

# ЭНЕРГИИ ЗАРОЖДЕНИЯ ТРЕЩИН ПО ДАННЫМ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ермишкин В.А., Соловьева Ю.Б.

(ИМЕТ РАН, Москва, Россия)

Тел./факс: +7(499)1359668/+7(499) 1358680; E-mail: [eva@imet.ac.ru](mailto:eva@imet.ac.ru)

**Abstract:** In the article the question about the origin of the cracks near the front of the notch and the proposed method of estimating the energy of their origin. In view of the fact that it is equal to twice the specific surface energy, it is possible to check the obtained result. The proposed method is a modification of a method first proposed by academician I. V. Obreimov, using the loading pattern, used by D. Gilman, with respect to the single crystals being destroyed by cleavage. In view of the fact that at high magnification curve of loading on the elastic portion of the detected periodic fluctuations in the load proposed to use in calculating energy values of crack initiation line and replace it with a trend line. The obtained results had to compare with theoretical evaluation of the surface energy at Gilman due to the lack of such data in the literature for aluminum and its alloys.

## Введение

Процесс развития разрушения принято рассматривать как двух стадийный. На первой стадии в нагруженном материале образуется микротрещина, а на второй происходит ее рост [1]. Часто вторую стадию разбивают на две самостоятельные стадии: стадию стабильного подрастания образовавшейся микротрещины до критического размера (трещины Гриффитса [2]), после чего начинается стадия ее ускоренного распространения, приводящая к ее развитию в магистральную трещину, вызывающую катастрофическое разрушение материала. Энергетические условия развития разрушения материала на первой стадии характеризуются удельной энергией зарождения трещины ( $G_i$ ), на второй - энергией распространения трещины. Для оценки энергии распространения трещины нашли широкое применение подходы механики разрушения [2, 3], что позволяет определить коэффициент интенсивности напряжений (КИН) через который выражаются компоненты тензора напряжений у фронта трещины [3] и эффективное значение энергии распространения трещины. Конструкционные материалы в рамках механики разрушения рассматриваются как сплошная однородная изотропная бесструктурная среда. Для оценки КИН разработаны специальные образцы с надрезом, имитирующим трещину макроскопического размера. Для каждой моды разрушения, которые изучаются в механике разрушения (нормальный отрыв, поперечный и продольный сдвиги), существуют свои типы образцов. В частности, для определения КИН при нормальном отрыве  $K_I$  часто используются образцы для внецентренного растяжения с заданной геометрией и размерами. Толщина образцов определяет условия деформирования. При больших толщинах материал разрушается в условиях близких к плоской деформации. Для определения значения КИН по результатам испытаний образцов для внецентренного растяжения в [4] приведена формула (1):

$$K_I = \frac{P}{Wt^{3/2}} \cdot f(\alpha) \quad (1)$$

где:  $P$  - приложенная нагрузка при страгивании трещины,  $t$  - толщина образца,  $W$  - расстояние от края образца до оси приложения нагрузки,  $\alpha = a/W$ ,  $f(\alpha)$  - функция, значения которой определяются по формуле:

$$f(\alpha) = (2 + \alpha)(0,8072 + 8,858\alpha - 30,23\alpha^2 + 41,088\alpha^3 - 24,15\alpha^4 + 4,951\alpha^5)(1 - \alpha)^{-3/2}$$

В работе [6] были определены условия, при которых КИН, определенный по данным фотометрического анализа (ФАСИ), совпадал со значением, найденным по формуле (1). Целью настоящей работы является оценка удельной энергии зарождения трещины. Экспериментальная проверка полученных результатов выполнена на алюминиевом сплаве В95.

