



МЕХАНИКА ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 620.178

Л.А. СОСНОВСКИЙ, д-р техн. наук, проф.

директор

E-mail: tribo-fatigue@mail.ru

ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», г. Гомель, Республика Беларусь

А.В. БОГДАНОВИЧ, д-р техн. наук

профессор кафедры теоретической и прикладной механики¹

E-mail: bogal@tut.by

С.С. ЩЕРБАКОВ, д-р физ.-мат. наук, доц.

профессор кафедры теоретической и прикладной механики¹

E-mail: sherbakovss@mail.ru

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 01.08.2017.

КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКАЯ УСТАЛОСТЬ: ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ. ЧАСТЬ 1. ПРЯМОЙ ЭФФЕКТ

Коррозия — один из основных электрохимических процессов, повреждающих металлические материалы. Сочетание циклических напряжений и коррозионной среды обуславливает износоусталостное повреждение, называемое коррозионно-механической усталостью. В работе исследуется проблема прогнозирования данного вида износоусталостного повреждения, который встречается практически во всех отраслях техники, особенно в химической, нефтяной, металлургической промышленности, на транспорте. Работа выполнена в трех частях. В первой части разработана методика оценки предела выносливости в заданной среде (прямой эффект). Во второй части предлагается методика прогноза коррозионно-эрозионного повреждения в зависимости от величины действующих напряжений (обратный эффект). В третьей части обсуждаются механизмы коррозионно-механической усталости.

Ключевые слова: коррозия, силовая (трибофатическая) система, износоусталостное повреждение, предел выносливости, скорость коррозии, коррозионно-механическая усталость, прямой эффект (ПЭ), обратный эффект (ОЭ), эрозионно-коррозионное повреждение

Введение. Явления взаимодействия окружающей среды и деформируемого твердого тела весьма многообразны, но наиболее опасные из них имеют электрохимическую природу. Коррозия — один из основных электрохимических процессов, повреждающих металлические материалы. Сочетание циклических напряжений и коррозионной среды обуславливает износоусталостное повреждение (ИУП), называемое коррозионно-механической усталостью (КорМУ) [1] (в литературе применяется и термин «коррозионная усталость»). Данный вид ИУП встречается практически во всех отраслях техники, особенно в химической, нефтяной, металлургической промышленности, на транспорте и в машиностроении.

Применительно к КорМУ в трибофатике установлено два эффекта:

- прямой эффект (ПЭ) — влияние коррозионной среды на изменение сопротивления усталости металлических материалов;
- обратный эффект (ОЭ) — механическая активация физико-химических процессов коррозии и изменение свойств среды при длительном ее взаимодействии с механически возбужденной поверхностью металла.

Исследователи широко изучали влияние среды на выносливость и сопротивление росту трещин образцов конструкционных материалов и натуральных деталей из них, т. е. ПЭ. Его основные закономерности были сформулированы в статье [2] путем

обобщающего анализа известных литературных источников (см. в [2]). И хотя в главной особенности ПЭ — снижении предела выносливости в коррозионной среде по сравнению с этой характеристикой, полученной при испытании в воздухе или в вакууме, — сомнений не остается, трудности возникают с прогнозированием поведения циклически нагруженных деталей, конструкций и даже лабораторных образцов в агрессивной среде.

В настоящей работе авторы делают попытку снять эти трудности (в первом приближении, конечно) на основе предложенного ранее энергетического критерия предельных состояний трибофатических систем [3–6].

Энергетический критерий предельного состояния трибофатической системы в условиях КорМУ и его общий анализ. Пусть трибофатическая система работает в среде с температурой T , при этом один из ее элементов находится в условиях линейного напряженного состояния под воздействием циклических напряжений σ , а поле контактных напряжений описывается средним фрикционным напряжением τ_w . Тогда энергетический критерий предельного состояния можно записать в следующем общем виде [5, 6]:

$$\Lambda_{T/M} \left[\frac{a_T}{1-D_T} T_\Sigma + \Lambda_{\sigma/\tau} \left(\frac{a_\sigma}{1-D_\sigma} \sigma^2 + \frac{a_\tau}{1-D_\tau} \tau_w^2 \right) \right] = U_0, \quad (1)$$

где коэффициенты $a \ll 1$ выделяют из полных тепловой и механической энергий их эффективные (затрачиваемые на повреждение) части U^{eff} ; функция (параметр) $\Lambda_{\sigma/\tau}$ учитывает взаимодействие эффективных частей механической энергии, обусловленных нормальными σ и фрикционными τ_w напряжениями, а $\Lambda_{T/M}$ — взаимодействие тепловой и механических составляющих эффективной энергии (величины Λ учитывают и процессы «залечивания» повреждений, каков бы ни был их механизм); $T_\Sigma = T_2 - T_1$ — изменение суммарной температуры в зоне силового контакта, обусловленное всеми источниками тепла, в том числе выделяемого при механическом (объемном и поверхностном) деформировании, структурных превращениях и т. п.; U_0 — энергия активации данного вещества, 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 твердом теле. Параметры $0 \leq D \leq 1$ в выражении (1) характеризуют вклад коррозионно-эрозийных процессов в ИУП трибофатической системы. Их прогнозирование можно выполнить по формулам:

