

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ДЕНИСОВА Анастасия Александровна

ДЛИТЕЛЬНАЯ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И
ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С АГРЕССИВНОЙ
СРЕДОЙ

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2011

Работа выполнена на кафедре теории упругости математико-механического факультета Санкт-Петербургского Государственного Университета (г. Санкт-Петербург)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор АРУТЮНЯН Роберт Ашотович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор ЛОКОЩЕНКО Александр Михайлович
(Московский государственный университет)

кандидат физико-математических наук,
доцент ПАВИЛАЙНЕН Галина Вольдемаровна
(Санкт-Петербургский государственный
университет)

Ведущая организация: Центральный научно-исследовательский институт
конструкционных материалов «ПРОМЕТЕЙ»

Защита состоится “ 22 ” декабря 2011 г. в 16 часов на заседании совета Д 212.232.49 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 201_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.232.30
доктор физико-математических наук

КУСТОВА Елена Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На практике наблюдаются многочисленные разрушения различных сооружений, в частности, газо-нефтепроводов, трубопроводов, сосудов давления, в условиях воздействия механических напряжений и агрессивных сред. В этих условиях в металлических материалах и тонкостенных конструкциях возникают характерные точечные дефекты (питтинги) и микротрещины. Рост этих дефектов до размеров магистральной трещины и их мгновенное распространение приводит к аварийному разрушению конструкций. В случае, когда при росте питтингов образуется сквозное отверстие, конструкция может не разрушаться, однако, теряет свою работоспособность и, практически, находится в аварийном состоянии.

Во многих случаях металлические конструкции эксплуатируются в активных средах, оказывающих существенное влияние на их длительную работоспособность. Типичным примером подобных сред являются так называемые коррозионные среды, в том числе морская и дистиллированная вода. Известно, что отрицательное воздействие коррозионных сред возрастает с увеличением длительности использования конструкций.

Важность построения эффективных и надежных методов расчета, позволяющих прогнозировать влияние агрессивных сред на длительную прочность конструкционных материалов, обуславливается необходимостью обеспечения длительной прочности конструкции в условиях недостаточных и дорогостоящих экспериментальных исследований.

Известно, что в условиях циклического нагружения существенно интенсифицируется анодное растворение, протекающее избирательно в пределах полос скольжения. В случае, когда эти полосы имеют устойчивый характер, избирательность растворения резко усиливается. При выяснении механизма ускоренного инициирования трещин коррозионной усталости следует принимать во внимание роль адсорбционного и водородного факторов. К настоящему времени электрохимические аспекты появления адсорбционного механизма как автономного фактора при инициировании трещин практически не изучены. Они нашли отражение только при исследовании распространения трещин.

Тем самым, наличие коррозионной среды или провоцирует развитие механизма растрескивания или является дополнительным усугубляющим фактором. Следовательно, влияние коррозионной среды на процессы инициирования и распространения трещин требует внимательного изучения.

Актуальность диссертационной работы связана с необходимостью учета этих факторов при формулировке критериев длительной прочности и

оценка работоспособности металлических материалов и тонкостенных конструкций в условиях длительной эксплуатации в коррозионно-активных средах.

Целью работы является формулировка критериев длительной прочности для оценки работоспособности металлических материалов и сложных технических конструкций в условиях длительной эксплуатации в коррозионно-активной среде, что потребовало разработки математической модели роста трещин коррозионной усталости. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Построить математическую модель, описывающую процесс разрушения материалов, работающих под воздействием агрессивных сред. Для этого необходимо сформулировать кинетическое уравнение роста коррозионных трещин;
2. Развить вероятностный подход в приложении коррозионного разрушения материалов и конструкций;
3. Построить критерий разрушения металлических материалов и элементов конструкций на основе развитого вероятностного подхода;
4. Провести сравнительный анализ теоретических результатов, согласно полученным моделям, с экспериментальными данными по длительному разрушению металлических материалов и конструкций под воздействием коррозионных сред.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