### 1. Материал и методика эксперимента

Образцы изготавливались из холоднокатанного листа толщиной 5,9 мм. Форма образца и его размеры показаны на рис.1. Форма и размеры образцов соответствовали требованиям к образцам типа «woll» за исключением требования к толщине образца, которая была равна толщине листа. Рис.1 дает представление о геометрии образцов и о его истинных размерах. Размеры, обозначенные соответствующими литерами, составили:

$W = 62$  мм.;  $a = 34$  мм.;  $t = 5,9$  мм.;  $\delta = 0,32$  мм. Образцы нагружали до появления максимума на кривой деформирования в захватах испытательной машины типа «Инстрон-3382» со скоростью 1 мм./мин. В процессе деформирования поверхность образцов непрерывно записывалась на видеокамеру синхронно с записью кривой деформирования. После испытаний производился покадровый анализ видеозаписи с заданной периодичностью с помощью фотометрического анализатора структурных изображений (ФАСИ). По результатам такого анализа удается оценить напряженно-деформированное состояние у фронта трещины

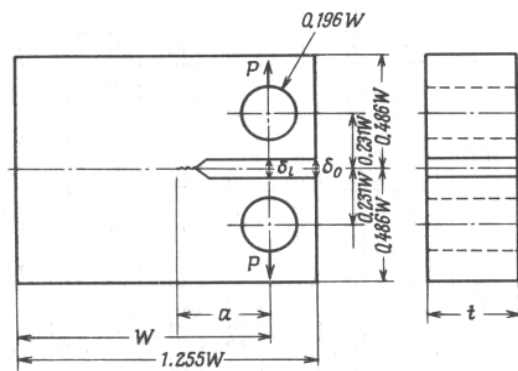
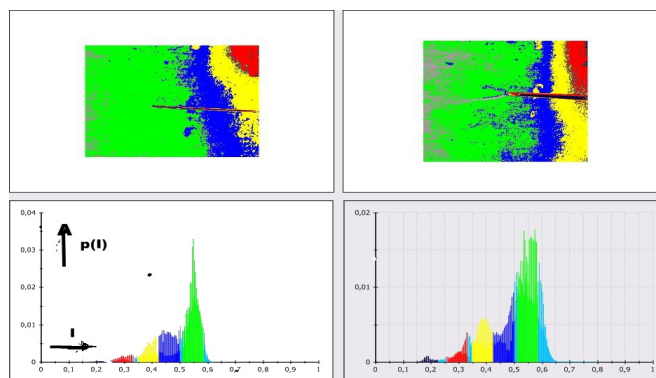


Рис.1. Образец для внецентренного растяжения

На рис.1. в качестве примера показан пример такого сравнения в ФАСИ фрагментов исследуемого образца до испытания и после его окончания. ФАСИ представляет собой программно-аналитический комплекс, в котором по дифференциальной схеме сравниваются изображения фрагментов исследуемого объекта и спектров яркости отражения от них видимого света, снятые до и после начала деформирования. Для решения задачи, поставленной в настоящей работе, была выбрана система, вложенных друг в друга фрагментов поверхности образца, окружающих вершину надреза с площадями: 0,562; 1,44; 2,69; 11,09 мм<sup>2</sup>. Изображения фрагментов до приложения нагрузки служили эталонами, сравнение с которыми позволяет обнаружить участки с наибольшими структурными изменениями, вызванных деформированием образца и получить количественную меру этих изменений. Достаточно подробное изложение принципов работы ФАСИ и техники их использования для оценки локального напряженного состояния материала в месте развития процессов разрушения содержится в [4, 5], поэтому здесь ограничимся только краткой информацией о его использовании в настоящей работе. С эталонного и исследуемого фрагментов снимаются спектры яркости отражения видимого света, над которыми выполняются алгебраические операции, позволяющие провести их детальное сравнение и по его результатам оценить изменение структурного состояния.



а)

б)

Рис.2. Сравнение фрагментов изображения и спектров яркости отражения света от них для сплава В95: а) - до деформирования, б) - после появления трещин (×0,5)

На рис.2 спектры яркости отражения видимого света от поверхности исследуемых фрагментов представлены в координатах « $p(I)$  -  $I$ », где под  $p(I)$  понимается спектральная плотность яркости отражения, описываемая формулой:

$$p(I) = \frac{n(I)}{N} \quad (1)$$

где:  $n(I)$  - число пикселей, окрашенных в определенный цвет, соответствующих яркости отражения -  $I$ ,  $N$  - число пикселей, на которое разделено все изображение.

