

МЕХАНИКА ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 620.178.3

А.В. БОГДАНОВИЧ, д-р техн. наук, проф.
профессор кафедры теоретической и прикладной механики¹
E-mail: bogal@tut.by

С.С. ЩЕРБАКОВ, д-р физ.-мат. наук, проф.
академик-секретарь Отделения физико-технических наук²
E-mail: sherbakovss@mail.ru

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

²Национальная академия наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 08.01.2025.

КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКАЯ УСТАЛОСТЬ: ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ. ЧАСТЬ 4. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КРИВОЙ КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ, А ТАКЖЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

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 состоит из нескольких частей. В первой части разработан методика оценки предела выносливости в заданной коррозионной среде (прямой эффект). Во второй части проанализирован обратный эффект, т. е. влияние действующих напряжений на скорость коррозии металлов и сплавов, и предложена методика прогноза коррозионно-эрозионного повреждения при обратном эффекте на основе энергетического критерия. В третьей части обсуждаются механизмы коррозионно-механической усталости при прямом и обратном эффектах. В четвертой части рассматривается методика ускоренной расчетно-экспериментальной оценки параметров степенного уравнения кривой коррозионно-механической усталости, а также долговечности на основе установленных корреляционных связей. Приводится схема взаимного расположения кривых механической и коррозионно-механической усталости среды с описанием характерных участков и точек. Сформулированы актуальные задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: коррозионно-механическая усталость, сопротивление усталости, ускоренная оценка, параметры кривой усталости, циклические напряжения, долговечность

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-2-71-55-61>

Введение. Для элементов машин и конструкций, подвергаемых в эксплуатации действию циклических напряжений в сухом воздухе или в нейтральных рабочих средах, расчетные методы оценки характеристик сопротивления усталости — пределов выносливости, долговечностей

при напряжениях выше предела выносливости и их рассеяния — за последние годы получили значительное развитие. В меньшей степени разработаны и освоены методики расчета материалов и деталей конструкций, эксплуатируемых в различных коррозионных средах. Многочисленные

наблюдения, накопленные к настоящему времени, еще не настолько систематизированы и обобщены, чтобы можно было говорить о существовании признанных методик расчета на коррозионно-механическую усталость (КорМУ) [1–11]. Ниже дается описание предлагаемой методики ускоренного расчетно-экспериментального определения параметров степенного уравнения кривой усталости и числа циклов до разрушения (долговечности) исследуемого объекта в коррозионной среде.

Схематизация кривой КорМУ и взаимосвязь между ее параметрами. На рисунке представлена схема взаимного расположения кривых механической усталости и КорМУ в двойных логарифмических координатах $\lg N - \lg \sigma$ (где σ — амплитуда напряжений; N — число циклов до наступления предельного состояния) для конструкционного материала, спрогнозированная [12] на основе анализа большого числа опытных данных. Кривая механической усталости имеет четыре характерных области (участка) [13], в пределах которой реализуются следующие разрушения: I — квазистатическое (σ_b — предел прочности), II — малоцикловое, III — многоцикловое и IV — высокоресурсное. Для многих конструкционных материалов участок IV — горизонтальная линия, отвечающая физическому пределу выносливости σ_{-1} .

Зоны L и G перелома кривой имеют определенные (устойчивые) абсциссы: $N_L \approx 5 \cdot 10^4$ и $N_G \approx 2 \cdot 10^6$ циклов. Кривая КорМУ левой ветвью (III_s) входит в зону L (при малоциклового усталости эффект влияния коррозионной среды относительно невелик), а правая ветвь (IV_s) наклонена к оси абсцисс под углом α_s ; зона ее перелома имеет абсциссу $N_{GS} \approx 2 \cdot 10^7$ циклов. Физический предел выносливости, как установлено экспериментально, при КорМУ не обнаруживается, поэтому определяют ограниченный предел выносливости σ_{-1s} , который соответствует точке перелома G_s — от участка III_s к участку IV_s — или его определяют на заданной базе испытаний, тогда правильнее обозначать его σ_{-1SN} , но в литературе обычно индекс N опускают. Статистический анализ экспериментальных результатов мог бы показать, действительно ли $N_{GS} / N_G \approx 10$, а показатели наклона $m_{IVS} = \operatorname{ctg} \alpha_s$ и $m = \operatorname{ctg} \alpha$ приблизительно равны. Полагая, что участки II и III_s имеют примерно одинаковый наклон к оси абсцисс (угол γ), получаем $\beta = \gamma - \alpha$, тогда показатель наклона участка III_s многоциклового КорМУ $m_{III_s} = m_s = \operatorname{ctg} \beta$. Если изложенные предположения верны, то по координатам точек L и G кривой механической усталости нетрудно рассчитать все параметры кривой КорМУ. Это позволяет прогнозировать сопротивление КорМУ, в том числе при больших базах испытаний, т. е. в условиях высокоресурсной усталости.

