



# МЕХАНИКА ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 620.178.3

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

А.В. БОГДАНОВИЧ, д-р техн. наук, проф.  
профессор кафедры теоретической и прикладной механики<sup>1</sup>  
E-mail: bogal@tut.by

Е.С. ТАРАНОВА  
преподаватель кафедры «Локомотивы»<sup>2</sup>  
E-mail: bona.85@mail.ru

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 01.09.2023.

## КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКАЯ УСТАЛОСТЬ: ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ. ЧАСТЬ 3. МЕХАНИЗМЫ КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ

*Коррозия — один из основных электрохимических процессов, повреждающих металлические материалы. Сочетание циклических напряжений и коррозионной среды обуславливает повреждение, называемое коррозионно-механической усталостью. В работе исследуется проблема прогнозирования данного вида коррозионно-усталостного повреждения, который встречается практически во всех отраслях техники, особенно в химической, нефтяной, металлургической промышленности, на транспорте. Работа состоит из нескольких частей. В первой части разработана 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 с учетом взаимодействующих явлений адсорбционной, водородной и собственно коррозионной усталости. Вводится понятие рассеянного эффекта множественного сдвига, окисления, переноса как сложного вида повреждения при коррозионно-механической усталости.*

**Ключевые слова:** коррозионно-механическая усталость, сопротивление усталости, прямой эффект, обратный эффект, циклические напряжения, механизмы повреждения

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-86-94>

*Продолжение № 1(42) 2018, 2(63) 2023.*

**Введение.** Механизмы взаимодействия поверхности напряженного металла и среды, особенно коррозионной, изучают давно и основательно [1–15]. Но особую практическую важность имеют проблемы взаимодействия циклически деформируемого твердого тела с жидкостью, газом,

потоком твердых частиц, жидких капель. Такие проблемы относятся к общим задачам трибофатики [16]. К сожалению, до настоящего времени они в общем виде даже не поставлены. Однако в механохимии и трибофатике [1, 7, 17, 18] получен ряд результатов исследования закономерностей прямого и обратного эффектов для частной трибофа-

тической системы «циклически деформируемый металл — коррозионная среда». В первых двух частях статьи была предложена и апробирована по экспериментальным данным методика прогнозирования прямого и обратного эффектов при коррозионно-механической усталости (КорМУ) [19, 20]. Ниже дается краткий обзор основных механизмов КорМУ.

**Анализ механохимических эффектов при КорМУ.** Разрушение металла в большинстве коррозионных сред замедляется во времени вследствие образования защитной пленки. Если же эта пленка непрерывно повреждается и удаляется, то скорость коррозии может возрасти. Поэтому очевидно, что при сочетании электрохимического и механического воздействий повреждения будут значительно большими, чем от каждого из них в отдельности. Поскольку взаимодействие между средой и металлом сопровождается многообразными и сложными явлениями, не до конца изученными, то механические и электрохимические эффекты не всегда удается различить.

По-видимому, основной причиной механической активации коррозионных процессов является тот факт, что механические напряжения изменяют термодинамическое состояние поверхности металла, повышая его неустойчивость в разных средах [1, 2], а также смещают электродный потенциал в сторону отрицательных значений. Это смещение тем больше, чем выше напряжение или чем больше время его действия (рисунок 1) [3].

Смещение потенциала неизбежно ведет к интенсификации физико-химических процессов коррозионного повреждения. Механизмы реализации таких процессов сложны и многообразны. Например, сдвиговые циклические деформации обуславливают выход на поверхность дислокаций и вакансий, образование экструзий и интрузий. Возникающие при этом ювенильные участки нового микрорельефа поверхности более анодны,

чем окружающий металл; на них происходит более интенсивная адсорбция (во впадинах) и хемосорбция (на выступах), что ведет к росту общей скорости коррозии. В зонах микроконцентрации напряжений (интрузий и других дефектов) анодные процессы локализуются; работа специфических пар Эванса [4] приводит к интенсификации местной (локальной) коррозии, что обуславливает избирательное растворение металла и образование первичных коррозионных трещин [2].

К настоящему времени не сложилось единого мнения о механизмах влияния коррозионных сред на сопротивление металлов усталости.

В основу электрохимической гипотезы КорМУ [4] положено представление о возникновении специфических коррозионных пар: дно концентраторов напряжений, их стенки и наружная поверхность металла. Анодные процессы локализуются в зонах микроконцентрации напряжений, которые имеют место на поверхности и вызываются микропорами, рисками, скоплениями дислокаций. Постепенный рост (в процессе циклического деформирования) локальных напряжений на дне таких концентраторов приводит к образованию нескольких коррозионных трещин, развитие которых и приводит к усталостному разрушению. Рост трещин обусловлен работой коррозионной пары с малополяризуемыми электродами; анодом такой пары является дно трещины.

В работе [5] предложена адсорбционно-электрохимическая гипотеза КорМУ, впоследствии дополненная представлениями о водородной усталости металла. Уменьшение сопротивления усталости в коррозионных средах объясняется эффектами адсорбционной, водородной и собственно коррозионной усталости.

На рисунке 2 а [5] приведены результаты испытаний стали 45 при различных видах усталости.

