

УДК 620.178.3

Е. С. ТАРАНОВА, аспирантка, Л. А. СОСНОВСКИЙ, доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ВЛИЯНИЕ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ: ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

Представлен анализ влияния среды на свойства циклически деформируемых металлов. Показано, что среда вызывает необратимое изменение их свойств.

Систематизация данных по коррозионной усталости приводит к схеме «скольжения с растворением», в соответствии с которой повреждение материала происходит из-за разрушения защитной пленки и последующего проникновения трещины в металл путем его растворения. Систематизация данных по водородной усталости приводит к схеме «переноса с растворением», согласно которой вредное влияние водорода на процесс разрушения металла является результатом конкуренции между «химическим» повреждением от взаимодействия металл-водород и «механическим» повреждением от воздействия приложенного напряжения. Развитие представлений о коррозионно-механической усталости с позиций трибофатики приводит к представлению об адсорбционной усталости как проявлению обратного эффекта: «диффузия с деформированием». Согласно разработанной схеме адсорбционная усталость возникает вследствие взаимодействия процессов циклического деформирования металла и адсорбции поверхностно-активных веществ (ПАВ) среды.

Общие сведения. На механические свойства материалов в процессе эксплуатации оказывают влияние различные среды: неактивные, химически активные и поверхностно-активные. Каждая из них «обеспечивает» характерные особенности воздействия на выносливость металла [1–10]. В работе [2], по-видимому, впервые дана экспериментально обоснованная классификация механизмов повреждения металлов под действием жидкой среды (рисунок 1). В соответствии с этой классификацией различают коррозионную, водородную и адсорбционную усталости.

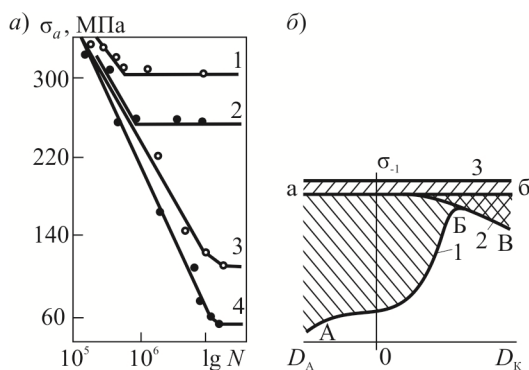


Рисунок 1 – Кривые усталости стали 45 в воздухе (1) и при адсорбционной (2), водородной (3) и коррозионной (4) усталости (а); схема снижения выносливости: от коррозионной (1), водородной (2) и от адсорбционной (3) усталости (б)

Из рисунка 1, а следует, что адсорбционная усталость (кривая 2) снижает предел выносливости стали примерно на 20 %, водородная – на 66 % (кривая 3), коррозионная усталость – почти на 92 % (кривая 4) по сравнению с усталостью в воздухе (кривая 1). Таким образом, наиболее опасной является коррозионная усталость, наименее опасной – адсорбционная. Это хорошо иллюстрирует рисунок 1, б. В средах, где происходит коррозия с водородной деполяризацией на катодных участках металла (D_K), наблюдается водородная усталость [2]. Характерной особенностью коррозионной усталости является интенсивное снижение сопро-

тивления углеродистой стали (АБ) при анодной поляризации (D_A) и значительно меньшее – при катодной (D_K) (БВ). Что касается адсорбционной усталости, то она не зависит от поляризации.

Рассмотрим известные закономерности коррозионного повреждения с точки зрения трибофатики. Это означает, что необходимо установить проявление двух эффектов – прямого и обратного, которые могут наблюдаться при одновременном воздействии повторно-переменных нагрузок и агрессивной среды. При прямом эффекте (ПЭ) изучается влияние среды на снижение характеристик сопротивления усталости металлических образцов, при обратном (ОЭ) – механическая активация физико-химических процессов среды и изменение свойств среды при ее длительном взаимодействии с механически возбужденной поверхностью металла. Эти явления впервые обсуждались в работе [1] и могут быть пояснены рисунком 2.

