



МЕХАНИКА ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 539.43;620.16+621.644→622.692.4

Л.А. СОСНОВСКИЙ, д-р техн. наук
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

А.Н. КОЗИК
ОАО «Гомельтранснефть Дружба», Республика Беларусь

МЕТОДИКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Разработано два частных варианта известной обобщенной теории предельных состояний трибофатических систем: 1) для условий коррозии под напряжением и 2) с учетом влияния параметров потока нефти (пристеночного трения). Согласно первой модели, предельное состояние материала (по критериям статической прочности либо сопротивления усталости) оценивается по соответствующей характеристике механических свойств в воздухе (предел прочности при растяжении, предел выносливости) с учетом влияния скорости коррозии под напряжением в данной среде. Сформулирована следующая общая закономерность коррозионно-механической прочности: произведение действующего нормального напряжения на функцию коррозионного влияния есть величина постоянная для данного материала в разнообразных условиях нагружения. На основе этой закономерности построена логарифмическая функция повреждаемости нефтепроводных труб в зависимости от времени эксплуатации, согласно которой трубы нефтепровода «Дружба» могут безопасно эксплуатироваться более двух сроков амортизации. Этот вывод подтвержден практической эксплуатацией линейной части нефтепровода «Дружба». Вторая модель принципиально отличается тем, что впервые позволяет оценить вклад пристеночного трения при движении потока нефти по трубе под давлением на изменение сопротивления металла коррозионно-механической усталости.

Ключевые слова: трибофатическая система, коррозионное повреждение, коррозионно-механическая прочность

Введение. Известно, что потери от коррозионного повреждения металлов в мире превышают 10 млрд. долларов ежегодно. Поэтому проблема коррозии в технике поставлена давно и изучается основательно (см., например, [1–4]). И к настоящему времени сложились многие направления исследований в этой области: коррозия под напряжением, термическая коррозия, коррозионно-механическая усталость, коррозионно-эрозионная усталость, коррозия трения, коррозионно-механическое изнашивание, коррозионно-механическая трещиностойкость и др. [1–11]. Однако следует признать, что до сих пор не сложилось единого мнения о механизмах влияния коррозионных сред на сопротивление металлов разрушению при действии статической и повторно-переменной нагрузок [5–11]. Это объясняет тот факт, что известные инженерные методики расчетной оценки коррозионно-механической прочности носят эмпирический характер и разрабатываются применительно к тем или иным условиям работы конкретных технических объектов. Так, для элементов конструкций, работающих в коррозионной среде при воздействии циклических напряжений, разработано два метода расчетов

на коррозионно-механическую усталость. Согласно первому методу [5, 11, 8], предел выносливости в коррозионной среде ($\sigma_{-1\text{корр}}$) оценивают путем экспериментального обоснования величины коэффициента влияния коррозии $K_{\text{корр}}$:

$$\sigma_{-1\text{корр}} = K_{\text{корр}} \sigma_{-1}, \quad K_{\text{корр}} \leq 1, \quad (1)$$

где σ_{-1} — предел выносливости исследуемого металла в воздухе.

Другой метод состоит в построении кривой коррозионной усталости по известной кривой механической усталости в воздухе [9, 12]. Это позволяет ставить и решать задачу расчета долговечности элемента конструкции, работающего в коррозионной среде.

Применительно к трибофатическим системам систематические теоретические и экспериментальные исследования коррозионно-механической прочности, по имеющимся данным, не проводились [13]. Однако разработана обобщенная теория предельных состояний таких систем [13, 14], в рамках которой дан метод учета электрохимической коррозии при оценке их работоспособности по различным критериям.

В данной статье ставится и решается задача построения частного варианта указанной теории для двух простых случаев: 1) когда элемент конструкции работает в коррозионной среде и находится под воздействием статических или циклических напряжений (σ); 2) когда он дополнительно подвержен действию силы трения ($\tau_{\text{тр}}$). Нетрудно видеть, что, будучи простейшими, такие случаи имеют принципиальное практическое значение, ибо позволяют оценить влияние на работоспособность трибофатических систем трех основных повреждающих явлений: механической усталости, трения и коррозионного повреждения (в совокупности).

