

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Действительный член АН БССР Н. С. АКУЛОВ, И. П. МАЗИН  
и Я. И. ФЕЛЬДШТЕЙН

ОБ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ

Явление усталости, приводящее к разрушению металла под действием переменной нагрузки, имеет исключительно важное значение как в практическом отношении, так и в смысле решения некоторых теоретических вопросов в области металлофизики. Исследованию явления усталости посвящено большое количество работ. Тем не менее, физический механизм этого явления до сих пор недостаточно выяснен. Известно, что после определенного числа циклов  $N$  при данной амплитуде вибрационного напряжения  $A$  металл разрушается. Разрушение непосредственно вызывается появлением трещин усталости, которые, зародившись и достигнув некоторой критической площади, начинают быстро расти за счет перераспределения и концентрации напряжений у кромки трещин. Таким образом, проблема вскрытия природы усталости сводится к выяснению механизма зарождения и развития трещин (расслоений), дальнейший рост которых приводит к разрушению.

Существующие эмпирические соотношения, устанавливающие связь между  $A$  и  $N$ , крайне разнообразны. Так, Иден, Роз, Коннингхэм<sup>(2)</sup> дают формулу  $A = cN^a$ , где  $c$  и  $a$  — константы, зависящие от материала и способа испытаний. Стомейер<sup>(2)</sup> на основе своих экспериментов приходит к соотношению  $A = \sigma_D + c \left( \frac{10^6}{N} \right)^{1/4}$ , где  $\sigma_D$  — амплитуда цикла при бесконечном числе циклов. Однако эти закономерности применимы лишь для весьма узкой области изменения  $A$  и  $N$ . Орован и Н. Н. Афанасьев<sup>(5, 6)</sup>, рассматривая усталость как особый род пластической деформации, приходят к соотношению типа

$$Bn = \ln \frac{\sigma_m - \sigma_y}{\sigma_m - \sigma_f}, \quad (1)$$

где  $B$  — коэффициент, зависящий от формы кривой упрочнения,  $\sigma_y$  и  $\sigma_f$  — напряжения, соответствующие пределу упругости и пределу пластического течения, определяемые из кривой упрочнения,  $\sigma_m$  — максимальное напряжение в так называемой «пластической» области, зависящее от внешнего напряжения, и  $n$  — число циклов до появления расслоения в пластической области. Эта формула дает качественное согласие с опытом. Однако при количественном сопоставлении с опытом возникают трудности, так как теория не дает количественной связи между  $n$  и  $\sigma_m$ , с одной стороны, и непосредственно определяемыми величинами  $N$  и  $A$ , с другой.

Поэтому можно присоединиться к мнению, что «явление усталости металлов — настолько сложный вопрос, что и до сего времени он

далеко не разработан в той степени, которая соответствовала бы современному состоянию машиностроения» (1). В настоящей работе на основе простой физической модели образования первичных трещин усталости устанавливается соотношение между  $A$  и  $N$ , которое дает хорошее совпадение с экспериментальными данными различных авторов.

Как известно, однородные, хорошо отожженные чистые металлы с хорошо выраженной решеткой имеют весьма низкий предел упругости. Уже под действием весьма малых усилий в них появляются сдвиги, чаще всего вдоль плоскостей, наиболее густо усаженных атомами, а также двойникование, которые приводят к пластическим деформациям в металле. В ходе пластической деформации происходит упрочнение металла, вследствие чего внутри него создается весьма значительная неоднородность в смысле сопротивления сдвигу отдельных частей металла. При этом создается концентрация напряжений около тех блоков или районов кристалла, которые наиболее сопротивляются сдвигу. Назовем эти районы «зацеплениями». Около таких зацеплений внутренние напряжения гораздо больше, чем средняя их величина.

Заметим, что наряду с этими, по существу «статическими», флуктуациями напряжений, которые при заданном состоянии металла не зависят от времени, могут иметь место непрерывные колебания напряжений, обусловленные тепловым движением атомов (дебаевскими волнами). Эти напряжения флуктуируют и накладываются на «статические» напряжения. Однако эти «динамические» флуктуации напряжений, вообще говоря, значительно меньше статических, и мы их здесь не будем принимать во внимание.

Пусть теперь на металл действует знакопеременная нагрузка с амплитудой  $A$ , причем постоянная нагрузка отсутствует, т. е. среднее напряжение цикла равняется нулю. При этом имеется некоторое число зацеплений со столь большой величиной концентрации напряжений около них, что если амплитуда превосходит некоторое критическое значение  $A_0$ , то происходят срывы зацеплений, приводящие к расслоению металла в этих местах. Если амплитуда меньше  $A_0$ , то зацепления не срываются, или их срывается так мало, что металл под действием знакопеременной нагрузки в течение очень большого числа циклов не разрушается.

Легко видеть, что около каждого центра, где произошло расслоение, происходит перераспределение напряжений, в результате чего по соседству с данным разрушенным зацеплением могут создаваться новые локализации напряжений около других зацеплений. Мы получаем, таким образом, цепной механизм разрушения части имеющихся и зарождение взамен этого новых центров локализации после каждого периода знакопеременной нагрузки. Именно срывы зацеплений, ведущие к образованию расслоений, приводят к образованию локализации напряжений около новых зацеплений. Следующие циклы разрушают вновь созданные центры, взамен чего регенерируются следующие. При таком механизме разрушения время одного знакопеременного цикла не будет сказываться на общей площади расслоений за один цикл.

