

## **ОБРАЗОВАНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН**

### **1. Постановка проблемы**

Сопротивление материалов действию нагрузок, систематически изменяющих свою величину или величину и знак, существенно отличается от сопротивления тех же материалов статическому и ударному действию нагрузок. Поэтому вопрос о проверке прочности при действии переменных нагрузок требует особого внимания.

Большинство деталей машин, подвергающихся усилиям, переменным по величине и повторяющиеся большое число раз, ломаются внезапно, без наличия заметных остаточных деформаций, при напряжениях, которым они сопротивляются при статических нагрузках вполне надежно.

### **2. Анализ исследований**

Многочисленные исследования показали, что при действии переменных напряжений в металле возникает усталостная трещина, постепенно проникающая вглубь детали. По мере развития трещины усталости поперечное сечение ослабляется все сильнее, и наконец, наступает окончательное разрушение, когда сопротивление оставшейся части сечения оказывается недостаточным. Поэтому понимание механизма возникновения и развития усталостных трещин является главным фактором при выработке правил конструирования и расчета элементов машины, которые гарантировали бы их от разрушения при переменных нагрузках.

### **3. Цели исследования**

Цель исследования этой работы состоит в попытке рассмотреть усталостное разрушение в контексте дислокационной природы усталостных процессов.

Объектом исследования является изучение механизма Коттрелла–Халла при зарождении усталостной трещины.

Предметом исследования является механизм зарождения и развития усталостных трещин при действии переменных нагрузок.

Гипотеза исследования – дислокационный механизм образования полос скольжения, вызывающих образование выступов и впадин на поверхности детали.

Задачи исследования:

1. На основе анализа научных источников раскрыть концептуальный подход при изучении этого явления.
2. Теоретически обосновать механизм зарождения усталостного разрушения.

Теоретическую основу исследования составляют основные научные положения при изучении механизма разрушения от переменных нагрузок.

Методы исследования: анализ литературы по данной тематике; анализ стадии развития данной проблемы; обобщения методов подхода к этому вопросу.

Теоретическое значение исследования состоит в научном обосновании необходимости изучения механизма зарождения и развития усталостной трещины, обоснование рациональности данного подхода у этой проблеме.

Практическое значения полученных результатов состоит в том, что понимание этого процесса дает возможность учитывать факторы влияющие на развитие трещины при конструировании и расчетах на выносливость и долговечность деталей машин.

Материалы исследования могут быть использованы преподавателями высших учебных заведений при чтении соответствующих разделов курса сопротивления материалов.

#### 4. Основной материал исследования

Усталостное разрушение, как и всякое другое, включает зарождение и распространение трещин. Как показывают рассмотренные ранее экспериментальные результаты, образование трещин связано с выступами и впадинами на поверхности образца (детали), появляющимися на ранних стадиях усталостного испытания. Таким образом, вопрос о механизме образования усталостных трещин сводится, по существу, к пониманию процессов, вызывающих появление характерных для циклического нагружения особенностей рельефа поверхности, так как тонкие полосы скольжения во внутренних зернах образца, как правило, не связаны с возникновением трещин.

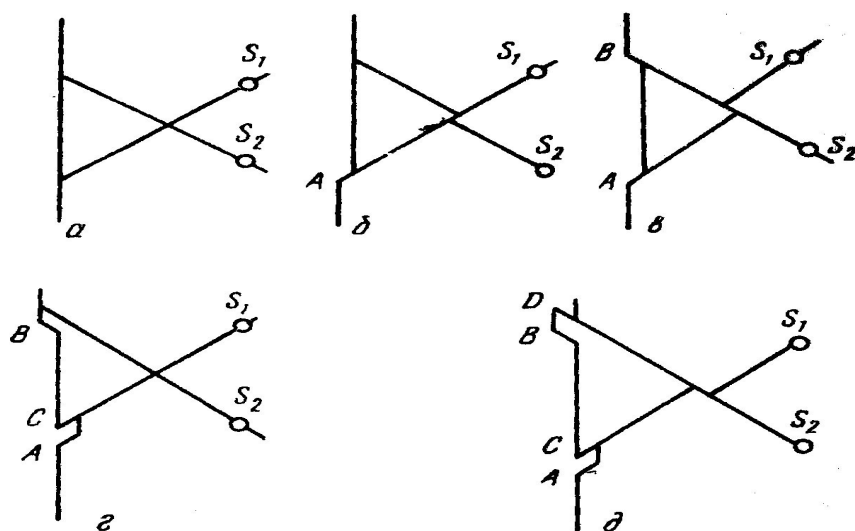
Уже само возникновение полос скольжения, вызывающих образование выступов и провалов на поверхности, указывает на дислокационный механизм процесса. Попытки связать процесс усталостного разрушения с движением точечных дефектов неубедительны, поскольку усталостные разрушения наблюдали даже при столь низких (гелиевых) температурах, при которых диффузионные процессы практически исключены.

Хотя дислокационная природа процессов, приводящих к образованию поверхностных выступов и впадин, вряд ли вызывает сомнения, современная теория усталости не имеет в своем распоряжении достаточно разработанной дислокационной модели, применение которой позволило бы объяснить совокупность экспериментальных фактов. Рассмотрим механизм Коттрелла–Халла.