Коррозия под напряжением и коррозионно-механическая усталость. Рассмотрим эти задачи в объединенной постановке. Это значит, что исследуется влияние нормальных (механических) напряжений σ на поведение объектов в коррозионной среде. При этом характер нагруженности связывается лишь с методом определения несущей способности: в случае статического нагружения критическое состояние определяется пределом прочности при растяжении (σ_b), а в случае циклического нагружения — пределом выносливости в воздухе (σ_{-1}).

Таким образом, в общем случае имеем критерий предельного состояния:

$$\sigma = \sigma_*, \quad (2)$$

где $\sigma_* = \sigma_{-1}$ либо $\sigma_* = \sigma_b$, а величина действующего напряжения может изменяться в интервале:

$$0 < \sigma \leq \sigma_*. \quad (3)$$

Поскольку, как отмечалось, многообразные электрохимические взаимодействия среды с металлом в строгой постановке и в полной мере количественно описать не удастся, следует предложить инженерную постановку и решение данной задачи. Примем следующую гипотезу: повреждающее действие коррозионной среды можно адекватно описать соответствующим увеличением действующего нормального напряжения. В самом деле, коррозионная среда, как правило, снижает прочность (несущую способность, сопротивление усталости металла) — в принципе то же самое будет и в случае роста напряжений σ .

Чтобы конкретизировать сформулированную выше гипотезу, введем представление о коррозионном параметре:

$$0 \leq D_\sigma \leq 1, \quad (4)$$

которому придаем следующее содержание: его увеличение должно быть эквивалентно росту электрохимической повреждаемости материала. Граничные условия таковы: если $D_\sigma = 0$, то данная среда не оказывает влияния на прочность металла; при $D_\sigma = 1$ среда оказывается «предельно» агрессивной. Естественно ожидать, что в технических приложениях реализуется условие $0 < D_\sigma < 1$.

Далее развиваемую концепцию реализуем в общей — энергетической постановке, используя основные положения теории предельных состояний трибофатических систем [13, 14]. Согласно этой теории, в частном случае действия нормальных напряжений предельное состояние металла достигается, когда эффективная энергия деформации U_σ^{eff} , обусловленная этим напряжением, достигнет критической величины U_0 :

$$U_\sigma^{\text{eff}} = U_0. \quad (5)$$

Согласно [15, 16], U_0 — энергия активации процесса разрушения, по порядку величины равная $1 \dots 10$ эВ в расчете на одну частицу, атом или молекулу ($\sim 10^2 \dots 10^3$ кДж/моль), т.е. величина, близкая к энергии разрыва межатомной связи в деформируемом твердом теле. Приближенная формула для ее расчета имеет вид [17]:

$$U_0 \approx \varepsilon_* \frac{C_a}{\alpha_V}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_* = 0,6$ — предельная деформация межатомной связи, C_a — атомная теплоемкость, α_V — коэффициент термического расширения объема.

Величина U_σ^{eff} в (5) есть та часть полной U_σ потенциальной энергии деформации, которая непосредственно расходуется на генерирование и накопление необратимых повреждений. В первом приближении ее можно оценить по методике, предложенной в работе [18]. И в упругой области (рисунок 1, заштриховано вертикальными пунктирными линиями):

$$U_\sigma = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon = \frac{1}{2E} \sigma^2 \sim \sigma^2$$

и в упругопластической области (см. рисунок 1, заштриховано горизонтальными сплошными линиями):

$$U_\sigma = K_\phi \sigma \varepsilon \sim \sigma^2$$

потенциальная энергия деформации пропорциональна величине σ^2 ; K_ϕ — коэффициент формы кривой растяжения. В обоих случаях ее эффективную часть вычисляют как соответствующую долю U_σ , т.е.:

$$U_\sigma^{\text{eff}} = a_\sigma \sigma^2, \quad (7)$$

где a_σ — коэффициент, который «выделяет» из полной энергии деформации ее эффективную часть.

