

Упругопластический расчет на сопротивление разрушению элементов оборудования 1-го контура АЭС

В. В. Харченко^а, В. А. Пиминов^б, А. Ю. Чирков^а, С. В. Кобельский^а,
В. И. Кравченко^а

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б ФГУП ОКБ “Гидропресс”, Подольск, Россия

Рассмотрены современные подходы расчетного анализа к оценке сопротивления разрушению элементов ответственного оборудования 1-го контура АЭС с ВВЭР. Отмечается, что решение вопросов обоснования безопасной эксплуатации, оценки целостности корпуса реактора и продления его ресурса существенно зависит от результатов расчета кинетики напряженно-деформированного состояния, адекватного учета полей остаточных технологических напряжений и деформаций, достоверной оценки параметров нелинейной механики разрушения. Развита общая методика расчетного анализа на сопротивление разрушению корпусов реакторов ВВЭР при моделировании аварийных режимов охлаждения. Сформулированы основные положения упругопластического расчета кинетики напряженно-деформированного состояния корпусов реакторов с учетом полей остаточных технологических напряжений и деформаций, а также предложена расчетная методика определения параметров разрушения постулируемой трещины. С применением разработанных методов расчета и программного обеспечения показано существенное влияние на расчетную оценку сопротивления разрушению корпусов реакторов ВВЭР-1000 таких факторов, как история термосилового нагружения и упругопластическое деформирование металла в окрестности фронта постулируемой трещины, остаточная технологическая напряженность, регулярность и плотность конечно-элементной сетки в окрестности фронта расчетной трещины, процедура вычисления параметров упругопластического разрушения в дискретных моделях метода конечных элементов. Показано, что уточненный упругопластический расчет на стадии разгрузки металла в окрестности фронта трещины при термошоке корпуса реактора может позволить обосновать дополнительные резервы прочности и ресурса корпуса реактора, а неучет истории нагружения и остаточной напряженности после термообработки приводит к неконсервативной оценке сопротивления разрушению узла соединения коллектора с корпусом парогенератора ПГВ-1000 при моделировании эксплуатационного цикла нагружения.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, остаточные напряжения, коэффициент интенсивности напряжений, постулированная трещина, корпус реактора, парогенератор, термошок, смешанная схема метода конечных элементов.

Введение. В настоящее время к числу основных направлений исследований по проблемам обеспечения прочности и ресурса элементов оборудования АЭС относятся: критерии предельного состояния и определение деградации свойств металла в процессе эксплуатации; расчет кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС); влияние остаточной технологической напряженности и дефектности; современные подходы к оценке сопротивления материала разрушению и внедрение их в практику расчетов; продление сроков эксплуатации. При этом обеспечение целостности корпуса реактора (КР) при всех возможных режимах нагружения является одним из основных условий безопасной эксплуатации энергоблоков АЭС и продления их ресурса.

При режимах работы реакторов, вызванных аварийными ситуациями, за основной критерий прочности и целостности КР принимается его способность сопротивляться хрупкому разрушению (СХР).

В работах [1–10] представлены многочисленные данные, отражающие современное состояние, нормативные подходы, опыт и различные аспекты расчетного обоснования прочности элементов оборудования АЭС, в первую очередь КР. Проанализированы современные модели, методы и программные продукты расчетов на прочность, а также приведены примеры их применения для различных типов расчетов и расчетных моделей конструкций АЭС.

Решение вопросов обоснования безопасной эксплуатации, оценки целостности КР и продления его ресурса существенно зависит от достоверности результатов расчетного анализа НДС, параметров механики разрушения металла корпуса реактора, причем к наиболее важным особенностям расчетного анализа на СХР следует отнести корректное моделирование нелинейных эффектов поведения материала – учет остаточных технологических напряжений и деформаций, истории термосилового нагружения и упругопластического деформирования металла в окрестности фронта постулируемой трещины.

Для достоверного, адекватного физическим процессам моделирования, необходимо обеспечить точность и сходимост ь конечноэлементного решения задачи, что зависит также от регулярности и плотности используемой сетки конечных элементов. При решении задачи в упругопластической постановке для определения устойчивых расчетных значений локальных параметров разрушения, особенно на стадии разгрузки материала, требуется достаточно мелкое конечноэлементное разбиение в окрестности фронта трещины. Опыт решения практических задач свидетельствует о том, что при моделировании аварийных режимов нагружения КР следует применять величины шага сетки в окрестности фронта трещины порядка десятков микрон и меньше.