Адсорбционная усталость — изменение сопротивления усталости металлов под влиянием адсорбирующихся поверхностно-активных компонентов среды на внешних или развитых внутренних поверхностных дефектах металла при действии циклических напряжений — снизила предел выносливости стали 45 на 20 % (кривая 2). Чаще всего адсорбционная усталость наблюдается не в чистом виде, а предшествует другим, более сильным видам воздействия сред на сопротивление усталости (коррозионному), т. е. адсорбционная усталость подготавливает металл для протекания этих воздействий.

Водородная усталость — снижение сопротивления усталости металлов, подверженных водородной хрупкости, наблюдаемое в электролитах под влиянием окклюзии металлом водорода — уменьшила значение предела выносливости стали 45 почти на 66 % (кривая 3) по сравнению с таковой на воздухе. Водородная усталость является частью явлений КорМУ, происходящих в элек-

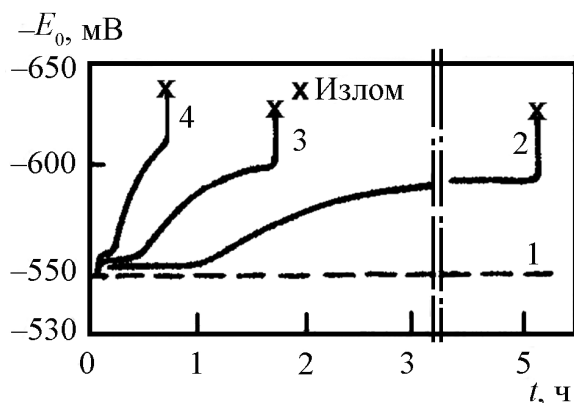


Рисунок 1 — Изменение общего электродного потенциала  $E_0$  образцов стали 20 во времени  $t$  при испытаниях на КорМУ [3]: 1–4 — напряжение  $\sigma_s$  равно 0, 160, 240, 320 МПа соответственно

Figure 1 — Variation of the total electrode potential  $E_0$  of steel 20 specimens in time  $t$  during the corrosion-mechanical fatigue tests [3]: 1–4 — voltage  $\sigma_s$  is equal to 0, 160, 240, 320 MPa, respectively

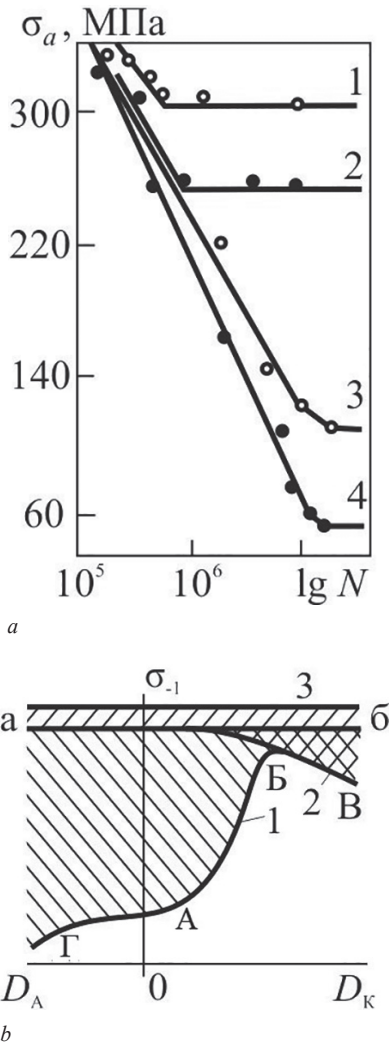


Рисунок 2 — Кривые усталости стали 45 в воздухе (1), а также при адсорбционной (2), водородной (3) и коррозионной (4) усталости (а) и схема изменения сопротивления усталости  $\sigma_{-1}$  стали в зависимости от плотности тока ( $D_k, D_a$ ) при поляризации (б) [5]  
 Figure 2 — Fatigue curves of steel 45 in air (1), as well as under adsorption (2), hydrogen (3) and corrosion (4) fatigue (a) and variation scheme of fatigue resistance  $\sigma_{-1}$  of steel depending on current density ( $D_k, D_a$ ) under polarization (b) [5]

тролитах при коррозии с водородной деполяризацией, вызывающей наводороживание катодных участков. В чистом виде водородная усталость проявляется в электролите и при поляризации от внешнего источника тока с достаточно большой плотностью.

Коррозионная усталость — непрерывное во времени снижение сопротивления усталости металлов, поддающихся электрохимической коррозии — снизила предел выносливости стали 45 почти на 92 % (кривая 4). Она наблюдается в воде, водных растворах солей, кислот, щелочей и других электролитах; ее обуславливают в основном электрохимические и механические факторы.

На рисунке 2 б [5] наглядно показано снижение сопротивления усталости стали под действием коррозионной среды. Линия аб указывает уровень предела выносливости металла в воздухе, а кривая

ГАБВ — изменение предела выносливости того же металла в 3-процентном водном растворе NaCl в зависимости от плотности катодного  $D_k$  и анодного  $D_a$  токов при поляризации испытуемых образцов от внешнего источника тока. Ветвь ГА кривой описывает снижение предела выносливости при анодной поляризации. При катодной поляризации предел выносливости  $\sigma_{-1}$  повышается с увеличением плотности тока до некоторой точки Б, а затем поляризация вызывает снижение кривой (ветвь БВ), что объясняется наложением на коррозионную усталость явления водородной усталости.

