

УДК 539.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ СООТНОШЕНИЙ
МЕХАНИКИ ПОВРЕЖДЕННОЙ СРЕДЫ
ПРОЦЕССОВ РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ
НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ
АГРЕССИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КОРРОЗИОННЫХ СРЕД***

© 2013 г. **С.А. Капустин¹, В.А. Горохов¹, Ю.А. Чурилов¹,
В.А. Панов², П.В. Тряев²**

¹НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

²ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

vas-gor@rambler.ru

Поступила в редакцию 20.12.2012

Предложены вариант модели и алгоритмы моделирования на основе метода конечных элементов процессов коррозионного растрескивания под напряжением элементов конструкций, работающих в условиях агрессивного воздействия коррозионной среды. Для оценки работоспособности предложенных моделей и алгоритмов проведено численное моделирование процесса разрушения тонкостенного трубчатого образца, частично погруженного в жидкую хлорсодержащую среду, в условиях осевого растяжения.

Ключевые слова: коррозионная среда, напряжения, деформации, накопление повреждений, разрушение, прочность, численное моделирование.

Введение

Одним из важных факторов, существенно влияющих на физико-механические характеристики металлов, является рабочая среда, в которой находятся исследуемые конструкции или их отдельные элементы.

Окружающая металл жидкая или газовая среда может воздействовать на поверхностный слой металлов и, вступая с ним в физическое или химическое взаимодействие, упрочнять или разупрочнять его. В результате этого взаимодействия деформационные и прочностные свойства металлов существенно изменяются. Длительное пребывание нагруженных конструкций в агрессивной окружающей среде часто приводит к коррозии металла.

В общем случае явление коррозии можно определить как повреждение материала вследствие химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой. Сложность процесса коррозии заключается в том, что он зависит от

* Выполнено в рамках реализации Программы государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-2843.2012.8).

множества факторов, характеризующих окружающую среду, и от электрохимической и металлургической природы явления.

Для конструкционных материалов оборудования и систем ядерных энергетических установок (ЯЭУ) особое значение имеет вид коррозии, обусловленный взаимодействием химических реакций в материале с механическими эффектами, определяемыми изменением напряжений и деформаций. В литературе этот вид коррозии называют коррозионным растрескиванием под напряжением (КРН).

Широко распространено определение КРН как увеличения скорости коррозионного процесса под действием статических напряжений. Коррозионное растрескивание, как предельный случай коррозии под напряжением, представляет собой полное разрушение металла в результате одновременного воздействия на него напряжений и коррозии.

Коррозионное растрескивание является характерным случаем, когда взаимодействует химическая реакция и механические силы, что приводит к структурному разрушению. Такое разрушение считается хрупким в присутствии определенной коррозионной среды и проявляется образованием множества трещин в материале под влиянием одновременно действующих растягивающих напряжений и коррозионной среды.

Согласно современным представлениям, развитие процесса КРН связано с разрушением в результате действия растягивающих напряжений в пленке, защищающей поверхность металла от агрессивного влияния коррозионной среды, и последующего анодного растворения металла. При этом ускоренный процесс коррозии, вызванный действием коррозионной среды на не защищенную пленкой поверхность металла, может быстро замедляться вследствие поляризации и повторного образования (залечивания) защитной пленки, что связано с изменением концентрации электролита внутри трещины.

Таким образом, возникновение и развитие процесса растрескивания под напряжением связано с тремя взаимодействующими процессами:

- разрушением в результате деформации защитных пленок на поверхности металла;
- анодным растворением металла в области, свободной от защитной пленки;
- образованием новой защитной пленки в результате залечивания.