Одной из важных выявляемых при этом особенностей упругопластического решения является наличие резкого снижения (так называемой “ниспадающей ветви”) коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в конце процесса его изменения от температуры при термошоке КР. Это обусловлено возникновением локальной зоны сжимающих напряжений при разгрузке металла в окрестности фронта трещины. Первые такие результаты упругопластического анализа были получены в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины [6, 11]. Расчетные значения КИН определяли по методике, основанной на концепции G -интеграла “закрытия трещины” [11, 12]. Было установлено, что использование в расчетных моделях недостаточно мелких конечноэлементных разбиений в окрестности вершины трещины не позволяет обнаружить локальные зоны разгрузки, что искажает зависимость КИН от температуры, полученную на достаточно густых сетках, когда имеет место сходимост ь численных результатов расчета. Необходимо отметить, что наличие в конце режима охлаждения КР такой ниспадающей ветви – достаточно важный фактор при оценке его ресурса, поскольку позволяет выявить дополнительные резервы прочности при продлении сроков эксплуатации.

Важным фактором при расчете изменения КИН в процессе термошока КР является учет истории нагружения, включая технологическую наследственность. Расчетный анализ процессов формирования и перераспределения напряжений в конструкции с привлечением уточненных расчетных моделей приобретает также особую актуальность в связи с периодическим обнаружением трещин в узлах соединения коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 в области сварного шва № 111.

Моделирование эксплуатационных режимов нагружения с применением трехмерных моделей таких узлов, учитывающих влияние других элементов петли первого контура реакторной установки, а в дальнейшем с учетом истории упругопластического деформирования и нетривиального влияния технологических операций изготовления и ремонта, в частности термообработки, позволило выявить высокий уровень растягивающих напряжений в узле в месте появления повреждений [9, 10]. Тем не менее кинетика формирования и перераспределения напряжений узла соединения коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 не изучена в полной мере, что определяет актуальность исследований в этом направлении.

Следовательно, расчет таких элементов конструкций АЭС на сопротивление материала разрушению должен включать решение краевых задач неизо-термической термопластичности и задач механики разрушения при моделировании нестационарных режимов термосилового нагружения. При выполнении расчетного анализа следует учитывать совместное влияние таких факторов, как неоднородность нагрева и охлаждения, история термосилового нагружения, пластическое деформирование, процессы ползучести и релаксации, остаточные напряжения и деформации, неоднородность физико-механических свойств материала и их зависимость от температуры, изменение сопротивления материала разрушению с учетом эксплуатационных воздействий и деградации исходных свойств металла. Поэтому упругопластическое моделирование кинетики НДС и анализ деформируемых конструкций АЭС на сопротивление материала разрушению относятся к числу наиболее сложных задач математической физики, а также проблем механики материалов и конструкций. И поскольку решение нестационарных и нелинейных краевых задач термомеханики и задач механики разрушения – весьма сложная численная процедура, практическая реализация которой может приводить к неприемлемым вычислительным затратам, расчет на сопротивление материала разрушению с учетом всех перечисленных факторов для полного спектра расчетных вариантов нагружения конструкций АЭС не представляется возможным.

Более того, известные коммерческие программные продукты, в основу расчетного анализа которых положен метод конечных элементов (МКЭ), в ряде случаев оказываются недостаточно точными и эффективными при решении таких сложных специфических прикладных задач механики упругопластического разрушения, поскольку большая размерность дискретной задачи и существенная нелинейность свойств материала в окрестности фронта расчетной трещины могут привести к потере устойчивости или нарушению сходимости вычислительных процессов.

Традиционные подходы к повышению точности путем увеличения густоты конечноэлементных разбиений или перехода к более сложным конечным

элементам не всегда эффективны даже в случае линейных задач. Для нестационарных и нелинейных пространственных задач термомеханики они практически неприемлемы, поскольку увеличение порядка решаемой системы нелинейных алгебраических уравнений и большое количество временных шагов и итераций приводят к значительному росту вычислительных затрат.

В связи с этим существует необходимость в разработке более совершенного аппарата проведения расчетного анализа, включающего новые подходы и алгоритмы решения краевых задач неизотермической термопластичности и задач механики разрушения, а также построение адекватных расчетных схем и моделей, применение современных концепций механики разрушения при оценке целостности корпусных конструкций АЭС, в частности корпусов атомных реакторов и парогенераторов.

Общая методика расчета на сопротивление разрушению элементов ответственного оборудования АЭС с ВВЭР рассматривается на примере КР.

