

УДК 539.3

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРОЦЕСС КОРРОЗИОННОГО
РАСТРЕСКИВАНИЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ЖИДКИХ ХЛОРСОДЕРЖАЩИХ СРЕД***

© 2014 г. С.А. Капустин, Ю.А. Чурилов, В.А. Панов

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

kapustin@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 03.07.2014

Представлены результаты численного исследования на основе ранее опубликованной методики процесса разрушения тонкостенного трубчатого образца, частично погруженного в жидкую хлорсодержащую среду, при различных уровнях растягивающих осевых напряжений. Проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными, показавшее их хорошее согласование.

Ключевые слова: коррозионная среда, напряжения, деформации, накопленные повреждения, разрушение, прочность, численное моделирование.

Введение

Коррозионное растрескивание под напряжением (КРН), обусловленное совместным взаимодействием химических реакций в материале с механическими эффектами, определяемыми изменением напряжений и деформаций, является наиболее опасным видом коррозионно-механических повреждений металлов.

В настоящее время широко распространено представление о том, что развитие процесса КРН связано с разрушением пленки, защищающей поверхность металла от агрессивного влияния коррозионной среды и последующего анодного растворения металла [1–4]. При этом ускоренный процесс коррозии, вызванный действием растягивающих напряжений и коррозионной среды на не защищенную пленкой поверхность металла, может замедляться при снижении напряжений вследствие поляризации и повторного образования (залечивания) защитной пленки, обусловленных изменением концентрации электролита.

Таким образом, возникновение и развитие процесса КРН можно рассматривать как результат действия трех взаимодействующих процессов:

- разрушения защитных пленок на поверхности металла вследствие его деформации;
- анодного растворения металла в области, свободной от защитной пленки;

* Выполнено при частичном финансировании Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-593.2014.8) и грантом Минобрнауки (соглашение от 27.08.2013 №02.В.49.21.0003 между Минобрнауки РФ и ННГУ).

– образования новой защитной пленки в результате залечивания.

Обзор публикаций, посвященных созданию методов оценки влияния агрессивного воздействия коррозионных сред на развитие повреждений в конструкционных материалах ЯЭУ и, в частности, процессов КРН, 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 концу 70-х – началу 80-х годов прошлого столетия. Среди публикаций, характеризующих основные направления современных исследований КРН, можно назвать статью, в которой скорость роста коррозионных трещин изучается с позиций механики разрушения материала в кончике трещин [4], и статью, посвященную изучению механизмов зарождения трещин КРН с позиций физики металлов [5]. До настоящего времени практически отсутствовали результаты изучения процессов КРН в материалах и элементах конструкций на основе современных представлений механики деформируемых тел и современных численных методов.

В статье [6] предложен вариант численной методики, позволяющей исследовать поведение элементов конструкций из нержавеющей стали в условиях агрессивного воздействия коррозионных сред на основе математической модели, описывающей процессы КРН при квазистатических термосиловых нагружениях в рамках соотношений механики поврежденной среды, реализованный в составе программных средств вычислительного комплекса УПАКС [7].

Настоящая статья посвящена применению созданных средств для оценки влияния уровня напряжений на процесс КРН нержавеющей стали по результатам численного моделирования процесса коррозионного растрескивания тонкостенного трубчатого образца в условиях осевого растяжения.

1. Методические основы численного моделирования процессов КРН элементов конструкций из нержавеющей стали при квазистатических термосиловых нагружениях

Основные положения математической модели, описывающей процессы КРН в нержавеющей стали, и численной методики, позволяющей исследовать на основе этой модели поведение элементов конструкций в условиях агрессивного воздействия коррозионных сред при квазистатических термосиловых нагружениях, представлены в [6].

