

УДК 539.375

© 1998 г. В.В. Болотин, А.А. Шипков

**МОДЕЛЬ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН
С УЧЕТОМ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Рассматриваются процессы накопления повреждений и роста трещин при сочетании циклических нагрузок и действия окружающей среды (называемые обычно коррозионной усталостью). Соотношения равновесия и баланса энергии в системе "тело с трещинами – нагрузка" дополнены уравнениями, которые описывают процессы накопления повреждений у фронтов трещин и их продолжении. Наряду с феноменологической мерой микроповреждений механического происхождения, введены параметры, характеризующие изменение свойств вблизи контактной поверхности под действием физико-химических факторов. Модель позволяет учесть влияние экстремальных напряжений цикла, частоты нагружения и параметров среды (например, концентрации коррозионного агента или водородного показателя среды), влияние начальных условий на скорость роста трещин, уровень повреждений и эффективный коэффициент концентрации на движущемся фронте, а также на суммарную долговечность, измеряемую как в числах циклов, так и в единицах времени. Показано, что предлагаемая модель удовлетворительно описывает особенности поведения трещин коррозионной усталости.

Рост трещин под действием циклических и/или длительных нагрузок – чисто механический процесс, изучаемый механикой разрушения (в широком смысле). Этот процесс происходит в широком масштабе длин: от уровня кристаллической решетки до уровня элементов конструкций. Поэтому для построения моделей роста усталостных трещин приходится применять наряду с классическими методами механики сплошной среды методы механики накопления рассеянных повреждений в виде феноменологических или структурных моделей. На основе синтеза механики разрушения и континуальной механики накопления повреждений удастся описать все стадии роста трещин, начиная от их зарождения вплоть до финального разрушения [1, 2].

Описание моделей усталостного разрушения усложняется, если необходимо учитывать влияние активных (жидких или газообразных) сред на свойства материала и его состояние в окрестности фронта трещины. Обычно различают рост трещин при совместном действии циклических напряжений и поверхностно-активного агента, т.е. коррозионную усталость и коррозионное растрескивание, при котором изменение напряжений во времени играет второстепенную роль. Зачастую эти явления присутствуют совместно, например в форме влияния средних напряжений на рост трещин при наличии циклической составляющей.

Коррозионная усталость – явление, в котором взаимодействуют механические, химические, электрохимические и абсорбционные процессы. Примером может служить рост усталостных трещин, сопровождаемый образованием и разрушением оксидной пленки, чередованием замедления роста и активизацией этого роста из-за растворения вновь обнаженных ювенильных поверхностей металла. Другой механизм – распространение трещин, которое сопровождается диффузией водорода в окрестности фронта трещины и охрупчиванием металла в концевой зоне. Значительная часть исследований по коррозионной усталости посвящено электрохимическим, металловедческим и химическим аспектам этого явления. Модели коррозионной усталости, как правило, носят качественный характер [3]. При этом прогнозирование роста трещин основано на принципе суперпозиции или его модификации. В простейшем случае скорость роста трещины представлена в виде суммы двух скоростей, одна из которых получена для нейтральной среды, а другая представляет собой некоторое взвешенное значение скорости коррозионного разъедания [4].

Процесс роста макроскопической трещины является результатом взаимодействия между механизмами накопления микрповреждений и условиями устойчивости нагружаемого тела как механической системы. Главная трудность состоит в определении обобщенных сил, входящих в условия равновесия и устойчивости системы "тело с трещинами – нагрузка". В механике хрупкого разрушения роль таких обобщенных сил выполняют величины типа интенсивности высвобождения энергии и J -интеграла. Вычисление обобщенных сил в механике усталостного разрушения связано с изохронным варьированием состояний системы "тело с трещинами – нагрузка". При варьировании следует учитывать предысторию нагружения, деформирования, накопления микрповреждений и роста трещин.

1. Постановка задачи. Будем трактовать тело с трещинами под внешней нагрузкой как механическую систему с односторонними связями, что учитывает необратимость трещин в обычных конструкционных материалах. Используем введенное ранее [1, 2] понятие варьирования по Гриффитсу. Это изохронный переход к смежным состояниям равновесия, при котором варьированию подлежат только параметры трещин с выполнением всех уравнений равновесия и совместности деформаций, а также всех граничных условий, кроме условий у фронтов трещин. Параметры трещин a_1, \dots, a_m приобретают при этом смысл обобщенных координат. Их вариации по определению удовлетворяют условиям $\delta a_j \geq 0$ ($j = 1, \dots, m$).

Назовем систему субравновесной, если вычисленная при варьировании по Гриффитсу виртуальная работа всех внешних сил и внутренних сил $\delta W < 0$; равновесной, если существуют такие вариации, на которых $\delta W = 0$, а для остальных вариаций $\delta W < 0$; неравновесной, если существуют такие вариации, для которых $\delta W > 0$. Субравновесные состояния по определению устойчивы, неравновесные неустойчивы, а устойчивость равновесных состояний зависит от знака $\delta(\delta W)$, где вторая вариация вычисляется по Гриффитсу. Равновесное состояние системы "тело с трещинами – нагрузка" устойчиво, если при всех вариациях $\delta(\delta W) < 0$, и неустойчиво, если существуют такие вариации, для которых $\delta(\delta W) > 0$. Случай, когда для некоторых вариаций $\delta(\delta W) = 0$, а для остальных $\delta(\delta W) < 0$, отвечает нейтральному (критическому) равновесию системы или является сомнительным.

Представим виртуальную работу в виде $\delta W = \delta W_e + \delta W_i + \delta W_f$, где δW_e – работа внешних сил, δW_i – работа внутренних сил, δW_f – работа, затрачиваемая на продвижение фронтов трещин. Обобщенные силы естественно ввести при помощи соотношений

$$\delta W_e + \delta W_i = \sum_{j=1}^m G_j \delta a_j, \quad \delta W_f = - \sum_{j=1}^m \Gamma_j \delta a_j \quad (1.1)$$

В дальнейшем силы G_j называем активными (силами, продвигающими трещины), силы Γ_j – пассивными (силами сопротивления). Усталостная трещина не растет, если все $G_j < \Gamma_j$. При достижении равенства $G_k = \Gamma_k$ для одного из a_k трещина может начать расти. Этот рост будет устойчивым при $\partial G_k / \partial a_k < \partial \Gamma_k / \partial a_k$ и неустойчивым при $\partial G_k / \partial a_k > \partial \Gamma_k / \partial a_k$. Если хотя бы одно из соотношений между обобщенными силами принимает вид $G_k > \Gamma_k$, то система станет неустойчивой по отношению к соответствующей обобщенной координате. Более общий случай рассмотрен в [5–7].