1. Предложено уравнение роста питтингов с учетом процессов микропластической деформации. Показано, что это уравнение является уравнением Риккати первого порядка.
2. Сформулирована система взаимосвязанных кинетических уравнений, в которых коэффициент интенсивности напряжений считается ответственным за ускорение процессов как механического, так и коррозионного разрушения.
3. С учетом этих уравнений разработан вероятностный метод, основанный на гипотезе слабого звена, и сформулирован критерий разрушения металлических материалов и тонкостенных конструкций, работающих под воздействием коррозионного и циклического нагружения.
4. Теоретически доказан эффект пересечения кривых усталости, экспериментально установленный Миллером. Этот факт был получен при моделировании процессов циклического и коррозионного разрушения в зависимости от коэффициента интенсивности напряжений с учетом воздействия коррозионной среды.

Практическая и теоретическая ценность. Практическая ценность результатов работы состоит в том, что данные исследования дают возможность реальной оценки работоспособности материалов и тонкостенных конструкций в условиях длительной эксплуатации при

взаимодействии с коррозионной средой. Диссертационная работа представляет интерес для научных работников, занимающихся вопросами коррозионной прочности и надежности различных металлических материалов и конструкций, а также для инженерно-технических работников, занятых проектированием, строительством и эксплуатацией в различных областях современной техники и машиностроения.

Теоретическая ценность результатов работы состоит в том, что она вносит существенный вклад в теорию кинетических процессов роста коррозионных питтингов и трещин с учетом микропластической деформации и взаимосвязанных механических и химических факторов, их использование для формулировки критериев длительной коррозионной прочности.

Достоверность основных научных положений. Коррозионные процессы, способствующие разрушению металлических материалов и сложных конструкций, хорошо изучены в науке и технике. Результаты, полученные в диссертационной работе, базируются на достижениях в этой области науки и являются их продолжением. Теоретическое описание взаимосвязанных механических, физических и химических процессов, вызывающих рост коррозионных дефектов, осуществляется методами механики деформируемого твердого тела. При формулировке критериев длительной прочности используются вероятностные модели, которые успешно применяются в различных областях науки, а также при оценке надежности технических систем.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Определение кинетического уравнения роста питтинга с учетом процессов неупругой деформации. Формулировка критерия длительной коррозионной прочности в соответствии с предложенным кинетическим уравнением.
2. Разработка системы взаимосвязанных кинетических уравнений роста коррозионной трещины и формулировка критериев усталостной прочности, учитывающих влияние коэффициента интенсивности напряжений на механические и химические процессы в кончике трещины.
3. Развитие вероятностных моделей в приложении к коррозионному разрушению. Формулировка критериев усталостной прочности, согласно кинетическим уравнениям роста коррозионных микротрещин.
4. Проведение сравнительного анализа теоретических результатов с опытными данными по длительной прочности металлических материалов и тонкостенных конструкций под воздействием агрессивных сред.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на секции «Строительной механики и надежности сооружений им. проф. Н. К. Снитко» Санкт – Петербургского Дома ученых РАН (Санкт –

Петербург, 2001), на XXIX Летней школе «Актуальные проблемы механики» института Проблем машиноведения РАН (Санкт – Петербург (Репино), июнь 2001), на Международном симпозиуме «Современные проблемы прочности» (Старая Русса, октябрь 2003), на XIV Петербургских чтениях по проблемам прочности Санкт – Петербургского Дома ученых РАН (Санкт – Петербург, март 2003), а также на семинарах кафедры теории упругости Санкт – Петербургского Государственного университета под руководством академика Н. Ф. Морозова (июнь 1999, май 2005).