В основу названной методики положено предположение о том, что возникновение и развитие процессов КРН являются результатом взаимодействия процессов разрушения защитной пленки на поверхности металла, анодного растворения металла и образования новой защитной пленки. Также предполагается, что при действии растягивающих напряжений в материале пленки могут накапливаться необратимые деформации e_n , меняющиеся со скоростью $\dot{e}_n(T, \gamma, \sigma_1)$, зависящей от температуры коррозионной среды T , степени агрессивности среды, характеризуемой параметром γ , и уровня растягивающих напряжений, характеризуемых значением главного растягивающего напряжения σ_1 .

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

Для характеристики текущего состояния пленки вводится понятие относитель-

ной 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 $\varepsilon_z = \varepsilon_z(T, \gamma)$.

Таким образом, согласно принятым модельным представлениям толщина пленки может либо монотонно увеличиваться при $d\sigma_1/dt < 0$ до значения $\tilde{h} \leq 1$, либо мгновенно разрушаться до значения $\tilde{h} = 0$ при условии $e_n \geq e_n^r \tilde{h}$, где e_n – накопленное значение растягивающей необратимой деформации пленки на текущем участке восстановления при $\tilde{h} > 0$.

Для описания изменения свойств металла в процессе его коррозии предполагается, что после разрушения пленки при $h = 0$ 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 при растяжении, 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 приостанавливается.

Ввиду принятого предположения о хрупком характере КРН для описания процесса накопления повреждений, связанных с коррозией металла, используется вариант модели накопления хрупких повреждений [6, 8] с учетом зависимости предельных напряжений от параметров, характеризующих результаты воздействия коррозионной среды.

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, используемых в процессе решения задачи, список которых должен быть дополнен функциями, необходимыми для реализации предложенной модели КРН.

2. Реализация модели в задачах исследования процессов КРН элементов конструкций на основе МКЭ

Ввиду локальности развития процессов КРН в реальных материалах реализация рассмотренной модели в задачах исследования коррозионного разрушения элементов конструкций на основе метода конечных элементов (МКЭ) потребовала введения ряда дополнительных предположений.

В частности, введено предположение об осреднении физических величин, характеризующих КРН в пределах используемого геометрического носителя физической информации конечного элемента (физического узла). Также предполагается, что используемая для описания поврежденности материала скалярная функция

ω , характеризующая осредненную поврежденность макрообъема, состоящего из достаточно большого числа микрообъемов, в физическом узле в процессе КРН может принимать последовательно увеличивающиеся значения в пределах $0 \leq \omega \leq 1$. Кроме этого, дискретный процесс изменения функции ω (соответствующий условию хрупкого разрушения) в численной методике заменяется эквивалентным эволюционным процессом на основе схемы «релаксации состояния», используемой в ВК УПАКС для реализации моделей хрупкого разрушения материалов [6, 8].

Реализация предложенной модели в задачах исследования процессов КРН элементов конструкций на основе МКЭ также потребовала введения дополнительной группы информационных объектов – «коррозионных узлов», в которых возможны коррозионные повреждения и с которыми связана информация, характеризующая процесс коррозии в точке материала.

Первоначально в число коррозионных узлов включаются все физические узлы, расположенные на поверхности контакта материала конструкции с агрессивной средой. В процессе воздействия агрессивной среды некоторые из коррозионных узлов могут получать повреждения, мера которых определяется скалярной функцией ω . Узлы, в которых $\omega \geq 0,99$, считаются полностью разрушенными. Материал в районе 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. В связи с этим внутренние узлы, к которым обеспечивается доступ агрессивной среды, добавляются к множеству ранее определенных коррозионных узлов.

Рассмотренные выше методические положения удалось реализовать в рамках используемой в ВК УПАКС общей методологии исследования процессов деформирования и разрушения конструкций на основе МКЭ и создать в составе программных средств ВК УПАКС вариант программы исследования процессов КРН элементов конструкций в условиях квазистатических термосиловых нагружений.

Проведенные с помощью этой программы численные исследования процесса КРН экспериментального образца [6] показали хорошее согласование результатов численного моделирования с аналогичными экспериментальными результатами и подтвердили работоспособность предложенной модели, алгоритмов и созданных на их основе программных средств.