Согласно коррозионно-механической гипотезе [6], процесс коррозионного растрескивания имеет следующие основные стадии.

1. Возникновение (вследствие избирательной коррозии под напряжением) и развитие первичных (локальных) коррозионных углублений. Важную роль играют здесь процессы сдвигообразования, интрузии и экструзии. С момента появления первичных углублений начинают работать специфические коррозионные пары, что увеличивает скорость развития таких углублений.

2. Образование трещин. Трещина появляется в тот момент, когда дно первичного углубления продвигается вглубь настолько, что концентрация напряжений вызывает локальный чисто механический микронадрыв решетки металла в плоскости действия максимальных растягивающих напряжений. При этом достигается локальная разрядка напряжений у места их чрезмерной концентрации. В дальнейшем на дне первой микротрещины работа анодных участков специфических пар вновь вызовет образование углублений, а локальная концентрация напряжений — образование ориентированных микроразрывов решетки. Чередование этих явлений и слияние отдельных микронадры-

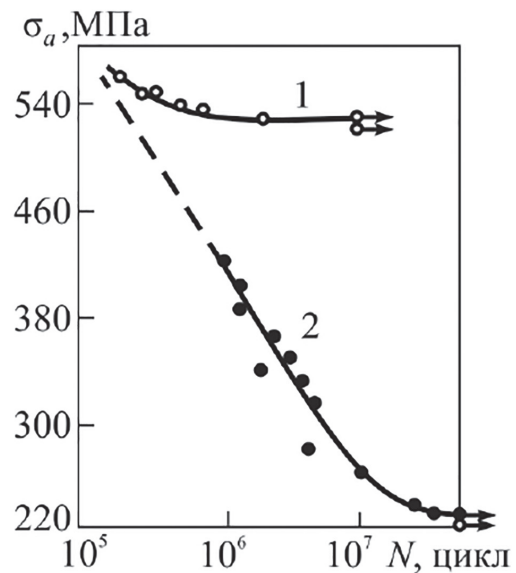


Рисунок 3 — Кривые усталости стали X17H2 в воздухе (1) и в 3-процентном растворе NaCl (2) [21]  
 Figure 3 — Fatigue curves of X17H2 (Kh17N2) steel in air (1) and in 3 % NaCl solution (2) [21]

вов представляют собой процесс развития коррозионно-усталостной трещины.

3. Механическое разрушение металла по оставшемуся живому сечению вследствие превышения действующими напряжениями предела его прочности.

Особая роль механического фактора может быть проиллюстрирована данными, приведенными на рисунке 3. Если  $\sigma_a \geq \sigma_{-1}$  ( $\sigma_{-1}$  — предел выносливости стали в воздухе), то долговечность образцов определяется, главным образом, уровнем амплитуды напряжений. Следовательно, смещение кривой 2 по отношению к кривой 1 при  $\sigma_a < 530$  МПа обусловлено прямым эффектом. Чем выше  $\sigma_a$ , тем меньше долговечность и, следовательно, тем слабее влияние коррозионного фактора. Иная ситуация возникает при  $\sigma_a \ll \sigma_{-1}$ , например, при  $\sigma_a = 300$  МПа. Эта амплитуда напряжений, в принципе, не может привести к усталостному разрушению, если коррозионная среда отсутствует. С другой стороны, за время, соответствующее  $5 \cdot 10^6$  циклам нагружения, процесс коррозии тоже не может вызвать разрушения, если отсутствуют циклические напряжения. Однако разрушение реализуется, когда действуют оба фактора одновременно. При этом циклические напряжения интенсифицируют местное коррозионное повреждение (обратный эффект), а последнее, в свою очередь, инициирует усталостное разрушение (прямой эффект). Таким образом, участок кривой КорМУ, лежащий ниже предела выносливости стали в воздухе, в значительной мере обусловлен обратным эффектом. После числа циклов нагружения  $\sim 10^7$  на кривой 2 обнаруживается перелом — интенсивность КорМУ резко снижается. По-видимому, это связано с тем, что напряжение  $\sigma_a < 260$  МПа принадлежит к тому пороговому интервалу циклического нагружения, которому соответствует минимальная скорость коррозии в данных условиях, а сам процесс коррозии становится преимущественно равномерным. В этом случае роль механического фактора в КорМУ ослабевает.

**О механизмах обратного эффекта.** Согласно воззрениям трибофатики [16, 17] основные механизмы обратного эффекта можно описывать следующим образом (см. рисунок 3). Будем исходить из того, что модель «скольжения с растворением» [3] достаточно хорошо подтверждена экспериментально [21].

Эта модель связывает развитие повреждений с механическим разрывом защитной пленки, за которым следует проникновение трещины в металл путем его растворения по незащищенным поверхностям; периодическая комбинация этих процессов и определяет развитие КорМУ. Циклическое деформирование металла в пределах опасного объема  $V_{Pr}$  приводит к трем основным эффектам (рисунок 4). С другой стороны, окисление металла (при реализации электрохимических реакций)



Рисунок 4 — Циклическое деформирование металла в пределах опасного объема  $V_{Pr}$   
 Figure 4 — Cyclic deformation of metal within the dangerous volume  $V_{Pr}$

приводит тоже к трем основным явлениям (см. рисунок 4).