Наиболее часто для аналитического описания кривой многоциклового усталости (участок III на рисунке) используют степенное уравнение [13–15]:

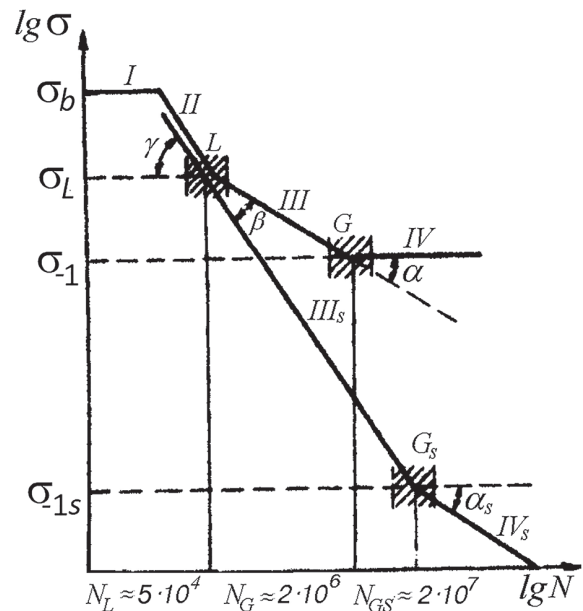


Рисунок — Схема взаимного расположения кривых механической усталости (I–IV) и КорМУ (III_s – IV_s) [12]
Figure — Scheme of mutual arrangement of curves of mechanical fatigue (I–IV) and corrosion-mechanical fatigue (III_s – IV_s) [12]

$$\sigma^m N = \sigma_{-1}^m N_G = 10^C, \quad (1)$$

где C — постоянная (начальная абсцисса в координатах $\lg N - \lg \sigma$). Очевидно, что кривая многоциклового КорМУ (участок III_s на рисунке) аналогично может быть описана степенным уравнением:

$$\sigma^{m_s} N = \sigma_{-1s}^{m_s} N_{GS} = 10^{C_s}. \quad (2)$$

Анализ более 150 кривых КорМУ, полученных разными исследователями путем испытания гладких и надрезанных образцов из различных конструкционных материалов в нескольких рабочих средах [14, 15], подтвердил приемлемость степенного уравнения (2).

Для сталей на основании анализа многочисленных опытных данных установлены выражения, связывающие параметры степенного уравнения кривой механической усталости с пределом выносливости [14]:

$$m = f(\sigma_{-1}) = a\sigma_{-1} + b; \quad (3)$$

$$C = f_1(\sigma_{-1}) = a_1(m+1)\lg \sigma_{-1} + b_1, \quad (4)$$

где $a = 0,027$, $b = 1,4$, $a_1 = 0,997$, $b_1 = 4 + 0,5(2,5 - \lg \sigma_{-1})^2$ — коэффициенты.

С помощью выражений (3), (4) можно выполнить расчетную оценку усталостной долговечности объекта, определив значение предела выносливости, вычислив значения параметров m и C , а затем найти долговечность для уровня напряжений σ в соответствии с уравнением (1):

$$N = \frac{10^{f_1(\sigma_{-1})}}{\sigma^{f(\sigma_{-1})}}. \quad (5)$$

Также с помощью (3), (4) можно определить предел выносливости и построить кривую усталости.