Пусть трещина – однопараметрическая, т.е. ее поведение описывается при помощи одного параметра длины a . Тогда условия страгивания, роста и остановки можно выразить в терминах активной обобщенной силы G и обобщенной силы сопротивления Γ :

$$G \leq \Gamma \quad (1.2)$$

Обе части соотношения (1.2) в общем случае зависят от параметров нагружения (например, от экстремальных значений приложенных напряжений), параметров окружающей среды (концентрации активного агента, его водородного показателя,

температуры), а также от некоторых дополнительных переменных, которые характеризуют распределение повреждений у фронта трещины и на его продолжении. В простейшем случае достаточно ввести две скалярные меры, одна из которых описывает механическую компоненту микроповреждений, вторая – коррозионную компоненту. Это означает, что соотношение (1.2) должно быть дополнено уравнениями накопления повреждений во времени.

2. Модель трещины коррозионной усталости.

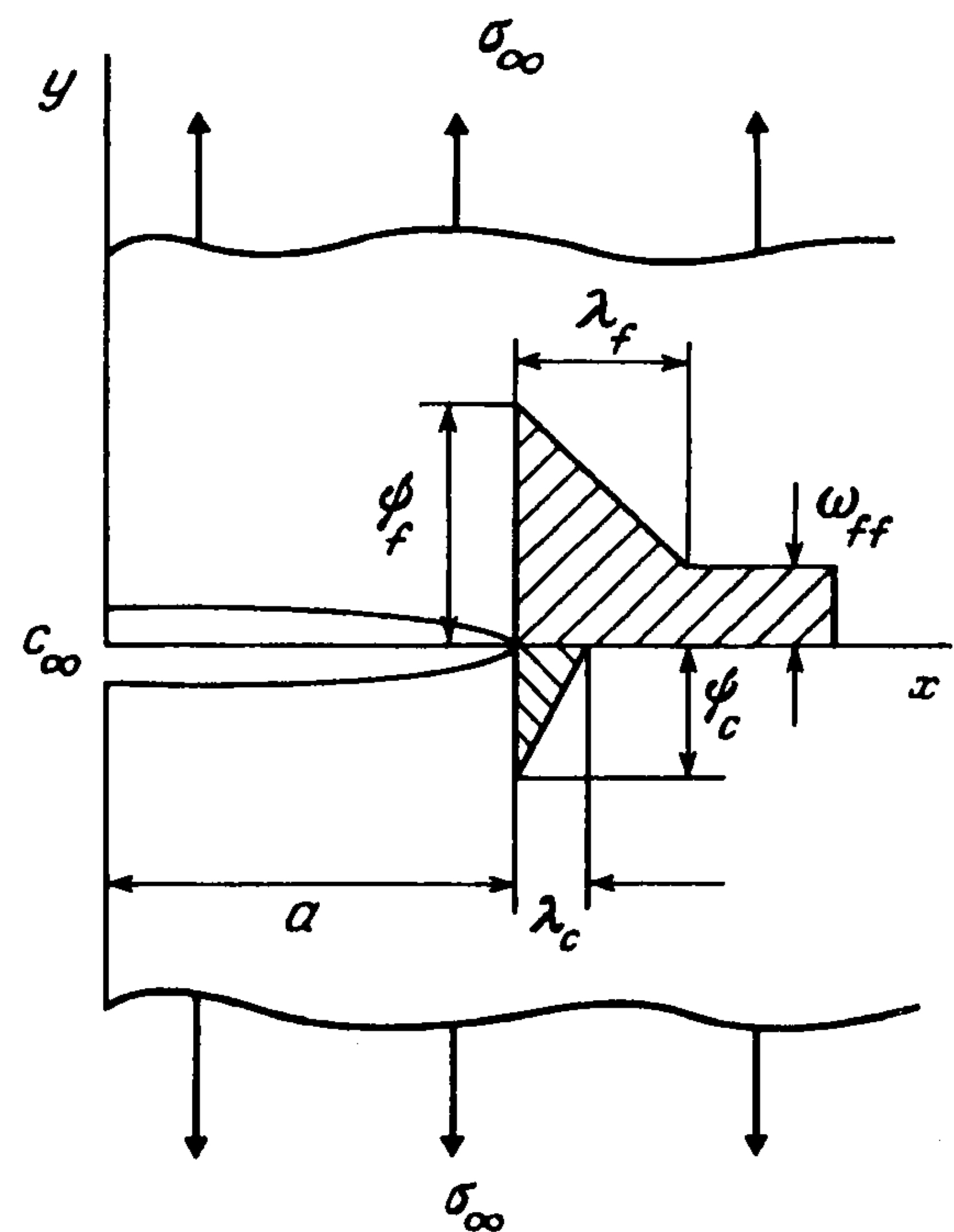
Предлагаемая модель показана на фиг. 1. Тело с поверхностной трещиной глубиной a находится под действием циклических напряжений σ_∞ , направленных по нормали к плоскости трещины, и активного агента, свойства которого у входа в трещину характеризуются некоторым параметром c_∞ (концентрацией, водородным показателем и т.п.). У фронта трещины различаем две характерные зоны. В зоне с характерным размером λ_f происходит интенсивное накопление механической компоненты усталостных повреждений. Уровень этих повреждений описываем скалярной мерой ω_f . При этом $0 \leq \omega_f \leq 1$, где значение $\omega_f = 0$ отвечает неповрежденному материалу, $\omega_f = 1$ – полностью поврежденному материалу [8, 9]. Мету механических повреждений на фронте трещины обозначим ψ_f , а уровень повреждений вне концевой зоны (в дальнем поле) обозначим ω_{ff} .

Концевая зона коррозионных повреждений, вообще, не совпадает с соответствующей зоной механических повреждений. Ограничиваясь коррозией, которая сопровождается образованием оксидной пленки (фиг. 1), будем отождествлять размер концевой зоны коррозионных повреждений с толщиной пленки λ_c . В типичной ситуации $\lambda_c \ll \lambda_f$. Введем мету коррозионных повреждений $0 \leq \omega_c \leq 1$, причем ее значение на фронте трещины обозначим ψ_c .