Обзор публикаций, посвященных созданию методов оценки влияния агрессивного воздействия коррозионных сред, в частности процессов КРН, на развитие повреждений в конструкционных материалах ЯЭУ, показывает, что эта проблема является весьма актуальной и малоизученной. В работе [1] отмечается, что наиболее важные результаты по созданию теории и математических моделей для надежного прогнозирования количественных характеристик воздействия коррозии на долговечность конструкций были получены в работах [2, 3], относящихся к 60-м – 70-м годам двадцатого столетия, и до настоящего времени практически отсутствуют примеры изучения процессов КРН в материалах и элементах конструкций в условиях агрессивного воздействия коррозионных сред на основе современных представлений механики деформируемых тел и современных численных методов.

В предлагаемой статье рассмотрен вариант математической модели, описывающей в рамках соотношений механики поврежденной среды процессы КРН нержавеющей сталей в условиях агрессивного воздействия коррозионных сред при квазистатических термосиловых нагружениях, и особенности ее реализации в зада-

чах моделирования процессов коррозионного разрушения реальных объектов. Предлагаемая модель включена в состав общей модели поврежденного материала, реализованной в вычислительном комплексе УПАКС [4, 5] моделирования на основе метода конечных элементов (МКЭ) процессов нелинейного деформирования и разрушения конструкций при квазистатических термосиловых нагружениях.

1. Основные соотношения модели, описывающей влияние агрессивного воздействия коррозионных водных сред на процессы накопления и развития повреждений в нержавеющих сталях при квазистатических термосиловых нагружениях

При построении предлагаемой ниже модели КРН рассматривается как некоторый нестационарный процесс изменения состояния конгломерата из окисной пленки, защищающей основной материал от агрессивного воздействия коррозионной среды, самого материала, состояние которого определяется уровнем действующих напряжений, температуры, временем воздействия и концентрацией коррозионной среды, а также параметрами, характеризующими историю необратимого деформирования и текущую поврежденность материала.

В соответствии с принятым предположением о механизме КРН возникновение и развитие процесса растрескивания под напряжением представляется как результат взаимодействия разрушения защитных пленок на поверхности металла, анодного растворения металла и образования новой защитной пленки.

При описании поведения пленки предполагается, что при действии растягивающих напряжений в материале пленки могут накапливаться необратимые деформации e_n , меняющиеся со скоростью $\varepsilon_n(\gamma, \sigma_1)$, зависящей от степени агрессивности коррозионной среды, характеризуемой параметром γ , и уровня растягивающих напряжений, характеризуемых значением главного растягивающего напряжения σ_1 . Процесс накопления необратимых деформаций пленки представляется в виде суммы вкладов элементарных изменений необратимых деформаций пленки на участках активного действия растягивающих напряжений:

$$e_n = \sum \delta e_n, \quad \delta e_n = \int_0^{\delta t} \varepsilon_n(t) dt,$$

где δt – промежуток времени, в пределах которого $d\sigma_1 / dt \geq 0$.

При достижении деформацией e_n некоторого предельного значения e_n^r ($e_n \geq e_n^r$) происходит мгновенное разрушение защитной пленки.

Для характеристики текущего состояния пленки вводится понятие относительной толщины пленки \tilde{h} . В начальном состоянии $\tilde{h} = 1$, $e_n = 0$. Полностью разрушенной пленке соответствует значение $\tilde{h} = 0$. Также предполагается, что в частично или полностью разрушенной пленке ($\tilde{h} < 1$) при возникновении условий $d\sigma_1 / dt \leq 0$ происходит залечивание пленки со скоростью $\varepsilon_z = \varepsilon_z(t, \gamma)$.

Изменение толщины пленки в результате залечивания представляется в виде

$$\Delta h_z = \sum \delta h_z, \quad \delta h_z = \int_0^{\delta t_z} \varepsilon_z(t, \gamma) dt,$$

где δt_z – время, при котором $d\sigma_1 / dt < 0$.