Далее учтем в (7) действие коррозионной среды согласно представлению (4):

$$U_\sigma^{\text{eff}} = \frac{a_\sigma \sigma^2}{1 - D_\sigma}. \quad (8)$$

При $D_\sigma = 0$ формула (8) переходит в (7), согласно которой влияние среды отсутствует в системе. Если же $D_\sigma > 0$,

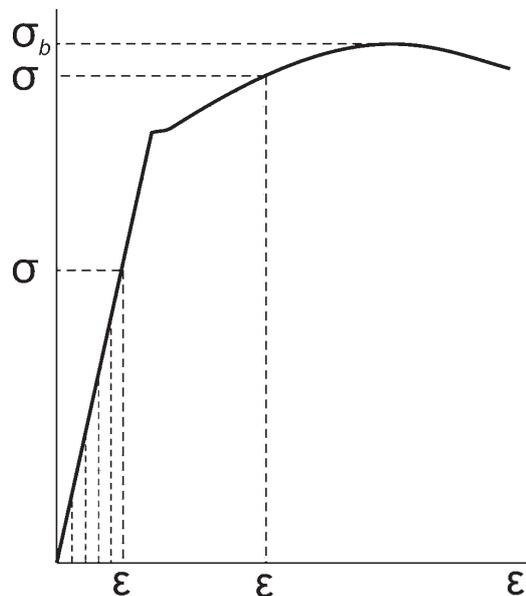


Рисунок 1 — К определению потенциальной энергии деформации

и $D_\sigma \ll 1$, то U_σ^{eff} в (8) растет соответственно увеличению D_σ , что и требуется (и прогнозируется).

Теперь критерий достижения предельного состояния (5) с учетом влияния коррозионной среды (8) реализуется с учетом (4):

$$U_\sigma^{eff} = \frac{a_\sigma \sigma^2}{1 - D_\sigma} = a\sigma_*^2 = U_0. \quad (9)$$

Критерий коррозионно-механической прочности (9) гласит: предельное (критическое) состояние металла при действии коррозионной среды (D_σ) наступает, когда эффективная потенциальная энергия деформации достигает величины энергии разрыва межатомной связи.

Параметр D_σ , в соответствии с теорией предельных состояний трибофатических систем, определяется соотношением скорости коррозии в данной среде (v_{ch}) и скорости коррозии в той же среде при воздействии нормальных напряжений ($v_{ch(\sigma)}$):

$$D_\sigma = 1 - \left(\frac{v_{ch}}{v_{ch(\sigma)}}\right)^{m_{v(\sigma)}}, \quad (10)$$

где $m_{v(\sigma)}$ — параметр, учитывающий физико-химические свойства материала, определяющие его способность сопротивляться повреждающему действию данной среды; это параметр, характеризующий чувствительность материала к коррозии.

Скорости коррозии v_{ch} и $v_{ch(\sigma)}$ определяют экспериментально по известным методикам [4, 6]. Величину a_σ можно оценить из (9) при граничном условии $D_\sigma = 0$:

$$a_\sigma = U_0 / \sigma_*^2, \quad (11)$$

где σ_* берется по одному из критериев (2).

Совместный анализ (8), (9) и (10) приводит к соотношению:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_*}\right)^2 = \left(\frac{v_{ch}}{v_{ch(\sigma)}}\right)^{m_{v(\sigma)}}, \quad (12)$$

из которого устанавливается следующая общая закономерность:

$$\sigma_* v_{ch}^{m_{v(\sigma)}/2} = \sigma v_{ch(\sigma)}^{m_{v(\sigma)}/2}, \quad (13)$$

которая гласит: произведение действующего нормально-го напряжения σ на соответствующую функцию скорости коррозии $v_{ch(\sigma)}^{m_{v(\sigma)}/2}$ есть величина постоянная для данного материала, находящегося под воздействием различных коррозионных сред, т.е.:

$$C(\sigma, v_{ch}) = \sigma v_{ch(\sigma)}^{m_{v(\sigma)}/2}. \quad (14)$$

Из (13) имеем уравнение для расчета предельного напряжения металла, находящегося под воздействием данной среды. Так, предел коррозионно-механической усталости будет:

$$\sigma_{-1ch} = \sigma_{-1} \left(\frac{v_{ch}}{v_{ch(\sigma)}}\right)^{m_{v(\sigma)}/2}. \quad (15)$$

Согласно (15), чем больше скорость коррозии под напряжением ($v_{ch(\sigma)}$), тем меньше сопротивление коррозионно-механической усталости (σ_{-1ch}). Этот вывод хорошо согласуется с известными экспериментальными данными и теоретическими представлениями [5, 8–12]. Величина σ_{-1ch} зависит также от чувствительности данного металла к коррозии под напряжениям ($m_{v(\sigma)}$).