В теории усталости приходится отказаться от трактовки трещин как математических разрезов. Для полного описания условий у фронта трещины необходимо ввести либо эффективный радиус кривизны на фронте ρ (в случае, если материал трактуется как упругий), либо раскрытие трещины на фронте δ (если, например, используется модель тонкой пластической зоны). В дальнейшем полагаем, что материал деформируется упруго, а радиус ρ имеет смысл некоторой характеристики, которая описывает концентрацию напряжений на фронте трещины при наличии сложной фрактографической картины и снижения жесткости материала в окрестности фронта.

Таким образом, повреждение материала при совместном действии циклических напряжений и факторов окружающей среды характеризуется мерами повреждений ψ_f , ω_{ff} и ω_c , размерами концевых зон λ_f , λ_c и эффективным радиусом кривизны на фронте ρ . Вообще говоря, размеры концевых зон и эффективного радиуса на фронте зависят от уровня повреждений у фронта и истории распространения трещины. В частности, для описания скачкообразного роста трещины нужно учитывать как изменение ρ (затупление и заострение фронта), так и возможность разрушения оксидной пленки.

Для дальнейшего анализа необходимо сформулировать уравнения накопления повреждений. Порогово-степенной закон [1] обладает достаточной общностью. Следуя ему, примем следующие уравнения для мер повреждений на продолжении



Фиг. 1

фронта трещины $x \geq a, y = 0$:

$$\frac{\partial \omega_f}{\partial N} = \left(\frac{\Delta \sigma - \Delta \sigma_{th}}{\sigma_d} \right)^m, \quad \frac{\partial \omega_c}{\partial t} = \frac{1}{t_c} \left(\frac{c - c_{th}}{c_d} \right)^n \quad (2.1)$$

Здесь N – число циклов, рассматриваемое как непрерывный аргумент; t – время; $\Delta \sigma$ – размах напряжений отрыва; c – концентрация агента на фронте трещины и ее продолжении. Правые части уравнений (2.1) содержат следующие параметры материала: σ_d и c_d – характеристики сопротивления материала накоплению механических повреждений, $\Delta \sigma_{th}$, c_{th} – пороговые значения сопротивления; m и n – положительные показатели, t_c – постоянная времени. Если $\Delta \sigma < \Delta \sigma_{th}$ или $c < c_{th}$, то правые части в соответствующих уравнениях (2.1) надо положить равными нулю. Для упрощения будем пренебрегать эффектом "закрытия трещины" и родственными явлениями [10], полагая что $\sigma_{\infty}^{min} > \sigma_{cl}$, где σ_{cl} – напряжение "закрытия трещины".

Нетрудно получить приближенные уравнения, которые описывают изменение мер повреждений на фронте движущейся трещины. Заменяя в (2.1) частные производные на субстанциональные и замечая, что в пределах концевых зон

$\partial \omega_f / \partial x \approx (\psi_f - \omega_{ff}) / \lambda_f$, $\partial \omega_c / \partial x \approx \psi_c / \lambda_c$, приходим к уравнениям

$$\frac{d\psi_f}{dN} + \frac{\psi_f - \omega_{ff}}{\lambda_f} \frac{da}{dN} = \left(\frac{\Delta \sigma_t - \Delta \sigma_{th}}{\sigma_d} \right)^m, \quad \frac{d\psi_c}{dt} + \frac{\psi_c}{\lambda_c} \frac{da}{dt} = \frac{1}{t_c} \left(\frac{c_t - c_{th}}{c_d} \right)^n \quad (2.2)$$

где значения $\Delta \sigma_t$ и c_t берутся на фронте трещины $x = a$. Уравнения (2.2) пригодны как в случае неподвижного фронта, так и относительно быстро продвигающегося фронта, когда первыми членами в левых частях уравнений можно пренебречь.

Эффективный радиус на фронте ρ неявно входит в первое из уравнений (2.2) через размах напряжений $\Delta \sigma_t$. Пусть материал остается линейно упругим, а изменение деформативных свойств у фронта трещины учтено косвенно через эффективный радиус ρ . Тогда

$$\Delta \sigma_t \approx \Delta \sigma_{\infty} \left[1 + Z(a/\rho)^{1/2} \right] \quad (2.3)$$

где Z – коэффициент порядка единицы (для эллиптической щели $Z = 2$). При составлении уравнения относительно ρ необходимо учитывать взаимодействие трех процессов: заострение фронта при ускорении роста трещины, затупление из-за накопления механических повреждений, затупление из-за коррозионных повреждений. Поскольку на начальной стадии роста трещины существенная роль принадлежит начальному значению радиуса, то функция $\rho(N)$ должна удовлетворять некоторому дифференциальному уравнению первого порядка. Простейшая форма такого уравнения имеет вид

$$\frac{d\rho}{dN} = \frac{\rho_s - \rho}{\lambda_{\rho}} \frac{da}{dN} + (\rho_f - \rho) \frac{d\psi_f}{dN} + \frac{\rho_c - \rho}{f} \frac{d\psi_c}{dt} \quad (2.4)$$

Первый член в правой части описывает процесс заострения до "острого" значения радиуса ρ_s , два других – процессы затупления до "тупых" значений ρ_f и ρ_c для механических и коррозионных повреждений соответственно. При этом $\rho_s \ll \min\{\rho_f, \rho_c\}$, где ρ_f и ρ_c могут иметь одинаковый порядок. Параметр длины λ_{ρ} , входящий в (2.4), характеризует расстояние, которое фронт трещины должен пройти, чтобы эффект заострения стал существенным. Очевидно, что λ_{ρ} имеет порядок размера концевой зоны λ_f . Кроме того, уравнение (2.4) содержит частоту изменения напряжений f .

Еще одна переменная, требующая дополнительного обсуждения – параметр активной среды s . Для определенности будем говорить о концентрации активного агента или просто о концентрации. Для мелких трещин $c_t \approx c_\infty$, где c_∞ – концентрация у поверхности тела, т.е. у входа в трещину. Для глубоких трещин $c_t < c_\infty$. Чтобы найти c_t , необходимо решить гидродинамическую задачу с учетом диффузии агента и его взаимодействия с концевой зоной, а также с лицевыми поверхностями трещины. Задача осложняется тем, что форма трещины изменяется как из-за ее роста, так и из-за ее частичного закрытия. Кроме того, реальные усталостные трещины извилисты и имеют неправильную форму. Хотя соответствующая гидродинамическая задача может рассматриваться в одномерной постановке [11], используем для c_t феноменологическую модель, аналогичную описанной уравнением (2.4).

