

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Г. В. КАРПЕНКО

О МЕХАНИЗМЕ КОРРОЗИОННОЙ УСТАЛОСТИ

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 10 II 1951)

Известно, что под действием циклической нагрузки в коррозионно-активной (агрессивной) среде усталостная прочность металла, по сравнению с его прочностью в инертной среде (сухом воздухе), значительно снижается<sup>(1)</sup>, причем в первом случае выносливость металла (условный предел выносливости) будет зависеть не только от величины напряжения, но и от времени пребывания в среде\*.

Переменное напряжение от циклической нагрузки, не влияя на усиление общей коррозии, вызывает развитие «глубинной» коррозии\*\*. В результате этого процесса поверхность металла, как показали наши исследования, покрывается множеством микротрещин, содержащих продукты окисления, в основном транскристаллитных и в меньшей части интеркристаллитных. В инертной среде количество микротрещин, развивающихся под влиянием переменных напряжений, значительно меньше и зависит от величины коэффициента циклической перегрузки, причем при малых коэффициентах, характеризующих интервал усталостных изломов<sup>(2)</sup>, может наблюдаться только появление одной видимой трещины усталости. В отличие от этого, в коррозионной среде, даже при коэффициенте циклической перегрузки, равном 1 (условном пределе выносливости), исследуемый металл весь покрывается перпендикулярными к действующим напряжениям микротрещинами (см. рис. 1).

Механизм разрушения металла от коррозионной усталости недостаточно изучен. Весьма распространено мнение о межкристаллитном характере усталостной коррозии. Предполагают, что «в коррозионных средах, являющихся электролитами, процесс коррозионной усталости развивается как процесс электролитической коррозии, особенно в начальный период ее развития»<sup>(3)</sup>.

Ни одна из существующих схем механизма коррозионной усталости не объясняет ряда явлений, происходящих при циклической работе стали в коррозионной среде, и, в частности, не объясняет, почему протекторная защита и электрозащита не ликвидируют полностью снижение предела усталости<sup>(3, 4)</sup>, а подвод анодного тока к циклически нагруженной детали, увеличивая в десятки раз ее общую коррозию и потерю в весе, не меняет условного предела усталости<sup>(3)</sup>. В связи с этим мы

\* В коррозионных средах невозможно получить истинный предел выносливости, так как с увеличением числа циклов нагружений (времени пребывания в среде) предел выносливости непрерывно снижается. Условились считать максимальное напряжение, которое выдерживает без поломки образец в коррозионной среде  $10^7$  или  $2 \cdot 10^7$  циклов нагружений, условным пределом выносливости.

\*\* Этот термин мы вводим для обозначения коррозии, протекающей от поверхности в глубину металла в малом его объеме. Межкристаллитная коррозия представляет частный случай «глубинной» коррозии.

предприняли ряд экспериментальных исследований\*, в связи с которыми, на основе теории П. А. Ребиндера об адсорбционном облегчении деформаций и разрушения твердого тела (5), мы предлагаем новую схему механизма протекания коррозионной усталости.

На рис. 2 представлен внешний вид двух образцов из стали 20Х (структура перлит + феррит, образцы шлифованные), растянутых на

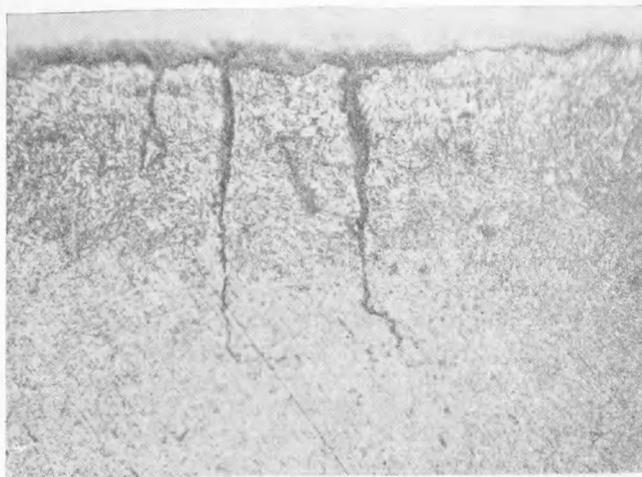


Рис. 1. Микротрещины коррозионной усталости. Сталь 40Х сорбитной структуры. Образцы работали в  $H_2O \times 500$ . Репрод. 3:4