$$\left. \begin{aligned} 1-D_T &= b_{e(T)} \left(\frac{v_{ch}}{v_{ch(T)}} \right)^{m_{v(T)}} ; & 1-D_\sigma &= b_{e(\sigma)} \left(\frac{v_{ch}}{v_{ch(\sigma)}} \right)^{m_{v(\sigma)}} ; \\ & & 1-D_\tau &= b_{e(\tau)} \left(\frac{v_{ch}}{v_{ch(\tau)}} \right)^{m_{v(\tau)}} , \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где v_{ch} — скорость коррозии в данной среде; $v_{ch(T)}$, $v_{ch(\sigma)}$, $v_{ch(\tau)}$ — скорость коррозии в той же среде соответственно при термическом (индекс T), силовом (индекс σ), фрикционном (индекс τ) воздействиях; b_e — коэффициенты, которые учитывают процессы коррозионной эрозии; m_v — параметры, определяющие электрохимическую активность материалов при силовом (индекс σ), фрикционном (индекс τ) и термодинамическом (индекс T) нагружениях.

Введем относительные меры ω термодинамического (индекс T), силового (индекс σ) и фрикционного (индекс τ) повреждений с учетом влияния коррозии (индекс ch):

$$\begin{aligned} \omega_{T(ch)} &= \frac{a_T T_\Sigma}{U_0 (1-D_T)} ; & \omega_{\sigma(ch)} &= \frac{a_\sigma \sigma^2}{U_0 (1-D_\sigma)} ; \\ \omega_{\tau(ch)} &= \frac{a_\tau \tau_w^2}{U_0 (1-D_\tau)} . \end{aligned} \quad (3)$$

Тогда критерий (1) принимает вид

$$\Lambda_{T/M} \left[\omega_{T(ch)} + \Lambda_{\sigma/\tau} (\omega_{\sigma(ch)} + \omega_{\tau(ch)}) \right] = 1, \quad (1a)$$

или

$$\omega_\Sigma = 1, \quad (16)$$

где мера комплексного ИУП

$$\omega_\Sigma = \Lambda_{T/M} \left[\omega_{T(ch)} + \Lambda_{\sigma/\tau} (\omega_{\sigma(ch)} + \omega_{\tau(ch)}) \right].$$

Согласно критерию (1), предельное состояние трибофатической системы наступит, когда сумма взаимодействующих эффективных составляющих энергии от силового, фрикционного и термического воздействий (с учетом процессов коррозии под напряжением, термической и трибохимической коррозии) достигнет критической величины U_0 . Критерий (1) в форме (1a) или (16) удобен тем, что все меры поврежденности являются безразмерными и имеют единый интервал ($0 \leq \omega \leq 1$) изменения величин.

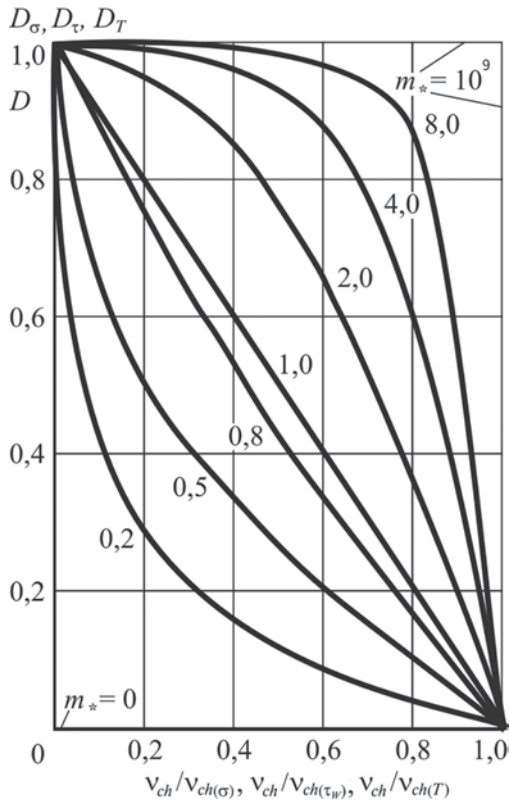
Методики оценки всех параметров и коэффициентов, входящих в критерий (1), разработаны и изложены в работах [3–6].

Общий анализ роли электрохимической повреждаемости (параметр D) в достижении силовой системой предельного состояния дан на рисунке 1.

