

## ХАРАКТЕР РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ ИСПЫТАНИИ СТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА НА УСТАЛОСТЬ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Несмотря на то, что проблеме разрушения материалов под действием переменных нагрузок посвящено огромное количество работ и получены очень существенные результаты, интерес к данной проблеме не ослабевает ввиду ее значимости как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Усталость - это процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием знакопеременной циклической нагрузки и приводящий к изменению структуры материала, появлению дефектов, образованию трещин и разрушению материала.

Циклические напряжения могут накладываться на статическую нагрузку. При циклическом нагружении разрушение может происходить при напряжении, максимальная амплитуда которого значительно меньше минимального статического напряжения разрушения. Именно это свойство металлов доставляет столько неприятностей проектировщикам конструкций, подвергающихся вибрационным нагрузкам. К таким конструкциям относятся трактора, автомобили, самолеты и пр.. Значительное число аварий самолетов вызвано усталостным разрушением.

Разрушение образца происходит после некоторого количества циклов напряжений. Это количество циклов может исчисляться миллионами, десятками миллионов или еще большими числами. Обычно чем меньше амплитуда циклического напряжения, тем больше среднее значение числа циклов, необходимых для разрушения.

Установлено [1], что на поверхности металлического кристалла, испытываемого на усталость, появляются, в результате пластической деформации и сдвига по плоскостям скольжения под углом в 45 градусов (рис.1), небольшие и очень тонкие, как бы выдавленные из металла выступы (экструзии) и впадины (интрузии). Было предложено, что механизмы зарождения двух источников дислокаций в результате скольжения по различным плоскостям находятся недалеко от поверхности деформируемого материала в результате скольжения по плоскостям.

Предполагается, что при циклическом нагружении эти два источника поочередно смещаются относительно друг друга. Сначала активируется один источник дислокаций и вызывает скольжение в своей плоскости скольжения, как показано на рис.1, позднее активируется второй источник и также вызывает скольжение. Скольжение от второго источника смещает плоскость скольжения первого источника. Во время обратной части цикла первый источник вновь вызывает скольжение, но уже в противоположном направ-

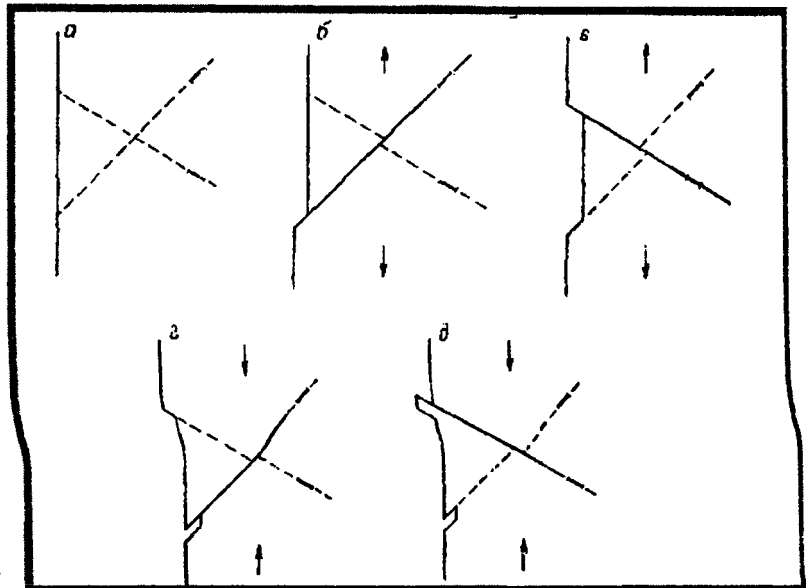


Рисунок 1- Механизм возникновения экструзий и интрузий в полосах скольжения, предложенный Коттреллом и Халлом [1]

лении. Вследствие смещения плоскости скольжения (рис.1) на поверхности кристалла образуется интрузия. Затем вновь активируется второй источник, который также вызывает скольжение в направлении, противоположном первоначальному, в результате чего образуется экструзия.

Орован [2] предложил остроумную теорию, позволяющую объяснить, почему усталостное разрушение происходит только после приложения к образцу определенного числа циклов напряжений. Он показал также причину возможного существования предела усталости. Представления Орована получили дальнейшее развитие в работах Хеда [3].

Теория Орована заключается в следующем. Рассмотрим процесс деформации некоторого критического объема материала образца. Примером критического объема служит область впереди зарождающейся трещины, которая может образоваться так, как это схематически показано на рис.1. Критическим объемом может также быть область вокруг включения в образце. Предположим, что деформационное

упрочнение металла протекает по линейному закону, и, что во время циклического нагружения деформация во всем образце будет упругой, за исключением критического объема. В критическом объеме концентрация напряжений может вызвать пластическую деформацию. Далее допустим, что упруго деформированная область вокруг критического объема заставляет этот объем расширяться и сжиматься при циклах с постоянной амплитудой деформации.