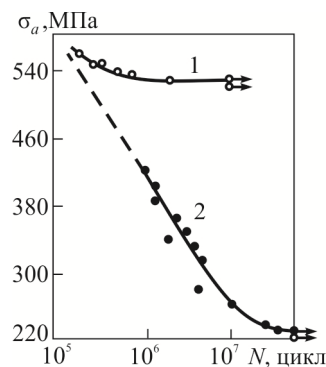


Рисунок 2 – Кривые усталости образцов стали X17H2 в воздухе (1) и в 3%-ном растворе NaCl (2)

Анализ рисунка показывает, что если $\sigma_a \geq \sigma_{-1}$ ($\sigma_a > 530$ МПа), то долговечность зависит в основном от уровня амплитуды напряжений, и смещение кривой 2 относительно первой объясняется прямым эффектом [1]. Чем выше σ_a , тем слабее влияние среды. Если $\sigma_a < \sigma_{-1}$, то усталостное разрушение происходит лишь при одновременном действии циклических напряжений

и среды. Циклические напряжения интенсифицируют местное повреждение от действия среды, а последняя, в свою очередь, – усталостное разрушение (ПЭ). Значит, участок кривой 2 при $\sigma_a < 530$ МПа обусловлен обратным эффектом (ОЭ) [1].

Если ПЭ исследуется давно и тщательно [1–10], то ОЭ лишь в единичных работах [1, 11, 12]. Ниже основное внимание уделено описанию ОЭ.

Коррозионная усталость: обратный эффект. В работе [1] представлена схема (рисунок 3), согласно которой могут быть описаны основные механизмы повреждения от коррозионной усталости. В основе схемы лежит модель "скользя с растворением", связывающая развитие повреждений с механическим разрывом защитной пленки и проникновением трещины в металл [1, 13, 14]. Согласно рисунку 3 циклическое деформирование металла в пределах опасного объема V_{py} приводит к трем основным эффектам (позиции 1–3) и, в то же время, его окисление под воздействием коррозионной среды сопровождается тремя основными явлениями (те же позиции 1–3) [1].



Рисунок 3 – Циклическое деформирование металла в пределах опасного объема

Из рисунка 3 видно, что образование оксидного слоя контролируется полем циклических деформаций (позиция 3), которые способствуют разрушению защитной пленки. Затем наступает локальное повреждение металла путем его растворения по ювенильным поверхностям. Из-за повышения химической активности зон пластического деформирования – множественных участков скопления дислокаций (позиция 2), происходит растворение железа. При коррозии формирование двойного электрического слоя (рисунок 4) ускоряется и наблюдается рост его эффективности из-за повышения термодинамической активности поверхности металла циклическими напряжениями (позиция 1 на рисунке 3) [15].

На рисунке 4, а буквой П обозначена поверхность, разделяющая два ряда противоположных зарядов, неравномерное расположение которых приводит к возникновению электрического поля. На рисунке 4, б $A \rightarrow B$ – направление электрохимической реакции; ΔG^0 – изменение свободной энергии (при $\Delta G^0 > 0$ скорость реакции есть функция высоты активационного барьера ΔG^+) [1].

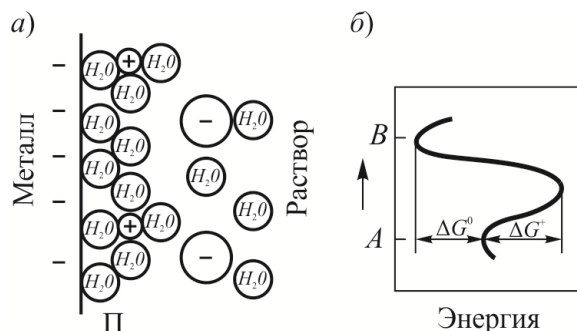


Рисунок 4 – Схема двойного электрического слоя на поверхности раздела металл – электролит (а) и диаграмма энергетического барьера в химической реакции (б)

Водородная усталость: обратный эффект. В работе [1] также представлена схема, на которой показаны основные механизмы ОЭ при водородной усталости (рисунок 5), основанная на модели "переноса с растяжением".