Сравнивая (15) с (1), устанавливаем, что содержание традиционного коэффициента влияния коррозии можно конкретизировать, а именно:

$$K_{кorr} = \left(\frac{v_{ch}}{v_{ch(\sigma)}}\right)^{m_{v(\sigma)}} \leq 1. \quad (16)$$

Уравнение (16) позволяет, по существу, прогнозировать значение $K_{кorr}$ по результатам обычных коррозионных исследований — вместо проведения трудоемких, длительных и дорогих испытаний образцов на усталость в воздухе и в коррозионной среде.

Для реализации (15) необходима методика определения параметра $m_{v(\sigma)}$ (рисунок 2).

Прологарифмируем уравнение (15). Тогда в соответствующих двойных логарифмических координатах оно представляется прямой линией. Это дает методику простого определения параметра чувствительности материала к влиянию коррозионной среды через тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс.

Заметим, наконец, что соотношение (15) можно использовать и для прогнозирующего расчета скорости коррозии под напряжением:

$$v_{ch(\sigma)} = v_{ch} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{-1}}\right)^{2/m_{v(\sigma)}}, \quad (17)$$

если известен предел выносливости стали. Согласно (17), величина $v_{ch(\sigma)}$ тем больше, чем выше действующее напряжение (σ) и чем меньше напряжение предельное (σ_{-1}); она определяется также чувствительностью материала к коррозии ($m_{v(\sigma)}$).

Приведем пример использования полученных решений.

При эксплуатации нефтепровода особый интерес представляет потеря Δh толщины стенки h_0 трубы вследствие развития коррозионного повреждения. Ее оценку можно выполнить, используя обобщенную функцию накопления повреждений [13], так:

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \left[1 - \left(1 - \frac{t}{T_{\sigma(ch)}}\right)^\alpha\right]^\beta, \quad (18)$$

где t — наработка (время эксплуатации), $T_{\sigma(ch)} = T_R$ — ресурс материала трубы под действием s и коррозионной

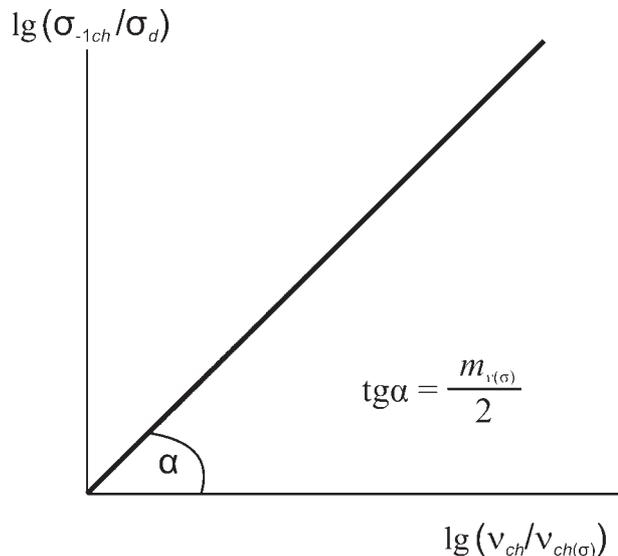


Рисунок 2 — К определению параметра $m_{v(\sigma)}$

среды (ch), α и β — параметры упрочнения-разупрочнения материала.

Функция (18) прогнозирует при $\alpha=1$ и $\beta=1$ линейный закон накопления повреждений (пунктирная линия на рисунке 3), при $\beta=1, \alpha>1$ описывается нелинейное разупрочнение (кривая 1), а при $\alpha=1$ и $\beta>1$ — нелинейное упрочнение (кривая 2).