Публикации. Основные результаты изложены в работах [1]-[5]. Работы [1-3] опубликованы в издании, входящем в список рекомендованных высшей аттестационной комиссией на момент публикации. В работе [1] диссертанту. принадлежит вывод кинетического уравнения роста трещины (стр. 60-62, 63-64). Соавтор предложил ввести вероятностный подход при построении модели накопления повреждений (стр. 63). В работе [2] Арутюнян Р. А. принадлежит постановка задачи (стр. 42, 44), Денисова А. А. реализовала постановку задачи, получила критерий усталостного разрушения и выполнила численное исследование роста трещин при коррозионном воздействии (стр. 43-46). Основные результаты работы [3] получены соискателем самостоятельно. Арутюнян Р. А. предложил ввести функцию повреждаемости в качестве второго слагаемого в уравнение роста трещины (стр. 60). В работе [5] Арутюнян Р. А. принадлежит идея формы кинетического уравнения повреждаемости в зависимости от коэффициента интенсивности напряжений (стр. 112). Денисова А. А. представила решение системы дифференциальных уравнений повреждаемости (стр. 111, 113).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, разбитых на разделы, заключения и списка литературы, содержащего 68 наименований. Работа изложена на 118 страницах, в том числе 88 страниц текста, 22 рисунка, 6 приложений, содержащих 17 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы научного исследования, определяются цели и задачи работы, формулируются основные результаты, выносимые на защиту, отражается их научная новизна.

В **первой главе** приводится краткий обзор современных достижений по проблеме механики коррозионного разрушения.

В настоящее время существует несколько теорий коррозионного разрушения, однако общие принципы содержатся в двух основных - *электрохимической* и *адсорбционной*, анализ которых выявил ряд нерешенных проблем. В частности, реальная корродирующая модель (анод – катод - электролит) не является линейной и при ее описании

линейными дифференциальными уравнениями вводится следующий ряд допущений: не учитываются некоторые «разрывные» явления, такие, как изменение начальной активности электролита во времени или колебаний блуждающего тока. Электрохимическое растворение металла осуществляется без каких-либо «запаздываний» в случае мгновенного изменения состава (концентрации) электролита. Не учитываются температурные влияния на протекание процесса коррозии, предполагается, что внутренняя энергия металла косвенно характеризуется его собственным потенциалом, а глубина коррозионной трещины пропорциональна анодному току. Кроме того, пренебрегают ускорением коррозионного процесса. Имеет место также недостаточное описание геометрии коррозионной трещины (кроме проникновения вглубь, коррозионная трещина может развиваться в длину). Возникает погрешность в определении неизвестных параметров для долгосрочного прогнозирования и ряд других проблем.

Наиболее подробно электрохимическая коррозия отражена в трудах В. В. Болотина, Г. Кеше, Я. М. Колотыркина, Р. М. Лазоренко – Маневича, П. А. Ребиндера, Г. М. Флориановича, Л. Я. Цикермана, Е. Д. Щукина. Адсорбционная коррозия представлена в работах Austen J. M., Musuva J. K., Radon J. C., Rhodes D., Walker E. F.

Развитие теории коррозионной прочности получила в работах Ю. М. Даля, А. М. Локощенко, Г. Н. Никифорчина, И. Г. Овчинникова, О. Н. Романив и других.

В подавляющем большинстве работ процессы разрушения под воздействием коррозионных сред описываются классическими методами механики материалов, которые сводятся к совместному рассмотрению механических процессов и коррозионных повреждений. При таком подходе не представляется возможным описание многочисленных и важных практических случаев коррозионного разрушения по причине образования и распространения питтингов и микротрещин.

Приведенный выше краткий анализ основных теорий, описывающих процессы, протекающих при коррозии, говорит о том, что классические, детерминированные методы не полностью описывают процесс коррозии.

Вторая глава диссертационной работы посвящена разработке кинетического уравнения роста коррозионно-усталостной трещины, учитывающего взаимосвязанные механические и химические процессы.

В случае неупругой деформации для описания всех этапов роста трещины, включая инкубационный, и учета влияния самой деформации в вершине трещины предлагается использовать следующее нелинейное дифференциальное уравнение

$$\frac{dl}{dt} = kl(l_* - l) + k_1 \dot{\varepsilon}_H, \quad (1)$$

где l - текущая, l_* - предельная длина трещины, k - константа, зависящая от напряжения и температуры, где k_1 - постоянная величина, а $\dot{\varepsilon}_H$ - скорость неупругой деформации.