Основные положения методики расчета на сопротивление разрушению КР. Расчет основывается на положениях документов [1, 7, 8] и включает два этапа:

упрощенный расчет на СХР для определения наиболее опасных аварийных режимов и месторасположений постулируемых дефектов;

уточненный расчет на сопротивление разрушению в упругопластической постановке с включением постулируемых дефектов в расчетную модель для наиболее неблагоприятных вариантов нагружения.

Упрощенный расчет на СХР заключается в следующем:

рассчитываются нестационарные тепловые поля для анализируемых режимов аварийных ситуаций;

выполняется упругий расчет НДС корпуса реактора без учета трещин и полей остаточных напряжений для анализируемых режимов нагружения;

учитываются остаточные напряжения в металле сварных швов и остаточные напряжения в основном металле, образовавшиеся вследствие нанесения наплавки, путем суммирования значений остаточных напряжений и напряжений, полученных в результате упругого расчета;

проводится расчет на СХР с использованием аналитических зависимостей по определению КИН для постулируемых трещин и расчетных данных о распределении напряжений по толщине КР без трещины;

на основе результатов проведенного расчета определяются наиболее опасные аварийные режимы и месторасположение постулируемых трещин.

При упрощенном расчете глубина расчетных постулируемых трещин выбирается на основании нормативных документов [7, 8]. Поскольку для нестационарных режимов нагружения КР наихудшая ситуация по условиям хрупкого разрушения не всегда реализуется для максимальной глубины трещины, расчет выполняется также для расчетных трещин меньшей глубины.

Уточненный расчет на сопротивление разрушению КР выполняется для наиболее опасных аварийных режимов и месторасположений постулируемых трещин, определенных в результате упрощенного расчета, и включает:

расчет полей остаточных напряжений и пластических деформаций в сварном шве, основном металле и антикоррозионной наплавке;

расчет нестационарных тепловых полей для наиболее опасных аварийных режимов;

упругопластический расчет кинетики НДС корпуса реактора для наиболее опасных режимов с включением постулируемой трещины в расчетную модель и учет полей остаточных напряжений и деформаций;

вычисление расчетных значений КИН для постулируемых трещин с использованием результатов проведенного упругопластического расчета и концепции G -интеграла “закрытия трещины”;

определение максимально допускаемой критической температуры хрупкости металла КР в соответствии с нормативными документами [7, 8].

Рассмотрим более детально основные особенности изложенного подхода.

Расчет кинетики НДС. Методика расчета базируется на последовательном решении задачи нестационарной теплопроводности и краевой задачи неизотермической термопластичности [13].

При этом зависимости температуры среды и коэффициента теплообмена от времени и пространственных координат, которые необходимы в качестве граничных условий при решении задач теплопроводности, должны определяться с применением специальных программных средств, таких как ОКВМIX и KWU-MIX, основывающихся на результатах полномасштабных экспериментов, после проведения общих теплогидравлических расчетов с применением расчетных программ, например RELAP5/MOD3.2 [1].

Расчет кинетики НДС в упругопластической постановке выполняется на основе МКЭ с использованием двух- и трехмерных расчетных моделей КР с “встроенной” в дискретную модель постулируемой трещиной. В основу конечноэлементного анализа положена смешанная схема МКЭ [14], обеспечивающая непрерывную аппроксимацию как для перемещений, так и для напряжений, что позволяет определять параметры НДС и механики разрушения с высокой степенью точности.

Расчетная оценка полей остаточных напряжений и деформаций. Методика расчетного определения полей остаточных напряжений и деформаций в КР включает моделирование следующих технологических операций: выполнение сварного соединения; термообработка по режиму высокого отпуска; нанесение антикоррозионной наплавки; термообработка по режиму высокого отпуска; гидравлические испытания на заводе-изготовителе. При расчете кинетики напряжений и деформаций, обусловленных операциями сварки, наплавки, последующей термообработкой и гидравлическими испытаниями, использовали гипотезу об осевой симметрии, что позволяет рассматривать задачу об определении полей остаточных напряжений и деформаций в осесимметричной постановке. Полученные данные о характере распределения и уровнях остаточных напряжений и пластических деформаций при моделировании технологических операций сварки, наплавки и термообработки полностью согласуются с известными результатами [7].