сти по одному опыту, в котором для напряжения σ найдена долговечность N . Используя их в уравнении (1), получаем:

$$\sigma^{f(\sigma-1)} N = 10^{f_1(\sigma-1)}. \quad (6)$$

Между параметрами C и m установлена устойчивая линейная корреляционная связь (коэффициент корреляции равен 0,995) [15]

$$C = 2,846m + 2,632, \quad (7)$$

которая справедлива в широких пределах изменения прочностных характеристик сталей, размеров и конструктивных форм изготовленных из них объектов, условий нагружения и других факторов [15].

Анализ 99 результатов испытаний стальных изделий на КорМУ в 3-процентном растворе NaCl показал, что между параметрами C_s и m_s кривой КорМУ имеется линейная корреляционная связь (коэффициент корреляции равен 0,997) [15]:

$$C_s = 2,548m_s + 5,658. \quad (8)$$

О расчетном построении кривой КорМУ и оценке долговечности в коррозионной среде. Распространенные методы ускоренной расчетно-экспериментальной оценки положения кривых усталости и предела выносливости в обычных условиях (в воздухе) не удалось пока применить для определения характеристик КорМУ в связи с тем, что исходные предпосылки, заложенные в основу известных ускоренных методов (Локати, Про, Эномото), неприемлемы для случаев КорМУ. Увеличение интенсивности нагружения как средство форсирования испытаний при испытаниях на КорМУ не вполне корректно по двум причинам:

1) уменьшение долговечности при неизменной частоте нагружения сводит на нет коррозионный фактор и затушевывает специфику коррозионно-усталостного разрушения;

2) режим возрастающей нагрузки не отделим от процесса суммирования повреждений, крайне слабо изученного применительно к КорМУ. Еще один вид форсирования испытаний на КорМУ — использование среды повышенной агрессивности. Например, раствор солей большей концентрации является еще более сложным, так как отсутствуют надежные критерии оценки агрессивности сред и зависимостей, позволяющих пересчитать долговечность при замене одной среды другой.

Поэтому сокращение времени испытаний за счет уменьшения количества опытов, в частности, путем построения кривой КорМУ объекта по одному опыту с использованием схемы взаимного расположения кривых усталости (см. рисунок) и корреляционных связей между параметрами кривой КорМУ, представляется перспективным и полезным.

Предположение связи между параметрами C_s и m_s кривой КорМУ в виде

$$C_s = a_s m_s + b_s \quad (9)$$

означает, что для конкретных условий (например, конкретной коррозионной среды) кривые усталости пересекаются в одной точке с координатами $\lg N = b_s$, $\lg \sigma = a_s$. Если обратиться к рисунку, то эти координаты должны соответствовать точке L . При фиксированных значениях координат связь между параметрами кривых усталости становится функциональной.

Заметим, что допущение о том, что для конкретной среды кривые усталости объектов, независимо от их материалов, конструктивных и технологических особенностей, пересекаются в одной общей точке, конечно, условно. Более правдоподобны связи типа (4) или в виде многочлена, расположенного по восходящим степеням независимого переменного, свидетельствующие об отсутствии общей точки и полностью отражающие случайную природу явления усталости. Вместе с тем линейные связи вида (9) удовлетворительно согласуются с опытными данными [14, 15]. При этом коэффициенты корреляции связей (9) очень высоки — близки к единице, что указывает на малое рассеяние точек пересечения кривых усталости разных объектов, хотя рассеяние их неизбежно.

Вообще установление связей (9) сводится к определению коэффициентов a_s и b_s , которые при переходе от одной среды к другой могут значительно меняться. В таблице даны значения этих коэффициентов по результатам статистической обработки представительных выборок из кривых КорМУ для разнообразных стальных объектов, подвергавшихся испытаниям при разных частотах нагружения. Можно приближенно характеризовать все среды, кроме дистиллированной воды, осредненными коэффициентами $\bar{a}_s = 2,493$ и $\bar{b}_s = 5,152$. Округлим значения этих коэффициентов, оставив одну значащую цифру после запятой, например, принять $a_s = 2,5$, $b_s = 5,1$ (второй коэффициент округляем в меньшую сторону, учитывая, что первый округляем в большую сторону).

