор «растущих» дефектов за определенный временной интервал эксплуатации элемента оборудования, на основании которого могут быть определены его показатели надежности. В частности, остаточный ресурс элемента конструкции может быть определен как продолжительность эксплуатации после очередного контроля, в течение которого размер дефекта увеличивается до размера, недопустимого в эксплуатации, или до критического значения.

Критические размеры дефектов и предельно допустимые в эксплуатации дефекты для данного изделия определяют по действующим нормативным документам.

3. Результаты и их обсуждение

Настоящая работа является первым этапом развития приведенной выше методологии для оценки вероятности достижения предельных состояний элементами оборудования с учетом роста остаточной дефектности.

Целью работы является применение компьютерного моделирования для оценки изменения характеристик остаточной дефектности во время эксплуатации элемента конструкции.

Рассмотрим результаты применения разрабо-

танного алгоритма для статистического моделирования роста поверхностных трещин в трубопроводе аварийной питательной воды к парогенератору ВВЭР-1000 [8].

Рабочие параметры:

- давление – 8 МПа;
- температура – 300 °С;
- материал – сталь 20.

Диаметр трубопровода – 108 мм, толщина стенки – 8 мм. Допустимое число циклов нагружения – 13200.

Эффективность контроля (вероятность выявления дефекта, размер которого равен толщине стенки трубопровода) принималась равной 0,999, граничный размер выявляемого дефекта – 0,5 мм.

На рисунке 1 приведены зависимости изменения текущих размеров дефектов от начального размера и относительного количества циклов нагружения N^* (отношения текущего числа циклов к допустимому числу циклов нагружения трубопровода).

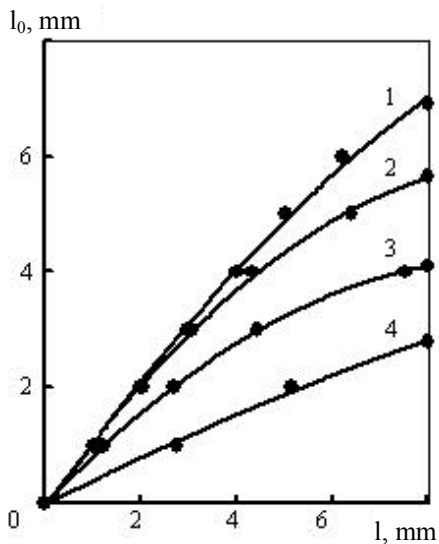


Рис. 1. Зависимости текущих размеров дефектов от начального размера для различных N^* : 1 – $N^*=0,2$; 2 – $N^*=0,4$; 3 – $N^*=0,6$; 4 – $N^*=0,8$.

Из приведенных на рис. 1 результатов видно, что для любого начального размера трещины (в зависимости от количества циклов нагружения до очередного контроля) может быть получен ее размер на момент контроля. Так, например, при $l_0=3$ мм и $N^*=0,6$, получим $l(N^*)=5$ мм.

Таким образом, на основании начального размера дефекта и с учетом роста дефекта в процессе нагружения с помощью компьютерного моделирования могут быть определены текущие размеры дефектов.

Результаты, приведенные на рис. 1, могут быть использованы для определения показателей надежности рассматриваемого трубопровода по критериям разрушения, течи или существования дефектов недопустимого размера.

Для этого рассмотрим процесс распространения исходной трещины длиной l_0 . Обозначим размер трещины в момент времени t через $l(t)$. С учетом стохастического характера механических характеристик материала конструкции и действующей нагрузки процесс развития трещины является случайным процессом.

Определим вероятность отказа трубопровода по критерию образования течи при условии, что исходная трещина не была обнаружена средствами НК перед эксплуатацией и при последующих контролях.

В случае трубопровода течь образуется тогда, когда линейный размер дефекта $l(t)$ становится равным толщине стенки s трубопровода, то есть вероятность отказа за время t или за число циклов нагружения (N^*) по критерию течи из трубопровода определяется из условия

$$Q(t) = Q(l \geq s; t),$$

где l – размер дефекта в направлении толщины стенки;

s – толщина стенки трубопровода.

Предположим, что в любой момент времени t размер трещины есть случайная величина с нормальным законом распределения и для полного ее описания достаточно знать математическое ожидание $\bar{l}(t)$ и дисперсию $D_{l(t)}$.

Тогда выражение для вероятности отказа трубопровода по критерию возникновения течи за время t можно записать в виде

$$Q(t) = 1 - \Phi\left(\frac{s - \bar{l}(t)}{\sqrt{D_{l(t)}}}\right), \quad (5)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-z^2/2} dz$ – функция Лапласа;

$\bar{l}(t)$ – математическое ожидание длины трещины в момент времени t ;

$D_{l(t)}$ – дисперсия текущей длины трещины.