В случае установившейся ползучести, когда $\dot{\varepsilon} = f(\sigma)$ уравнение (1) переходит в частное уравнение Риккати.

Решение исходного уравнения имеет вид:

$$l(t) = \frac{A + B \exp(\nu \cdot t)}{1 + C \exp(\nu \cdot t)}, \quad (2)$$

где C - произвольная постоянная, определяемая из начальных условий: $l|_{t=0} = l_0$ и $u|_{t=0} = l_0 - \frac{l_*}{2}$.

Постоянные величины, входящие в решение (2) определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} A &= \frac{l_*}{2} - \frac{a}{\sqrt{k}}, & B &= \left(\frac{l_*}{2} + \frac{a}{\sqrt{k}} \right) \frac{\beta}{\alpha}, \\ \alpha &= a - \sqrt{k} \left(l_0 - \frac{l_*}{2} \right), & \beta &= a + \sqrt{k} \left(l_0 - \frac{l_*}{2} \right), \\ C &= \frac{\alpha}{\beta}, & \nu &= 2a\sqrt{k}, & a &= \sqrt{k_1 f(\sigma) + \frac{kl_*^2}{4}}. \end{aligned}$$

Выбор кинетического уравнения роста трещины в виде (1) основывается на следующих соображениях. На практике для данной величины неупругой деформации реализуются три этапа роста трещины: инкубационный, период интенсивного роста и замедление роста трещины из-за ее блокировки продуктами коррозионного разрушения. С переходом на другой уровень неупругой деформации наблюдается повторение этих этапов вплоть до образования магистральной трещины.

В диссертационной работе рассматривается также другие подходы к моделированию кинетического уравнения роста коррозионной трещины. В качестве основного параметра, характеризующего влияние коррозионной среды на разрушение металлов, принимается зависящая от напряжения σ и количества циклов N длина коррозионной трещины $l(\sigma, N)$.

Исследование коррозионно-циклической трещиностойкости материалов сопряжено с двумя главными отличительными особенностями. Первая особенность состоит в изменении напряженно-деформированного состояния в вершине коррозионной трещины в связи с ее ветвлением и затуплением (коррозионным разъеданием), а также с влиянием продуктов распада на процессы закрытия трещины. Вторая особенность определения коррозионно-циклической трещиностойкости обусловлена вероятной спецификой электрохимических условий в вершине трещины, которые могут существенно отличаться от условий на поверхности испытываемого образца. Таким образом, кинетика коррозионно-усталостной трещины определяется зависимостью от коэффициентов уравнения Paris – Erdogan, коэффициента интенсивности напряжений и факторов среды:

$$\frac{dl}{dN} = F(C_m, K_{\max \text{ eff}}, pH_{BT}, E_{BT}),$$

В основу разрабатываемой модели положен следующий принцип: рост коррозионной усталостной трещины описывается с помощью системы кинетических уравнений, учитывающих взаимосвязанные механические и химические эффекты. В соответствии с этим вводится следующее уравнение:

$$\frac{dl}{dN} = C_1(\Delta K)^{m_1} + \kappa \frac{d\omega}{dN}, \quad (3)$$

где ω - параметр, описывающий коррозионное разрушение, κ - эмпирический коэффициент. C_1 и m_1 - константы материала, используемые в уравнении Paris – Erdogan:

$$\frac{dl}{dN} = C_1(\Delta K)^{m_1}$$

При соответствующем выборе кинетического уравнения для параметра ω , можно описать процессы химических реакций, зависящих от коэффициента интенсивности напряжений. Считаем, что коэффициент интенсивности напряжений, ΔK , изменение которого происходит по закону $\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi \cdot l}$, определяет ускорение химических реакций и процессов разрушения. В этом случае, как показано в работе, имеется возможность описания основных экспериментальных данных роста коррозионных трещин.