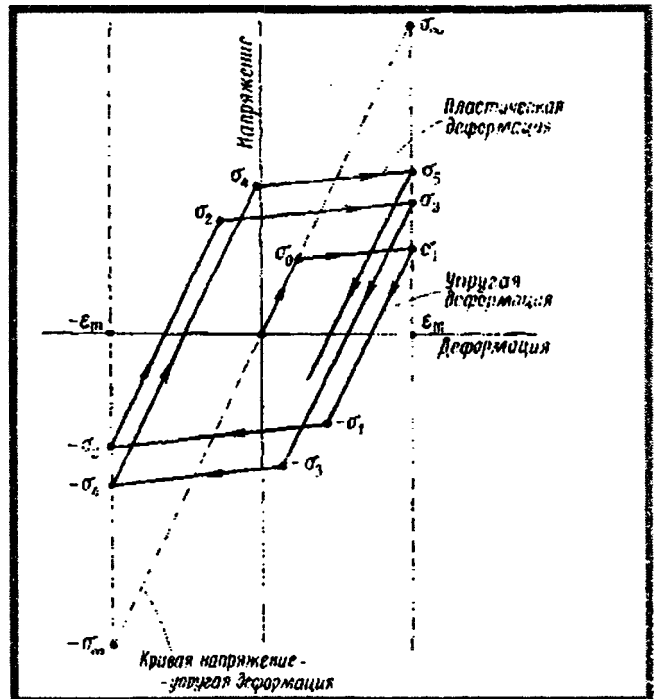


Рисунок 2

Общая деформация в критическом объеме представляет сумму упругой и пластической деформаций (рис.2). Процесс изменения напряжений и деформаций в циклически деформируемом критическом объеме показан на рис.2. В начале процесса напряжение и деформация равны нулю. При увеличении напряжения до значения  $\sigma_0$ , равного критическому напряжению сдвига, металл деформируется упруго. При дальнейшем увеличении напряжения до значения  $\sigma_1$ , соответствующего максимальной деформации  $\epsilon_m$ , металл деформируется пластически. Далее напряжение уменьшается, а затем изменяет знак, деформация будет упругой до значения напряжения  $-\sigma_1$ . При этом напряжении начинается пластическая деформация, которая продолжается до напряжения  $-\sigma_2$ , когда достигается максимальная (отрицательная) деформация  $-\epsilon_m$ . Затем напряжение вновь изменяет знак, и цикл повторяется.

По мере того как образец продолжает упрочняться, все большая часть циклической деформации происходит за счет упругой деформации и все меньшая часть — за счет пластической деформации. С приближением числа циклов к бесконечности кривая деформации приближается к линии между  $\pm\sigma_\infty$  на фигуре (рис.2). При этом пределе деформация становится полностью упругой. Напряжение в критическом объеме изменяется в пределах

$$\pm\sigma_\infty = \pm\mu\epsilon_m,$$

где  $\mu$  — соответствующая упругая постоянная.

Если предельное напряжение  $\sigma_\infty$  больше, чем статическое разрушающее напряжение металла, то при определенном числе циклов критический объем, очевидно, разрушается. Разрушение произойдет при таком числе циклов, при котором амплитуда напряжения на рис.2 достигнет статического разрушающего напряжения. С другой стороны, если  $\sigma_\infty$  меньше, чем статическое разрушающее напряжение, то критический объем никогда не разрушит-

ся. Этот случай соответствует испытанию на усталость, проводимому при напряжениях ниже предела усталости.

Теория Орована дает правдоподобное качественное объяснение как усталостного разрушения, так и существования предела усталости. При этом не используется детальная дислокационная теория.

Представленная информация не дает полного представления о механизме формирования и роста трещины в деформируемом материале при испытании на усталость. Для получения более ясной картины нами был проведен эксперимент на упруго пластическом образце из Ст 45, который позволяет получить более полное представление о механизме роста трещины и разрушения.

На стальном образце, размером 45 x 45 мм, толщиной 10 мм, на середине одной из его сторон был выполнен V-образный надрез с углом раскрытия 45 градусов.

В вершине V-образного надреза, методом вибрационного нагружения, была выращена зародышевая трещина.

Образец, подготовленный таким образом, закреплялся в нагружающем устройстве, позволяющим прикладывать к образцу растягивающие нагрузки.

На нагружающем устройстве был смонтирован голографический интерферометр для измерения и регистрации поверхностных деформаций в зоне вершины трещины образца под действием растягивающих напряжений.

По мере увеличения растягивающей нагрузки велся постоянный контроль (под микроскопом) деформационного поля образца в зоне вершины трещины.

С ростом растягивающих напряжений в вершине трещины наблюдалось постепенное увеличение поля деформаций в виде острого языка, выступающего и растущего перед вершиной трещины до определенной величины. Затем происходил резкий, скачкообразный рост (выброс) вершины трещины на величину языка поля деформаций (Рис.3).

После такого прострела локальное поле деформаций исчезало. После очередного дополнительного увеличения напряжений начинало появляться и постепенно расти снова новое, в виде языка, поле деформаций в зоне вершины трещины. Ступенчатый процесс роста трещины повторяется каждый раз после достижения напряжением критической величины, достаточным для разрыва материала в зоне языка деформаций. Процесс циклически повторяется.

Величина (длина) языка поля деформаций по видимому определяется прочностными свойствами испытуемого материала и может быть характеристическим коэффициентом для расчетов прочностных параметров.

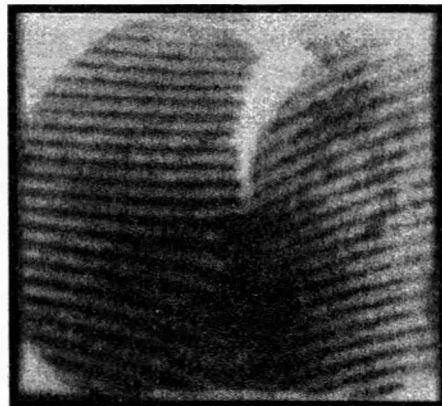


Рисунок 3

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Cottrell A., li., Dislocations and Plastic Flow in Crystals, Clarendon Press, Oxford, 1953, русский перевод: Коттрелл А. Х., Дислокации и пластическое течение в кристаллах, Металлургиздат, 1958.
2. O rowan K., Proc. Roy. Soc. (London), A171, 79 (1939).
3. Head A. K., Phil. Mag., 44, 925 (1953).