Расчетные постулируемые дефекты. При проведении расчетов на сопротивление разрушению КР постулируемый дефект в данной работе определяли как плоскую поднаплавочную полуэллиптическую трещину глубиной $(0,07...0,125)s$, где s – толщина КР с учетом наплавки, и отношением полуосей 0,3 [4, 7, 8]. Рассматривали трещины, расположенные в осевом и окружном

направлении в металле кольцевых сварных соединений под входным патрубком корпуса на оси “языка” холодной воды. Отметим, что расчетный дефект во всех расчетах постулировали как поднаплавочную трещину, расположенную в основном металле КР, в отличие от подхода, согласно которому при упрощенном расчете постулируют поверхностную трещину, тогда как при упругопластическом – моделируют поднаплавочную трещину [2].

Расчетная методика определения КИН. Основные положения разработанной методики расчета базируются на использовании концепции G -интеграла “закрытия трещины” в дискретных моделях МКЭ. Расчетное обоснование применения концепции G -интеграла к решению задач теории трещин на основе смешанной схемы МКЭ содержится в [11, 12].

При условии плоской деформации и выполнении определенных допущений для вычисления G -интеграла используют инвариантный, т.е. не зависящий от пути интегрирования, контурный J -интеграл Черепанова–Райса [15]. При этом следует учитывать, что инвариантность значений J -интеграла будет в том случае, если тело либо упругое, либо подчиняется уравнениям деформационной теории пластичности [16]. Если принять, что материал в пластической области деформируется в соответствии с уравнениями теории течения [17], J -интеграл не будет инвариантен. Результаты, полученные по этим теориям пластичности, совпадают, если тело с трещиной нагружается монотонно растущей нагрузкой, изменяющейся пропорционально одному параметру, в этом случае справедливо равенство $G = J$. Однако при произвольной истории нагружения, например при аварийном охлаждении активной зоны КР, когда в вершине трещины имеет место разгрузка материала, или при повторном нагружении равенство двух интегралов G и J теряет силу. В этом случае расчет на сопротивление упругопластическому разрушению с применением концепции J -интеграла становится необоснованным.

Таким образом, при упругопластическом моделировании произвольной истории нагружения J -интеграл не может использоваться в качестве адекватного параметра разрушения, тогда как G -интеграл сохраняет обоснованный физический смысл в качестве удельной работы, необходимой для страгивания стационарной трещины в упругопластическом теле. Применение концепции G -интеграла в дискретных моделях МКЭ показало, что результаты упругопластического расчета полностью согласуются с принципом мелкомасштабного пластического течения в вершине трещины, в частности, с “поправкой Ирвина” на пластичность и сохраняют это свойство при сгущении сетки [12].

Для получения надежных и устойчивых результатов определения величин G -интеграла и КИН расчеты выполняются на последовательно сгущаемых сетках МКЭ. Величина шага сетки в окрестности расчетной точки фронта трещины выбирается из условия, согласно которому полученные для двух последовательно сгущаемых сеток МКЭ расчетные значения параметров разрушения достаточно близки. На этапах активного нагружения применение концепции G -интеграла в дискретных моделях МКЭ приводит к устойчивым результатам определения КИН при использовании достаточно умеренных по размерам конечных элементов в окрестности фронта трещины. При разгрузке материала в окрестности фронта трещины сходимость результатов определения расчетных значений КИН достигается при более мелких разбиениях.

Программные средства, использованные в расчетах. Расчет нестационарных тепловых полей, кинетики НДС и КИН проводили с использованием программного комплекса SPACE-RELAX [18]. Вычислительный программный комплекс SPACE-RELAX разрабатывался в течение многих лет в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины для решения широкого круга прикладных задач, включая рассматриваемые при математическом моделировании процессы формирования и перераспределения напряжений и деформаций в ответственных элементах конструкций АЭС с ВВЭР, прошел всестороннее тестирование и разрешен к применению в атомной отрасли Украины соответствующим приказом эксплуатирующей организации – НАЭК “Энергоатом”.