Введем дифференциальное уравнение

$$\frac{dc_t}{dt} = \frac{c_a - c_t}{t_a} - \frac{c_t}{\lambda_c} \frac{da}{dt} \quad (2.5)$$

где c_a – установившееся значение концентрации на неподвижном фронте, λ_c – параметр длины типа λ_p в уравнении (2.4), t_a – временной параметр, который характеризует скорость изменения c_t при остановившемся фронте. Очевидно, что этот параметр должен зависеть от глубины трещины a и частоты нагружения f . Примем, что

$$c_a = c_\infty \left[1 + \frac{a}{a_\infty} \left(1 + \frac{f}{f_\infty} \right)^{\alpha_f} \right]^{-\alpha_c}, \quad \alpha_f > 0, \quad \alpha_c > 0 \quad (2.6)$$

где a_∞ и f_∞ – параметры материала размерности длины и частоты соответственно.

Для медленных процессов нагружения $f \ll f_\infty$, и формула (2.6) дает $c_a = c_\infty [1 + (a/a_\infty)]^{-\alpha_c}$. По мере углубления трещины концентрация c_a убывает из-за затруднения доступа свежего агента. При $f \gg f_\infty$ процесс перемешивания интенсифицируется, так что (при прочих одинаковых условиях) c_a приближается к c_∞ . Таким образом, модель, описываемая формулами (2.5) и (2.6), оказывается достаточно гибкой, чтобы описать изменение концентрации на фронте с учетом основных факторов: глубины трещины, скорости ее роста и частоты нагружения.

3. Уравнения роста трещин. Соотношение между обобщенными силами для однопараметрической усталостной трещины имеет вид

$$G \leq \Gamma \quad (3.1)$$

где для исходной трещины $G < \Gamma$. Для устойчиво растущей трещины, $G = \Gamma$, $\partial G/\partial a < \partial \Gamma/\partial a$. Поскольку активная обобщенная сила G характеризует высвобождение энергии во всей системе "тело с трещиной – нагрузка", то влияние микрповреждений на значение этой силы весьма незначительно [12]. Поэтому можно положить

$$G = K^2(1 - \nu^2)/E \quad (3.2)$$

где K – коэффициент интенсивности напряжений (здесь и далее ссылки на моду разрушения опущены), E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона материала. В соотношении (3.1) значение G берется в момент времени, когда приложенные напряжения достигают максимальных значений $\sigma_\infty^{\max}(N)$. Тогда в формуле (3.2)

$$K_{\max} = Y \sigma_\infty^{\max} (\pi a)^{1/2}, \quad Y = O(1) \quad (3.3)$$

При вычислении обобщенной силы сопротивления Γ необходимо учитывать как механическую, так и коррозионную составляющие. Сила Γ выражается через удельную работу разрушения γ , равную энергии, которую нужно затратить для продви-

жения фронта трещины на единицу площади. До сих пор нет достоверных экспериментальных данных о влиянии микрповреждений на характеристики трещиностойкости. Простейшая модель – аддитивная [13]; при этом

$$\gamma = \gamma_0 [1 - (\omega_f + \omega_c)^\beta / \omega_r^\beta] \quad (3.4)$$

где γ_0 – удельная работа разрушения для неповрежденного материала, $\beta > 0$. Примем, что ω_r в формуле (3.4) может принимать значения, превышающие единицу. При $\omega_r > 1$ значение $\gamma_0(1 - \omega_r^{-\beta})$ характеризует остаточную трещиностойкость поврежденного материала, т.е. материала, для которого $\omega = \omega_f + \omega_c = 1$. Формула (3.4) соответствует выражению для обобщенной силы сопротивления

$$\Gamma = \gamma_0 [1 - (\psi_f + \psi_c)^\beta / \psi_r^\beta] \quad (3.5)$$

Для получения приближенного уравнения, описывающего установившийся рост трещины коррозионной усталости, используем приближенное уравнение (2.2), пренебрегая в их левых частях первыми членами. Тогда

$$\psi_f \approx \omega_{ff} + \lambda_f \left(\frac{da}{dN} \right)^{-1} \left(\frac{\Delta\sigma_t - \Delta\sigma_{th}}{\sigma_d} \right)^m, \quad \psi_c \approx \frac{\lambda_c}{ft_c} \left(\frac{da}{dN} \right)^{-1} \left(\frac{c_t - c_{th}}{c_d} \right)^n \quad (3.6)$$

Подставив (3.6) в (3.5) и приравняв значение G из (3.2) значению Γ , получим уравнение, разрешенное относительно da/dN :

$$\frac{da}{dN} = \left[\lambda_f \left(\frac{\Delta\sigma_t - \Delta\sigma_{th}}{\sigma_d} \right)^m + \frac{\lambda_c}{ft_c} \left(\frac{c_t - c_{th}}{c_d} \right)^n \right] \left[\omega \left(1 - \frac{K_{max}^2}{K_c^2} \right)^{1/2} - \omega_{ff} \right]^{-1} \quad (3.7)$$

$$K_c^2 = \gamma_0 E / (1 - \nu^2)$$

где введено обозначение K_c для критического (в смысле механики разрушения) коэффициента интенсивности напряжений.

Выражение в первых квадратных скобках в правой части уравнения (3.7) учитывает вклад микрповреждений у фронта, во вторых квадратных скобках – вклад энергетического баланса в системе "тело с трещиной — нагрузка" а также микрповреждений в дальнем поле. Рост трещины становится неустойчивым при достижении равенства $K_{max} = K_{fc}$, где K_{fc} – критический коэффициент интенсивности напряжений для усталостных трещин

$$K_{fc} = K_c [1 - (\omega_{ff} / \omega_r)]^{\beta/2} \quad (3.8)$$

Формула (3.8) учитывает снижение трещиностойкости из-за микрповреждений, накопленных в дальнем поле, т.е. до того как фронт трещины достигнет положения, при котором произойдет фактическое разрушение. При $K \ll K_{fc}$ приходим к уравнению

$$\frac{da}{dN} = \left[\lambda_f \left(\frac{\Delta\sigma_t - \Delta\sigma_{th}}{\sigma_d} \right)^m + \frac{\lambda_c}{ft_c} \left(\frac{c_t - c_{th}}{c_d} \right)^n \right] \quad (3.9)$$

Правая часть уравнения (3.9) формально выглядит как результат суперпозиции скоростей, связанных с механическими и коррозионными повреждениями [4]. Однако в действительности даже столь простое уравнение описывает взаимодействие всех процессов. Так, размах напряжений $\Delta\sigma_t$ зависит от концентрации напряжений на фронте, которые в свою очередь зависят от обеих мер повреждений; концентрация агента c_t на фронте зависит от глубины трещины и скорости ее роста и т.п.