Рассматриваются два варианта соотношений для функции $\frac{d\omega}{dN}$:

$$\frac{d\omega}{dN} = [k_2 + k_1(\Delta K)^n] \cdot \{1 - \exp(-\alpha N)\}, \quad (4)$$

где k_1, k_2, n, α - константы материала, и

$$\frac{d\omega}{dN} = \left(k_2 + k_1 (\Delta K)^n \right) N^\beta, \quad (5)$$

где k_1 , k_2 , n , α , β - константы материала.

дополненные начальными значениями $l(N=0) = l_0$ и $\omega(N=0) = 0$.

В выражении (5) k_1 - функция температуры, определяемая по законам химической кинетики, β и n - постоянные.

Решение системы уравнений (3) – (4) и (3) – (5) при условии $\Delta\sigma = const$ записывается, соответственно, в следующем виде:

$$l(\sigma, N) = l_0 \cdot \exp \left[\sigma^2 \pi \cdot \left\{ (C + k_2)N + \frac{k_2}{\alpha} (\exp(-\alpha N) - 1) \right\} \right] \quad (6)$$

$$l(\sigma, N) = \frac{1}{\frac{1}{l_0} - (\Delta\sigma)^4 \pi^2 \left\{ CN - k_1 \frac{N^2}{2} \right\}} \quad (7)$$

Рост коррозионно-усталостной трещины описывается также следующей системой уравнений:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^m + \frac{d\omega}{dN} \quad (8)$$

$$\frac{d\omega}{dN} = k_2 [1 - \exp(-\alpha N)], \quad (9)$$

Решение этой системы при условии $\Delta\sigma = \sigma_{eff} = const$ имеет вид

$$l = l_0 \cdot \exp \left[\sigma_{eff}^2 \pi \left((C + k_2)N + \frac{k_2}{\alpha} (e^{-\alpha N} - 1) \right) \right] \quad (10)$$

В **третьей главе** разрабатывается вероятностный метод описания феноменологических процессов накопления повреждений. Вероятностный подход к построению моделей накопления повреждений рассмотрен также в работах Р. А. Арутюняна, В. В. Болотина, J. L. Vogdanoff, F. Kozin. Указанные работы посвящены изучению кумулятивного повреждения твердых тел на основе феноменологической вероятностной модели в виде вложенной цепи Маркова и пуассоновских процессов.

В представленной диссертационной работе используется вероятностная модель, реализованная на основе гипотезы слабого звена, основанная на вероятностном подходе к распределению трещин по размерам и их развитию. Эта модель позволяет вычислить функцию

надежности и сформулировать критерий усталостного разрушения. В частности, для формулировки критерия усталостного разрушения принимается принцип масштабной инвариантности, состоящий в следующем: независимо от числа трещин, кривые их распределения будут инвариантны. Считается, что распределение размеров трещин является случайным, и подчиняется следующему закону Пуассона:

$$G(l) = \frac{e^{-\lambda_{0i}} - e^{-\lambda}}{e^{-\lambda_{0i}} - e^{-\lambda_*}}. \quad (11)$$

Случайным является также распределение числа циклов разрушения (образование первого коррозионного отверстия):

$$G(l) = \frac{e^{-\lambda_{0i}} - e^{-\lambda(\sigma, N)}}{e^{-\lambda_{0i}} - e^{-\lambda_*}}. \quad (12)$$

Соотношение для надежности запишем в виде:

$$R(N) = 1 - H(N), \quad (13)$$

где $H(N)$ является интегральной функцией распределения времени появления первого события, совпадающей с двухпараметрическим распределением Вейбулла, которое носит нестационарный характер:

$$H(N) \approx 1 - \exp[-m \cdot G(N)] \quad (14)$$

На базе модели, построенной в третьей главе, формулируется вероятностный критерий разрушения конструкции под воздействие коррозионного и циклического нагружения:

$$R(N) = \exp \left[-m \cdot \frac{e^{-\lambda_{0i}} - e^{-\lambda(\sigma_{eff}, N)}}{e^{-\lambda_{0i}} - e^{-\lambda_*}} \right]. \quad (15)$$

Задавая уровень надежности $R = R_*$, из формулы (15) следует критерий усталостной прочности, выражающий величину напряжения σ_{eff} в зависимости от числа циклов нагружения, статистических параметров распределения микротрещин, механических и химических постоянных.