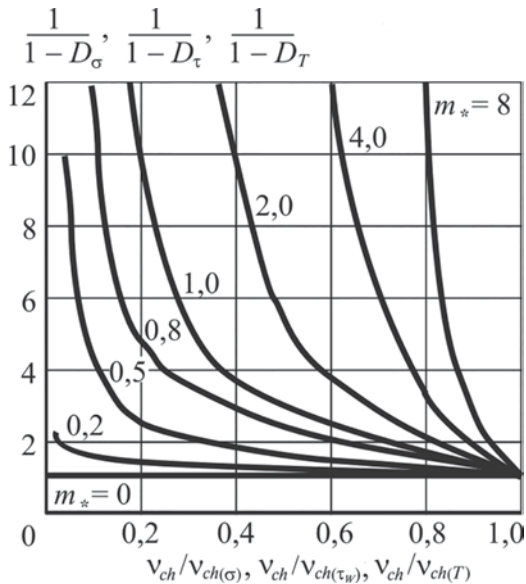
Изучая совместно формулы (1) и (2), а также рисунок 1, можно сделать следующие выводы.

1. Если параметр D растёт (см. рисунок 1 а), то $(1 - D)$ соответственно уменьшается. Следовательно, величина $1 / (1 - D)$ увеличивается тем больше, чем меньше относительная скорость повреждения $v_{ch}/v_{ch(*)}$ (см. рисунок 1 б). Иными словами, электрохимическая повреждаемость ускоряет достижение трибофатической системой предельного состояния тем сильнее, чем больше величина параметра D и/или скорости $v_{ch(*)}$ термической коррозии, коррозии трения, коррозии под напряжением.

2. Параметр m_v оказывает сильное влияние на ИУП системы, и оно тем значительнее, чем больше его величина (см. рисунок 1). Важная особенность



а



б

Рисунок 1 — Графики функций (2) (а) и величин $1/(1-D)$ (б) в связи с изменением значений параметра m_*

этого влияния: данная среда очень чувствительна к возбуждению в силовой системе механических напряжений и к повышению температуры, если для нее параметр $m_* > 5$ (см. рисунок 1 б). Другими словами, в подобном случае может быть реализовано запредельное состояние, для которого мера поврежденности больше единицы ($\omega_\Sigma > 1$), тогда как для достижения предельного состояния, согласно (1а), достаточно иметь $\omega_\Sigma = 1$.

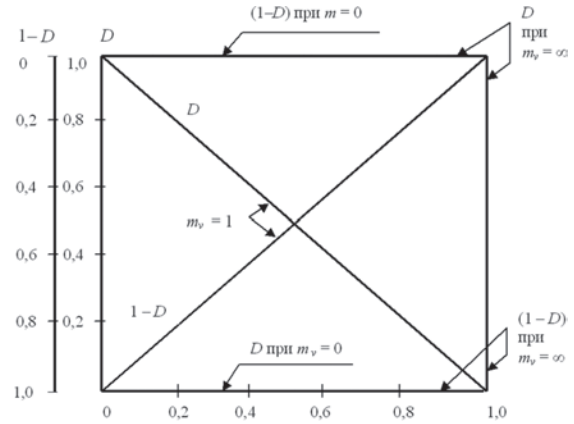


Рисунок 2 — Особые случаи электрохимического состояния силовой системы

На рисунке 2 проиллюстрированы два особых случая.

1. Первый случай $D = 0$: нет влияния электрохимической коррозии на ИУП. Но это не значит, что отсутствует процесс электрохимической коррозии. В самом деле при $D = 0$ имеем

$$1 - \frac{v_{ch}}{v_{ch^*}} - b_* = 0,$$

откуда следует, что должно быть $b_* = 1$ и $v_{ch}/v_{ch^*} = 1$, т. е. скорость коррозии нечувствительна к данному фактору (механическому или фрикционному напряжению некоторой величины или определенной температуре). Это означает, что существуют пороговые значения σ^0 , τ_w^0 и T^0 для данной среды. Скорость коррозии в такой среде не изменяется при $\sigma \leq \sigma^0$, $\tau_w \leq \tau_w^0$ и $T \leq T^0$.

2. Второй случай $D = 1$, т. е. $(1 - D) = 0$ и $1/(1 - D) \rightarrow \infty$, т. е. в системе может быть реализовано взрывное повреждение, если $\omega_\Sigma \rightarrow \infty$. В этом случае должно быть

$$\frac{v_{ch}}{v_{ch^*}} - b_* = 0.$$

Когда $v_{ch} = 0$ — событие невозможное, остается предположить, что $v_{ch^*} \rightarrow \infty$. Это и есть условие химического взрыва в силовой системе. Взрыв обусловлен не просто действием среды — это действие среды, катастрофически усиленное температурой, а также механическими напряжениями.

Роль параметра среды m_* в двух рассмотренных случаях наглядно иллюстрируют рисунки 1 и 2.