Предложено по крайней мере шесть различных механизмов зарождения усталостного разрушения, каждый из которых в состоянии объяснить лишь некоторые особенности процесса. Кратко рассмотрим два из них.

Механизм Коттрелла-Халла предусматривает образование выступов и впадин на поверхности в результате скольжения по двум системам плоскостей (рис. 1) За время одного полуцикла напряжения источник  $S_1$

генерирует дислокации, образующие на поверхности ступеньку  $A$  одного направления. Затем в том же полувцикле начинает действовать источник  $S_2$  в другой плоскости скольжения, в результате работы которого на поверхности возникает ступенька  $B$  противоположного направления, а первый источник  $S_1$  смещается относительно своей плоскости скольжения. При обратном полувцикле напряжения источник  $S_1$  образует ступеньку  $C$ , не совпадающую по направлению со ступенькой  $A$  и отстоящую от нее на величину смещения, вызванного действием источника  $S_2$  за прямой полувцикл напряжения. Аналогичным образом действие источника  $S_2$  вызывает при обратном полувцикле появление ступеньки  $D$ , смещенной относительно  $B$  и не совпадающей с ней по направлению. Образовавшиеся таким образом впадины и выступы растут при последующих циклах нагружения.



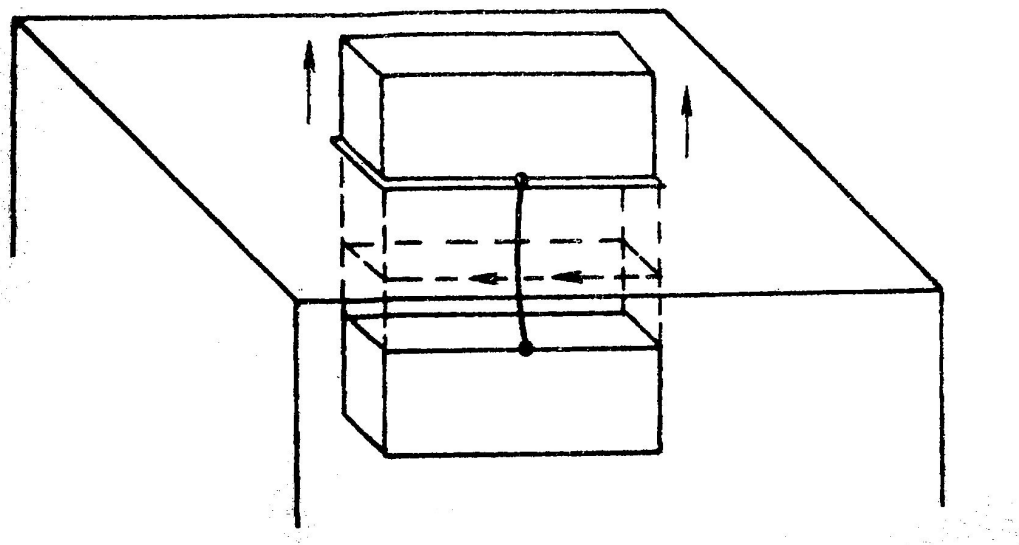
**Рис 1** – Механизм усталости по Коттреллу-Халлу:

а – исходное состояние; б – работа источника  $S_1$  в прямом полувцикле;  
 в – работа источника  $S_2$  в прямом полувцикле; г – работа источника  $S_1$  в обратном полувцикле; д – работа источника  $S_2$  в обратном полувцикле

Механизм Коттрелла—Халла объясняет возникновение выступов и провалов в соседних полосах скольжения, однако, согласно этой модели отдельная полоса скольжения должна приводить к появлению либо впадины,

либо выступа по всей длине ее пересечения с поверхностью, что не всегда подтверждается экспериментальными наблюдениями.

Перейдем к рассмотрению механизма Мотта.



**Рис. 2** – Образование выступов при циклическом движении винтовой дислокации по механизму

Механизм Мотта связывает образование выступов на поверхности с циклическим движением винтовой дислокации (рис. 2), которая за время первого полуцикла перемещается по одной поверхности полосы скольжения, а затем путем поперечного скольжения переходит к другой поверхности и движется вдоль нее при обратном полуцикле в противоположном направлении. В конце этого полуцикла дислокация снова возвращается на исходную поверхность в результате поперечного скольжения и контур ее движения, таким образом, замыкается. Следствием такого движения является перемещение объема материала, ограниченного контуром параллельно линии дислокации, на расстояние, равное ее вектору Бюргерса.

Механизм Мотта не может объяснить одновременное образование выступов и провалов. Кроме того, реализация схемы Мотта должна предусматривать действие некоторого запирающего механизма, который преобразует колебательное движение дислокации в движение по замкнутому контуру. Предпринятый Кеннеди анализ запирающего механизма с участием

барьеров Коттрелла — Ломера приводит к значительному усложнению рассматриваемой модели.