3. Численное исследование влияния уровня напряжений на коррозионное растрескивание нержавеющей стали

Исследование влияния уровня напряжений на растрескивание сталей в хлорсодержащих средах проводилось на основе результатов численного моделирования процесса КРН тонкостенного трубчатого образца в условиях осевого растяжения при различных уровнях прикладываемых напряжений. Результаты экспериментального изучения разрушения таких образцов и влияния различных эксплуатационных факторов (уровня напряжений, температуры, состава среды) на стойкость против КРН стали X18H10T приведены в [9].

Образцы изготавливались из прутков диаметром 30 мм из стали X18H10T и подвергались термообработке в нейтральной атмосфере при температуре $T = 1050^\circ\text{C}$ в течение 20 минут с охлаждением на воздухе.

Экспериментальные исследования образцов проводились в растворе хлористого натрия концентрацией от 10^{-4} до 35 г/кг при напряжениях от 50 до 250 МПа.

Численное моделирование проводилось для фрагмента образца (его рабочей части) – тонкостенной цилиндрической оболочки длиной $L = 26$ мм, имеющей внутренний диаметр $D = 10$ мм и толщину стенки $h = 1,5$ мм.

Левая часть образца, включая участок рабочей части длиной $l = 13$ мм, погружалась в жидкую хлорсодержащую среду (полупроцентный раствор NaCl), нагретую до температуры $T = 100$ °С. Правая часть находилась в воздушной среде и нагревалась до температуры $T = 150$ °С. По толщине образца распределение температуры принималось постоянным. График распределения температуры вдоль образующей фрагмента образца представлен на рис. 1.

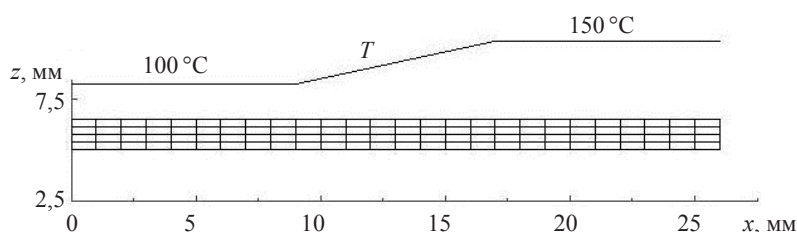


Рис. 1

С целью идентификации и возможности визуализации коррозионных узлов каждому физическому узлу исследуемых конструкций присваивалось значение параметра γ , определяющего наличие ($\gamma = 1$) или отсутствие ($\gamma = 0$) коррозионной среды.

В качестве начальной поверхности, подвергающейся коррозионному воздействию, в расчетах принималась наружная поверхность левой части фрагмента образца на длине $l = 17$ мм. Всем узлам конечно-элементной сетки, попадающим на эту поверхность, присваивались признаки коррозионных узлов.

Растяжение образца производилось осевой силой интенсивностью q , равномерно распределенной по его правой торцевой поверхности, с последующей выдержкой под нагрузкой до его разрушения. Расчеты выполнялись для следующих значений осевой силы q : 75, 100, 125, 150, 200 МПа.

- При моделировании процесс нагружения образца осуществлялся в два этапа:
- мгновенное приложение осевой силы;
 - выдержка под нагрузкой.

Численное решение задач осуществлялось на основе МКЭ в осесимметричной и пространственной постановках с использованием реализованных в ВК УПАКС изопараметрических конечных элементов с квадратичным законом изменения функций перемещений для двух вариантов дискретизации фрагмента, выбранных на основе проведения предварительных численных исследований. Более грубый вариант дискретизации в осесимметричной и пространственной постановках изображен на рис. 1 и рис. 2 соответственно.