Дополнительное осложнение вносит то, что размеры концевых зон, вообще говоря, не являются константами материала. Размер λ_f имеет порядок нескольких радиусов кривизны на фронте или, если используется модель тонкой пластической зоны, длины этой зоны [2]. Размер λ_c можно связать с мерой коррозионных повреждений, положив, например, $\lambda_c = \lambda_0 \psi^\alpha$, где λ_0 отвечает полностью сформировавшейся оксидной пленке, $\alpha > 0$. В целом уравнения (3.7) и (3.9) носят скорее иллюстративный характер, показывая, что выводы теории могут трактоваться в контексте известных полуэмпирических уравнений [3, 14]. Если не вводить дополнительные упрощения, то единственный путь реализации предложенной модели – вычислительный эксперимент.

4. Численное моделирование. Алгоритм вычислений содержит совместное решение уравнений (2.4)–(2.5) до момента первого достижения равновесного состояния. В этот момент достигается равенство

$$K_{\max}^2 = \frac{E\gamma_0}{1-\nu^2} \left[1 - \left(\frac{\psi_f + \psi_c}{\omega_r} \right)^\beta \right] \quad (4.1)$$

После достижения первого равновесного состояния размер трещины получает малое приращение Δa , после чего цикл вычислений повторяется. Кроме того, алгоритм включает внутренние циклы итерации, поскольку переменные $\sigma_i(N)$, $\omega_f(x, N)$, $\omega_c(x, N)$, $\rho(N)$ и $c_i(N)$ взаимно обусловлены. Для напряжений $\sigma(x)$ на продолжении фронта трещины используется известное решение для эллиптической трещины

$$\frac{\sigma}{\sigma_\infty} = \frac{\xi^2 + \mu}{\xi^2 - \mu} + \frac{(1-\mu)^2 [\xi^4 + 3\xi^2 + \mu(\xi^2 - 1)]}{2(\xi^2 - \mu)^3} \quad (4.2)$$

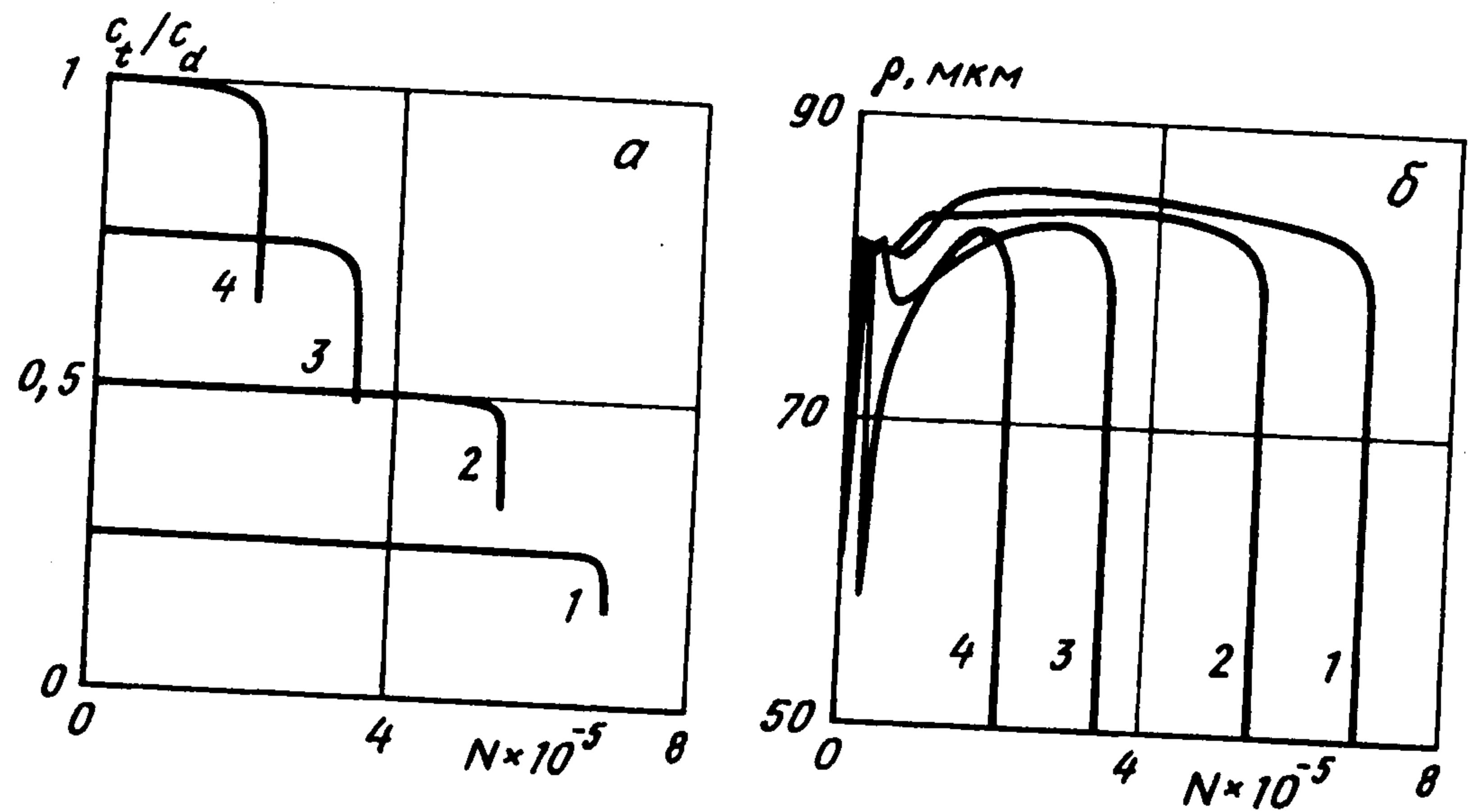
$$\xi = \frac{(x/a) + [(x/a)^2 + (\rho/a)^2 - 1]^{1/2}}{1 + (\rho/a)^{1/2}}, \quad \mu = \frac{1 - (\rho/a)^{1/2}}{1 + (\rho/a)^{1/2}}$$

Использование формул (4.2) снимает вопрос о размере концевой зоны λ_f . Для толщины коррозионной пленки примем, что $\lambda_c = \lambda_0 \psi_f$.