Рисунок 5 – Основные механизмы обратного эффекта, связанные с водородной усталостью

Циклическое деформирование металла в пределах опасного объема V_{py} приводит к трем основным эффектам (позиции 1–3). С другой стороны, процесс переноса водорода приводит также к трем основным явлениям (те же позиции 1–3).

На рисунке 5 показано, что движение дислокаций при циклическом деформировании ускоряет процесс переноса водорода по дислокациям (позиция 3), а возбуждение градиента напряжений интенсифицирует его диффузию по междоузлиям в матрице (позиция 2), что

приводит к повышению скорости образования множественных локальных повреждений металла. Повышение термодинамической активности поверхности металла механическими напряжениями вызывает процессы адсорбции атомов водорода на поверхности, диссоциации его молекул, хемосорбции (позиция 1) [1].

На рисунке 6 показана одна из схем, которая иллюстрирует процесс переноса водорода, приводящий к охрупчиванию конструкционного сплава [1].

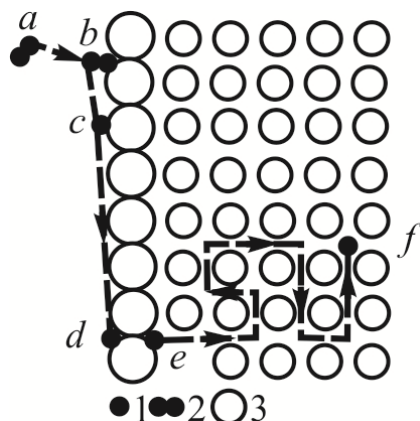


Рисунок 6 – Схема переноса водорода

Согласно рисунку 6 перенос водорода осуществляется согласно следующим стадиям: $a \rightarrow b$ – 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 [1].

Адсорбционная усталость: обратный эффект. По имеющимся сведениям в литературе отсутствует анализ адсорбционной усталости, подобный тому, как это описано выше для коррозионной и водородной усталости.

Основные механизмы обратного эффекта при адсорбционной усталости можно описать согласно рисунку 7. 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 поверхностной 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 [2].

На рисунке 8 представлена известная схема расположения адсорбированных молекул на поверхности твердого тела.



Рисунок 7 – Основные механизмы обратного эффекта, связанные с адсорбционной усталостью

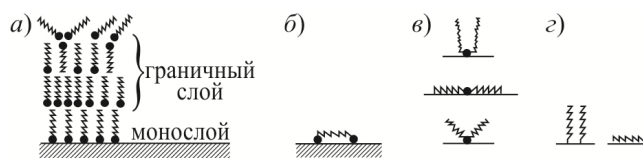


Рисунок 8 – Схема расположения адсорбированных молекул на поверхности твердого тела

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 8, 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 8, б) молекулы располагаются параллельно поверхности твердого тела. Если полярная группа размещена посередине молекулы (см. рисунок 8, в), а также в случае адсорбции молекул неполярного вещества (см. рисунок 8, г) возможно как вертикальное, так и "лежачее" расположение молекул. Процесс адсорбции протекает постепенно до тех пор, пока не достигается насыщение граничного слоя молекулами адсорбата [16].

Из рисунков 1, 3, 5 и 7 видно, что время (число циклов до разрушения) и уровень циклических напряжений являются весьма "сильными" параметрами, которые управляют процессами водородной, адсорбционной и особенно коррозионной усталостей [1].

Таким образом, в данной работе: 1) изложены общие закономерности влияния среды применительно к явлению механической усталости; 2) дано обобщенное описание механизмов коррозионной и водородной усталости; 3) предложена общая схема процессов и механизмов адсорбционной усталости.