Сокращенные испытания для построения кривой КорМУ по отдельному результату проводятся в следующей последовательности. Подлежащий испытанию объект подвергается нагружению в заданной коррозионной среде при напряжении σ , соответствующем достаточно большой долговечности N_s (тем большей, чем больше частота нагружения). По результату испытания записывается уравнение (2) с учетом выражения (9):

$$\sigma^{m_s N_s} = 10^{a_s m_s + b_s}, \quad (10)$$

из которого находим параметр m_s КорМУ испытанного объекта:

$$m_s = \frac{(\lg N_s - b_s)}{(a_s - \lg \sigma)}. \quad (11)$$

Таблица — Коэффициенты обобщенных зависимостей $C_s(m_s)$ для стальных объектов [15]
 Table — Coefficients of generalized dependences $C_s(m_s)$ for steel objects [15]

Коррозионная среда	a_s	b_s	Коэффициент корреляции
Дистиллированная вода	2,275	7,112	0,999
Пресная вода	2,317	5,676	0,998
Морская вода	2,585	4,272	0,980
3-процентный раствор NaCl	2,512	5,614	0,997
10-процентный раствор NaCl	2,561	4,203	0,974
20-процентный раствор NaCl	2,684	3,098	0,961
10-процентный раствор KCl	2,400	5,636	0,998
20-процентный раствор KCl	2,490	5,717	0,999
10-процентный раствор KNO ₃	2,530	4,864	0,983
4-процентный раствор NaOH	2,544	5,224	0,997
4-процентный раствор HNO ₃	2,488	5,535	0,992
6-процентный раствор HNO ₃	2,312	5,832	0,998

Можно подставить в выражение (11) рекомендованные выше осредненные значения коэффициентов a_s и b_s :

$$m_s = \frac{(\lg N_s - 5,1)}{(2,5 - \lg \sigma)}. \quad (12)$$

При необходимости следует использовать частные значения коэффициентов a_s и b_s для заданной коррозионной среды (см. таблицу). Эти коэффициенты определяют максимально допустимые напряжения и минимально допустимые долговечности, которые могут быть приняты во внимание при вычислении параметра m_s по формуле (11) или (12); очевидно, что пригодны для этой цели результаты опыта, для которого $\lg \sigma < a_s$, $\lg N_s > b_s$.

Далее по имеющемуся значению параметра m_s находим соответствующую ему начальную абсциссу кривой КорМУ по данным того же опыта:

$$C_s = m_s \lg \sigma + \lg N_s. \quad (13)$$

По значениям C_s и m_s можно построить индивидуальную кривую КорМУ испытанного объекта. В случае испытания n объектов для каждого определяются индивидуальные параметры C_s и m_s , а затем — их средние значения $\bar{C}_s$ и $\bar{m}_s$, по которым строится осредненная кривая КорМУ.

Рассмотренная методика ускоренного построения кривой КорМУ относится к участку III_s этой кривой (см. рисунок). Для оценки величины предела выносливости σ_{-1s} можно воспользоваться энергетическим подходом и рекомендациями для различных конструкционных материалов и коррозионных сред, основанными на анализе многочисленных опытных данных, которые изложены в статье [16]. Очевидно, что долговечность на участке III_s кривой КорМУ при заданном уровне напряжений σ в условиях регулярного нагружения можно определить из степенного уравнения (2):

$$N = \frac{\sigma_{-1s}^{m_s} N_{GS}}{\sigma^{m_s}} = \frac{10^{C_s}}{\sigma^{m_s}}. \quad (14)$$

Заключение. Таким образом, в работе рассмотрен один из возможных подходов к расчетно-экспериментальной оценке параметров степенного уравнения кривой КорМУ и долговечности. Проверка метода на основе соответственно поставленных экспериментов покажет, насколько корректно его практическое применение для решения прикладных задач. Однако при всей практической значимости изложенного подхода следует признать, что он формален. Поэтому актуальной, хотя и непростой, является задача количественного описания накопления повреждений ω_s во времени при КорМУ. Такое описание базируется на параметрах, управляющих процессом электрохимической коррозии. По существу, требуется обосновать уравнение состояния

$$\frac{d\omega_s}{dn} = f\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_m}; m_j; v_k; T\right), \quad (15)$$

где амплитуда напряжений σ_a , среднее напряжение цикла σ_m , число циклов n характеризуют процесс циклического нагружения; параметры m_j описывают физико-химические свойства материала исследуемого объекта; величина v_k определяет скорость коррозии, обусловленную электрохимическими реакциями; T — абсолютная температура.