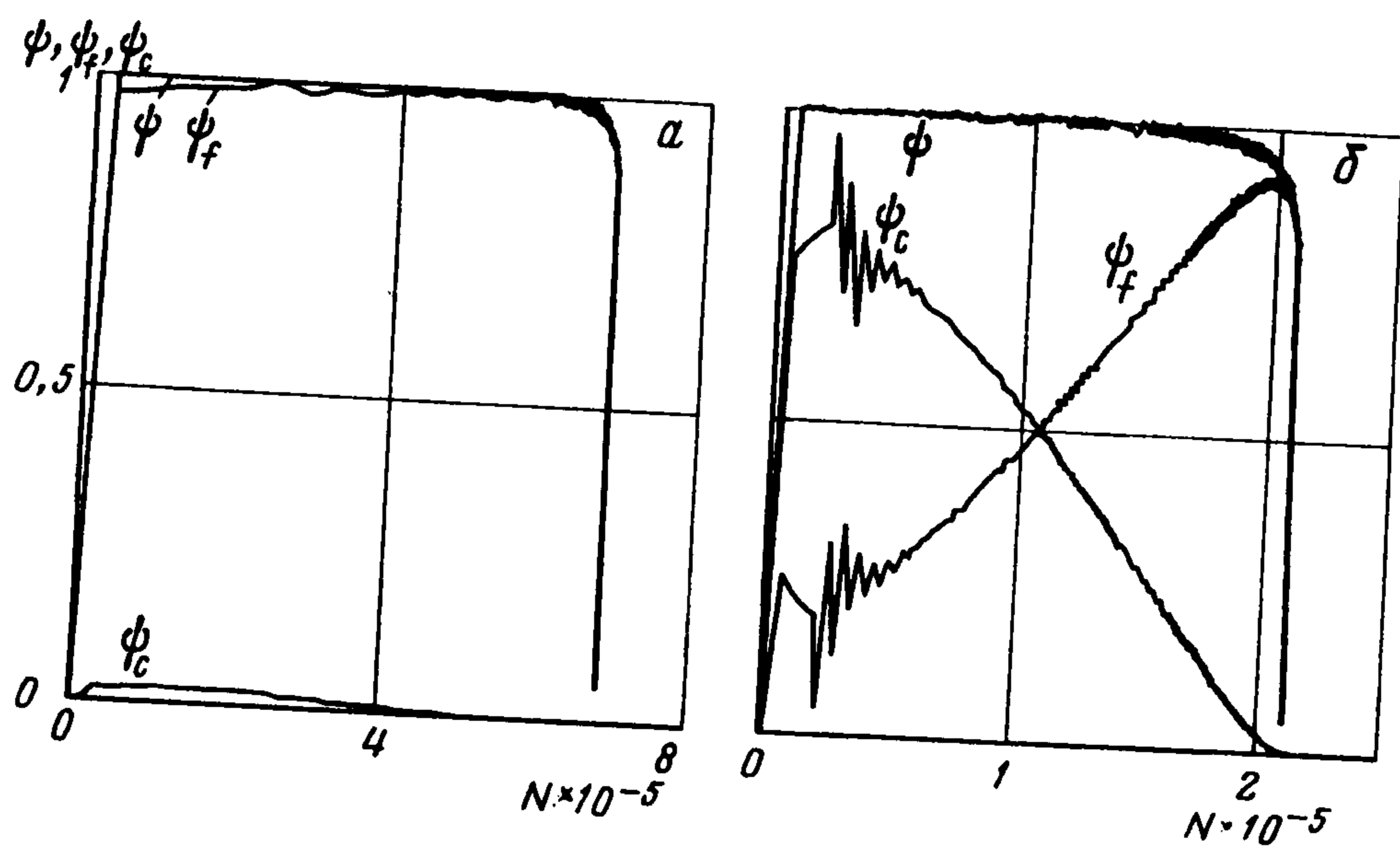
В качестве основных численных данных были взяты следующие: $E = 200$ ГПа, $\nu = 0.3$, $\gamma_0 = 10$ кДж/м². В первом уравнении (2.1) принято, что $\sigma_d = 5$ ГПа, $\Delta\sigma_{th} = 250$ МПа при коэффициенте асимметрии цикла $R = \sigma_{\infty}^{\min}/\sigma_{\infty}^{\max} = 0$, показатель степени $m = 4$. Во втором уравнении (2.2) концентрация c отнесена к параметру материала c_d , так что условия окружающей среды выражены через безразмерную величину c_∞/c_d , где c_∞ – концентрация у входа в трещину. Пороговое значение концентрации принято $c_{th} = 0$, показатель степени $n = 4$. В уравнениях (2.4) и (2.5) приняты следующие значения характерных длин: $\rho_s = 10$ мкм, $\rho_f = \rho_c = \lambda_\rho = \lambda_c = 100$ мкм. Максимальная толщина оксидных пленок $\lambda_0 = 10$ мкм. Постоянные времени во втором уравнении (2.1) и в уравнении (2.5) приняты $t_c = t_a = 1$ час. В формуле (2.6) $a_\infty = 1$ мм, $f_\infty = 1$ Гц, $\alpha_f = \alpha_c = 1$.

На фиг. 2–4 представлены результаты вычислительного эксперимента при $\Delta\sigma_\infty = 100$ МПа, $f = 1$ Гц. Начальные данные взяты следующие: $a_0 = 1$ мм, $\rho_0 = 50$ мкм; все параметры повреждения в начальном состоянии приняты равными нулю. Кривые 1–4 на фиг. 2, 4 соответствуют уровням концентрации $c_\infty/c_d = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$. Изменение концентрации на фронте c/c_d в функции от числа циклов N показано на фиг. 2, а. По мере углубления трещины скорость ее роста увеличивается, а концентрация активного агента на фронте убывает, резко снижаясь перед финальным разрушением.