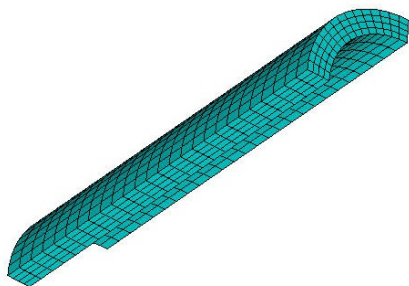


Рис. 2

В более детальном варианте удваивалось число КЭ как по толщине, так и по длине фрагмента. Ввиду хорошего согласования результатов численных исследований, полу-

ченных для указанных вариантов, более детальной дискретизации фрагмента образца не потребовалось.

Картина начального распределения параметра γ показана на рис. 3.

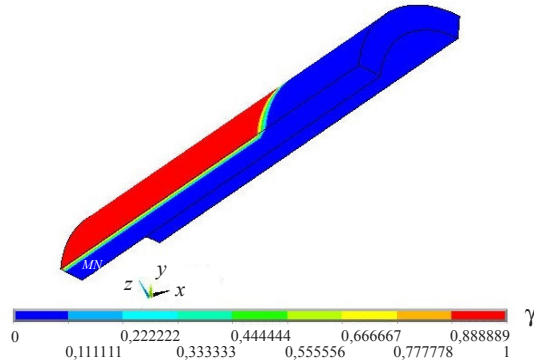


Рис. 3

В процессе численного решения задач для каждого варианта расчета контролировались параметры, характеризующие процесс КРН в коррозионных узлах, и моменты времени t_R , при которых происходило полное разрушение (потеря несущей способности) образца.

Результаты численных исследований показали, что для всех рассмотренных вариантов нагрузок разрушение образца происходило в области границы раздела коррозионной среды с воздушной средой, причем конкретное место его разрушения располагалось в зоне действия максимальных растягивающих напряжений на части поверхности, подверженной воздействию коррозионной среды. Для всех вариантов эта зона находилась в месте возмущения НДС, вызванного градиентом температуры на границе раздела коррозионная среда – воздух, в сечении, соответствующем осевой координате $x \approx 17$ мм по длине рабочей части.

В результате исследований также установлено, что характер разрушенных в результате КРН зон и последовательность их развития во времени для всех рассмотренных вариантов нагрузок качественно совпадают, а результаты расчетов, полученные для различных вариантов дискретизации в пределах каждого варианта нагрузки, хорошо согласуются между собой и качественно, и количественно. Так, для значения $q = 75$ МПа максимальная разница во времени начала разрушения образца для рассмотренных вариантов дискретизации составила $\delta_R^1 \approx 1\%$, а полного разрушения – $\delta_R^K \approx 7\%$.

В таблице 1 приведены значения времени разрушения t_R образца для различных вариантов нагрузки q , полученные в результате численного моделирования и на основе экспериментальных кривых, приведенных в [9].

Таблица 1

q , МПа	75	100	125	150	200
t_R , час (расчет)	290	203	148	98	62
t_R , час (экспер.)	280	200	140	95	55

На основе представленных данных построены зависимости времени разрушения образца t_R от уровня приложенной нагрузки q (рис. 4, где кривая – эксперимент, точки – расчетные значения).

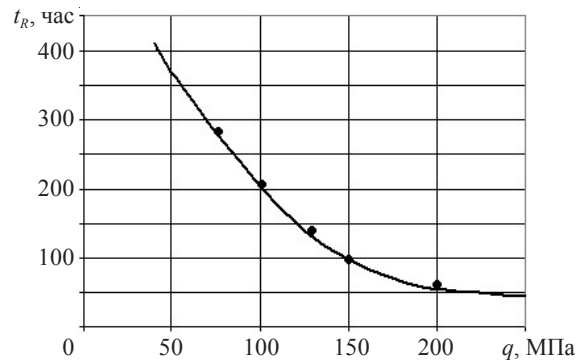


Рис. 4

Приведенные материалы показывают, что результаты численного моделирования хорошо качественно (совпадение зоны разрушения по длине образца) и количественно (разница в оценке времени полного разрушения образца не превышает 13%) согласуются с экспериментальными данными.