Видно, что образование оксидного слоя контролируется полем циклических деформаций (позиция 3); последние обуславливают ускоренное разрушение защитной пленки, после чего наступает локальное повреждение металла путем его растворения по ювенильным поверхностям (образование множественных питтингов). А растворение матрицы (железа) интенсифицируется вследствие повышения химической активности зон пластического деформирования — множественных участков скопления дислокаций (позиция 2).

Если говорить об общей коррозии, то ясно, что формирование двойного электрического слоя (путем диффузии в жидкой среде) (рисунок 5) [22]

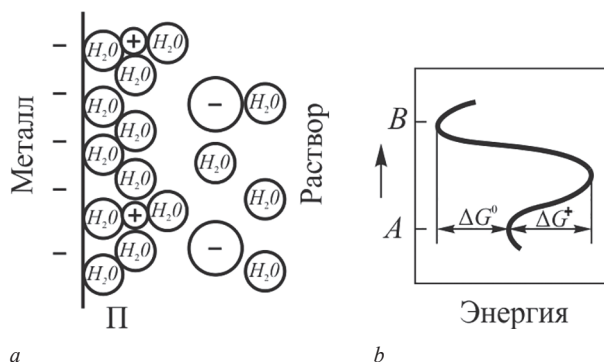


Рисунок 5 — Схема двойного электрического слоя на поверхности раздела «металл — электролит» (a) и диаграмма энергетического барьера в химической реакции (b) [22]  
 Figure 5 — Scheme of the electric double layer at the “metal — electrolyte interface” (a) and diagram of the energy barrier in the chemical reaction (b) [22]

ускоряется, а его эффективность, в смысле реализации электрохимических реакций, растет вследствие повышения термодинамической активности поверхности металла циклическими напряжениями (позиция 1 на рисунке 4). На рисунке 5 буквой П обозначена поверхность раздела, разъединяющая два слоя противоположных зарядов, неравномерное расположение которых приводит к возникновению электрического поля ( $\sim 10^7$  В/см<sup>2</sup>), действующего на металл;  $A \rightarrow B$  — направление электрохимической реакции;  $\Delta G_0$  — изменение свободной энергии (при  $\Delta G_0 > 0$  скорость реакции есть функция высоты активационного барьера  $\Delta G^+$ ).

Как известно, коррозионный процесс сопровождается несколькими реакциями, важнейшей из которых является выделение водорода [23]. На рисунке 6 показана одна из схем переноса водорода, вызывающего охрупчивание конструктивного сплава:  $a \rightarrow b$  — диффузия в газовой среде;  $b \rightarrow c$  — физическая адсорбция и диссоциация;  $c \rightarrow d$  — миграция адсорбированных атомов и хемосорбция;  $d \rightarrow e$  — растворение;  $e \rightarrow f$  — диффузия в решетке сплавов. Известная модель «переноса с растяжением» [24] утверждает, что вредное влияние водорода на процесс разрушения металла является результатом конкуренции (по скорости развития) между химическим повреждением от взаимодействия металл-водород и механическим повреждением от воздействия приложенного напряжения. Основные механизмы, посредством которых водород ухудшает механические свойства металлов:

1. Взаимодействие с межатомными связями решетки: адсорбируясь на поверхности, водород понижает ее свободную энергию (адсорбционный механизм охрупчивания), а, кроме того, водород, содержащийся внутри решетки металла, вызывает локальные понижения когезивной прочности (декогезивное охрупчивание).
2. Взаимодействие с дислокациями: присутствие водорода изменяет их подвижность.

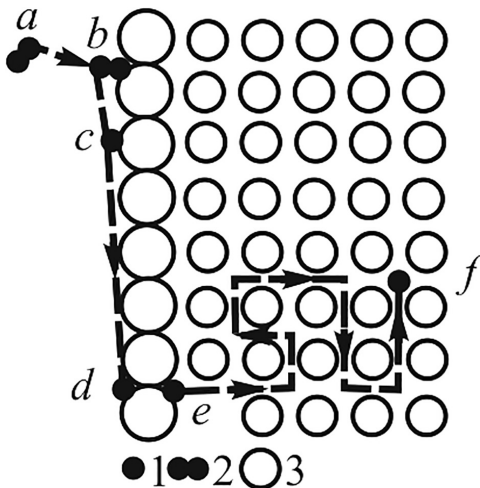


Рисунок 6 — Схема переноса водорода  
Figure 6 — Hydrogen transfer scheme



Рисунок 7 — Основные механизмы обратного эффекта, связанные с водородной усталостью  
Figure 7 — Main mechanisms of the reverse effect associated with hydrogen fatigue

3. Создание очагов внутреннего давления в сплавах с концентрацией водорода выше равновесной: рост давления в пустотах приводит к тому, что повреждения развиваются при сниженных напряжениях.

4. При концентрации выше предела растворимости водород может образовать гидриды металлов. Охрупчивание сплавов может происходить из-за повышенных объемных расширений, связанных с образованием гидридов, а также вследствие природной хрупкости самих гидридов.