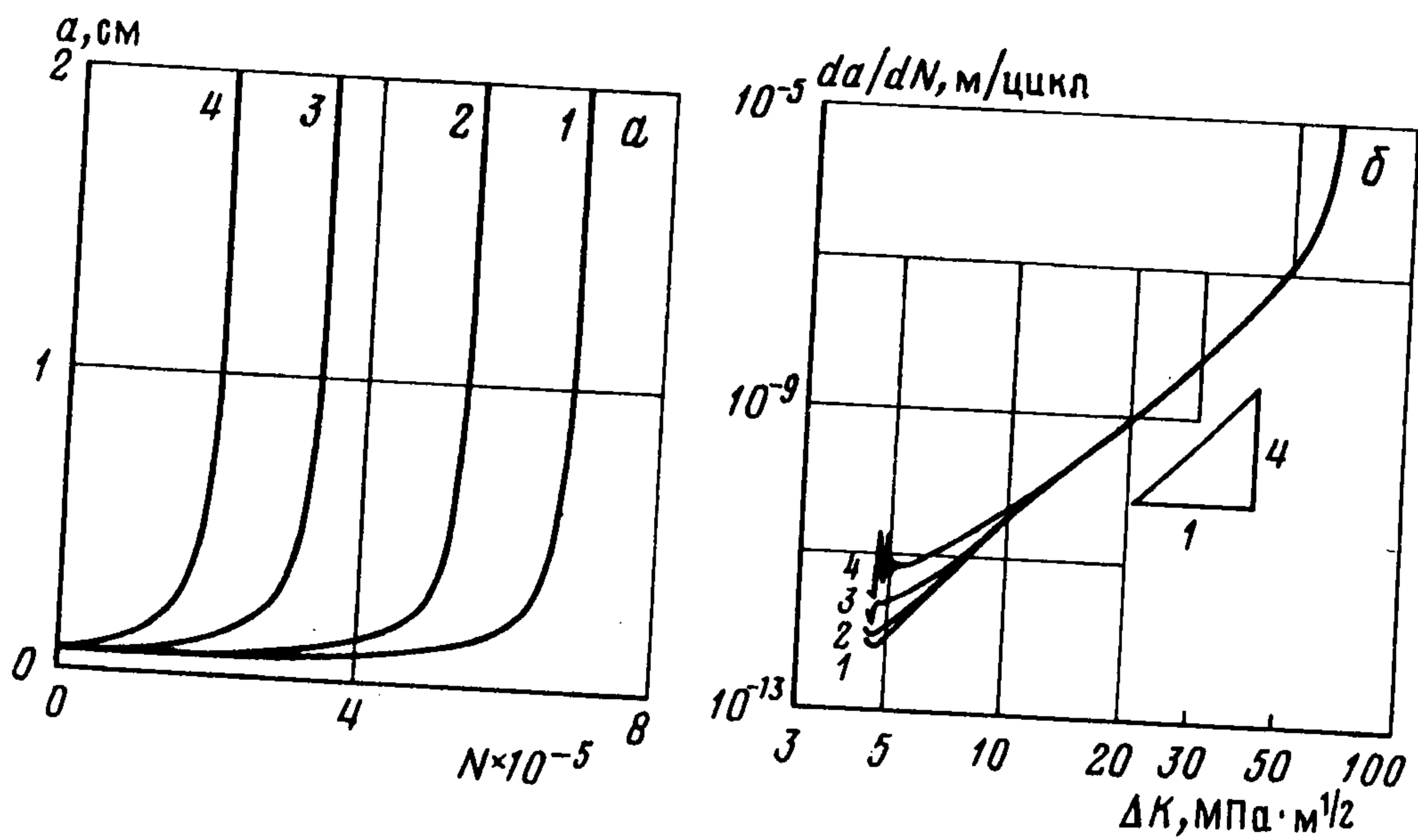
Фиг. 2, б показывает, как в процессе роста трещины изменяется эффективный радиус кривизны ρ . Стадия заострения трещины от начального значения $\rho_0 = 50$ мкм до значения, близкого к $\rho = 80$ мкм, на диаграмме не видна. Установившийся рост идет при радиусе, близком к этому значению. Заострение фронта начинается на заключительной стадии роста трещины. Однако при высоких значениях c_∞/c_d наблюдается несколько заострений на начальной стадии. Это объясняется взаимодействием механических и коррозионных повреждений.