Таким образом, при условии $d\sigma_1/dt \leq 0$ в точке материала будет происходить увеличение толщины пленки

$$\hat{h} = \bar{h} + \Delta h_z \quad \text{при} \quad \hat{h} \leq 1.$$

При повторных растяжениях, т.е. при $d\sigma_1/dt > 0$, снова может произойти разрушение пленки, если вновь накопленная деформация e_n достигнет предельного значения $e_n \geq e_n^r \cdot \tilde{h}$, где \tilde{h} – текущее значение относительной толщины пленки. Разрушение также происходит мгновенно, при этом $\tilde{h} = 0, e_n = 0$.

Таким образом, предполагается, что толщина пленки \tilde{h} может либо монотонно увеличиваться при $d\sigma_1/dt < 0$ до значения $\tilde{h} \leq 1$, либо уменьшаться (разрушаться) до значения $\tilde{h} = 0$ при условии $e_n \geq e_n^r \tilde{h}$, где e_n^r – накопленное значение растягивающей необратимой деформации пленки на текущем участке восстановления при $\tilde{h} > 0$. Функции $e_n^r(\gamma)$, $\varepsilon_n(\gamma, \sigma_1)$, $\varepsilon_z(t, \gamma)$ являются функциями материала и должны быть определены из соответствующих экспериментов.

Для описания изменения свойств металла в процессе его коррозии предполагается, что после разрушения пленки при $\tilde{h} = 0$ происходит анодное растворение металла под пленкой, сопровождающееся деградацией прочностных свойств. В рамках предлагаемой модели принимается, что в процессе анодного растворения происходит снижение текущего значения предела прочности металла σ_R^t при растяжении.

Скорость растворения металла ε_M считаем зависящей от параметра γ , а также от уровня растягивающих напряжений σ_1 :

$$\varepsilon_M = \varepsilon_M(\sigma_1, \gamma).$$

Функция $\varepsilon_M(\sigma_1, \gamma)$ является функцией материала и определяется из соответствующих экспериментов.

Процесс растворения материала в рассматриваемой точке считается необратимым и представляется в виде

$$\sigma_R^t = \sigma_R^0 (1 - \sum \varepsilon_M \cdot \delta t_M),$$

где $\sigma_R^0 = \sigma_R^t(t_M = 0)$, δt_M – время действия коррозионной среды при $\tilde{h} = 0$.

В случае действия постоянных напряжений ($\sigma_1 = \text{const}$) можно считать

$$\sigma_R^t = \sigma_R^0 (1 - \varepsilon_M t_M),$$

т.е. текущий предел прочности материала при растяжении необратимо уменьшается с ростом t_M .

Таким образом, агрессивное воздействие коррозионной среды на не защищенный оксидной пленкой материал, находящийся в условиях растяжения, снижает его прочностные характеристики, что в итоге приводит к развитию в материале хрупких повреждений, завершающихся появлением трещины, открывающей доступ коррозионной среды к внутренним волокнам материала. При снижении уровня растягивающих напряжений (при $d\sigma_1/dt < 0$) на незащищенных поверхностях материала происходит образование новой пленки и процесс разрушения будет приостановлен. Ввиду принятого предположения о хрупком характере КРН для описания процесса накопления повреждений, связанных с коррозией металла, используется вариант модели накопления хрупких повреждений [5, 6] с учетом рассмотренной выше зависимости предельных напряжений от параметров, характеризующих результаты

воздействия коррозионной среды. При этом приращение $\Delta\omega$ используемой в ВК УПАКС меры поврежденности ($\omega = 0$ для неповрежденного материала, $\omega = 1$ для полностью разрушенного) на элементарном шаге изменения внешних воздействий представляется в виде

$$\Delta\omega = C \frac{\tilde{\sigma}_1 - \sigma_R^t(t, \tilde{h})}{\tilde{\sigma}_1},$$

где $\tilde{\sigma}_1, \tilde{h}$ – прогнозируемые значения главного растягивающего напряжения и остаточной толщины пленки в рассматриваемой точке материала; C – регуляризационный параметр, выбираемый на основе применения схемы «релаксации состояния», используемой для реализации вычислительного процесса при моделировании хрупких повреждений.