5-тонной универсальной машине, после того как образцы подвергались циклическому нагружению на усталостной машине при чистом изгибе с

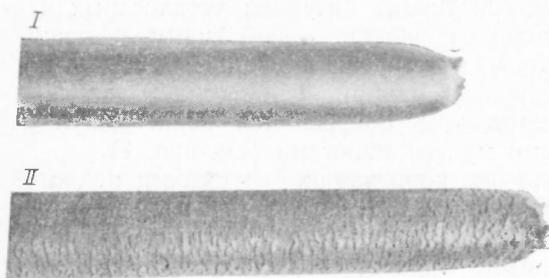


Рис. 2

вращением. Первый образец (I), работая в воздухе при напряжении, равном пределу усталости  $\sigma = 28,9$  кг/мм<sup>2</sup>, прошел  $10^7$  циклов нагружений. Второй образец (II), работая в воде при напряжении, равном условному пределу усталости  $\sigma = 19$  кг/мм<sup>2</sup>, прошел также  $10^7$  циклов нагружений. Оба образца находились под напряжением в соответствующих средах по 60 час.

Поверхность образца I после усталостных испытаний в воздухе выглядела гладко шлифованной, без видимых трещин. После растяжения трещин не обнаружилось, но поверхность стала слегка шероховатой. Поверхность образца II после усталостных испытаний в воде была покрыта незначительной по глубине общей коррозией, без местных изъязвлений. Видимых трещин также не было. После растяжения весь образец покрылся раскрывшимися поперечными линзообразными трещинами, хорошо видимыми на рис. 2.

При скручивании образцов, работавших при условном пределе усталости в коррозионной среде, появлялось также значительное количество трещин, перпендикулярных к поверхности (к оси) образца.

\* Исследования проводились в динамической и металлографической лабораториях Института строительной механики АН УССР.

Металлографические исследования образцов из различных сталей после их работы при циклической нагрузке в воздухе при напряжении, равном пределу усталости, показали отсутствие микротрещин усталости как в продольном, так и в поперечном сечении образца. У образцов, работавших при тех же условиях в воде, в поперечном сечении трещин не обнаруживалось, в продольном же сечении обнаруживалось большое количество трещин, поперечных к оси образца. У крупнозернистых сталей (структура перлит + феррит) трещины чаще всего имели транскристаллитный характер, начинаясь под некоторым, близким к  $90^\circ$ , углом к поверхности; у сталей мелкозернистых (сорбитной структуры) трещины проходят через значительное число зерен и идут перпендикулярно к поверхности и оси образца.

На рис. 1 представлено продольное сечение образца стали 40X (сорбитной структуры), проработавшего в воде на условном пределе усталости  $10^7$  циклов. Здесь средняя глубина трещин  $40-80 \mu$  и доходит в отдельных случаях до  $100-150 \mu$ . В устьях трещин, достигавших  $1-4 \mu$  по ширине, обнаруживалось скопление продуктов коррозии, достигающих до  $1/4-1/5$  глубины трещины. Глубинные части трещин имеют волосовидный характер.

Проведенные нами исследования указывают на избирательность глубинной коррозии под влиянием напряжений. Прокорродировавшими оказываются трещины, расположенные перпендикулярно к действующим максимальным напряжениям. Эта коррозия не имеет межкристаллитного характера, так как в последнем случае были бы обнаружены трещины как в продольном, так и в поперечном сечении образца, идущие под различными углами к поверхности, а при скручивании образца, пораженного межкристаллитной коррозией, должны были бы открыться трещины, расположенные под  $45^\circ$  к оси образца. Таким образом, объяснить явление коррозионной усталости на основании теории межкристаллитной коррозии нельзя, на что, в частности, указывает Г. В. Акимов (1).

Объяснение избирательности глубинной коррозии под действием напряжений, а также невозможности полностью ликвидировать снижение предела усталости протекторной или электрозащитой мы видим в следующей, предлагаемой нами схеме механизма усталостной коррозии.