Процесс коррозионно-усталостного разрушения можно рассматривать с энергетических позиций, критерий предельного состояния в этом случае можно записать, опираясь на кинетическую теорию прочности твердых тел, в виде [12]:

$$\frac{R_2}{U_0} \left[kT_z + \left(V_a \gamma_k \frac{\sigma^2}{E} + \alpha n F \Delta \varphi + u_x \right) R_1 \right] = 1, \quad (16)$$

где U_0 — энергия активации процесса, не зависящая от его механизма; V_a — активационный

объем; γ_K — структурно-чувствительный коэффициент; E — модуль нормальной упругости; k — коэффициент Больцмана; T_Σ — абсолютная температура, определяемая всеми источниками тепла; α — константа меньше единицы; F — число Фарадея; $\Delta\phi$ — разность потенциалов у поверхности раздела; R_1 — параметр, учитывающий взаимодействие механической и электрохимической составляющих энергии; R_2 — параметр, учитывающий влияние тепловой составляющей энергии.

Выражение для долговечности объекта при КорМУ с использованием критерия (16) запишет в виде

$$N = k_* N_* \exp \left[\frac{U_0 - V_a \gamma_K \frac{\sigma^2}{E} - \alpha n F \Delta\phi - u_k}{kT} \right], \quad (17)$$

где N_* — некоторая характерная долговечность; k_* — размерный коэффициент.

Специально поставленные эксперименты должны показать, насколько предложенные уравнения соответствуют опыту. Их уточнение и совершенствование возможно в результате как теоретических, так и экспериментальных исследований.

Завершая серию статей по КорМУ, отметим некоторые актуальные задачи дальнейших исследований.

1. В литературе практически отсутствуют статистические результаты исследований КорМУ, поэтому расчетная оценка рассеяния предела выносливости или долговечности при КорМУ затруднительна, а в ряде случаев — невозможна. Однако только с вероятностных позиций можно достоверно оценить надежность изделий, работающих в условиях КорМУ. Таким образом, необходимо проведение статического анализа имеющихся материалов, а также постановка соответствующих статистических опытов.

2. С практической точки зрения актуальны исследования КорМУ в сложных условиях нагружения: при блочном и случайном изменении напряжений, при повышенных температурах, нейтронном облучении. Хотя проведение таких испытаний затруднительно ввиду их длительности и высокой стоимости, следует учитывать, что развитие новой техники будет облегчено, если удастся получить обоснованные характеристики сопротивления материалов КорМУ в специфических условиях.