Основные механизмы обратного эффекта, связанные с водородной усталостью, представлены на рисунке 7. Циклическое деформирование металла в пределах опасного объема  $V_{py}$  приводит к трем основным эффектам (см. рисунок 7). С другой стороны, процесс переноса водорода приводит также к трем основным явлениям (см. рисунок 7).

Ясно, что движение дислокаций при циклическом деформировании ускоряет процесс переноса водорода по дислокациям (позиция 3), а возбуждение градиента напряжений (на макроуровне) интенсифицирует диффузию водорода по междоузлиям в матрице (позиция 2). Следовательно, скорость образования множественных локальных повреждений металла при этом повышается. Наконец, усиление термодинамической активности поверхности металла механическими напряжениями интенсифицирует процессы адсорбции атомов водорода на поверхности, диссоциации его молекул, хемосорбции (позиция 1).

Из рисунков 2, 3 и 6 следует, что время (число циклов до разрушения) и уровень циклических напряжений являются факторами, которые управляют процессами водородной усталости и особенно коррозионной усталости. Аналогичное заключение можно сделать и относительно адсорбционной усталости.

На основании изложенного можно заключить, что при КорМУ реализуется рассеянный эффект множественного сдвига, окисления, переноса (РЭМСОП). РЭМСОП, как повреждающее явление, действует на всех стадиях КорМУ.

Представленный выше анализ касался в основном периода до появления магистральной трещины. Период ее развития (живучести металлов и сплавов) в процессе КорМУ изучают в рамках механики коррозионного разрушения [25], а повреждение описывают обычно в терминах коэффициента интенсивности напряжений и скорости роста усталостной трещины.

Существует ряд способов снижения склонности металлов к КорМУ [2, 5, 6, 8, 26–28]. Для углеродистых сталей тщательная деаэрация растворов солей может повысить предел выносливости стали до его уровня на воздухе. Эффективно введение ингибиторов: в водопроводной воде с добавкой 200 мг/л  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  стойкость к КорМУ нормализованной стальной проволоки (0,35 % С) может стать выше, чем в воздухе. Достоинство покрытий протекторного типа (например, цинка или кадмия, осажденного на сталь) состоит в том, что основной металл катодно защищен и на тех участках, где на покрытии есть дефекты. Гальванические покрытия в ряде случаев увеличивают срок службы изделий. Так, цинковые покрытия по алюминию эффективны, а кадмиевые — нет. Электролитические покрытия стали оловом, свинцом, медью и серебром предохраняют ее от разрушения благодаря изоляции от внешней среды, а не за счет повышения сопротивления усталости. Данные о применении никелевых и хромовых покрытий противоречивы.

По имеющимся сведениям, в литературе отсутствует анализ адсорбционной усталости, подобный тому, что описан выше для коррозионной и водородной усталости. Ниже дается, по-видимому, первая попытка такого описания.

Основные механизмы обратного эффекта при адсорбционной усталости можно описать согласно рисунку 8. Как и в предыдущих случаях, циклическое деформирование металла и процесс адсорбции поверхностно-активных веществ (ПАВ) среды приводят к трем основным эффектам. Адсорбционное влияние (позиция 1) на механические свойства твердого тела связано, прежде всего, со снижением уровня поверхностной энергии последнего (позиция 2), что облегчает (у кристаллических тел) выход и разрядку на поверхности дислокаций. Снижение поверхност-

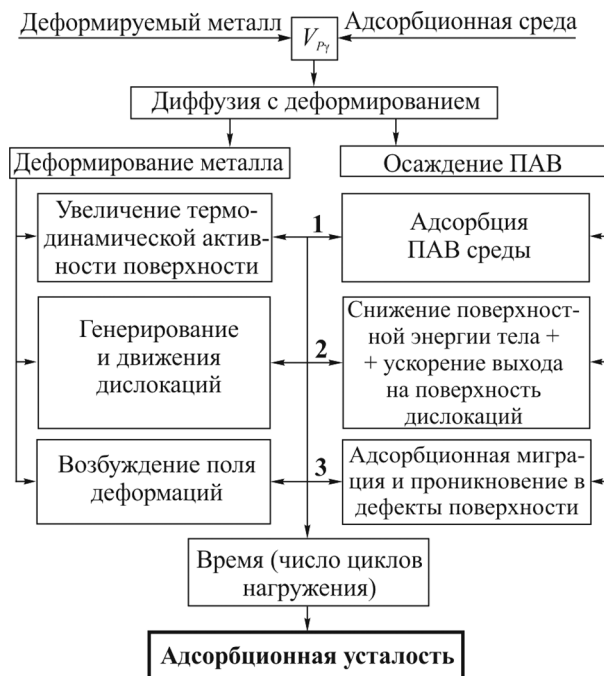


Рисунок 8 — Основные механизмы обратного эффекта, связанные с адсорбционной усталостью  
Figure 8 — Main mechanisms of the reverse effect associated with adsorption fatigue

ной энергии термодинамически обуславливает адсорбционную миграцию элементов адсорбата по поверхности адсорбента и проникновение его во многие дефекты поверхности типа щелей и их расклинивания (позиция 3). Эти элементы в процессе разрушения твердого тела проникают в зону предразрушения и включаются во взаимодействие с атомами твердого тела, облегчая протекание процесса разрушения [5].