Частные случаи. Поскольку проверка (1) невозможна из-за отсутствия соответствующих экспериментальных данных, рассмотрим простейший частный случай: коррозия при действии только циклических напряжений $\sigma > 0$. Для такого случая в (1) имеем $\tau_w = 0$, $b_e(\sigma) = 1$, а влияние температуры отсутствует (т. е. $a_T = 0$). И теперь критерий (1) достижения предельного состояния (при $U_0 = a_\sigma^* \sigma_{-1}$), где σ_{-1} — предел выносливости металлического образца в воздухе) принимает с учетом второй формулы в (2) следующий вид:

$$\frac{a_{\sigma} \sigma^2}{1 - D_{\sigma}} = \frac{a_{\sigma} \sigma^2}{\left(\frac{v_{ch}}{v_{ch(\sigma)}}\right)^{m_v(\sigma)}} = U_0 = a_{\sigma}^* \sigma_{-1}^2. \quad (4)$$

Поскольку, в соответствии с [3–6], должно быть $a_{\sigma}^* = a_{\sigma}$, из (4) следует закономерность

$$\sigma^2 v_{ch(\sigma)}^{m_v(\sigma)} = \sigma_{-1}^2 v_{ch}^{m_v(\sigma)} = const. \quad (5)$$

В общем случае величина циклического напряжения σ заключена в интервале

$$0 < \sigma \leq \sigma_b, \quad (6)$$

где σ_b — предел прочности при растяжении. Естественно, что она может (в определенных условиях) принимать и значение $\sigma = \sigma_{-1ch}$, так как аналогично (6) имеют место неравенства

$$0 < \sigma_{-1ch} \leq \sigma_b, \quad (7)$$

где σ_{-1ch} — (ограниченный) предел выносливости в данной среде (ch); ограничение его значения дают на определенной цикловой базе N ($\sigma_{-1ch}^{(N)}$), если кривая КорМУ не имеет точки перелома.

Учитывая (7) в (4), получаем формулу для расчета предела выносливости в данной коррозионной среде (σ_{-1ch}):

$$\sigma_{-1ch} = \sigma_{-1} \left(\frac{v_{ch}}{v_{ch(\sigma)}}\right)^{m_v(\sigma)/2} = \sigma_{-1} (1 - D_{\sigma})^{1/2}. \quad (8)$$

В (4) следует принять $v_{ch(\sigma)} = v_{ch(\sigma = \sigma_{-1})}$, тогда как $m_v(\sigma) = const$.

Другой простейший частный случай из (1): коррозия трения ($\sigma = 0$, $b_c(\tau) = 1$, влияние температуры не учитывается). Аналогично (8) имеем:

$$\tau_{fch} = \tau_f \left(\frac{v_{ch}}{v_{ch(\tau)}}\right)^{m_v(\tau)/2} = \tau_f (1 - D_{\tau})^{1/2}, \quad (9)$$

где τ_f , τ_{fch} — предел фрикционной усталости (при трении скольжения) [3, 4] в воздухе и в коррозионной среде соответственно.

Поскольку и для этого простейшего случая экспериментальных данных, по имеющимся сведениям, нет [3–6], ограничимся пока анализом (8).

Анализ прямого эффекта. Влияние среды на изменение пределов выносливости (ПЭ) в соответствии с (8) проанализируем графически (рисунок 3 а) в двойных логарифмических координатах:

$$\lg \sigma_{-1ch} = \lg \sigma_{-1} + \frac{m_v(\sigma)}{2} \lg \frac{v_{ch}}{v_{ch(\sigma)}}. \quad (10)$$

Видно (см. рисунок 3 а), что величина σ_{-1ch} может либо существенно снижаться (сплошная линия), либо несколько возражать (штриховая линия), либо оставаться неизменной (штрихпунктирная линия), поскольку, как показывает анализ (4), (6), (7), может быть

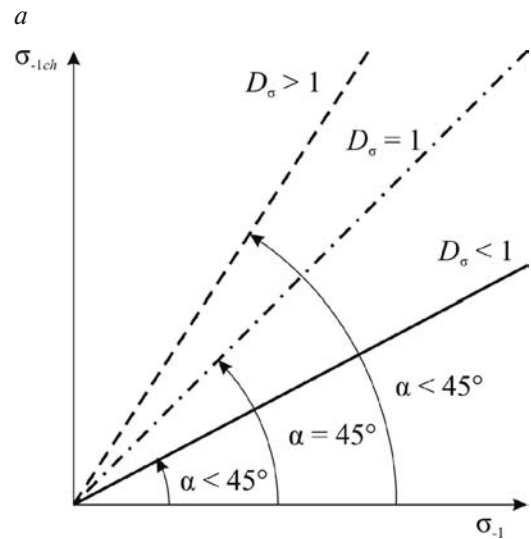
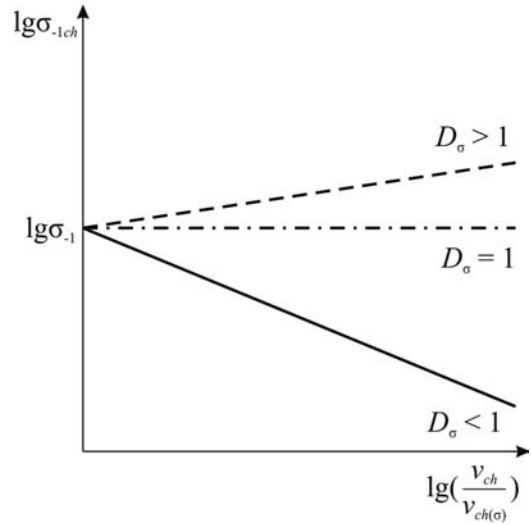


Рисунок 3 — Графическое представление уравнений (8) и (10) в логарифмических (а) и равномерных (б) координатах

$$\frac{v_{ch}}{v_{ch(\sigma)}} \geq 1, \quad (11)$$

или, соответственно,

$$D_{\sigma} \geq 1 \text{ либо } (1 - D_{\sigma}) \leq 1. \quad (12)$$

С другой стороны, из (8) нетрудно получить график, характеризующий взаимосвязь между значениями пределов выносливости в воздухе и в среде (см. рисунок 3 б).