Список литературы

1. Похмурский, В.И. Коррозионная усталость металлов / В.И. Похмурский. — М.: Металлургия, 1989. — 206 с.
2. Reviewing the Progress of corrosion fatigue research on marine structures / Yu. Yang, C. Chen, Y. Zhuang, Z. Suo // *Frontiers in Materials*. — 2024. — Vol. 11. — DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1399292>.
3. Milella, P.P. Fatigue and Corrosion in Metals / P.P. Milella. — Milan: Springer Milano, 2012. — 844 p. — DOI: <https://doi.org/10.1007/978-88-470-2336-9>.
4. Горбовец, М.А. Испытания конструкционных металлических материалов на скорость роста трещины усталости в коррозионно-активной среде (обзор) / М.А. Горбовец, И.А. Ходинев, С.А. Монин // *Труды ВИАМ*. — 2022. — № 12(118). — С. 135–144.
5. Опыт исследований влияния коррозионных повреждений на прочностные характеристики алюминиевых сплавов, применяемых в авиационной промышленности / М.А. Фомина, А.Е. Кутырев, Е.И. Ямщиков, А.И. Вдовин // *Труды ВИАМ*. — 2023. — № 9(127). — С. 16–31.
6. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор). Часть 3. Коррозионное растрескивание алюминиевых сплавов / А.Б. Лаптев, Л.И. Закирова, О.А. Загорских, М.Р. Павлов // *Труды ВИАМ*. — 2022. — № 6(112). — С. 138–149.
7. Xue, S. Corrosion-fatigue analysis of high-strength steel wire by experiment and the numerical simulation / S. Xue, R. Shen // *Metals*. — 2020. — Vol. 10, iss. 6. — DOI: <https://doi.org/10.3390/met10060734>.
8. Hoffman, M.E. Corrosion and fatigue research – structural issues and relevance to naval aviation / M.E. Hoffman, P.C. Hoffman // *International Journal of Fatigue*. — 2001. — Vol. 23. — P. 1–10. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00115-3](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00115-3).
9. Stress corrosion cracking and corrosion fatigue characterization of MgZn1Ca0.3 (ZX10) in a simulated physiological environment / S. Jafari, R.K. Singh Raman, C.H.J. Davies [et al.] // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. — 2020. — Vol. 65. — P. 634–643. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.09.033>.
10. Corrosion fatigue mechanisms and evaluation methods of high-strength steel wires: A state-of-the-art review / Z. Jie, Z. Zhang, L. Susmel [et al.] // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. — 2024. — Vol. 47, iss. 7. — P. 2287–2318. — DOI: <https://doi.org/10.1111/ffe.14311>.
11. Significant improvement of the self-protection capability of ultra-high temperature ceramic matrix composites / F. Servadei, L. Zoli, A. Vinci [et al.] // *Corrosion Science*. — 2021. — Vol. 189. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109575>.
12. Сосновский, Л.А. Коррозионно-механическая усталость: основные закономерности (обобщающая статья) / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов // *Заводская лаборатория*. — 1993. — Т. 59, № 7. — С. 33–44.
13. Трошенко, В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справ.: в 2 т. / В.Т. Трошенко, Л.А. Сосновский. — Киев: Наук. думка, 1987. — Т. 1. — 510 с.; Т. 2. — 825 с.
14. Олейник, Н.В. О форме кривой коррозионной усталости деталей машин / Н.В. Олейник, А.В. Вольчев // *Детали машин*. — 1977. — Вып. 25. — С. 86–91.
15. 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.
16. Сосновский, Л.А. Коррозионно-механическая усталость: проблемы прогнозирования. Часть 1. Прямой эффект / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович, С.С. Щербаков // *Механика машин, механизмов и материалов*. — 2018. — № 1(42). — С. 51–57.

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

Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics¹

E-mail: bogal@tut.by

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

Academic Secretary of the Department of Physical and Technical Sciences²

E-mail: sherbakovss@mail.ru

¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

²National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received January 8, 2025.

CORROSION-MECHANICAL FATIGUE: THE PROBLEMS OF FORECASTING. PART 4. ASSESSMENT OF CORROSION-MECHANICAL FATIGUE CURVE PARAMETERS AS WELL AS DURABILITY OF MATERIALS

Corrosion is one of the main electrochemical processes that damage metal materials. The combination of cyclic stresses and a corrosive environment causes wear-fatigue damage, called corrosion-mechanical fatigue. The paper investigates the problem of predicting this type of wear-fatigue damage, which occurs in almost all branches of technology, especially in the chemical, oil, metallurgical industries, transport. The work consists of several parts. In the first part a technique for estimating the fatigue limit in a given corrosive environment (direct effect) is developed. The second part analyzes the reverse effect, i.e. the effect of acting stresses on the corrosion rate of metals and alloys, and proposes a method for predicting corrosion-erosion damage with the reverse effect based on the energy criterion. The third part discusses the mechanisms of corrosion-mechanical fatigue with direct and reverse effects. The fourth part considers the methodology of accelerated computational and experimental evaluation of the parameters of the power equation of the corrosion-mechanical fatigue and durability curve based on established correlation relationships. A diagram of the relative position of the curves of mechanical and corrosion-mechanical fatigue of the environment is given with a description of characteristic sections and points. The current tasks of further research are formulated.