Четвертая глава посвящена результатам численного исследования задач коррозионно-усталостного разрушения, полученных во второй главе, и сравнению полученных теоретических результатов с экспериментальными данными, представленными в литературных источниках.

Сформулируем критерий длительного коррозионного разрушения для тонкостенного цилиндрического сосуда с днищем, находящегося под воздействием внутреннего давления агрессивной среды P . В

цилиндрической системе координат (r, φ, z) напряжения в стенке сосуда приближенно равны

$$\sigma_r = 0, \sigma_z = \frac{PR}{2L_*}, \sigma_\varphi = \frac{PR}{L_*}, \quad (16)$$

где R - диаметр, L_* - толщина стенки.

Принимая в качестве эффективного напряжения, к примеру, интенсивность

$$\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\varphi - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2} \quad (17)$$

будем иметь

$$\sigma_{eff} = \frac{PR}{2L_*} \quad (18)$$

Внося соотношение (18) в решение (6), используя выражение (15), получим критерий длительного коррозионного разрушения для цилиндрического сосуда с днищем

$$P = \frac{2L_*}{R} \left[\frac{1}{\pi \cdot \left((C + k_2)N + \frac{k_2}{\alpha} (e^{-\alpha N} - 1) \right)} \ln \frac{A_*}{l_0} \right]^{1/2} \quad (19)$$

$$A_* = \frac{1}{\lambda} \ln \left(e^{-\lambda l_{0i}} + \frac{1}{m(N)} \ln R_* \cdot (e^{-\lambda l_{0i}} - e^{-\lambda l_*}) \right)^{-1}.$$

На рис. 1 представлены теоретические кривые роста коррозионной

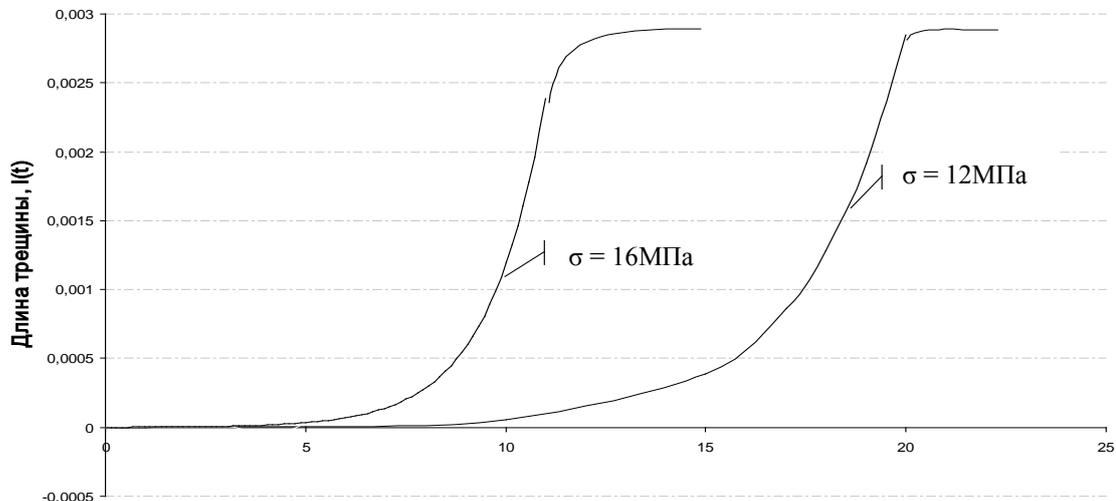
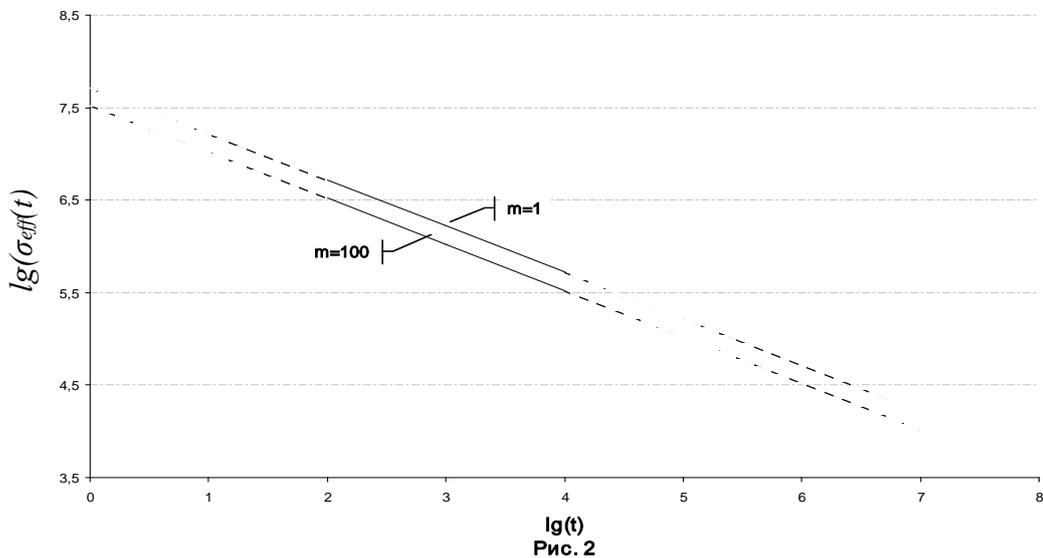