Неопределенность оценки остаточной дефектности – это вероятностная характеристика, зависящая не только от особенностей физических методов неразрушающего контроля, но и от материала, в котором находится дефект, в частности от разброса механических и прочностных характеристик для разных участков объема материала изделия.

В связи с этим для определения математического ожидания и дисперсии длины растущей трещины в каждый момент времени при компьютерном моделировании исходную трещину помещали поочередно в различные сечения модели материала и в результате компьютерного «нагружения» в соответствии с принятой моделью эксплуатационного нагружения получали набор случайных величин $l(t)$ или $l(N^*)$.

Для каждой из вероятных длин исходных трещин определяли математическое ожидание и дисперсию по формулам:

$$\bar{l}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i(t); D_{l(t)} = \frac{\sum_{i=1}^n [l_i(t) - \bar{l}(t)]^2}{n},$$

где n – число расчетов.

На рисунке 2 приведены зависимости вероятности отказа трубопровода по критерию течи при наличии в нем дефектов, оставшихся невыявленными методами НК, с начальными размерами от 1 до 4 мм. Вероятность отказа определялась в соответствии с формулой (5).

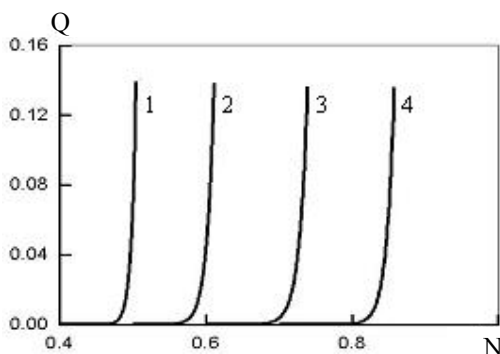


Рис. 2. Вероятность отказа трубопровода по критерию течи для различных значений длин исходных трещин: 1 – $l_0 = 4$ мм; 2 – $l_0 = 3$ мм; 3 – $l_0 = 2$ мм; 4 – $l_0 = 1$ мм

Как видно из рис. 2, при нормативной вероятности отказа $Q_n = 0,05$ для различных длин исходных трещин можно определить время, в течение которого возможна безопасная эксплуатация трубопровода даже при вероятности пропуска дефекта соответствующего размера методами НК.

Кроме того, зависимости, приведенные на рис. 2, могут быть использованы также и для определения времени проведения очередного контроля, чтобы исключить возможный отказ в межконтрольный период. Другими словами, с помощью компьютерного моделирования возможно для заданного интервала контроля при известном количестве циклов нагружения определить предельный размер дефектов, которые за время между контролями не успеют вырасти до критических размеров. В рассматриваемом случае критическим размером является толщина стенки трубопровода.

Из рисунка 2 также следует, что полученные закономерности требуют обеспечения высокой надежности дефектоскопических методов в области больших дефектов.

Верификация приведенной выше методологии была проведена путем сравнения численных значений вероятностей отказа рассматриваемого трубопровода, полученных с помощью компьютерного

моделирования, с результатами, приведенными в работе [8].

На рисунке 3 приведена зависимость вероятности отказа трубопровода по критерию возникновения течи при различном количестве циклов нагружения в течение интервала между проведением контроля (при различных значениях N^*).

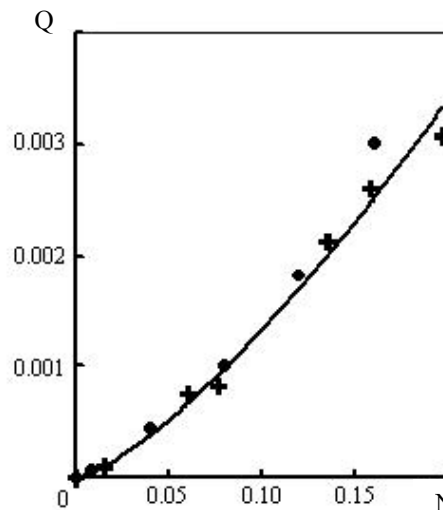


Рис. 3. Вероятность отказа трубопровода в период между контролями при различных N^* :
+ – значения вероятности отказа, полученные с помощью РЭМ;
• – результаты, приведенные в работе [8]

Видно, что наблюдается хорошее совпадение с данными, приведенными в работе [8]. По значениям вероятности отказа трубопровода, которые определяют категории отказа [8] как высокую ($1 \cdot 10^{-3}$), среднюю ($1 \cdot 10^{-4}$) и низкую ($1 \cdot 10^{-5}$), могут быть найдены соответствующие граничные значения параметра N^* , которые будут определять необходимость в проведении контроля.