Фиг. 2

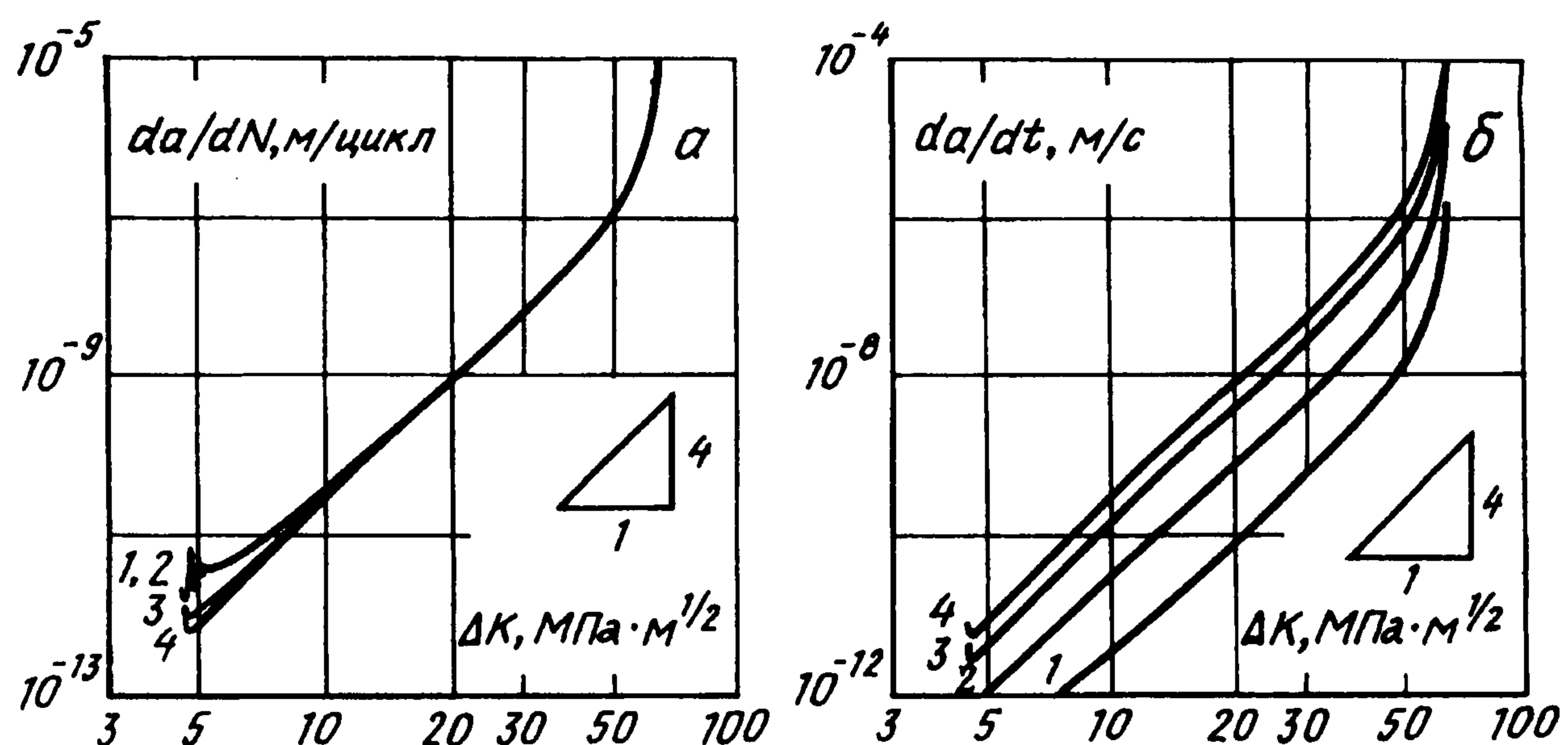


Фиг. 3



Фиг. 4

На фиг. 3 показано изменение мер микроповреждений ψ_f , ψ_c и $\psi = \psi_f + \psi_c$ при $c_\infty/c_d = 0,25$ (а) и $c_\infty/c_d = 1$ (б). Графики иллюстрируют взаимодействие между различными механизмами и изменение вклада каждой компоненты повреждений в рост трещины. При малых c_∞/c_d доминируют механические повреждения, так что $\psi \approx \psi_f$. На начальной стадии роста трещины наблюдается также и появление чисто коррозионной компоненты ψ_c . Страгивание трещины происходит вблизи $\psi = 1$. При больших c_∞/c_d вклад коррозионных повреждений становится существенным (фиг. 3, б). По мере продвижения фронта трещины коррозионная составляющая



Фиг. 5

уменьшается, механическая – возрастает. Обе составляющие (как и их сумма) начинают быстро уменьшаться с приближением к финальному разрушению. Значение ψ_c можно трактовать как безразмерную толщину оксидной пленки. К завершению процесса эта толщина уменьшается практически до нуля. Наиболее существенной особенностью графика, представленного на фиг. 3, б, является скачкообразное поведение мер ψ_f и ψ_c на начальной стадии. Это можно истолковывать как результат поочередного заострения и затупления трещины.

Размер трещины a в функции от числа циклов N представлен на фиг. 4, а.

Диаграмма роста трещины в стандартной форме (скорость роста da/dN в функции от размаха ΔK коэффициента интенсивности напряжений) представлена на фиг. 4, б. Начальная часть кривых отличается от обычных экспериментальных диаграмм роста усталостных трещин. В частности здесь наблюдается немонотонная зависимость скорости da/dN от размаха ΔK и значительный разброс, зависящий от концентрации активной среды. При высокой концентрации начальный участок диаграммы может быть истолкован как "плато", которое отвечает слабому вкладу чисто механической составляющей в скорость распространения трещины. Далее начинает доминировать механическая составляющая. Средняя часть диаграммы соответствует обычной аппроксимации Пэриса–Эрдогана с угловым коэффициентом, близким к $m = 4$. Далее наблюдается ускорение роста трещины вплоть до финального разрушения.

Влияние частоты нагружения на скорость роста трещины проиллюстрировано на фиг. 5. При этом принято $c_\infty/c_d = 1$. Кривые 1–4 построены для частот $f = 0,1, 1,5$ и 10 Гц соответственно. На фиг. 5, а скорость измеряется в м/цикл, на фиг. 5, б – в м/с. В первом случае наибольшее расхождение имеет место на начальных участках кривых, когда преобладает коррозионный тип повреждений. Во втором случае расхождение существенно на всей диаграмме. В обоих случаях угловой коэффициент на средней части кривых близок к показателю $m = 4$ в уравнении (2.1).

Представленные графики отражают лишь малую часть проведенного вычислительного эксперимента, в котором в совокупности изучено влияние экстремальных напряжений цикла, частоты нагружения и начальных условий на скорость роста трещин и поведение остальных определяющих параметров: концентрации, эффективного радиуса на фронте, меры механических, коррозионных и суммарных повреждений. Показано, что часть параметров, входящих в предлагаемую модель, может быть оценена по результатам стандартных испытаний на коррозионную усталость, в частности, по экспериментальным диаграммам роста трещины при различных уровнях циклических напряжений, различных концентрациях и различных начальных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (96-01-01488).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Болотин В.В.* Уравнения роста усталостных трещин // Изв. АН СССР. МТТ. 1983. № 4. С. 153–160.
2. *Болотин В.В., Лебедев В.Л.* Механика роста усталостных трещин в среде с микроповреждениями // ПММ. 1995. Т. 59. Вып. 2. С. 307–317.
3. *Похмурский В.И.* Коррозионная усталость металлов. М.: Металлургия, 1985. 206 с.
4. *Krausz K., Krausz A.S.* The development of the constitutive law of crack growth in corrosion fatigue // Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures/Ed. A. Carpinteri. Amsterdam: Elsevier. 1994. P. 1227–1306.
5. *Болотин В.В.* О динамическом распространении трещин // ПММ. 1992. Т. 56. Вып. 1. С. 150–162.
6. *Bolotin V.V.* Fracture from the standpoint of non-linear stability // Intern. J. Non-Linear Mechanics. 1994. V. 29. N 4. P. 569–585.
7. *Bolotin V.V.* Stability Problems in Fracture Mechanics. N.Y.: Wiley, 1996. 188 p.
8. *Kachanov L.M.* Introduction to Continuum Damage Mechanics. Dordrecht: Nijhoff, 1986. 135 p.
9. *Шестериков С.А., Лебедев С.Ю., Юмашева М.А.* О длительной прочности // Проблемы механики сплошной среды. Владивосток: Ин-т автоматизации и процессов упр. ДВО РАН, 1996. С. 80–85.
10. *Гольдштейн Р.В., Житников Ю.В., Морозова Т.М.* Равновесие системы разрезов при образовании в них областей налегания и раскрытия // ПММ. 1991. Т. 55. Вып. 4. С. 672–678.
11. *Черепанов Г.П.* Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
12. *Болотин В.В., Ковех В.М.* Численное моделирование роста усталостных трещин в среде с микроповреждениями // Изв. РАН. МТТ. 1993. № 2. С. 132–142.
13. *Болотин В.В.* Механическая модель коррозионного растрескивания // Машиноведение. 1987. № 4. С. 20–26.
14. Atlas of Stress-Corrosion and Corrosion Fatigue Curves / Ed. E.J. McEvily. Metal Press: ASM International, 1990. 520 p.

Москва

Поступила в редакцию
28.IV.1997