При увеличении амплитуды знакопеременной нагрузки на  $dA$  площадь производимых расслоений за один цикл увеличится. Это обусловлено тем, что напряжение около каждого центра локализации спадает постепенно. Поэтому около каждого такого центра существует область субкритических напряжений, в которой при данной амплитуде  $A$  расслоение не происходит. При увеличении амплитуды на  $dA$  разрушение частично начинает распространяться и на эту субкритическую область. В результате величина расслоения за один цикл становится больше на некоторую величину  $dS$ . Величина дополнительно захваты-

ваемой субкритической области будет тем больше, чем больше величина той критической области, вокруг которой расположена область субкритических напряжений. Таким образом, величина  $dS$  пропорциональна  $S$ , где  $S$  — общая площадь расслоения в единице объема за один цикл, т. е.

$$dS = aS dA, \quad (2)$$

где  $a$  — коэффициент пропорциональности. Из (2) следует

$$S = S_0 e^{a(A-A_0)}, \quad (3)$$

где  $A > A_0$ , т. е. при  $A = A_0$  в образце за один цикл создаются расслоения площадью  $S_0$  в единице объема. Вследствие неоднородности образца число появляющихся расслоений, отнесенное к единице объема, может быть различно. Нам будет интересно в дальнейшем те области металла, которые соответствуют максимуму появляющихся расслоений.

Такую часть металла будем называть районом усталостной опасности. Если средняя площадь расслоения за один цикл остается постоянной в течение большого числа циклов, то за  $n$  циклов общая площадь расслоений

$$S_n = Sn. \quad (4)$$

Когда  $S_n$  достигает некоторой критической величины  $S_k$ , изменение внутренней структуры начинает сильно влиять на общее поле напряжений. Происходит эффект слияния расслоений. В результате этого образуется макротрещина. Можно считать, что величина  $S_k$  зависит только от материала образца и не зависит от величины амплитуды, т. е. не зависит от того, каким образом достигается критическая величина

$$S_k = SN. \quad (5)$$

Отсюда имеем

$$NdS + SdN = 0. \quad (6)$$

Подставляя в (6) (2), имеем

$$\begin{aligned} N &= N_0 e^{-a(A-A_0)} && \text{при } A > A_0, \\ N &\rightarrow \infty && \text{при } A \leq A_0. \end{aligned} \quad (7)$$

Для проверки полученных теоретических соотношений мы воспользовались экспериментальными данными различных авторов (2, 7). Из

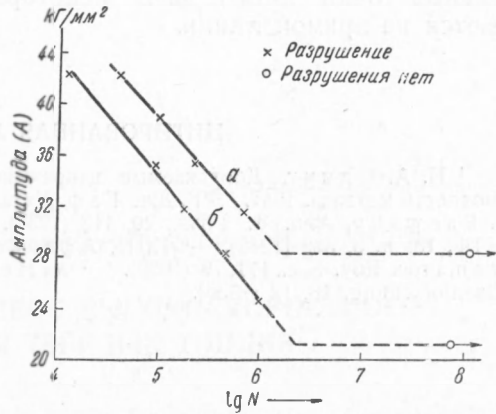


Рис. 1. Кривые усталости для углеродистых сталей. а — 0,82% С, б — 0,55% С

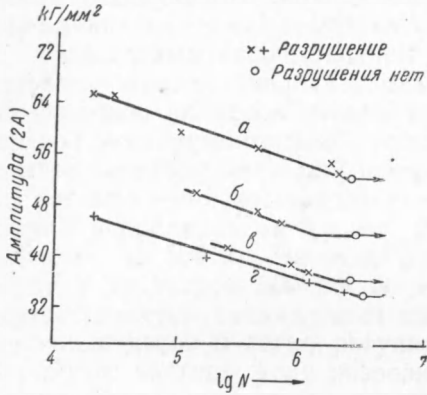


Рис. 2. Кривые усталости для сталей с присадками Мо, Сг, W. а — 0,51% Мо при 300°; б — 0,51% Мо при 400°; в — 0,51% Мо при 20°; г — 15,5% Сг, 13,3 Ni, 2,02% W при 20°

чина расслоений. В соответствии с этим число циклов  $N$ , которое необходимо для достижения критической площади расслоений, определяется соотношением

кривых видно, что теоретическая зависимость  $A$  от  $\log N$  при  $A > A_0$  представляет прямую линию с различным наклоном по отношению к оси абсцисс для разных материалов (см. рис. 1 и 2). Экспериментальные точки хотя и дают некоторый разброс, но хорошо укладываются на прямой линии.

Поступило  
8 II 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> И. А. Одинг, Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металла, 1947. <sup>2</sup> Г. Дж. Гаф, Усталость металлов, 1936. <sup>3</sup> N. Акулов и R. Raewsky, Ann. d. Phys., **20**, 113 (1934). <sup>4</sup> Н. С. Акулов и Н. З. Мирясов, ЖТФ, **18**, в. 3, 389 (1948). <sup>5</sup> Н. Н. Афанасьев, ЖТФ, **14**, 638 (1944). <sup>6</sup> E. Orowan, Proc. Roy. Soc., **171**, 79 (1939). <sup>7</sup> M. Hempel и G. Tillmann, Mitteil. KWI, Eisenforschung, **18**, 12 (1936).