Список литературы

- 1 **Сосновский, Л. А.** Трибофатика: износосталостные повреждения в проблемах ресурса и безопасности машин / Л. А. Сосновский, Н. А. Махутов. – Москва-Гомель : ФЦНТП "Безопасность" – НПО "ТРИБОФАТИКА", 2000. – 304 с.
- 2 **Карпеченко, Г. В.** Влияние среды на прочность и долговечность металлов / Г. В. Карпеченко. – Киев : Наукова думка, 1976. – 128 с.
- 3 **Гликман, Л. А.** Коррозионно-механическая прочность металлов / Л. А. Гликман. – М. : Машгиз, 1955. – 230 с.
- 4 **Пахмурский, В. И.** Коррозионная усталость металлов / В. И. Пахмурский. – М. : Metallurgia, 1989. – 206 с.
- 5 **Олейник, Н. В.** Сопротивление усталости материалов и деталей машин в коррозионных средах / Н. В. Олейник, А. Н. Магденко, С. П. Скляр. – Киев : Наукова думка, 1987. – 200 с.
- 6 **Романив, О. Н.** Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов / О. Н. Романив, Г. Н. Никифорчин. – М. : Metallurgia, 1986. – 293 с.
- 7 **Романов, В. В.** Влияние коррозионной среды на циклическую прочность металлов / В. В. Романов. – М. : Наука, 1969. – 219 с.
- 8 Corrosion fatigue / edited by O. Devereus [et al.]. – Houston, Texas : National Ass. of Corrosion Eng, 1972. – 172 p.
- 9 **Рябченков, А. В.** Коррозионно-усталостная прочность стали / А. В. Рябченков, под ред. Г. В. Акимова. – М. : Машгиз, 1953. – 179 с.
- 10 **Ткаченко, Н. Н.** Физико-химическая механика материалов / Н. Н. Ткаченко, А. В. Болтарович, Т. В. Карпенко. – 1965. – № 5. – С. 386.
- 11 **Сосновский, Л. А.** Трибофатика: проблемы и перспективы: доклад на тематической выставке АН СССР "Математика и механика – народному хозяйству" / Л. А. Сосновский. – Гомель : БелИИЖТ, 1989. – 65 с.
- 12 **Сосновский, Л. А.** Тезисы докладов 4-й Республиканской НТК. Ч. 2 / Л. А. Сосновский. – Киев : ИПП АН УССР, 1991. – С. 83–84.
- 13 The Theory of Stress Corrosion Cracking in Alloys / J. C. Scully [ed.]. – Brussels : NATO, 1971. – 471 p.
- 14 **Parkins R. N.** Environment Sensitive Fracture and its Prevention / R. N. Parkins // British Corrosion Journal. – 1979. – Vol. 14. – No 1. – P. 5–14.
- 15 **Дивайн, Т. М.** Коррозия сплавов на основе железа / Т. М. Дивайн, под ред. К. Л. Брайнента и С. К. Бенерджи; пер. с англ. – М. : Metallurgia, 1988. – С. 188–217.
- 16 **Богданович, П. Н.** Трение и износ в машинах: учеб. для вузов / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак. – Мн. : Выш. шк., 1999. – 374 с.

Получено 31.10.2011

E. S. Taranova, L. A. Sosnovsky. Influence of the working environment on resistance of fatigue of materials: the review of researches.

The analysis of influence of environment on properties of cyclically deformable metals is presented. It is shown that environment causes irreversible change of their properties.

Ordering of the data on corrosion fatigue leads to the scheme «slidings with dissolution» according to which material damage occurs because of destruction of a protective film and the subsequent penetration of a crack into metal by its dissolution. Ordering of the data on hydrogen fatigue leads to the scheme «carrying over with dissolution» according to which the adverse effect of hydrogen on process of destruction of metal grows out of a competition between "chemical" damage from interaction metal-hydrogen and "mechanical" damage from influence of the enclosed pressure. Development of representations about corrosion-mechanical fatigue from positions tribo-fatigue leads to representation about adsorption to fatigue as to boomerang effect display: «diffusion with deformation». According to the developed scheme adsorption the fatigue arises owing to interaction of processes of cyclic deformation of metal and adsorption of surface-active substances of environment.