Выбор расчетных схем (моделей). При расчетах напряженности КР с постулированной трещиной при термошоке следует учитывать влияние многих факторов, связанных с конструктивными параметрами КР, условиями нагружения, физико-механическими характеристиками материалов, остаточной технологической напряженностью, параметрами трещины, расчетными методами и моделями [1]. Обычно задачу упрощают, пренебрегая влиянием ряда факторов, а также схематизируя реальную ситуацию. Для выбора наиболее значимых факторов необходимо проводить анализ чувствительности получаемых решений к вариации того или иного фактора, а также к выбранной схематизации реальной ситуации. Достаточно часто при этом, для экономии времени и затрат, пользуются результатами уже проведенных, известных исследований, например [1]. Однако следует учитывать, что уже известные закономерности могут не только количественно, но и качественно измениться при рассмотрении иного объекта, например КР ВВЭР-1000 вместо ВВЭР-400. Иногда даже незначительные изменения некоторого параметра могут существенно повлиять на чувствительность и (или) точность расчета. Важное значение также имеют квалификация и опыт расчетчика при разработке расчетных схем и включении тех или иных факторов в число рассматриваемых при решении. Получаемые различия в решениях могут быть достаточно ощутимыми. Так, известна из практики ситуация с различием в несколько десятков градусов максимально допускаемой критической температуры хрупкости металла однотипных КР из-за разных подходов к моделированию теплогидравлических процессов при термошоке и соответственно к определению граничных условий для задачи теплопроводности. Другой пример различной чувствительности в зависимости от рассматриваемого объекта – влияние на КИН различия между модулем упругости и коэффициентом термического расширения основного металла и наплавки, имеющееся в нормативных документах. Это различие практически не сказывается на уровне КИН для поверхностной трещины, но заметно влияет на его величину в случае поднаплавочной трещины в металле КР ВВЭР-1000.

Ниже с использованием изложенных подходов анализируется влияние некоторых факторов на расчетную оценку сопротивления разрушению, которым, на наш взгляд, не уделяется должного внимания во многих работах, посвященных расчетам на сопротивление разрушению корпусов реакторов и парогенераторов.

Влияние плотности конечноэлементных разбиений. Оценим влияние густоты конечноэлементных сеток в окрестности вершины трещины при моделировании характерного режима охлаждения КР ВВЭР-1000. Расчеты проводили в осесимметричной постановке с учетом полей послесварочных напряжений и деформаций. При решении задачи использовали равномерную треугольную сетку в окрестности вершины поднаплавочной кольцевой трещины глубиной 20 мм, расположенной на оси языка холодной воды на уровне сварного шва № 4.

Точность и сходимость результатов расчета проверяли на последовательно сгущаемых сетках МКЭ. Величину шага сетки в окрестности вершины трещины принимали равной 1000, 100, 10, 1, 0,1 и 0,01 мкм. На рис. 1 представлены результаты упругопластических расчетов. Характерной особенностью таких расчетов является наличие ниспадающей ветви изменения КИН в конце процесса аварийного расхолаживания (термошока). Более резкое уменьшение КИН вызвано большим проявлением влияния разгрузки материала в окрестности вершины трещины, что связано с уменьшением величины шага сетки в этой зоне. Использование достаточно редких сеток не позволяет выявить эту зону, что искажает зависимость КИН от температуры, полученную на достаточно густых сетках, при которых имеет место сходимость численных результатов расчета. Анализ данных упругопластических расчетов в трехмерной постановке приводит к аналогичному выводу. Указанное обстоятельство является весьма существенным фактором, поскольку более точный учет разгрузки материала в вершине трещины позволяет выявить дополнительные резервы прочности КР и, следовательно, его ресурса. Однако при этом следует обосновать адекватность применяемых расчетных моделей физическим процессам деформирования и разрушения материала в вершине трещины.

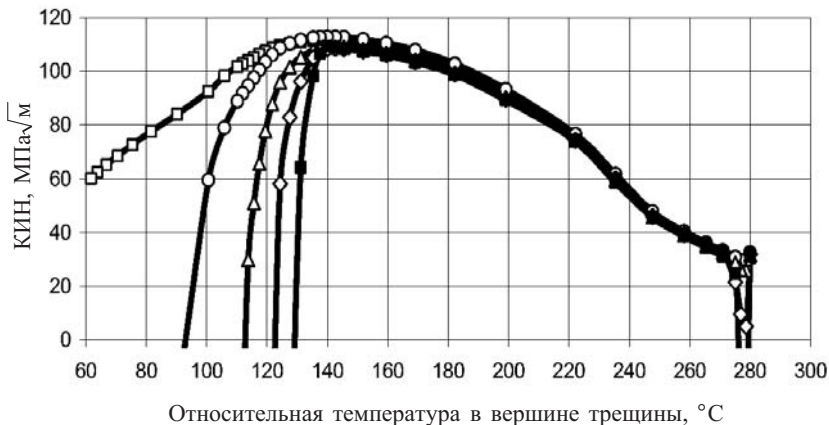


Рис. 1. Изменение КИН в зависимости от температуры в наиболее глубокой точке поднаплавочной кольцевой трещины при различных шагах сетки h : □ – $h = 1000$ мкм; ○ – $h = 100$ мкм; △ – $h = 10$ мкм; ◇ – $h = 1$ мкм; ■ – $h = 0,1$ мкм.