Принимая гипотезу линейного уменьшения толщины стенки трубы (в (18) $\alpha=1$ и $\beta=1$), установлено (рисунок 4), что нефтепровод можно эксплуатировать свыше двух амортизационных сроков (33 года \times 2), при этом равномерная коррозия не превысит 12 %.

На рисунке 5 дана оценка функции снижения пределов коррозионно-механической усталости трубной стали согласно изложенной выше модели. Она отражает взаимосвязь накопления коррозионных и усталостных повреждений элементов труб в любом интервале времени $0 \leq t \leq T_H$, где T_H — нормативный срок службы (технический ресурс).

Учет силы трения. Кратко рассмотрим задачу об учете сил пристеночного трения при транспорте нефти по трубе под давлением. Будем считать, что известная формула:

$$\tau_L = \alpha_L f_L v_L / 2 \quad (19)$$

применима для оценки касательных напряжений τ_L , обусловленных движением нефти по трубе; здесь v_L — линейная скорость потока, f_L — коэффициент пристеночного трения.

Тогда, согласно теории [13, 14], критерий достижения предельного состояния можно записать так:

$$\left(\frac{a_\sigma \sigma^2}{1 - D_\sigma} + \frac{a_\tau \tau_L^2}{1 - D_\tau} \right) \Lambda_{\sigma/\tau} = U_0, \quad (20)$$

где D_τ — параметр влияния коррозии трения, определяемый по методике, изложенной выше (в формуле (10) все индексы σ заменяются на индексы τ); здесь $\Lambda_{\sigma/\tau}$ — параметр взаимодействия необратимых повреждений, обусловленных нормальными и касательными напряжениями. Методика определения $\Lambda_{\sigma/\tau}$ описана в работах [13, 14].

После несложных преобразований из (20) можно получить уравнение для прогнозирующего расчета пре-

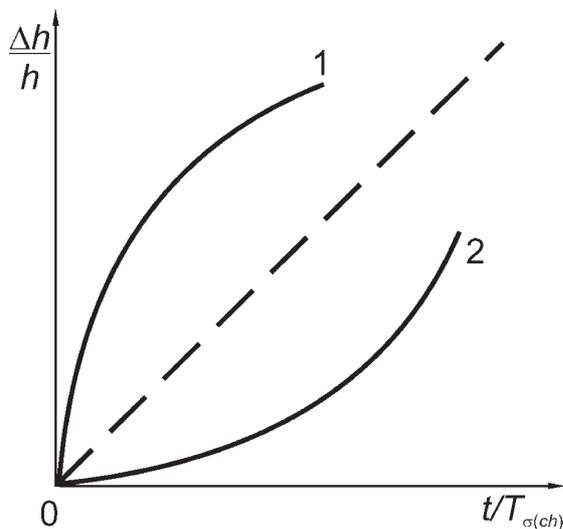


Рисунок 3 — Типичные функции износа

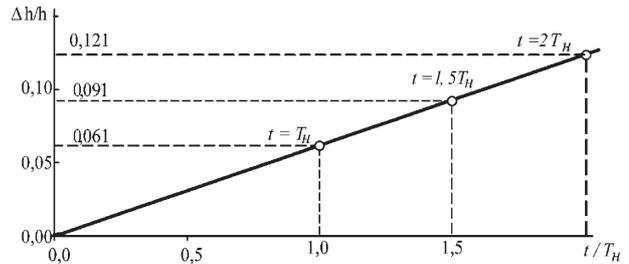


Рисунок 4 — График изменения относительной толщины стенки трубы в процессе эксплуатации

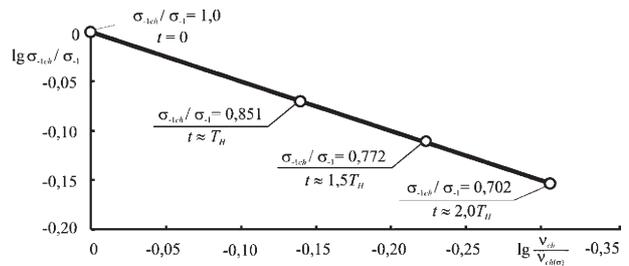


Рисунок 5 — Логарифмическая функция повреждаемости труб

дельных напряжений для металла трубы с учетом влияния коррозии под напряжением (параметр D_σ) и коррозии трения (параметр D_τ):

$$\sigma_{-1}(\tau_L, D_\sigma, D_\tau) = \sigma_{-1ch} \sqrt{\frac{1}{\Lambda_{\sigma/\tau}} - \left(\frac{\tau_L}{\tau_f} \right)^2 \left(\frac{v_{ch}(\tau)}{v_{ch}} \right)^{m_{v(\sigma)}}}, \quad (21)$$