С целью более наглядной иллюстрации закономерностей развития процесса КРН приведены некоторые характерные результаты расчета образца для отдельного варианта нагрузки $q = 100$ МПа.

В начальный момент времени при совместном действии растягивающих сил и температурного поля распределение НДС в образце оказалось отличным от однородного. Графики изменения главных напряжений σ_1 вдоль наружной (кривая 1) и внутренней (кривая 2) поверхностей образца для варианта нагрузки $q = 100$ МПа изображены на рис. 5. При этом в узлах, принадлежащих коррозионной поверхности образца, возникли растягивающие напряжения, максимальное значение которых имело место на границе коррозионной поверхности (при $x \approx 17$ мм по длине рабочей части) и достигло величины $\sigma_1 = 128,2$ МПа.

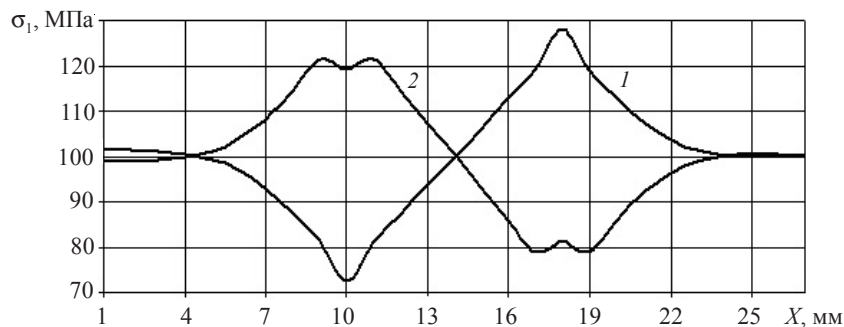


Рис. 5

В процессе выдержки образца в коррозионной среде в узлах, уровень растягивающих напряжений в которых $\sigma_1 > 0$, начала разрушаться защитная пленка, причем наивысшая скорость разрушения имела место в отмеченном наиболее нагруженном узле.

Полное разрушение защитной пленки в этом узле завершилось к моменту времени $t_1 \approx 131$ часу. Далее в этом узле начался процесс растворения металла, который к моменту времени $t_2 \approx 157$ часам завершился его разрушением. Картины распределения меры поврежденности ω и интенсивности напряжений σ_i по объему образца для этого момента времени изображены соответственно на рис. 6 и 7.