Учет остаточной технологической напряженности. Расчетный анализ проводили для пяти вариантов учета полей остаточных технологических напряжений, применяемых в мировой практике: 1) процедура “stress-free-

temperature”; 2) нагрев до температуры высокого отпуска и охлаждение до нормальной температуры; 3) процедура stress-free-temperature и приложение дополнительной нагрузки, при которой в сварных соединениях возникают растягивающие напряжения порядка 100 МПа; 4) нагрев до температуры высокого отпуска, охлаждение до нормальной температуры и приложение дополнительных растягивающих напряжений порядка 100 МПа; 5) упруго-пластический расчет с учетом полного цикла формирования и перераспределения полей остаточных напряжений и деформаций.

На рис. 2 представлены результаты упругопластических расчетов для поднаплавочной кольцевой трещины глубиной 15 мм, расположенной на уровне сварного шва № 4 КР ВВЭР-1000, при моделировании характерного режима охлаждения.

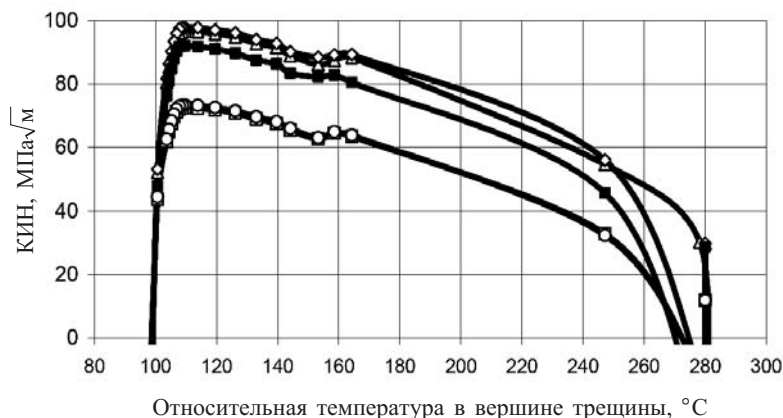


Рис. 2. Изменение КИН в зависимости от температуры в наиболее глубокой точке поднаплавочной кольцевой трещины при различных вариантах учета полей остаточных напряжений: □ – вариант 1); ○ – вариант 2); △ – вариант 3); ◇ – вариант 4); ■ – вариант 5).

Видно, что учет остаточных напряжений по вариантам 1) и 2) приводит к расхождению результатов расчета КИН при термошоке менее 1%. Однако полученные таким образом значения КИН существенно неконсервативны по сравнению с таковыми по другим вариантам учета остаточных напряжений, так как, по сути, учитываются только остаточные напряжения, возникающие после нанесения антикоррозионной наплавки на внутреннюю поверхность КР, и не учитываются остаточные напряжения в сварных швах.

Одним из возможных способов учета остаточных напряжений после сварки является метод дополнительной нагрузки, при использовании которого в цилиндрических обечайках КР возникают дополнительные осевые растягивающие напряжения порядка 100 МПа. Эта величина связана с уровнем остаточных напряжений после сварки при определенном сочетании технологических параметров.

Расчеты с использованием метода дополнительной нагрузки приводят к более высоким значениям КИН при термошоке. Однако результаты расчетов КИН для 3) и 4) вариантов заметно различаются только на начальном этапе охлаждения и практически совпадают на участках с максимальными значениями КИН.

Упругопластический расчет с учетом полного цикла формирования и перераспределения полей остаточных напряжений при моделировании технологических операций сварки и нанесения антикоррозионной наплавки приводит к менее консервативным оценкам критической температуры хрупкости по сравнению с вариантами 3) и 4), в которых учитывается дополнительная нагрузка. В то же время эти оценки являются более консервативными по сравнению с оценками по вариантам расчета 1) и 2), в которых не учитываются остаточные напряжения в сварном шве.

Учет истории нагружения. Для оценки влияния учета истории термодинамического нагружения на сопротивление разрушению узла соединения горячего коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 моделировали эксплуатационный цикл нагружения. Расчет НДС узла соединения выполняли в упругопластической постановке с учетом и без учета истории нагружения.