Выводы

На основе специального расчетно-экспериментального метода разработан алгоритм для оценки влияния остаточной дефектности на вероятность разрушения элементов конструкций.

Получены зависимости текущих размеров дефектов от начального размера и времени эксплуатации трубопровода аварийной питательной воды к парогенератору ВВЭР-1000. Показано, что разработанный подход позволяет получить функции распределения размеров трещин в любой момент времени эксплуатации трубопровода, в том числе и за интервал времени между проведением НК.

Знание размеров дефектов, существующих в изделии (после контроля и ремонта выявленных дефектов), позволит более точно оценить его реальное состояние, фактический уровень надежности и воз-

возможность безопасной эксплуатации.

Разработанный подход может быть использован для оценки оптимальной периодичности эксплуатационного контроля металла оборудования путем сравнения полученных показателей надежности с допускаемыми, обеспечивающими безопасную работу оборудования, определенными на основе требований нормативной и конструкторской документации.

Литература

1 Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля (ПНАЭГ-7-010-89) [Текст] / Госатомнадзор России. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 73 с.

2 Гурвич, Н. К. Надежность дефектоскопического контроля как надежность комплекса “Дефектоскоп - оператор - среда” [Текст] / Н. К. Гурвич // Дефектоскопия. – 1992. – № 3. – С. 5-13.

3 Аркадов, Г. В. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла (вероятностные методы) [Текст] / Г. В. Ар-

кадов. – М. : Энергоатомиздат, 2010. – 424 с.

4 Милешкин, М. Б. Применение специального расчетно-экспериментального метода для оценки остаточного ресурса элементов конструкций по фактическому состоянию материала [Текст] / М. Б. Милешкин, И. В. Библик // Надежность и долговечность машин и сооружений : Междунар. науч.-техн. сб. ИПП НАНУ. – 2006. – Вып. 27. – С. 304-310.

5 Биргер, И. А. Сопротивление материалов [Текст] / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М. : Наука, 1986. – 560 с.

6 Гетман, А. Ф. Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления [Текст] / А. Ф. Гетман, Ю. Н. Козин. – М. : Энергоатомиздат, 1997. – 288 с.

7 Гетман, А. Ф. Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов АЭС [Текст] / А. Ф. Гетман. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 427 с.

8 Оптимизация плановых ремонтов энергоблоков атомных электростанций с ВВЭР [Текст] : моногр. / В. И. Скалозубов, Ю. Л. Коврижский, В. Н. Кольханов и др. – Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС, 2008. – 496 с.

Поступила в редакцию 1.06.2014, рассмотрена на редколлегии 17.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. отделом нестационарных механических процессов Ю. С. Воробьев, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗРОСТАННЯ ЗАЛИШКОВОЇ ДЕФЕКТНОСТІ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ

I. V. Biblik

У рамках спеціального розрахунково-експериментального методу, заснованого на комп'ютерному моделюванні процесу руйнування матеріалів і елементів конструкцій, проведено статистичне моделювання зростання залишкової дефектності для визначення показників надійності елементів конструкцій в процесі їх експлуатації. З використанням характеристик методу неруйнуючого контролю дефектів розроблено алгоритм для оцінки впливу залишкової дефектності на імовірність руйнування елементів конструкцій. Показано, що розроблена імовірнісна методика моделювання пошкоджуваності елементів конструкцій, що складається з відновлення вихідної дефектності, з урахуванням ефективності виявлення дефектів засобами неруйнуючого контролю, дозволяє моделювати процеси зародження нових тріщин, докритичного їх підростання, а також критичного розвитку в процесі експлуатації.

Ключові слова: вихідна дефектність, залишкова дефектність, комп'ютерне моделювання, імовірність руйнування, показники надійності.

COMPUTER SIMULATION OF RESIDUAL DEFECTIVENESS GROWTH DURING OPERATION OF DESIGN ELEMENTS

I. V. Biblik

Within the framework of a special design-experimental method based on computer simulation of the fracture processes of materials and structural elements, a statistical simulation of residual defectiveness growth to determine a reliability characteristics of structural elements during their operation is carried out. Using the characteristics of NDT method an algorithm to estimate the effect of residual defectiveness on the probability of failure of structural elements is developed. It is shown that the developed probabilistic modeling technique of structural elements damaging consisting of restoration of the initial defectiveness, based on the NDT method performance, allows to simulate the nucleation of new cracks, subcritical crack growth, as well as the development of critical defects in service.

Key words: initial defectiveness, residual defectiveness, computer simulation, probability of fracture, reliability.

Библик Ирина Валентиновна – Главный инженер-исследователь отдела материаловедения, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: miles@ipmach.kharkov.ua.