Заметим, что в исследуемых частных случаях возможна реализация условий (12), но равенство $D = 1$ не сопряжено с химико-термическим взрывом, как это описано в п. 1, поскольку здесь отсутствует необходимая для взрыва температура.

Выполним оценку погрешности (8) и (10) по результатам многочисленных известных литературных данных.

Результаты интегрального анализа (8) приведены на рисунке 4 [2], где представлена корреляционная связь между пределами выносливости

(на базе 10^7 циклов) сталей в воде и в различных масляных средах (σ_{-1c}), полученная путем систематизации опытных данных, содержащихся в [7]. Видно, что эта связь соответствует прогнозу (см. рисунок 3 а)

На рисунке 4 наклонная линия соответствует значению $\sigma_{-1ch} / \sigma_{-1} = 1$ (где σ_{-1} — предел выносливости в воздухе). В масляных средах (точки 2) сопротивление усталости практически может быть равным или несколько превышать предел выносливости в воздухе, поскольку, прежде всего, масло изолирует металл от среды. Водная среда, как правило, резко снижает предел выносливости в 3–4 и более раз [8–10].

Для исследования (10) были использованы опытные значения величин σ_{-1} и σ_{-1ch} , взятые из литературных источников [11–17] для разных классов металлических материалов (углеродистые и легированные стали, цветные металлы и сплавы) при разной термообработке, образцы из которых испытаны в различных коррозионных средах. Кроме того, для оценки скорости коррозии исследуемых материалов в той или иной коррозионной среде без напряжения воспользовались данными, приведенными в справочном пособии [18].

На рисунках 5, 6 представлены графики зависимости пределов коррозионно-механической усталости σ_{-1ch} от скорости коррозии под напряжением $v_{ch(\sigma)}$ для исследованных марок углеродистых и легированных сталей. Видно, что прогнозирование ПЭ крайне затруднено, если графики представляются традиционно: равномерные координаты и абсолютные значения анализируемых параметров.

Прологарифмируем выражение (8). Введя относительную величину $\sigma_{-1ch} / \sigma_{-1}$, получим:

$$\lg \frac{\sigma_{-1ch}}{\sigma_{-1}} = \frac{1}{2} \lg(1 - D_\sigma). \quad (8a)$$

Как видно, уравнение (8a) в двойных логарифмических координатах представляет собой

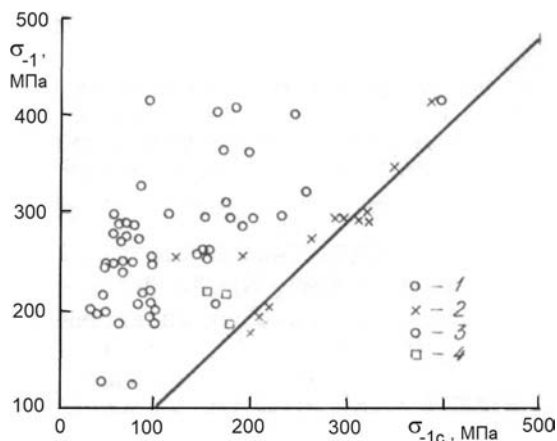


Рисунок 4 — Корреляционная взаимосвязь между пределами выносливости гладких образцов углеродистой стали в воздухе и в различных средах: 1, 3, 4 — вода пресная, соленая, высокой очистки соответственно; 2 — разные масла