Keywords: corrosion-mechanical fatigue, fatigue resistance, accelerated assessment, fatigue curve parameters, cyclic stresses, durability

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-2-71-55-61>

References

1. Pokhmurskiy V.I. *Korrozionnaya ustalost metallov* [Corrosion fatigue of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989. 206 p. (in Russ.).
2. Yang Y., Chen C., Zhuang Y., Suo Z. Reviewing the progress of corrosion fatigue research on marine structures. *Frontiers in materials*, 2024, vol. 11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1399292>.
3. Milella P.P. *Fatigue and corrosion in metals*. Milan, Springer Milano, 2012. 844 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-88-470-2336-9>.
4. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Monin S.A. Ispytaniya konstruktsionnykh metallicheskih materialov na skorost rosta treshchiny ustalosti v korrozionno-aktivnoy srede (obzor) [Tests of structural metallic materials for the fatigue crack growth rate in a corrosive environment (review)]. *Trudy VIAM*, 2022, no. 12(118), pp. 135–144 (in Russ.).
5. Fomina M.A., Kuttyrev A.E., Yamschikov E.I., Vdovin A.I. Opyt issledovaniy vliyaniya korrozionnykh povrezhdeniy na prochnostnye kharakteristiki alyuminievykh splavov, primenyaemykh v aviatsionnoy promyshlennosti [Experience in impact research of corrosion damage on strength characteristics aluminum alloys used in the aviation industry]. *Trudy VIAM*, 2023, no. 9(127), pp. 16–31 (in Russ.).
6. Laptev A.B., Zakirova L.I., Zagorskikh O.A., Pavlov M.R. Metody issledovaniya protsessov korrozionno-mekhanicheskogo razrusheniya i navodorozhivaniya metallov (obzor). Chast 3. Korrozionnoe rastreskivanie alyuminievykh splavov [Methods of investigation of the processes of corrosion-mechanical destruction and hydrogenation of metals (review). Part 3. Corrosion cracking of aluminum alloys]. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6(112), pp. 138–149 (in Russ.).
7. Xue S., Shen R. Corrosion-fatigue analysis of high-strength steel wire by experiment and the numerical simulation. *Metals*, 2020, vol. 10, iss. 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10060734>.
8. Hoffman M.E., Hoffman P.C. Corrosion and fatigue research – structural issues and relevance to naval aviation. *International journal of fatigue*, 2001, vol. 23, supplement 1, pp. 1–10. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00115-3](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00115-3).
9. Jafari S., et al. Stress corrosion cracking and corrosion fatigue characterization of MgZn1Ca0.3 (ZX10) in a simulated physiological environment. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 2020, vol. 65, pp. 634–643. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.09.033>.
10. Jie Z., Zhang Z., Susmel L., Zhang L., Lu W. Corrosion fatigue mechanisms and evaluation methods of high-strength steel

- wires: a state-of-the-art review. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, 2024, vol. 47, iss. 7, pp. 2287–2318. DOI: <https://doi.org/10.1111/ffe.14311>.
11. Servadei F., et al. Significant improvement of the self-protection capability of ultra-high temperature ceramic matrix composites. *Corrosion science*, 2021, vol. 189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109575>.
 12. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A. Korroziionno-mekhanicheskaya ustalost: osnovnye zakonomernosti (obobshchayushchaya statya) [Corrosion and mechanical fatigue: basic patterns (summary article)]. *Zavodskaya laboratoriya*, 1993, vol. 59, no. 7, pp. 33–44 (in Russ.).
 13. Troshchenko V.T., Sosnovskiy L.A. *Soprotivlenie ustalosti metallov i spлавov* [Fatigue resistance of metals and alloys]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1987. Vol. 1, 510 p., vol. 2, 825 p. (in Russ.).
 14. Oleynik N.V., Volchev A.V. O forme krivoy korroziionnoy ustalosti detaley mashin [About the shape of the corrosion fatigue curve of machine parts]. *Detali mashin*, 1977, iss. 25, pp. 86–91 (in Russ.).
 15. Oleynik N.V., Magdenko A.N., Skliyar S.P. *Soprotivlenie ustalosti materialov i detaley mashin v korroziionnykh sredakh* [Fatigue resistance of materials and machine parts in corrosive environments]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1987. 198 p. (in Russ.).
 16. Sosnovskiy L.A., Bogdanovich A.V., Sherbakov S.S. Korroziionno-mekhanicheskaya ustalost: problemy prognozirovaniya. Chast 1. Pryamoy effekt [Corrosion-mechanical fatigue: the problems of forecasting. Part 1. Direct effect]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2018, no. 1(42), pp. 51–57 (in Russ.).