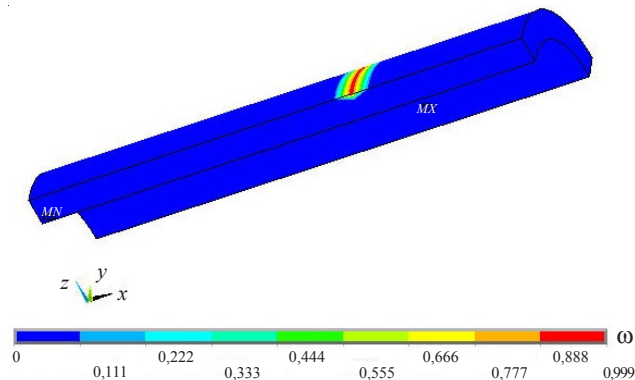


Рис. 6

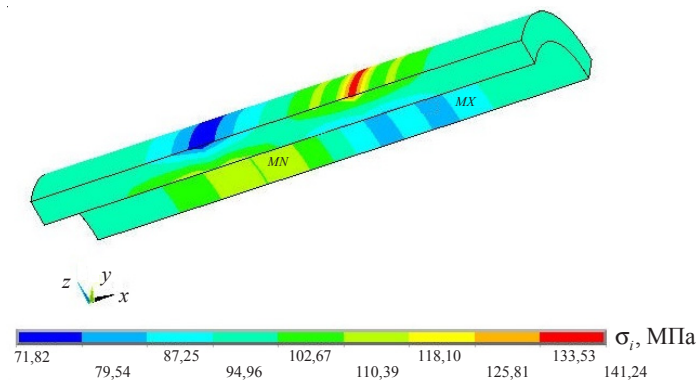


Рис. 7

В связи с нарушением сплошности материала в районе разрушенного узла и проникновением коррозионной среды внутрь материала в его окрестности образовалась группа новых коррозионных узлов, в которых сразу же начался процесс растворения металла. Кроме этого, в ряде коррозионных узлов первоначальной группы закончился процесс разрушения защитной пленки и начал интенсивно протекать процесс растворения металла. В результате к моменту времени $t \approx 163$ часам произошло разрушение соседнего узла из коррозионных узлов первоначальной группы, расположенных на наружной поверхности образца.

Дальнейший процесс КРН образца сопровождался последовательным продвижением разрушенных узлов и соответствующим расширением окрестности вновь образовавшихся коррозионных узлов. Картина развития процесса КРН в продольном сечении образца для моментов времени $t_3 \approx 176$ часам, $t_4 \approx 189$ часам, $t_5 \approx 205$ часам и момента t_R полного разрушения образца, обозначенных цифрами 1, 2, 3 и 4 соответственно, построенная на основе результатов для второго варианта конечно-элементной дискретизации фрагмента образца, показана на рис. 8. Здесь Z – координата по толщине образца.

При проведении расчетов на более грубой сетке (первый вариант дискретизации) картина развития процесса КРН (изображенная на рис. 9 для момента времени $t_4 \approx 189$ часам) качественно соответствовала приведенной на рис. 8 и отличалась, в основном, шириной разрушенной зоны. Очевидно, что ширина разрушенной зоны в данной задаче зависит от размеров КЭ в осевом направлении, и можно ожидать,

что при дальнейшем сгущении сетки КЭ вдоль оси образца область зоны разрушения будет представлять собой достаточно узкую трещину.

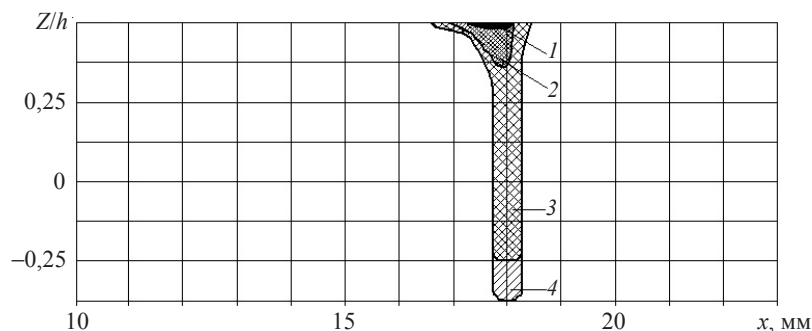


Рис. 8

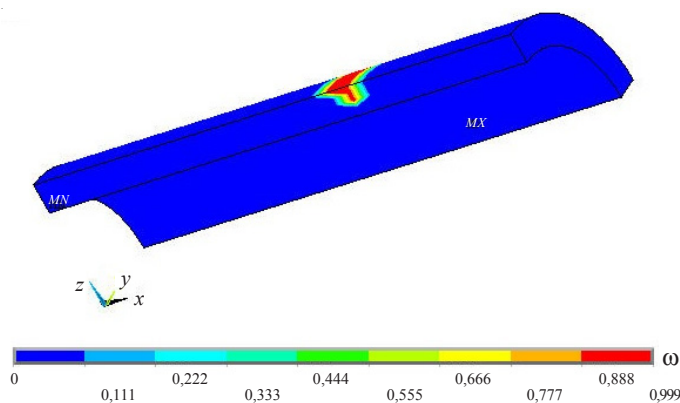


Рис. 9

Из приведенных рисунков видно, что в процессе КРН область разрушения первоначально развивается вдоль наружной поверхности образца, а затем прорастает в виде узкой зоны, ориентированной по толщине к его внутренней поверхности.