По оси абсцисс отложено значение яркости отражения  $I$  в условных единицах линейной шкалы, в которой нулевое значение соответствует полному поглощению падающего на фрагмент видимого света, а единица - полному отражению падающего света. Предварительно на спектрах яркости отражения света до и после деформирования образцов с помощью цветового окрашивания выделяются характеристические интервалы яркости, соответствующие областям особенностей спектра. ФАСИ позволяет дать количественную оценку тех структурных изменений, которые были вызваны воздействиями различной физической природы, в нашем случае - воздействием механических напряжений. После окрашивания выделенных интервалов в спектре яркости отражения эти цвета переносятся на изображение фрагмента, с которого был получен соответствующий спектр. Тем самым удается обнаружить те структурные элементы, которые появились в результате внешнего воздействия, измерить их спектральные характеристики и после тарировки определить по ним параметры локального напряженно-деформированного состояния. В качестве количественной меры происшедших структурных изменений была использована структурная поврежденность ( $D_s$ ) исследуемого материала, вызванная внешним воздействием. Ее можно ввести разными способами, используя данные количественных измерений фотометрических характеристик спектров яркости отражения, подчинив ее начальному и конечному условиям, которые можно записать в виде:

$$D_s(0) = 0 \text{ и } D_s(t_r) = 1 \quad (2)$$

В нашем конкретном случае структурная повреждаемость выражалась формулой:

$$D_s = \frac{\varphi_t - \varphi_0}{\varphi_{\max} - \varphi_0} \quad (3)$$

где:  $\varphi_t$  - площадь под спектральной кривой в некоторый промежуточный момент времени испытаний  $t$ , численно равная энергии излучения поверхности,  $\varphi_0$  - площадь

под спектральной кривой отражения света от исследуемой поверхности до начала испытаний,  $\Phi_{\max}$  - максимальная площадь под спектральной кривой отражения от образца, находящегося под нагрузкой.

В виду того, что под нагрузкой раскрывается как надрез, так и трещина, можно воспользоваться для изучения кинетики развития разрушения измерениями величины площадей, которые были окрашены в цвет фона надреза. Энергия излучения света поверхностью образца ( $U$ ) определяется величиной внутренней энергии, аккумулированной в нем ( $Q$ ), и согласно [7] их связь можно выразить соотношением:

$$U = AQ \quad (4)$$

где:  $A$  - коэффициент, характеризующий вероятность спонтанного излучения лучистой энергии твердым телом. По данным анализа энергии отражения видимого света была разработана методика оценки средних напряжений в области развития трещины.

## 2. Анализ полученных результатов

В рамках механики разрушения получить оценку удельной энергии зарождения трещины можно экстраполировав зависимость энергии распространения трещины от ее длины ( $r$ ) к ее нулевому значению. Для построения такой зависимости по данным ФАСИ необходимо выразить безразмерные измерения энергии излучения в размерных физических единицах. Для этого можно воспользоваться измерениями ФАСИ на упругом участке кривой нагружения образца. Разность внутренних энергий материала в нагруженном и в исходном состояниях с учетом соотношения (4) выразится формулой:

$$U_{\sigma} - U_0 = B(\varphi_{\sigma} - \varphi_0) = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (5)$$

где:  $B$  - переводной размерный коэффициент,  $E$  - нормальный модуль упругости,  $\varphi_{\sigma}$  - площадь под спектральной кривой, снятой с фрагмента поверхности образца, находящегося под напряжением  $\sigma$ ,  $\varphi_0$  - площадь под спектральной кривой с того же фрагмента, но до приложения нагрузки. Напряжения у трещины находим по формуле [10]:

$$\sigma = \frac{Pa}{W} \quad (6)$$

где:  $P$  - нагрузка, приложенная к образцу на упругом участке кривой нагружения образца,  $W$  - момент сопротивления сечения образца, определяемое по формуле:

$$W = \frac{(0,485w)^2 t}{6}, \quad a - \text{расстояние от фронта надреза до оси приложения нагрузки.}$$

Параметры  $w$ ,  $a$ ,  $t$  - указаны на рис.1. Измерив значения  $\varphi_{\sigma}$  при нескольких значениях напряжений  $\sigma$  из формулы (5) найдем значение переводного коэффициента  $B$ , связывающего значения  $\sigma$  и  $\varphi$  в формуле (7):

$$\sigma = \sqrt{2EB\Delta\varphi} \quad (7)$$

Результаты оценки коэффициента  $B$  показаны на рис.3.