где функция влияния касательных напряжений и коррозии трения:

$$\varphi(\tau_L, D_\tau) = \sqrt{\frac{1}{\Lambda_{\sigma/\tau}} - \left(\frac{\tau_L}{\tau_f} \right)^2 \left(\frac{v_{ch}(\tau)}{v_{ch}} \right)^{m_{v(\sigma)}}} \quad (22)$$

определяется не только уровнем касательных напряжений ($\tau_L/\tau_f < 1$ (здесь τ_f — предел выносливости металла при кручении в воздухе), но и параметром $\Lambda_{\sigma/\tau} \gg 1$, описывающим условия и направленность диалектического взаимодействия взаимообусловленных повреждений от нормальных и касательных напряжений. Согласно (21) и (22) имеем $\sigma_{-1}(\tau_L, D_\sigma, D_\tau) > \sigma_{-1ch}$, когда $\varphi(\tau_L, D_\tau) > 1$ и, следовательно, $\Lambda_{\sigma/\tau} < 1$. И $\sigma_{-1}(\tau_L, D_\sigma, D_\tau) < \sigma_{-1ch}$, когда $\varphi(\tau_L, D_\tau) < 1$ и, следовательно, $\Lambda_{\sigma/\tau} > 1$. Таким образом, сопротивление коррозионно-механической усталости металла труб зависит от:

- уровня нормальных (σ), касательных (τ_L) напряжений и воздействия коррозионной среды (D_σ, D_τ);
- прочности материала трубы при указанных воздействиях ($\sigma_{-1ch}, \tau_f, m_v, v_{ch}$);
- взаимодействия повреждений, обусловленных механической усталостью и трением ($\Lambda_{\sigma/\tau}$).

Нетрудно видеть, что, в зависимости от условий эксплуатации и свойств металла трубы, возможна реализация соотношения:

$$\sigma_{-1}(\tau_L, D_\sigma, D_\tau) \gg \sigma_{-1ch}. \quad (23)$$

Иными словами, сложные процессы взаимодействия явлений способны приводить не только к снижению прочности трубы ($\sigma_{-1ch} < \sigma_{-1}$), но и, в некоторых условиях, к ее повышению ($\sigma_{-1}(\tau_L, D_\sigma, D_\tau) > \sigma_{-1ch}$). Это, казалось бы, парадоксальный вывод может быть объяснен образованием — в определенных условиях — кор-

розионной защитной пленки на внутренней поверхности трубы.

Заключение. Используя основные положения энергетической теории предельных состояний трибофатических систем, разработана инженерная модель коррозионно-механической прочности. Согласно этой модели, произведение действующего нормального напряжения на функцию коррозионного влияния оказывается постоянным для данного материала в разнообразных условиях нагружения. На базе данной модели прогнозируются: логарифмическая функция повреждаемости внутренней поверхности нефтепроводных труб; изменение относительной толщины стенки трубы в процессе эксплуатации; типичные функции износа, обусловленные свойствами упрочнения-разупрочнения трубной стали под воздействием повторно-переменных нагрузок. В первом приближении дано решение задачи об учете влияния пристеночного трения на условия достижения предельного состояния материала трубы и об учете влияния коррозии под напряжением и коррозии трения на изменение пределов его выносливости. Дан краткий анализ основных закономерностей повреждения труб в анализируемых условиях нагружения.