Расчет на сопротивление разрушению с учетом истории нагружения проводили при моделировании следующего цикла эксплуатационного нагружения: гидравлические испытания (ГИ) → разгрузка после ГИ → нормальные условия эксплуатации (НУЭ). В качестве начального состояния принимали поля остаточных напряжений и деформаций, полученные в результате расчетного моделирования технологических операций сварки и термообработки.

Расчет без учета истории нагружения осуществляли для режима НУЭ путем однократного нагружения при свободном от напряжений начальном состоянии.

Конечноэлементная трехмерная модель включала парогенератор, главный циркуляционный трубопровод и КР. Постулировали поверхностную кольцевую полуэллиптическую трещину глубиной 18 мм и отношением полуосей 2/3, расположенную в зоне максимальной напряженности галтели узла соединения. Решение задачи получено с применением процедуры фрагментации.

Анализ результатов расчетов показывает, что неучет истории нагружения и остаточной напряженности после термообработки приводит к заниженным расчетным значениям КИН (до 28%) и, следовательно, к неконсервативной оценке сопротивления разрушению узла соединения при моделировании эксплуатационного цикла нагружения (рис. 3).

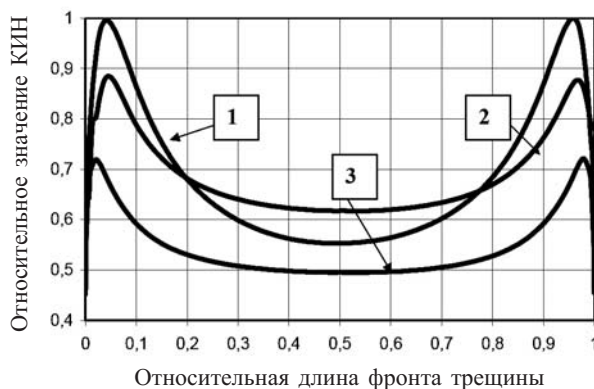


Рис. 3. Распределение относительных значений КИН вдоль фронта поверхностной кольцевой трещины в узле парогенератора: 1 – с учетом истории нагружения и остаточной напряженности; 2 – с учетом истории нагружения; 3 – без учета истории нагружения и остаточной напряженности.

Выводы

1. Рассмотрены современные расчетные подходы к оценке сопротивления разрушению элементов ответственного оборудования 1-го контура АЭС с ВВЭР. Отмечается, что решение вопросов обоснования безопасной эксплуатации, оценки целостности КР и продления его ресурса существенно зависит не только от используемых критериев сопротивления разрушению и прогнозирования трещиностойкости металла, но и от достоверности результатов расчетного анализа кинетики НДС и параметров нелинейной механики разрушения.

2. Развита общая методика расчета на сопротивление разрушению корпусов реакторов ВВЭР при моделировании аварийных режимов охлаждения. Сформулированы основные положения упругопластического расчета кинетики НДС корпусов реакторов с учетом полей остаточных технологических напряжений, а также разработана расчетная методика определения параметров разрушения постулируемой трещины.

3. С применением разработанных методов расчета и программного обеспечения показано существенное влияние на расчетную оценку сопротивления разрушению КР таких факторов, как учет истории термосилового нагружения и упругопластического деформирования металла в окрестности фронта постулируемой трещины в условиях нагрузки и разгрузки, учет полей остаточных технологических напряжений и деформаций, регулярность и плотность конечноэлементной сетки в окрестности фронта расчетной трещины, процедура вычисления параметров упругопластического разрушения в дискретных моделях МКЭ.

4. Показано, что уточненный упругопластический расчет на стадии разгрузки металла в окрестности фронта трещины при термошоке КР может позволить обосновать дополнительные резервы прочности и ресурса КР, а неучет истории нагружения и остаточной напряженности после термообработки приводит к неконсервативной оценке сопротивления разрушению узла соединения горячего коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 при моделировании эксплуатационного цикла нагружения.