На рисунке 9 представлена известная схема расположения адсорбированных молекул на поверхности твердого тела.

Адсорбируясь на поверхности, молекулы ориентируются относительно нее в зависимости от того, где расположен активный центр — полярная группа. Если молекула большой длины имеет полярную группу на конце, то она располагается перпендикулярно поверхности (см. рисунок 9 а). Противоположные концы (хвосты) этих молекул совершают ротационное движение, которое при увеличении температуры усиливается, и адсорбированные слои разрушаются. При наличии полярных групп на обоих концах (см. рисунок 9 б) мо-

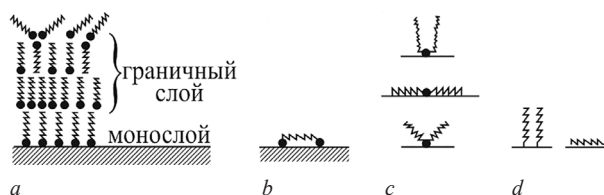


Рисунок 9 — Схема расположения адсорбированных молекул на поверхности твердого тела [29]  
Figure 9 — Scheme of arrangement of adsorbed molecules on the surface of a solid body [29]

лекулы располагаются параллельно поверхности твердого тела. Если полярная группа размещена посередине молекулы (см. рисунок 9 *c*), а также в случае адсорбции молекул неполярного вещества (см. рисунок 9 *d*) возможно как вертикальное, так и лежачее расположение молекул. Процесс адсорбции протекает постепенно до тех пор, пока не достигается насыщение граничного слоя молекулами адсорбата [29].

Из рисунков 8 и 9 видно, что время (число циклов до разрушения) и уровень циклических напряжений являются весьма активными параметрами, которые управляют процессами водородной, адсорбционной и особенно коррозионной усталости [18].

**Заключение.** В работе дано обобщенное описание механизмов коррозионно-механической усталости КорМУ. Понимание этих механизмов позволяет разрабатывать эффективные методы защиты металлических материалов от коррозионных сред, а также мероприятия по повышению долговечности конструкций и деталей, работающих в агрессивных средах. Для уточнения и детализации протекающих при КорМУ процессов важными являются правильная постановка эксперимента, выбор оборудования и приборного инструментария. Актуальной задачей при решении проблем, связанных с коррозионно-механической усталостью, является количественное описание накопления повреждений во времени, исходя из подходов физико-химической механики и трибофатики.