Список литературы

1. Улиг, Г.Г. Коррозия и борьба с ней / Г.Г. Улиг, Р.У. Ревин. — Л.: Химия, 1989. — 456 с.
2. Гутман, Э.М. Металлохимия металлов и защита от коррозии / Э.М. Гутман. — М.: Металлургия, 1981. — 271 с.
3. Коррозия / под ред. Л. Шрайера. — М.: Металлургия, 1981. — 632 с.
4. Герасимов, В.В. Прогнозирование коррозии металлов / В.В. Герасимов. — М.: Металлургия, 1989. — 152 с.
5. Похмурский, В.И. Коррозионно-усталостная прочность и методы ее повышения / В.И. Похмурский. — Киев: Навук. думка, 1974. — 186 с.
6. Логан, Х.Л. Коррозия металлов под напряжением / Х.Л. Логан. — М., 1970. — 404 с.
7. Ажогин, Ф.Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей / Ф.Ф. Ажогин. — М., 1974. — 112 с.
8. Романов, В.В. Влияние коррозионной среды на циклическую прочность металлов / В.В. Романов. — М.: Наука, 1969. — 219 с.
9. Олейник, Н.В. Сопротивление усталости материалов и деталей машин в коррозионных средах / Н.В. Олейник, А.Н. Магденко, С.П. Скляр. — Киев: Наук. думка, 1987. — 198 с.
10. Романив, О.Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов / О.Н. Романив, Г.Н. Никифорчин. — М.: Металлургия, 1986. — 294 с.
11. Карпенко, Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов / Г.В. Карпенко. — Киев: Наук. думка, 1976. — 128 с.
12. Сосновский, Л.А. Коррозионно-механическая усталость: основные закономерности (обобщающая статья) / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 1993. — № 7. — С. 33—44.
13. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2007. — 434 с.
14. Богданович, А.В. Прогнозирование предельных состояний силовых систем / А.В. Богданович. — Гродно: ГрГУ им. Я. Купалы, 2008. — 372 с.
15. Журков, С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел / С.Н. Журков // Вестн. АН СССР. — 1968. — № 3. — С. 46—52.
16. Черепанов, Г.П. Механика разрушения и кинетическая теория прочности / Г.П. Черепанов // Проблемы прочности. — 1989. — № 11. — С. 3—8.
17. Журков, С.Н. Дилатонный механизм прочности твердых тел / С.Н. Журков // Физика прочности и пластичности. — Л.: Наука, 1986. — С. 5—11.
18. Сосновский, Л.А. Инженерная модель коррозионно-механической прочности / Л.А. Сосновский, А.А. Костюченко, В.В. Воробьев // Вес. НАНБ. Сер. физ.-техн. наук. — 2008. — № 2. — С. 66—70.
19. Коррозия внутренней поверхности нефтесборных промышленных трубопроводов / Н.В. Инюшин [и др.] // Нефтяное хозяйство. — 2002. — № 3. — С. 85—86.
20. Long-Term Inside Corrosion Attack of an Oil Main Operation / V.A. Andriashin [et al.] // Protection of metals. — 2006. — Vol. 42, № 1. — pp. 46—50.

Sosnovskiy L.A., Kozik A.N.

Technique of a settlement-experimental estimation of corrosion-mechanical strength of tribo-fatigue systems

It is developed two private variants of the known generalised theory of limiting conditions of tribo-fatigue systems: 1) for corrosion conditions energised and 2) taking into account influence of parametres of a stream of oil. According to the first model, the limiting condition of a material (by criteria of static durability or resistance of weariness) is estimated under corresponding characteristic of mechanical properties in air (strength at a stretching, an endurance limit) taking into account influence of speed of corrosion energised in the given environment. The following general law of corrosion-mechanical durability is formulated: product of operating normal pressure on function of corrosion influence is size a constant for the given material in various conditions нагружения. On the basis of this law logarithmic function of damageability of petrowire pipes depending on operation time is constructed, according to which oil pipeline «Druzhba» pipes can be maintained safely more than 2 terms of amortisation. This conclusion is confirmed by practical operation of a linear part of oil pipeline «Druzhba». The second model essentially differs that for the first time allows to estimate the contribution of near-wall friction at movement of a stream of oil on a pipe under pressure upon change of resistance of metal of corrosion-mechanical weariness.

Поступила в редакцию 14.05.2011.