Сравнительная оценка механизмов усталостного разрушения показывает, что образование выступов и провалов, связанных с ними устойчивых полос скольжения и зародышевых микротрещин наблюдается, как отмечалось ранее, на ранних стадиях усталостного испытания. Следовательно, критической стадией усталостного разрушения является процесс распространения трещин. Между тем атомный механизм этого процесса совершенно не ясен. По-видимому, к вопросам распространения усталостной трещины применим энергетический подход Гриффитса. Однако специфические особенности циклического нагружения не дают возможности получить сколько-нибудь удовлетворительные количественные данные, которые можно было бы сравнивать с экспериментальными. Качественная картина распространения усталостной трещины довольно проста.

На ранних стадиях испытания зародившаяся усталостная трещина замедляется и на глубине  $10^{-3} - 10^{-2}$  см становится почти неподвижной (не распространяющаяся усталостная трещина). Эта остановка трещины, очевидно, связана с релаксацией растягивающих напряжений у ее вершины. Заключительная стадия роста усталостной трещины, при которой образуется большая часть собственно усталостного излома ABC, но которая по времени занимает лишь небольшую часть (около 10 %) испытания, начинается, когда трещина переходит в плоскость, перпендикулярную направлению нормального напряжения. Прогрессивное распространение трещины на этом этапе происходит скачками.

Привлекая дислокационные представления, Коттрелл следующим образом описывает рост трещины на этой стадии процесса. Во время фазы растяжения фронт трещины несколько продвигается вперед в результате действия механизма, аналогичного механизму пластичного разрушения при статическом нагружении. Рост трещины приостанавливается вследствие пластической деформации, так как напряжения, создаваемые

дислокационными скоплениями перед вершиной трещины, препятствуют ее распространению. Во время фазы сжатия острие трещины захлопывается и дислокационные скопления исчезают, однако плоскости трещины не свариваются, так что во время следующего цикла происходит новый скачок фронта трещины. Процесс повторяется до тех пор, пока поперечное сечение образца не становится достаточно малым для полного разрушения за одну фазу растяжения. Детальный анализ поверхности усталостного излома подтверждает, что каждый скачок фронта трещины происходит за один цикл нагружения, поскольку число тонких линий, отображающих последовательное положение вершины трещины, соответствует числу циклов нагружения.

### **Выводы**

- образование усталостных трещин связано с выступами и впадинами на поверхности детали, появляющимися на ранних стадиях усталостного испытания;
- возникновения полос скольжения, вызывающих образование выступов и провалов на поверхности, указывает на дислокационный характер процесса;
- механизм Коттрелла–Халла предусматривает образование выступов и впадин на поверхности в результате скольжения по двум системам плоскостей;
- механизм Мотта связывает образование выступов на поверхности с циклическим движением винтовой дислокации;
- так как некоторые положения механизмов Коттрелла–Халла и Мотта не подтверждаются экспериментально, по-видимому, логично к вопросу распространения трещины применить энергетический подход Гриффитса.

### **Список использованных источников**

1. Атомный механизм разрушения : сб. – М. : Metallurgizdat, 1993. – 174 с.
2. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов / В. Вейбулл ; пер. с англ. Т. А. Бекш, Е. С. Муслина ; под ред. С. В. Серенсена. – М. : Машиностроение, 1994. – 263 с.
3. Кеннеди А. Д. Ползучесть и усталость металлов / А. Д. Кеннеди. – М. : Metallurgiya, 1995. – 367 с.
4. Разрушение твердых тел : сб. – М. : Metallurgiya, 1992. – 286 с.
5. Усталость и выносливость металлов: сб. – 1963. – 386 с.

***Кравцов М.К., Оболенская Т.А., Безуглый С.Г.*** «Образование и распространение усталостных трещин».

Статья посвящена вопросу повышения эксплуатационных качеств деталей, так как это чрезвычайно актуально с появлением высокотехнического промышленного производства.

В статье дается анализ различных видов разрушения металлов. Процессы разрушения рассмотрены с привлечением современных теорий, базирующихся на дислокационных модулях.

***Ключевые слова:*** усталостные трещины, эксплуатация, высокотехническое производство, анализ, дислокационные модули.

***Кравцов М.К., Оболенська Т.О., Безуглый С.Г.*** «Виникнення та розповсюдження тріщин втомленості».

Стаття присвячена питанню підвищення експлуатаційних якостей деталей, що занадто актуально з появою високотехнічного промислового виробництва.

В статті надано аналіз різних видів руйнування металів. Процеси руйнування розглядаються з залученням сучасних теорій, які базуються на дислокаційних модулях.



**Ключові слова:** тріщини втомленості, експлуатація, високотехнічне виробництво, аналіз, дислокаційні модулі.

***Kravtsov M.K., Obolenskaya T.A., Bezugly S.G.*** «The formation and diffusion of the fatigue cracks».

The article is devoted to the problem of the raising the exploiting quality details, because this is very timely with appearance of high technical industrial production.

The analysis of the different aspects of the metals distruction is listed in the article. The distruction processes are examined with attraction of the modern theories, which are based on the dislocation moduluses.

***Key words:*** fatigue cracks, exploiting, high technical production, analysis, dislocation moduluses.

Стаття надійшла до редакції 28 травня 2010 р.