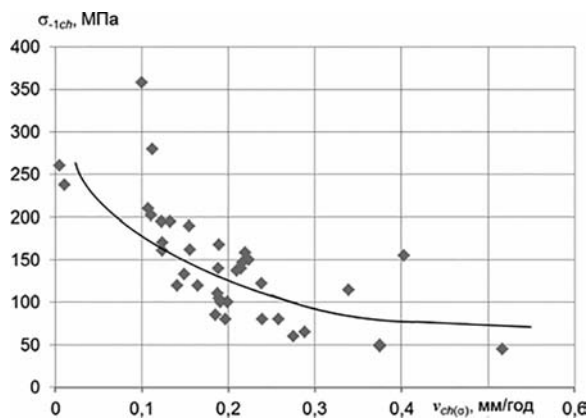


Рисунок 5 — Зависимости σ_{-1ch} — $v_{ch(\sigma)}$ для углеродистых сталей

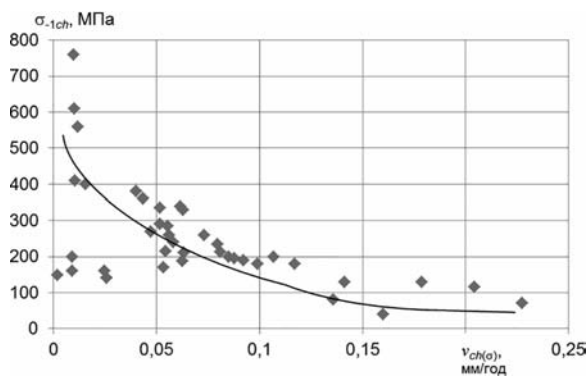


Рисунок 6 — Зависимости σ_{-1ch} — $v_{ch(\sigma)}$ для легированных сталей

прямую линию с коэффициентом наклона, равным 0,5; оно отражает взаимосвязь накопления коррозионных и усталостных повреждений. Для исследованных марок углеродистых сталей (12 марок с содержанием углерода от 0,06 % до 1,1 %) эта закономерность подтверждается (рисунок 7, коэффициент корреляции составил $r = 0,895$); заметим, что на рисунке обозначено $\sigma_* = 266,32$ МПа — характеристическое предельное напряжение, имеющее смысл усредненного по ряду сталей предела выносливости в воздухе.

Результаты исследования 37 марок легированных сталей (в том числе применяемые в агрессивных средах хромистые, никелевые, нержавеющей, высоколегированные стали с содержанием хрома до 17 %, никеля до 10 %) при разной термообра-

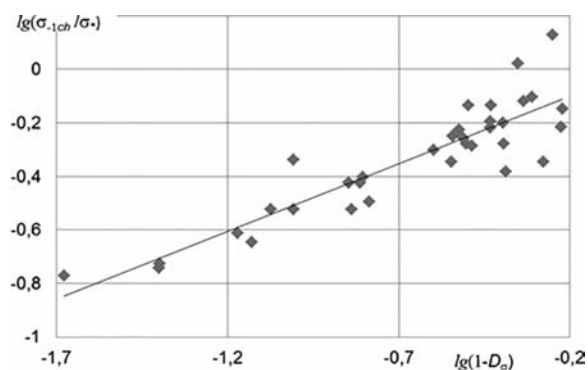


Рисунок 7 — К прогнозированию ПЭ для КорМУ для углеродистых сталей

ботке и в различных коррозионных средах (дистиллированная, пресная, водопроводная, соленая и морская вода, влажный морской воздух, 3 %-й раствор NaCl, 4 %-й раствор NaCl, 2 %-й раствор олеиновой кислоты в вазелиновом масле, вазелиновое масло, 2 %-й водный раствор олеиновой кислоты) в двойных логарифмических координатах по (8а) представлены на рисунке 8. Коэффициент корреляции составил $r = 0,80$. Характеристическое напряжение в этом случае равно $\sigma_* = 433,11$ МПа, оно имеет смысл усредненного по ряду легированных сталей предела выносливости в воздухе.

Удовлетворительно критерий (8а) описывает и результаты испытаний на КорМУ цветных металлов и сплавов. Для анализа было принято 19 марок цветных сплавов и чистых металлов (алюминий, титан, никель, медь). В качестве примера графики $\lg(\sigma_{-1ch}) - \lg(1 - D_o)$ для исследуемых алюминиевых сплавов даны на рисунках 9 (в пресной воде), 10 (в соленой воде); на последнем рисунке выделяются две группы алюминиевых сплавов по характеру воздействия коррозионной среды.

Изучение графиков на рисунках 7–10 показывает, что модель (8а) может быть эффективно использована для прогнозирования сопротивления усталости черных и цветных металлов и сплавов в коррозионной среде. По нашему мнению, анализ более широких (статистических) результатов испытаний позволит поставить и решить задачу о погрешности прогнозов в зависимости от природы испытываемых материалов в разных средах.

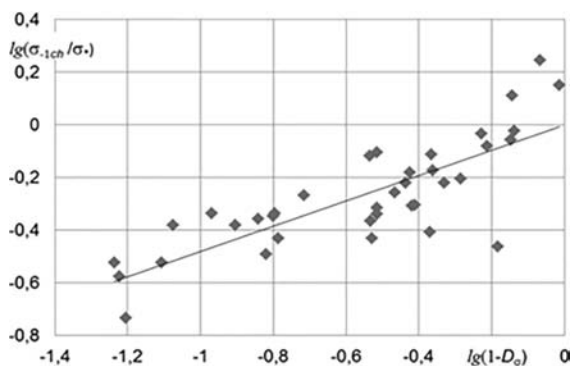


Рисунок 8 — К прогнозированию ПЭ для КорМУ для легированных сталей

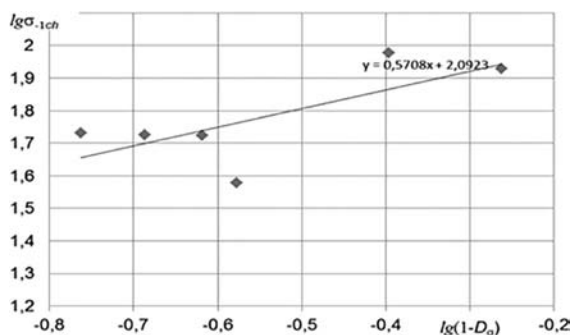


Рисунок 9 — К прогнозированию ПЭ для КорМУ для алюминиевых сплавов в пресной воде