Под влиянием циклической нагрузки в наиболее слабых местах кристаллической решетки металла будут происходить сдвиги. Адсорбция ионов из электролитической коррозионно-агрессивной среды на поверхности металла и адсорбция поверхностно-активных веществ из водных растворов значительно облегчают образование этих сдвигов и умножают их число, как это показано опытами над монокристаллами П. А. Ребиндера, В. И. Лихтмана и сотр. В этих опытах было установлено снижение предела текучести и измельчение пачек скольжения, т. е. увеличение их числа под действием адсорбции (6). Это объясняется увеличением числа развивающихся при деформации обратимых ультрамикротрещин, появление и развитие которых на основе слабых мест в решетке поверхностных зерен металла облегчается вследствие понижения его поверхностной энергии в результате адсорбции. Под влиянием адсорбционного эффекта Ребиндера обратимые ультрамикротрещины при циклической нагрузке раздвигаются адсорбционными слоями и дают начало многочисленным микротрещинам усталости, которые в инактивной среде не получили бы развития (7).

Описанный процесс адсорбционного облегчения деформации и разрушения (образование микротрещин усталости) начинается сейчас же после приложения циклической нагрузки к испытываемому образцу в коррозионной среде (электролите), так как латентный период, необходимый для адсорбции, весьма короток. Этот процесс вызывает развитие большого числа микротрещин усталости, ориентированных перпен-

дикулярно к действующим нормальным (растягивающим) напряжениям, так как адсорбционный эффект Ребиндера будет действовать только в ультрамикротрещинах, рост которых возможен под влиянием действующих напряжений.

Вслед за образованием микротрещин начинается электрохимический коррозионный процесс внутри трещин. Коррозия вызывает дополнительные напряжения в местах образования трещин (4). Продукты коррозии, заполняя микротрещины, препятствуют их захлопыванию под действием внешних сил и содействуют их росту как в глубину, так и в ширину (так как объем продуктов превышает объем исходного материала).



Рис. 3. Влияние на усталостную прочность стали окружающей среды. I — неактивная среда, II — поверхностно-активная среда, III — коррозионно-активная среда

Таким образом, в явлениях коррозионной усталости сочетаются два процесса: первичный, заключающийся в адсорбционном облегчении развития микротрещин усталости под влиянием циклической нагрузки, и вторичный, собственно коррозионный процесс (электрохимическая коррозия) внутри уже образовавшихся трещин, способствующий их дальнейшему росту.

Предложенная схема механизма коррозионной усталости хорошо иллюстрируется рис. 3, схематически показывающим на

основании наших опытов влияние окружающей среды на усталостную прочность стали. Здесь снижение предела усталости в коррозионной среде состоит из: а) снижения под влиянием адсорбционного эффекта Ребиндера; б) снижения под влиянием собственно коррозии.

Наша схема объясняет избирательность «глубинной» коррозии, предпочтительность образования транскристаллитных трещин и невозможность полностью ликвидировать снижение предела усталости при помощи протекторной или электрозащиты. Защита, подавляя электрохимический процесс коррозии внутри трещин, ликвидирует за счет этого соответствующее снижение предела усталости, но не воздействует на адсорбционное снижение предела усталости, которое, согласно нашим исследованиям, может быть значительным (8).

Очевидно, что при коррозионной усталости разрушение в конечной своей стадии происходит в результате отрыва (под действием нормальных напряжений).

Отдел дисперсных систем  
Института физической химии  
Академии наук СССР

Поступило  
25 I 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Г. В. Акимов, Теория и методы исследования коррозии металлов, изд. АН СССР, 1945. <sup>2</sup> И. А. Одинг, Структурные признаки усталости металлов, изд. АН СССР, 1949. <sup>3</sup> А. В. Рябченков, ЦНИИТОМАШ, кн. 31, 1950, стр. 5. <sup>4</sup> Ю. Р. Эванс, Коррозия, пассивность и защита металлов, 1941. <sup>5</sup> П. А. Ребиндер, ЖТФ, 2, № 7—8, 726 (1932); Юбил. сборн. АН СССР, 1947, стр. 533. <sup>6</sup> П. А. Ребиндер и В. И. Лихтман, ДАН, 56, № 7 (1947). <sup>7</sup> Г. В. Карпенко, ДАН, 74, № 1 (1950). <sup>8</sup> Г. В. Карпенко, Докл. АН УССР, № 3, № 6 (1949); ДАН, 73, № 6 (1950).