Резюме

Розглянуто сучасні підходи розрахункового аналізу до оцінки опору руйнуванню елементів відповідального обладнання 1-го контуру АЕС з ВВЕР. Відмічається, що розв'язання питань обґрунтування безпечної експлуатації, оцінки цілісності корпусу реактора і продовження його ресурсу суттєво залежать від результатів розрахунку кінетики напружено-деформованого стану, адекватного урахування полів залишкових технологічних напружень і деформацій, достовірної оцінки параметрів нелінійної механіки руйнування. Розвинуто загальну методологію розрахункового аналізу на опір руйнуванню корпусів реакторів ВВЕР при моделюванні аварійних режимів охолодження. Сформульовано основні положення пружно-пластичного розрахунку кінетики напружено-деформованого стану корпусів реакторів з урахуванням полів залишкових технологічних напружень і деформацій, а також запропоновано розрахункову методику визначення параметрів руйнування постульованої

тріщини. Із використанням розроблених методів розрахунку і програмного забезпечення показано суттєвий вплив на розрахункову оцінку опору руйнуванню корпусів реакторів ВВЕР-1000 таких чинників, як історія термосилового навантаження і пружно-пластичного деформування металу в околі фронту постульованої тріщини, варіанти урахування залишкової технологічної напруженості, регулярність і щільність скінченноелементної сітки в околі фронту розрахункової тріщини, процедура обчислення параметрів пружно-пластичного руйнування в дискретних моделях методу скінченних елементів. Показано, що уточнені пружно-пластичні розрахунки на стадії розвантаження металу в околі фронту тріщини при термошоці корпусу реактора можуть дозволити обґрунтувати додаткові резерви міцності та ресурсу корпусу реактора, а неврахування історії навантаження і залишкової напруженості після термообробки призводить до неконсервативної оцінки опору руйнуванню вузла з'єднання колектора з корпусом парогенератора ПГВ-1000 при моделюванні експлуатаційного циклу навантажування.

1. *Pressurized Thermal Shock in Nuclear Power Plants: Good Practices for Assessment* // IAEA-TECDOC-1627. – Vienna, 2010. – 229 p.
2. Шарый Н. В., Семешкин В. П., Пиминов В. А., Драгунов Ю. Г. Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР. – М.: ИздАТ, 2004. – 496 с.
3. Шарый Н. В. Актуальные проблемы расчетного обоснования прочности реакторных установок ВВЭР и пути их решения // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС.* – 2010. – Вып. 27. – С. 5 – 20.
4. *Brumovsky M. IAEA NULIFE VERLIFE – guidelines for integrity and lifetime assessment of components and piping in WWER NPPs during operation* // *Конструкционная прочность материалов и ресурс оборудования АЭС: Тез. докл. междунар. конф. / Отв. ред. В. В. Харченко.* – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2012. – С. 6 – 7.
5. Харченко В. В., Чирков А. Ю., Кобельский С. В. и др. Особенности расчетной оценки на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов ВВЭР при термошоке // *Прочность материалов и элементов конструкций.* – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2010. – С. 225 – 230.
6. Харченко В. В., Чирков А. Ю., Кобельский С. В. и др. Влияние истории термомеханического нагружения на напряженность корпусов реакторов ВВЭР АЭС при термошоке // *Пробл. прочности.* – 2010. – № 1. – С. 27 – 36.
7. *РД ЭО 0606-2005. Методика расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР (МРКР-СХР-2004).* – СПб.; М., 2004. – 65 с.
8. *МТ-Д.0.03.391-06. Методика оценки прочности и ресурса корпусов реакторов ВВЭР в процессе эксплуатации.* – Киев, 2009. – 50 с.

9. Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др. Оценка напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения “горячего” коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС // Пробл. прочности. – 2003. – № 5. – С. 142 – 153.
10. Харченко В. В., Степанов Г. В., Кравченко В. И. и др. Перераспределение напряжений в узле соединения коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 при его нагружении после термообработки // Там же. – 2009. – № 3. – С. 25 – 31.
11. Чирков О. Ю. Розвиток та реалізація змішаного методу скінченних елементів у задачах міцності коливальних та стійкості елементів конструкцій: Автореф. дис...д-ра техн. наук. – К., 2008. – 41 с.
12. Чирков А. Ю. Расчетный анализ модельных задач теории трещин на основе смешанной схемы метода конечных элементов // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2012. – Вып. 35. – С. 200 – 208.
13. Чирков А. Ю. Построение двухслойных схем интегрирования уравнений пластического течения в теории процессов деформирования по траекториям малой кривизны // Пробл. прочности. – 2012. – № 6. – С. 93 – 124.
14. Чирков А. Ю. Смешанная схема метода конечных элементов для решения краевых задач теории упругости и малых упругопластических деформаций. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2003. – 250 с.
15. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
16. Ильюшин А. А. Пластичность. Основы общей математической теории. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 272 с.
17. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
18. Програмне забезпечення “Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій” (SPACE) / Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA1.017.0054634-04. – 2004.

Поступила 10. 06. 2013