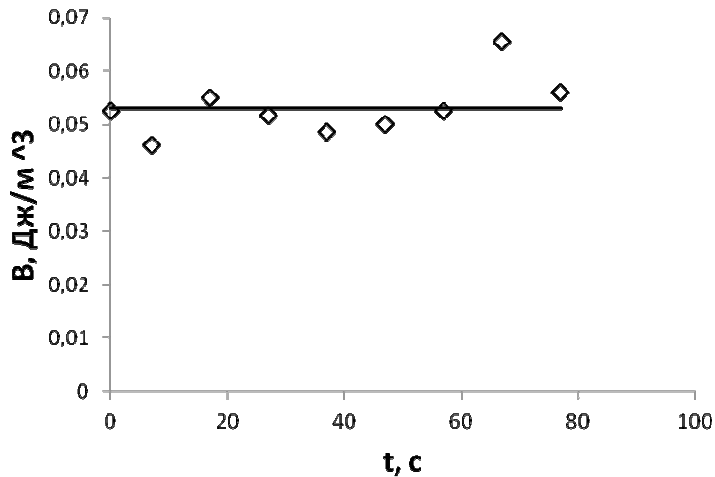


Рис.3. Изменение параметра  $B$  в процессе нагружения образца сплава В95 на упругом участке

Формула (7) позволяет определить усредненные значения напряжений по данным измерений  $\varphi$  на системе вложенных площадок. После подстановки результатов измерений в формулу (7) были получены оценки усредненных напряжений, действующих в центрах выделенных площадок. Зная расстояния этих центров от фронта трещины ( $r$ ) и значения напряжений в них из формулы (8) получали значения КИН ( $K_I$ ) [11].

$$K_I = \sigma \sqrt{2\pi r} \quad (8)$$

На рис.4 приведена зависимость КИН от расстояния от точки измерения напряжения до фронта надреза.

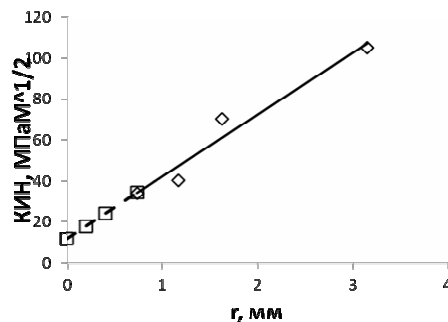


Рис.4. Величина КИН в функции удаленности точки измерения напряжений от фронта трещины

Экстраполяция этой зависимости к нулевому значению дает минимальное значение КИН, которое можно использовать для получения оценки энергии зарождения трещины из формулы [3]:

$$G_{pd} = \frac{K^2}{E} (1 - \nu^2) \quad (9)$$

Формула (9) приведена для случая плоской деформации в виду того, что испытанные образцы показали практически отсутствие поперечных деформаций. Полученная оценка  $G_{pd}$  на два порядка превышает ее разумное значение. Очевидно, что

зарождение трещины у концентратора напряжений должно происходить еще на начальном участке кривой нагружения образца. В виду того, что для энергии зарождения трещины справедлива формула (10) для оценки  $G_{pd}$  можно воспользоваться схемой Гилмана для оценки поверхностной энергии [8,9]:

$$G_{pd} = 2\gamma S \quad (10)$$

где:  $\gamma$  - поверхностная энергия материала образца,  $S$  - площадь зародившейся трещины.

Нагружение квадратного образца с размерами  $20 \times 20 \times 6$  мм<sup>3</sup> и электроискровым надрезом длиной 4 мм. Образец нагружали внедрением клина в надрез как это показано на рис.5.