*Продолжение следует.*

## Список литературы

1. Гутман, Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии / Э.М. Гутман. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1981. — 270 с.
2. Похмурский, В.И. Коррозионная усталость металлов / В.И. Похмурский. — М.: Металлургия, 1985. — 206 с.
3. The theory of stress corrosion cracking in alloys / J.C. Scully (ed.). — Brussels: NATO Scientific Affairs Division, 1971. — 321 p.
4. Эванс, Ю.Р. Коррозия и окисление металлов / Ю.Р. Эванс; пер. с англ.; под ред. И.Л. Розенфельда. — М.: Машгиз, 1962. — 856 с.
5. Карпенко, Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов / Г.В. Карпенко. — Киев: Наук. думка, 1976. — 127 с.
6. Романов, В.В. Влияние коррозионной среды на циклическую прочность металлов / В.В. Романов. — М.: Наука, 1969. — 219 с.
7. Ажогин, Ф.Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей / Ф.Ф. Ажогин. — М.: Металлургия, 1974. — 256 с.
8. Олейник, Н.В. Сопротивление усталости материалов и деталей машин в коррозионных средах / Н.В. Олейник, А.Н. Магденко, С.П. Складар. — Киев: Наук. думка, 1987. — 197 с.
9. McCafferty, E. Introduction to corrosion science / E. McCafferty. — New York: Springer, 2010. — 302 p. — DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0455-3>.
10. Milella, P.P. Fatigue and corrosion in metals / P.P. Milella. — Milano: Springer, 2012. — 844 p. — DOI: <https://doi.org/10.1007/978-88-470-2336-9>.
11. Corrosion fatigue and damage tolerance in the nickel-based superalloy RR1000 subjected to SO<sub>2</sub> environments / M. Bache [et al.] // Fatigue & Fracture Engineering Materials & Structures. — 2022. — Vol. 45, iss. 5. — Pp. 1537–1549. — DOI: <https://doi.org/10.1111/ffe.13687>.
12. McMahon, M.E. Review of residual stress impingement methods to mitigate environmental fracture susceptibility / M.E. McMahon // Corrosion and Materials Degradation. — 2021. — Vol. 2, iss. 4. — Pp. 582–602. — DOI: <https://doi.org/10.3390/cmd2040031>.
13. 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>.
14. Marandi, L. Effect of saline atmosphere on the mechanical properties of commercial steel wire / L. Marandi, I. Sen // Metallurgical and Materials Transactions A. — 2019. — Vol. 50, iss. 1. — Pp. 132–141. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4956-x>.
15. Wang, Y. Research on corrosion fatigue performance and multiple fatigue sources fracture process of corroded steel wires / Y. Wang, Y. Zheng // Advances in Civil Engineering. — 2019. — Vol. 2019. — DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/4914359>.
16. Сосновский, Л.А. Трибофатика: проблемы и перспективы: доклад / Л.А. Сосновский // Математика и механика — народному хозяйству: тематич. выставка АН СССР. — Гомель: БелИИЖТ, 1989. — 63 с.
17. Сосновский, Л.А. О механической активации коррозионных процессов при циклическом нагружении / Л.А. Сосновский // Повышение надежности и долговечности машин и сооружений: тез. докл. межресп. науч.-техн. конф. — Киев, 1991. — С. 83–84.
18. Сосновский, Л.А. Трибофатика: износосталостные повреждения в проблемах ресурса и безопасности машин / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов. — Москва-Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», ФЦНТП «Безопасность», 2000. — 304 с.
19. Сосновский, Л.А. Коррозионно-механическая усталость: проблемы прогнозирования. Ч. 1. Прямой эффект / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович, С.С. Щербаков // Механика машин, механизмов и материалов. — 2018. — № 1(42). — С. 51–57.
20. Сосновский, Л.А. Коррозионно-механическая усталость: проблемы прогнозирования. Ч. 2. Обратный эффект. Влияние напряжений на скорость коррозии / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович, С.С. Щербаков // Механика машин, механизмов и материалов. — 2023. — № 2(63). — С. 61–68. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-61-68>.
21. О влиянии некоторых покрытий на усталостную и коррозионно-усталостную прочность стали X17H2 / В.И. Похмурский [и др.] // Физико-химическая механика материалов. — 1965. — № 6. — С. 694–696.
22. Parkins, R.N. Predictive approaches to stress corrosion cracking failure / R.N. Parkins // Corrosion Science. — 1980. — Vol. 20, iss. 2. — Pp. 147–166. — DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(80\)90128-6](https://doi.org/10.1016/0010-938X(80)90128-6).
23. Дивайн, Т.М. Коррозия сплавов на основе железа / Т.М. Дивайн // Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов; под ред. К.Л. Брайента, С.К. Бенерджи; пер. с англ. — М.: Металлургия, 1988. — С. 188–217.
24. Нельсон, Г.Г. Водородное охрупчивание / Г.Г. Нельсон // Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов; под ред. К.Л. Брайента, С.К. Бенерджи; пер. с англ. — М.: Металлургия, 1988. — С. 256–333.
25. Романив, О.Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов / О.Н. Романив, Г.Н. Никифорчин. — М.: Металлургия, 1986. — 293 с.
26. Гликман, Л.А. Коррозионно-механическая прочность металлов / Л.А. Гликман. — Москва-Ленинград: Машгиз, 1955. — 176 с.
27. Corrosion fatigue: chemistry, mechanics and microstructure / ed. by O. Devereux [et al.]. — Houston: National Ass. of Corrosion Eng., 1972. — 780 p.
28. Рябченков, А.В. Коррозионно-усталостная прочность стали / А.В. Рябченков; под ред. Г.В. Акимова. — М.: Машгиз, 1953. — 180 с.
29. Богданович, П.Н. Трение и износ в машинах: учеб. для вузов / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. — Минск: Выш. шк., 1999. — 374 с.

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

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

Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics<sup>1</sup>

E-mail: bogal@tut.by

TARANOVA Elena S.

Lecturer of the Department "Locomotives"<sup>2</sup>

E-mail: bona.85@mail.ru

<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

Received 01 September 2023.

## CORROSION-MECHANICAL FATIGUE: THE PROBLEMS OF FORECASTING. PART 3. MECHANISMS OF CORROSION-MECHANICAL FATIGUE

*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 corrosion-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 taking into account the interacting phenomena of adsorption, hydrogen and corrosion fatigue itself. The concept of diffuse effect of multiple shear, oxidation, transfer is introduced as a complex type of damage in corrosion-mechanical fatigue.*

**Keywords:** corrosion-mechanical fatigue, fatigue resistance, direct effect, reverse effect, cyclic stress, damage mechanisms