Приведенные соотношения позволяют описать процесс КРН материала при известных значениях параметра коррозионной среды γ , температуры T , времени t воздействия коррозионной среды, параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние (НДС), историю необратимого деформирования и накопления повреждений в точке материала, которые определяются из решения соответствующей краевой задачи деформирования исследуемого объекта. Также должны быть известны материальные функции моделей, используемые в процессе решения задачи, список которых должен быть дополнен функциями, необходимыми для реализации предложенной модели КРН:

$e_n^r(\gamma)$ – предельная деформация пленки;

$\varepsilon_n = \varepsilon_n(\gamma, \sigma_1)$ – скорость развития необратимых деформаций пленки;

$\varepsilon_M(\gamma, \sigma_1)$ – скорость коррозионного растворения металла;

$\varepsilon_z(\gamma)$ – скорость залечивания пленки.

Все перечисленные функции должны быть получены в результате проведения прямых или косвенных экспериментов.

2. Особенности реализации модели в задачах моделирования на основе МКЭ процессов КРН конструкций в условиях агрессивного воздействия коррозионных сред

Предложенная выше модель ориентирована на применение ее для анализа квазистатических процессов накопления и развития повреждений конструкций на основе МКЭ. Согласно существующим представлениям, реальный процесс КРН имеет хрупкий характер и локализуется в пределах малого объема материала, определяемого размерами нескольких зерен материала. Однако МКЭ оперирует с осредненными или простейшими распределениями физических величин в пределах рассматриваемых конечных элементов (КЭ). При этом густота сетки КЭ при решении практических задач не может быть доведена до такой степени детализации, чтобы описать конфигурацию отдельных зерен. Поэтому в предлагаемой методике введено предположение об осреднении физических величин, характеризующих КРН в пределах используемого геометрического носителя физической информации (физического узла).

Аналогичное предположение делается относительно принимаемого понятия «хрупкое разрушение». Согласно физической картине КРН, хрупкое разрушение означает полную деградацию характеристик механического сопротивления материала в достаточно малом его микрообъеме, которая происходит мгновенно. В рамках

терминов механики поврежденной среды (МПС) в окрестности такого микрообъема мера поврежденности материала ω должна скачкообразно изменить значение от $\omega = 0$ для неповрежденного материала до значения $\omega = 1$ после разрушения.

В предлагаемой методике, согласно принятому предположению, мера ω характеризует осредненную поврежденность макрообъема, состоящего из достаточно большого числа микрообъемов, благодаря чему значение этой функции в физическом узле в процессе КРН может принимать последовательно увеличивающиеся значения в пределах $0 \leq \omega \leq 1$.

Кроме того, описание дискретного (прерывного) процесса изменения функции ω в рамках используемых вычислительных схем оказывается несколько затруднительным, поэтому этот дискретный процесс заменяется эквивалентным эволюционным процессом на основе упомянутой выше схемы «релаксации состояния», используемой в ВК УПАКС для реализации моделей хрупкого разрушения материалов.

При моделировании на основе МКЭ процессов КРН из множества физических узлов, соответствующих рассматриваемой схеме дискретизации исследуемого объекта, выделяется класс «коррозионных узлов», в которых возможны коррозионные повреждения, расположенные на той части поверхности, которая непосредственно соприкасается с агрессивной средой. Поэтому первоначально к числу коррозионных узлов будут относиться физические узлы, расположенные на поверхности контакта с агрессивной средой.

В процессе воздействия агрессивной среды некоторые из коррозионных узлов могут получать повреждения, мера которых определяется скалярной функцией ω . Для неповрежденных узлов $\omega = 0$, для частично поврежденных $0 < \omega < 1$. Узлы, в которых $\omega = 1$, считаются полностью разрушенными. Материал в окрестности таких узлов перестает оказывать сопротивление любым видам деформаций и, кроме этого, допускает проникновение агрессивной среды к внутренним узлам области, расположенным в непосредственной близости к разрушенному узлу. Внутренние узлы, к которым обеспечивается доступ агрессивной среды, добавляются к множеству ранее определенных коррозионных узлов. Предполагается, что в качестве таких вновь образовавшихся коррозионных узлов рассматриваются лишь те внутренние узлы, которые принадлежат элементам, прилегающим к вновь разрушенному узлу.