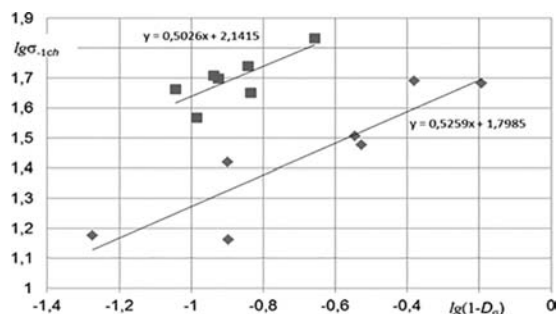


Рисунок 10 — К прогнозированию ПЭ для КорМУ для алюминиевых сплавов в соленой воде

Заключение. Задача о прогнозировании прямого эффекта (ПЭ) в сопротивлении КорМУ в принципе решена аналитически. Данное решение показало приемлемое соответствие многочисленным результатам испытаний сталей и цветных сплавов в коррозионной среде.

Список литературы

1. Межгосударственный стандарт. Трибофатика. Термины и определения: ГОСТ 30638–99. — Введ. 01.01.2000. — Минск: Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. — 24 с.
2. Сосновский, Л.А. Коррозионно-механическая усталость: прямой и обратный эффекты (обобщающая статья) / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов // Заводская лаборатория. — 1993. — № 7, Т. 59. — С. 33–44.
3. Сосновский, Л.А. Основы трибофатика: учеб. пособие / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2003. — Т. 1. — 246 с.; Т. 2. — 234 с.
4. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2007. — 434 с.
5. Богданович, А.В. Прогнозирование предельных состояний силовых систем / А.В. Богданович. — Гродно: ГрГУ им. Я. Купалы, 2008. — 372 с.
6. Шербаков, С.С. Механика трибофатических систем / С.С. Шербаков, Л.А. Сосновский. — Минск: БГУ, 2010. — 407 с.
7. Трошенко, В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справ. пособие: в 2-х т. / В.Т. Трошенко, Л.А. Сосновский. — Киев, 1987. — Т. 1. — 510 с.; Т. 2 — 825 с.
8. Герасимов, В.В. Прогнозирование коррозии металлов / В.В. Герасимов. — М.: Металлургия, 1989. — 152 с.
9. Гутман, Э.М. Механохимия металлов и защита их от коррозии / Э.М. Гутман. — М.: Металлургия, 1974. — 230 с.
10. Коррозия / под ред. Л. Шрайера. — М.: Металлургия, 1981. — 632 с.
11. Сосновский, Л.А. Механика усталостного разрушения: словарь-справочник: в 2-х т. / Л.А. Сосновский. — Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 1994. — Т.1. — 328 с.; Т.2. — 340 с.
12. Сопротивление материалов деформированию и разрушению: справочное пособие: в 2-х т. / В.Т. Трошенко [и др.]; под ред. В.Т. Трошенко. — Киев: Наук. думка, 1993. — Т. 2. — 700 с.
13. Похмурский, В.И. Коррозионная усталость металлов / В.И. Похмурский. — М.: Металлургия, 1989. — 206 с.
14. Расчет деталей машин на коррозионную усталость / Н.В. Олейник [и др.]. — Киев: Наук. думка, 1990. — 150 с.
15. Карпенко, Г.В. Коррозионное растрескивание сталей / Г.В. Карпенко, И.И. Василенко. — Киев: Техніка, 1971. — 192 с.
16. Карпенко, Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов / Г.В. Карпенко. — Киев: Наук. думка, 1976. — 127 с.
17. Рябченков, А.В. Коррозионно-усталостная прочность стали / А.В. Рябченков. — М.: Машгиз, 1953. — 179 с.
18. Воробьева, Г.А. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств / Г.А. Воробьева. — 2-е изд., доп. и перераб. — М.: Химия, 1976. — 816 с.

SOSNOVSKIY Leonid A., D. Sc. in Eng., Prof.

Director

E-mail: tribo-fatigue@mail.ru

S&P GROUP TRIBOFATIGUE LTD, Gomel, Republic of Belarus

BOGDANOVICH Alexander V., D. Sc. in Eng.

Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics¹

E-mail: bogal@tut.by

SHERBAKOV Sergey S., D. Sc. in Phys. and Math., Assoc. Prof.

Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics¹

E-mail: sherbakovss@mail.ru

¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Received 01 August 2017.