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-86-94>

### References

- Gutman E.M. *Mekhanokhimiya metallov i zashchita ot korrozii* [Mechanochemistry of metals and corrosion protection]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 270 p. (in Russ.).
- Pokhmurskiy V.I. *Korroziionnaya ustalost metallov* [Corrosion fatigue of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 206 p. (in Russ.).
- The theory of stress corrosion cracking in alloys*. Brussels, NATO Scientific Affairs Division, 1971. 321 p.
- Evans U.R. *The corrosion and oxidation of metals: scientific principles and practical applications*. London, Edward Arnold, 1960. 1094 p.
- Karpenko G.V. *Vliyaniye sredy na prochnost i dolgovechnost metallov* [Influence of the medium on the strength and durability of metals]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1976. 127 p. (in Russ.).
- Romanov V.V. *Vliyaniye korroziionnoy sredy na tsiklicheskiy prochnost metallov* [Influence of a corrosive environment on the cyclic strength of metals]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 219 p. (in Russ.).
- Azhogin F.F. *Korroziionnoe rastreskivaniye i zashchita vysokoprochnykh staley* [Stress corrosion cracking and protection of high strength steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974. 256 p. (in Russ.).
- Oleynik N.V., Magdenko A.N., Sklyar S.P. *Soprotivleniye ustalosti materialov i detaley mashin v korroziionnykh sredakh* [Fatigue resistance of materials and machine parts in corrosive environments]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1987. 197 p. (in Russ.).
- McCafferty E. *Introduction to corrosion science*. New York, Springer, 2010. 302 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0455-3>.
- Milella P.P. *Fatigue and corrosion in metals*. Milano, Springer, 2012. 844 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-88-470-2336-9>.
- Bache M., Ball C., Hardy M., Mignanelli P. Corrosion fatigue and damage tolerance in the nickel-based superalloy RR1000 subjected to SO<sub>2</sub> environments. *Fatigue & fracture engineering materials & structures*, 2022, vol. 45, iss. 5, pp. 1537–1549. DOI: <https://doi.org/10.1111/ffe.13687>.
- McMahon M.E. Review of residual stress impingement methods to mitigate environmental fracture susceptibility. *Corrosion and materials degradation*, 2021, vol. 2, iss. 4, pp. 582–602. DOI: <https://doi.org/10.3390/cmd2040031>.
- 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>.
- Marandi L., Sen I. Effect of saline atmosphere on the mechanical properties of commercial steel wire. *Metallurgical and materials transactions A*, 2019, vol. 50, iss. 1, pp. 132–141. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4956-x>.
- Wang Y., Zheng Y. Research on corrosion fatigue performance and multiple fatigue sources fracture process of corroded steel wires. *Advances in civil engineering*, 2019, vol. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/4914359>.
- Sosnovskiy L.A. Tribofatika: problemy i perspektivy [Tribofatigue: problems and prospects]. *Materialy tematicheskoy vystavki AN SSSR "Matematika i mekhanika — narodnomu*



- khozyaystvu*” [Proc. Thematic exhibition of the Academy of Sciences of the USSR “Mathematics and mechanics – to the national economy”]. Gomel, 1989, 63 p. (in Russ.).
17. Sosnovskiy L.A. O mekhanicheskoy aktivatsii korrozionnykh protsessov pri tsiklicheskom nagruzhении [On mechanical activation of corrosion processes under cyclic loading]. *Tezisy dokladov mezhpriblitskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Povyshenie nadezhnosti i dolgovechnosti mashin i sooruzheniy”* [Abstracts of papers of interrepublican scientific and technical conference “Improving the reliability and durability of machines and structures”]. Kiev, 1991, pp. 83–84 (in Russ.).
  18. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A. *Tribofatika: iznosoustalostnye povrezhdeniya v problemakh resursa i bezopasnosti mashin* [Tribo-fatigue: wear-fatigue damage in the problems of lifetime and safety of machines]. Moscow–Gomel, NPO “TRIBO-FATIKA” Publ., FTsNTP “Bezopasnost” Publ., 2000. 304 p. (in Russ.).
  19. Sosnovskiy L.A., Bogdanovich A.V., Sherbakov S.S. Korrozionno-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.).
  20. Sosnovskiy L.A., Bogdanovich A.V., Sherbakov S.S. Korrozionno-mekhanicheskaya ustalost: problemy prognozirovaniya. Chast 2. Obratnyy effekt. Vliyaniye napryazheniy na skorost korrozii [Corrosion-mechanical fatigue: the problems of forecasting. Part 2. Reverse effect. Influence of stresses on the corrosion rate]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2023, no. 2(63), pp. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-61-68> (in Russ.).
  21. Pokhmurskiy V.I., et al. O vliyaniy nekotorykh pokrytiy na ustalostnyuyu i korrozionno-ustalostnyuyu prochnost stali Kh17N2 [On the effect of some coatings on the fatigue and corrosion-fatigue strength of steel X17H2 (Kh17N2)]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov*, 1965, no. 6, pp. 694–696 (in Russ.).
  22. Parkins R.N. Predictive approaches to stress corrosion cracking failure. *Corrosion science*, 1980, vol. 20, iss. 2, pp. 147–166. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(80\)90128-6](https://doi.org/10.1016/0010-938X(80)90128-6).
  23. Devine T.M. Corrosion of iron-base alloys. *Treatise on materials science & technology*, 1983, vol. 25, pp. 201–234. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-341825-8.50012-X>.
  24. Nelson H.G. Hydrogen embrittlement. *Treatise on materials science & technology*, 1983, vol. 25, pp. 275–359. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-341825-8.50014-3>.
  25. Romaniv O.N., Nikiforchin G.N. *Mekhanika korrozionnogo razrusheniya konstruktsionnykh splavov* [Corrosion fracture mechanics of structural alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 293 p. (in Russ.).
  26. Glikman L.A. *Korrozionno-mekhanicheskaya prochnost metallov* [Corrosion-mechanical strength of metals]. Moscow–Leningrad, Mashgiz Publ., 1955. 176 p. (in Russ.).
  27. *Corrosion fatigue: chemistry, mechanics and microstructure*. Houston, National Association of Corrosion Engineers, 1972. 780 p.
  28. Ryabchenkov A.V. *Korrozionno-ustalostnaya prochnost stali* [Corrosion-fatigue strength of steel]. Moscow, Mashgiz Publ., 1953. 180 p. (in Russ.).
  29. Bogdanovich P.N., Prushak V.Ya. *Trenie i iznos v mashinakh* [Friction and wear in machines]. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1999. 374 p. (in Russ.).