Также принимается, что частично поврежденные узлы (в которых значение меры поврежденности $\omega < 1$) не приводят к нарушению сплошности материала и не допускают проникновения в него агрессивной среды.

Ввиду существенной нелинейности соотношений предложенной модели КРН краевые задачи, к которым сводится моделирование процессов деформирования и разрушения конструкций в условиях агрессивного воздействия коррозионных сред, оказываются также нелинейными. Решение таких задач осуществляется в рамках используемой в ВК УПАКС общей методологии исследования процессов деформирования и разрушения конструкций при квазистатических термосиловых нагружениях путем пошагового интегрирования инкрементальных уравнений с использованием комбинированной шаговой схемы.

Решение нелинейных задач на каждом шаге изменения внешних воздействий осуществляется в форме метода начальных напряжений. Численное решение линеаризованных задач строится на основе МКЭ с использованием универсальных моделей изопараметрических квадратичных КЭ с сирендиповой аппроксимацией поля перемещений. В качестве физических узлов таких элементов используются узлы

основной сетки. В этих узлах хранятся и вычисляются все величины, определяющие физическое состояние в точке материала (температура, деформации, параметры состояния). При этом общая схема вычислений в задачах моделирования КРН остается такой же, как в исходном варианте ВК УПАКС, однако вносится ряд изменений, касающихся входной информации и информации, возникающей в процессе вычислений, и вводятся дополнительные операции, обеспечивающие вычисление параметров, характеризующих коррозионные процессы. В частности, в состав входной информации дополнительно включены список коррозионных узлов и значения параметров γ в этих узлах в исходном состоянии.

В состав параметров, характеризующих текущее состояние материала, в коррозионных узлах дополнительно включены величины:

- параметр γ , характеризующий степень агрессивности коррозионной среды в рассматриваемом физическом узле;
- накопленная необратимая деформация пленки e_n ;
- параметр \tilde{h} , характеризующий текущую толщину защитной пленки;
- значение разрушающего напряжения σ_R^t в коррозионных узлах, соответствующее текущей истории растворения материала.

В вычислительный процесс решения задачи на его различных стадиях также вводится ряд дополнительных операций, в том числе:

- вычисление на шаге нагружения текущих значений необратимых деформаций пленки e_n^d ;
- проверка условия разрушения пленки;
- вычисление изменения Δh_z и остаточной толщины \tilde{h} пленки в результате заживления;
- вычисление значения разрушающего напряжения σ_R^t , соответствующего текущей истории растворения материала;
- вычисление изменения мер коррозионного разрушения на различных стадиях вычислительного процесса;

- проверка условия полного разрушения материала ($\omega = 1$) в коррозионном узле.

В случае если на текущем шаге нагружения произошло полное разрушение некоторого коррозионного узла, то для этого узла производится:

- корректировка параметров, характеризующих НДС в узле (согласно алгоритму, используемому в ВК УПАКС при моделировании процессов развития трещин);
- определение локальных окрестностей, количество и номера вновь образовавшихся коррозионных узлов;
- наделение вновь образовавшихся коррозионных узлов необходимой для реализации коррозионной модели информацией (значения параметра γ агрессивности коррозионной среды, параметров, характеризующих текущее значение и историю изменения толщины защитной пленки, текущее время коррозии τ).

Таким образом, представленная модель коррозионного разрушения материалов может быть реализована в рамках общего алгоритма реализации модели поврежденного материала в составе ВК УПАКС.

3. Численное моделирование процесса КРН тонкостенного трубчатого образца, частично погруженного в жидкую хлорсодержащую среду, в условиях осевого растяжения

Для иллюстрации применения и оценки работоспособности предложенных моделей и алгоритмов в составе средств ВК УПАКС создан опытный вариант про-

граммы, позволяющий исследовать процессы КРН конкретных элементов конструкций в условиях коррозионных воздействий.