CORROSION-MECHANICAL FATIGUE: THE PROBLEMS OF FORECASTING. PART 1. DIRECT EFFECT

Corrosion – the main electrochemical process damaging metal materials. The combination of cyclic stresses and corrosive environment causes wear-fatigue damage called corrosion-mechanical fatigue. The paper studies the problem of forecasting this type of wear-fatigue damage, which occurs practically in all branches of engineering, especially in the chemical, oil, metallurgical industries, in transport. The work is done in 3 parts. In the first part, a technique for estimating the endurance limit in a given medium (direct effect) has been developed. In the second part, a technique for predicting corrosion-erosion damage is proposed depending on the magnitude of the operating stresses (back effect). The third part discusses mechanisms of corrosion-mechanical fatigue.

Key words: corrosion, power (tribo-fatigue) system, wear-and-fatigue damage, endurance limit, corrosion rate, corrosion-mechanical fatigue, direct effect, inverse effect, erosion-corrosion damage

References

1. GOST 30638-99. *Mezhhgosudarstvennyj standart. Tribofatika. Terminy i opredeleniya* [State Standart 30638-99. Interstate standard. Tribo-fatigue. Terms and Definitions.]. Minsk, Mezhhgosudarstvennyj Sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii, 1999. 24 p.
2. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A. Korroziionno-mehaničeskaja ustaloŝt: prjamoj i obratnyj jeffekty (obobshhajushhaja statja) [Corrosion-mechanical fatigue: direct and inverse effects (generalizing article)]. *Zavodskaja laboratorija* [Factory laboratory], 1993, no. 7, vol. 59, pp. 33–44.
3. Sosnovskiy L.A. Tribo-Fatigue. Wear-Fatigue Damage and Its Prediction. *Foundations of Engineering Mechanics*, Springer, 2005. 424 p.
4. Sosnovskiy L.A. *Mehanika iznosoustalostnogo povrezhdenija* [Mechanics of wear-and-fatigue damage]. Gomel, BelGUT, 2007. 434 p.
5. Bogdanovich A.V. *Prognozirovanie predelnyh sostojanij silovyh sistem* [Prediction of the limiting states of power systems]. Grodno, GrGU im. Ja. Kupaly, 2008. 372 p.
6. Sherbakov S.S., Sosnovskiy L.A. *Mehanika tribofaticheskikh sistem* [The Mechanics of Tribo-Fatigue Systems]. Minsk, BGU, 2010. 407 p.
7. Troshchenko V.T., Sosnovskiy L.A. *Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov* [Resistance to fatigue of metals and alloy]. Kiev, 1987, vol. 1. 510 p. Vol. 2. 825 p.
8. Gerasimov V.V. *Prognozirovanie korrozii metallov* [Forecasting of corrosion of metals]. Moscow, Metallurgija, 1989. 152 p.
9. Gutman E.M. *Mehanohimija metallov i zashhita ih ot korrozii* [Mechanochemistry of metals and their protection against corrosion]. Moscow, Metallurgija, 1974. 230 p.
10. Schreyer L. *Korrozija* [Corrosion]. Moscow, Metallurgija, 1981. 632 p.
11. Sosnovskiy L.A. *Mehanika ustalostnogo razrushenija* [Mechanics of fatigue failure]. Gomel, NPO "TRIBOFATIKA", 1994, vol. 1. 328 p. Vol. 2. 340 p.
12. Troshchenko V.T., Krasovskiy A.Ya., Pokrovskiy V.V., Sosnovskiy L.A., Strizhalo V.A. *Soprotivlenie materialov deformirovaniju i razrusheniju* [Resistance of materials to deformation and destruction]. Kiev, Naukova dumka, 1993, vol. 2. 700 p.
13. Pokhmurskiy V.I. *Korroziionnaja ustalost metallov* [Corrosion fatigue of metals]. Moscow, Metallurgija, 1989. 206 p.
14. Oleynik N.V., Volchev A.V., Bershak S.V., Vasiliev N.R. *Raschet detalej mashin na korroziionnuju ustalost* [Calculation of machine parts for corrosion fatigue]. Kiev, Naukova Dumka, 1990. 150 p.
15. Karpenko G.V., Vasilenko I.I. *Korroziionnoe rastreskivanie stalej* [Corrosion cracking of steels]. Kiev, Tehnika, 1971. 192 p.
16. Karpenko G.V. *Vlijanie sredy na prochnost i dolgovechnost metallov* [Influence of the medium on the strength and durability of metals]. Kiev, Naukova Dumka, 1976. 127 p.
17. Ryabchenkov A.V. *Korroziionno-ustalostnaja prochnost stali* [Corrosion-fatigue strength of steel]. Moscow, Mashgiz, 1953. 179 p.
18. Vorobyova G.A. *Korroziionnaja stojkost materialov v agressivnyh sredah himicheskikh proizvodstv* [Corrosion Resistance of Materials in Aggressive Media of Chemical Production]. Moscow, Himija, 1976. 816 p.