Аналогичная картина развития процессов КРН наблюдалась и для других вариантов нагрузок.

Заключение

Приведены основные положения численной методики, описывающей процессы КРН элементов конструкций, и результаты численного моделирования процесса коррозионного разрушения тонкостенного трубчатого образца, частично погруженного в коррозионную среду, в условиях осевого растяжения при различных уровнях растягивающих напряжений. Представлено сопоставление полученных численных результатов с известными экспериментальными данными.

На основе анализа приведенных материалов можно сделать следующие выводы.

1. Результаты численного моделирования процесса КРН образца качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными. Предсказываемая зона разрушения образца по длине совпадает с фактической. Время предсказываемого разрушения образца для всех вариантов нагрузок хорошо согласуется с экспери-

ментальными значениями. Максимальная разница в оценке времени полного разрушения образца не превышает 13%. Результаты расчетов, полученные на различных вариантах сеток в пределах каждого варианта нагрузки, также хорошо согласуются между собой и качественно, и количественно.

2. Полученная в результате численного моделирования зависимость времени коррозионного разрушения экспериментального образца от уровня растягивающих напряжений (нагрузок q) подтверждается приведенными в [9] экспериментальными данными. При заданной концентрации хлорсодержащей среды (полупроцентный раствор NaCl), нагретой до температуры $T = 100$ °С, время разрушения образца, равное $t_R \approx 280$ часам при $q = 75$ МПа, с увеличением нагрузки резко уменьшается, снижаясь до величины $t_R \approx 60$ часам при $q = 200$ МПа, и имеет тенденцию к стабилизации в районе $t_R < 40$ часов при $q \geq 200$ МПа.

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., Сентюрев В.П.* Межкристаллитная 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.: Энергиздат, 1963. 326 с.
4. *Kawakubo T., Hishida M.* Elastic-plastic fracture mechanics analysis on environmentally accelerated cracking of stainless steel in high temperature water // *Engineering Materials and Technology*. 1985. Vol. 107. P. 240–245.
5. Исследование процесса зарождения трещин коррозионного растрескивания под напряжением в малоуглеродистых низколегированных сталях / М.С. Болдин, А.В. Нохрин, В.Н. Чувильдеев, М.К. Чегуров и др. // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2010. №5(2). С. 186–189.
6. Моделирование на основе соотношений механики поврежденной среды процессов растрескивания под напряжением нержавеющей сталей в условиях агрессивного воздействия коррозионных сред / В.А. Горохов, С.А. Капустин, Ю.А. Чурилов, В.А. Панов, П.В. Тряев // *Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т*. 2013. Вып. 75(1). С. 77–87.
7. Вычислительный комплекс УПАКС. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный паспорт аттестации ПС № 147 от 31.10.2002.
8. *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.
9. *Сандлер Н.Г., Козин В.А.* Коррозионное растрескивание сталей типа X18H10T в пароводяных хлорсодержащих средах // *Защита металлов*. 1984. Т. XX, №3. С. 393–396.

**NUMERICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF THE STRESS LEVEL
ON THE PROCESS OF CORROSION CRACKING OF STAINLESS STEEL
IN CONDITIONS OF INFLUENCE OF LIQUID
CHLORINE-CONTAINING ENVIRONMENTS**

S.A. Kapustin, Yu.A. Churilov, V.A. Panov

The paper presents the results of numerical investigation on a basis of previously published methodic of the process of destruction of thin-walled tubular specimen, partially submerged in liquid chlorine-containing environment at various levels of the axial tensile stresses. The comparison of the results of numerical modeling with experimental data, which showed their good agreement.

Keywords: corrosion environment, stress, strain, the accumulation of damage, destruction, strength, numerical modeling.