Проведено численное моделирование процесса разрушения тонкостенного трубчатого образца, частично погруженного в жидкую хлорсодержащую среду, в условиях осевого растяжения. Результаты экспериментального изучения разрушения таких образцов и влияния различных эксплуатационных факторов (уровня напряжений, температуры, состава среды) на стойкость против КРН стали X18H10T приведены в [7].

Численное моделирование проводилось для рабочей части образца – тонкостенной цилиндрической оболочки длиной $L = 26$ мм, имеющей внутренний диаметр $D = 10$ мм и толщину стенки $h = 1,5$ мм. Образец выполнен из нержавеющей стали X18H10T. Необходимые для расчета материальные функции, используемые в моделях КРН, получены при соответствующей обработке результатов из [7].

Левая часть образца (по длине рабочей части $l = 13$ мм) погружена в жидкую хлорсодержащую среду, нагретую до температуры $T = 100$ °С. Правая часть находится в воздушной среде и нагрета до температуры $T = 150$ °С.

График распределения температуры по контуру поперечного сечения рассматриваемого фрагмента образца представлен на рис. 1. По толщине образца температура принималась постоянной.

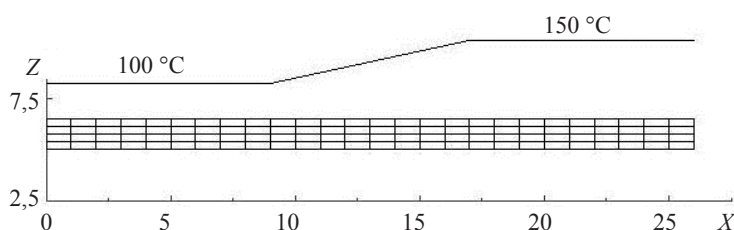


Рис. 1

Растяжение образца производилось осевой силой интенсивностью $q = 100$ МПа, равномерно распределенной по его правой торцевой поверхности, с последующей выдержкой под нагрузкой до его разрушения.

Процесс нагружения фрагмента образца осуществлялся в два этапа. На первом этапе производилось мгновенное приложение осевой силы, на втором – выдержка под нагрузкой (число подэтапов $n \geq 200$).

Численное решение задачи осуществлялось на основе МКЭ с использованием реализованных в ВК УПАКС изопараметрических КЭ осесимметричного тела с квадратичным законом изменения функций перемещений для трех вариантов дискретизации фрагмента. Наиболее грубый вариант дискретизации (вариант 1) изображен на рис. 1. В варианте 2 удваивалось число КЭ по толщине, а в варианте 3 удваивалось число КЭ как по толщине, так и по длине фрагмента.

Начальное размещение коррозионных узлов по наружной поверхности фрагмента образца (для $t = 0$) и последующее их распространение по объему образца показаны на рис. 2.

В процессе решения задач контролировались:

- текущие значения необратимой деформации пленки e_n^d в коррозионных узлах;
- текущие значения коэффициента $K_\sigma = 1 - \sigma_R^t / \sigma_R^0$ снижения значения разрушающего напряжения σ_R^t в коррозионных узлах;

- значения параметра \tilde{h} , характеризующие текущую толщину защитной пленки в коррозионных узлах;
- число и номера (текущее распределение по сеточной области) коррозионных узлов, характеризующихся отличным от нуля значением параметра γ ;
- текущие значения параметра поврежденности ω в узлах сеточной области.