Рис. 1

трещины согласно формуле (19) для двух уровней эффективного напряжения 12МПа и 16МПа. При расчетах по этой формуле были использованы следующие величины коэффициентов $l_0 = 10^{-6}$ м, $l_* = 3 \cdot 10^{-3}$ м, $R = 0,5$, $C = 9,32 \cdot 10^{-17}$, $k_2 = 7,86 \cdot 10^{-16}$.

На рис. 2 в координатах $\lg(\sigma_{eff}) - \lg(t)$ показаны кривые длительной прочности, для начального числа трещин $m = 1$ и 100 , соответственно. При вычислении величины A_* в выражении (19) принимались следующие значения параметров $\lambda = 0,05$, $R_* = 0,5$.



Как видно из рис. 2, долговечность цилиндрического сосуда понижается более чем на порядок с увеличением начального дефектного состояния.

Публикации автора по теме диссертации.

Статьи в рецензируемых журналах и изданиях:

1. *Арутюнян Р. А., Денисова А. А.* Учет неупругой деформации в модели длительного коррозионного разрушения. // Вестник СПбГУ. Сер. 1. Вып. 3. 2001. (№ 17). С. 60 – 64.
2. *Арутюнян Р. А., Денисова А. А.* Кинетика роста коррозионных трещин и критерий усталостного разрушения. // Вестник СПбГУ. Сер. 1. Вып. 3. 2002. (№ 17). С. 42 – 46.
3. *Арутюнян Р. А., Денисова А. А.* О роли коэффициента интенсивности напряжений в процессах роста коррозионных трещин и усталостного разрушения. // Вестник СПбГУ. Сер. 1. Вып. 2. 2002. (№ 17). С. 59 – 64.

Другие публикации:

4. *Денисова А. А.* Оценка циклической прочности тонкостенных конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой. // Научные труды VI Международного симпозиума «Современные проблемы прочности» им. В. А. Лихачева. Т. 2. Великий Новгород. 2003. С. 56 – 61.
5. *Arutyunyan R. A., Denisova A. A.* A failure criterion of metallic materials and structures due to attack of corrosive media. // Advanced Problems in Mechanics' 2001 Saint-Petersburg (Repino), June 21-30, 2001. P. 111 – 113.

Типография Отдел оперативной полиграфии НИИХ СПбГУ
198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр. 26
Номер заказа
Тираж 100 экз.