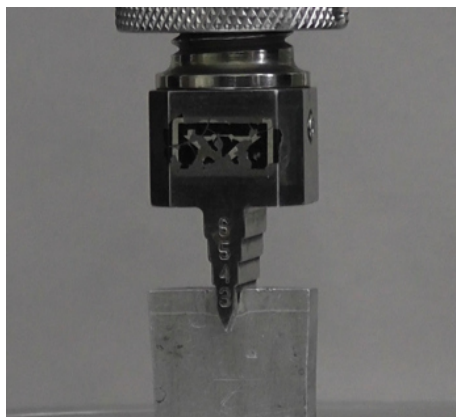


Рис.5. Общий вид нагружения образца для определения поверхностной энергии сплава В95

Внедрение клина в образец записывалось на видеокамеру с последующим фотометрическим анализом развития трещины с шагом времени 2 - 10 сек. Каждому кадру видеозаписи ставилось в соответствие значения нагрузки и величины внедрения клина в надрез. Клино внедрялся в надрез со скоростью 1 мм/мин. На рис.6. представлена кривая нагружения образца. На ней нанесена линия тренда, что позволило точнее определить на ней упругий участок. Поверхностную энергию материала по результатам эксперимента определяли как отношение работы для образования зародыша трещины к удвоенной величине ее площади по формуле:

$$\gamma = \frac{P_{i+1} \cdot f_{i+1} - P_i \cdot f_i}{2b(l_{i+1} - l_i)} \quad (11)$$

где:  $P_i$ ,  $f_i$ ,  $l_i$  – соответственно нагрузка, глубина внедрения клина в надрез, длина трещины на  $i$ -том шаге нагружения,  $b$  - толщина образца.

Значения длины трещины вычислялись в предположении ее развития в области упругого поведения образца при малых нагрузках по формуле [9]:

$$l = \left( \frac{3E J_x}{kP} \right)^{1/3} \quad (12)$$

где:  $J_x$  - момент инерции сечения балки, которая образовалась в образце после нанесения надреза на образец,  $k$  - тарировочный коэффициент, определенный с учетом исходной длины надреза.

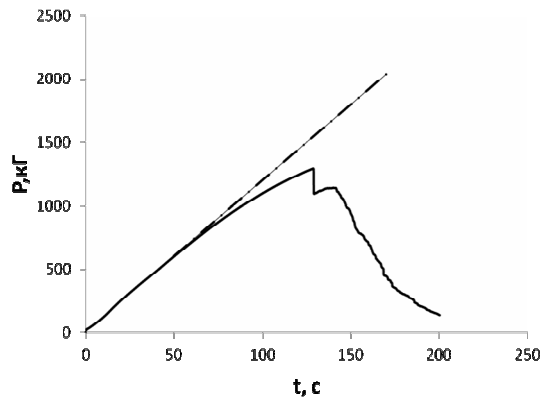


Рис.6. Кривая нагружения образца сплава В95

На рис.7 показаны результаты определения поверхностной энергии по данным на упругом участке кривой, изображенной на рис.6.

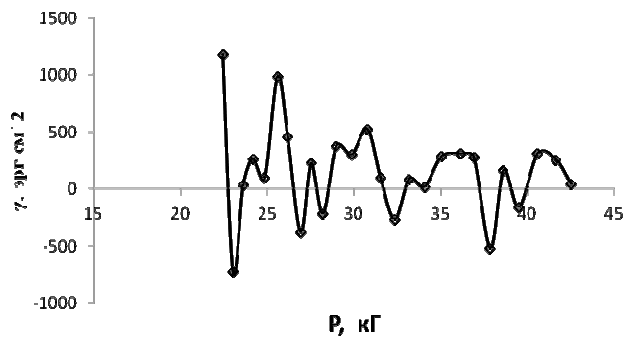


Рис.7. Зависимость величины поверхностной энергии от уровня нагрузки.

Обращает на себя внимание колебания значений поверхностной энергии в зависимости от величины нагрузки, при которой она вычислялась. Фотометрический анализ поверхности образцов в процессе деформирования показал, что трещины растут в шаговом режиме путем чередования фаз развития пластических зон у их фронтов, сопровождаемое раскрытием надреза и распространения трещин через эти зоны. Изображение кривой нагружения при больших увеличениях подтвердило колебательный характер развития процесса разрушения. Это можно видеть из рис 8.