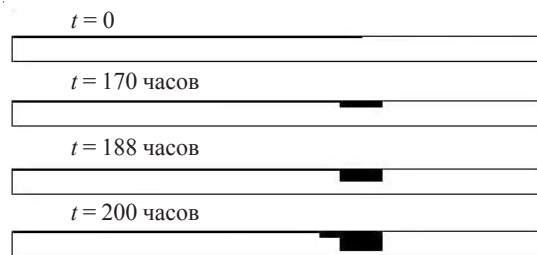


Рис. 2

В результате численных исследований было установлено следующее:

1. Разрушение образца для всех трех вариантов расчета произошло в области границы коррозионной среды с воздушной средой за время $t \approx 200$ часов.
2. Характер разрушенных в результате КРН зон и последовательность их развития во времени для всех рассмотренных вариантов качественно совпадают и незначительно отличаются количественно по глубине и ширине зон разрушения, соответствующих потере несущей способности образца. Картины развития во времени зон разрушения для третьего варианта задачи показаны на рис. 3.

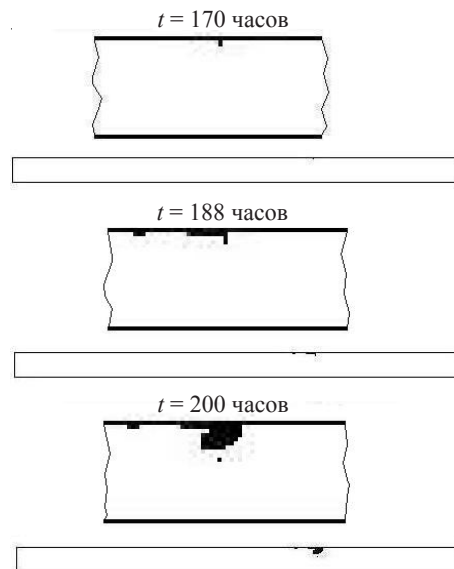


Рис. 3

3. Время разрушения защитной пленки в наиболее нагруженном коррозионном узле для всех вариантов составило $t \approx 150$ часов. Далее в этом узле начался процесс растворения металла, который продолжался до момента времени $t \approx 170$ часов и при значении коэффициента $K_{\sigma} \approx 0,73$ завершился хрупким разрушением материала в этом узле.

4. После разрушения рассмотренного коррозионного узла в его окрестности образовалась группа новых коррозионных узлов, в которых сразу же начался процесс растворения металла. К этому времени в большей части первоначальной группы коррозионных узлов закончился процесс разрушения защитной пленки и интенсивно происходил процесс растворения металла. В результате к моменту $t \approx 179$ часов для варианта 1 (и $t \approx 174$ часа для варианта 3) произошло еще одно разрушение узла из первоначальной группы коррозионных узлов.

5. Дальнейший процесс КРН образца сопровождался последовательным продвижением разрушенных узлов и соответствующим расширением окрестности вновь образовавшихся коррозионных узлов. Картина развития во времени процесса КРН в узлах сетки показана на рис. 4. Светлыми точками на этом рисунке помечены коррозионные узлы, черными – разрушенные узлы.

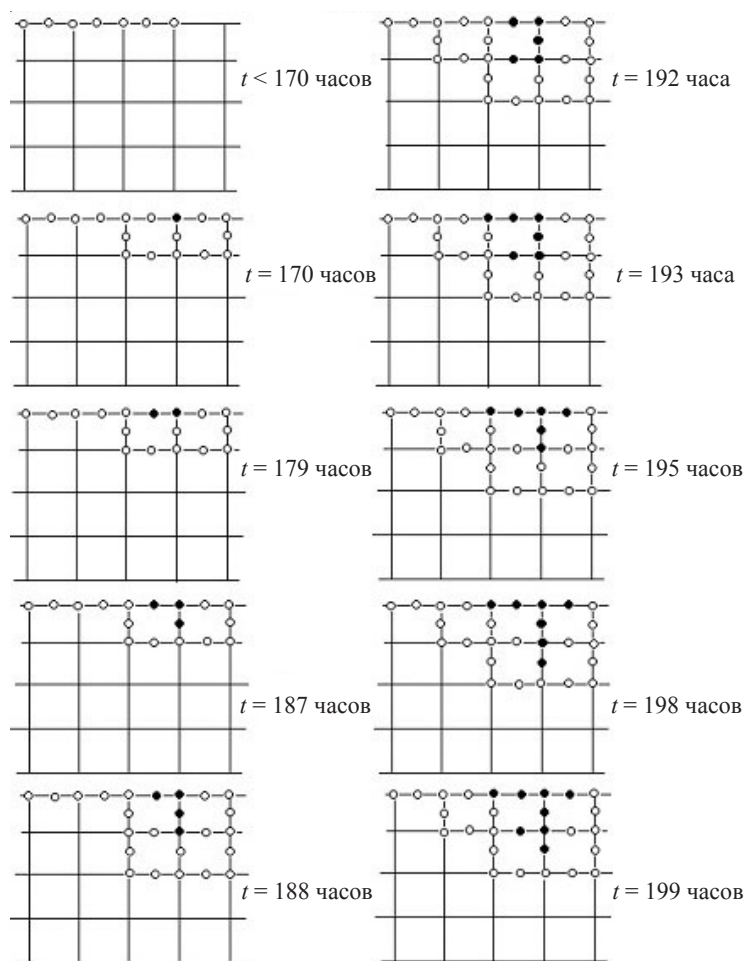


Рис. 4

Объективную оценку достоверности полученных численных результатов удалось осуществить на основе сравнения лишь двух параметров, которые удалось получить из описания [7] проведенных экспериментов: места разрушения образца и времени его разрушения. Расчетные значения этих параметров хорошо согласуются с экспери-

ментальными значениями, что позволяет судить о работоспособности предложенных в статье моделей и алгоритмов.

Список литературы

1. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок / Ф.М. Митенков, В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких, В.А. Панов, С.Н. Пичков / Под общ. ред. Ф.М. Митенкова. М.: Машиностроение, 2007. 448 с.
2. *Погодин В.П., Богоявленский В.Л., Сентюров В.П.* Межкristаллитная коррозия и коррозионное растрескивание нержавеющей сталей в водных средах. М.: Атомиздат, 1976. 326 с.
3. *Акользин П.А., Гуляев В.Н.* Коррозионное растрескивание аустенитных сталей. Л.: Энергоиздат, 1963. 326 с.
4. Вычислительный комплекс УПАКС. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности: Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный паспорт аттестации ПС № 147 от 31.10.2002.
5. *Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Горохов В.А.* Численное моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций в условиях квазистатических термосиловых и терморadiационных воздействий // Современные проблемы ресурса материалов и конструкций: Тр. III школы-семинара. М.: МАМИ, 2009. С. 90–104.
6. Численное моделирование процессов зарождения и развития трещин на основе соотношений механики поврежденной среды / С.А. Капустин, В.А. Горохов, В.Ю. Пантелеев, Ю.А. Чурилов // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2009. Вып. 71. С. 36–44.
7. *Сандлер Н.Г., Козин В.А.* Коррозионное растрескивание сталей типа X18H10T в пароводяных хлорсодержащих средах // Защита металлов. 1984. Т. XX, №3. С. 393–396.

**MODELING CRACKING PROCESSES IN STAINLESS STEELS LOADED
BY PRESSURE AND EXPOSED TO AGGRESSIVE EFFECTS
OF CORROSION MEDIA, USING RELATIONS OF MECHANICS
OF DAMAGED MEDIA**

S.A. Kapustin, V.A. Gorokhov, Yu.A. Churilov, V.A. Panov, P.V. Tryayev

The paper presents a version of the model and modeling algorithms for FE-modeling corrosion cracking processes in structural elements loaded by pressure and exposed to aggressive corrosion media. To assess the effectiveness of the present models and algorithms, the failure process of a thin-walled tubular specimen partly submerged into a chlorine-containing liquid and loaded by axial tension is numerically modeled.

Keywords: corrosion medium, stresses, deformations, damage accumulation, failure, strength, numerical modeling.