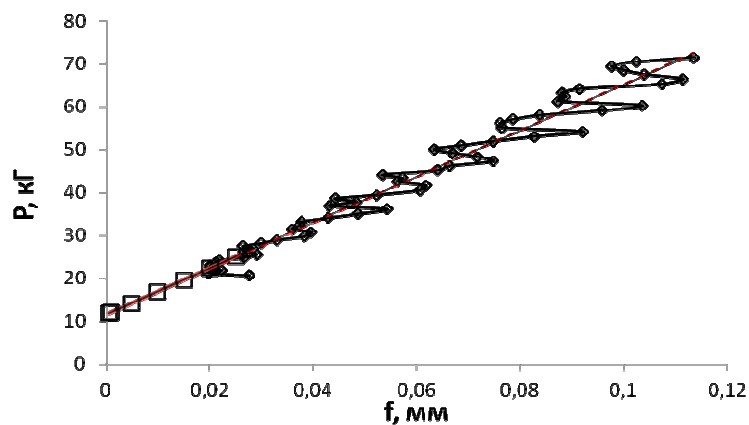


Рис.8. Начальный участок кривой нагружения

Из рис. 8 становится ясно, что колебания значений поверхностной энергии, являются отражением колебаний данных, по которым они были вычислены. Наиболее достоверные значения поверхностной энергии получаются при использовании в расчете малых нагрузок. Следует отметить, что в литературе существуют большие противоречия между теоретическими оценками поверхностной энергии и результатами их экспериментальных измерений для ГЦК металлов. В таблице № 1 приведены данные для сплава В95, полученные нами и литературными данные по меди.

Таблица 1 - Значения поверхностной энергии для меди и сплава В95

Металл	Г-поверхностная энергия, эрг/см <sup>2</sup>		Источник
	Теория по Гилману	Эксперимент	
С	Сu	1370-1100	8
Al	811,2	1306,331179,96	Настоящая работа

Для получения однозначной оценки поверхностной энергии нужно на начальном участке кривой нагружения (рис.8) провести линию тренда и для вычисления нагрузок воспользоваться ее уравнением. При этом коэффициент детерминации оказался равным  $R^2=0,9643$ , а полученное значение  $\gamma = 1471,4$  эрг.см<sup>2</sup>.

#### Выводы:

1. На основе фотометрического анализа результатов экспериментов разработан метод оценки поверхностной энергии.
2. Разработанный метод был использован для оценки поверхностной энергии алюминиевого сплава В95 с достаточно правдоподобным результатом.
3. В результате совместного анализа разрушения образцов сплава В95 методами механики и фотометрии установлено, что распространение трещин осуществляется в автоколебательном режиме

**Список литературы:** 1. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.:Наука, 1974, 311 с. 2. Нотт Д.Ф. Основы механики разрушения. М.: Металлургия, 1978, 256 с. 3. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.:Наука, 1974, 640 с. 4. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. п/р Ю. Мураками, М.:Мир, 1990, 448 с. 5. Ермишкин В.А., Мурат Д.П., Подбельский В.В. Информационные технологии фотометрического анализа усталостного повреждаемости материалов. Информационные технологии» 2007. №11, С. 65-70. 6. Ермишкин В.А., Мурат Д.П., Подбельский В.В. Система фотометрического анализа структурных изображений и ее применение для исследования материалов в условиях усталости. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008, №10, С. 38-44 7. Астапенко В.А. Взаимодействие излучения с атомами и наночастицами. Долгопрудный: Из-во Интеллект. 2010. 492 с. 8. Гилман Д. Скол, пластичность и вязкость монокристаллов. Сб. Атомный механизм разрушения. М.: Гос. Из-во по черной и цветной металлургии, 1963, С. 220-253. 9. Мейнер К. Физико-химическая кристаллография. - М.: Металлургия, 1972, 479 с. 10. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 589 с.