

УДК 621.906

Ермишкин В. А., вед. научн. сотр., д-р ф.-м. наук,
Соловьева Ю. Б., Минина Н. А., Кулагин С. П.

Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова, г. Москва, Россия

E-mail: eva@imet.ac.ru

УСЛОВИЯ РАВЕНСТВА ОЦЕНКИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ МАКРОСКОПИЧЕСКОМ И МИКРОСКОПИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ К ЕЕ ИЗМЕРЕНИЮ

В работе разработан метод оценки определения коэффициент интенсивности напряжений на малогабаритных образцах, дающий реалистические значения данного параметра. Выявлены условия, при которых определение коэффициент интенсивности напряжений дает совпадающий результат с его значением, определенным методами механики разрушения. Установлено, что временные зависимости коэффициент интенсивности напряжений несут линейный характер с параметрами, которые могут быть определены из аппроксимации экспериментальных данных.

Ключевые слова: Метод, трещиностойкость, механика разрушения, коэффициент интенсивности напряжений.

V. A. Jermishkin, J. B. Soloviova, N. A. Minina, S. P. Kulagin

CONDITIONS OF EQUALITY OF ESTIMATION OF CRACK-RESISTANCE IN MACROSCOPIC AND MICROSCOPIC APPROACH TO ITS MEASUREMENT

The aim of the paper is to discuss the problem of comparability of fracture toughness assessment methods on the basis of macroscopic and microscopic approaches using the example of experimental research results carried out on an aluminum alloy B95 (7075). The conditions for the coincidence of the fracture toughness estimates obtained on the basis of the brittle fracture mechanics and the photometric analysis of structural images (PHASI). The technique of determination of crack resistance according to FASI is considered.

Keywords: Method, fracture toughness, fracture mechanics, stress intensity factor.

1. Введение

Процесс разрушения материалов в настоящее время принято рассматривать как двухстадийный, включающий стадию зарождения трещин и стадию их распространения. Трещиностойкость характеризует склонность материалов к распространению трещин. Ее критерии сформулированы в механике разрушения применительно к макромасштабным хрупким и упруго-пластическим разрушениям [1]. В рамках этого подхода материал представляется как сплошная бесструктурная и, как правило, изотропная среда, упругое поведение которой описывается двумя независимыми константами: нормальный модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν . При хрупком разрушении в качестве критерия трещиностойкости принят коэффициент интенсивности напряжений K_i (КИН), где индекс « i » принимает значения I, II, III для обозначения разных мод разрушения: нормальный отрыв, продольный и поперечный сдвиги. Моды разрушения характеризуют взаимную ориентацию линии приложения нагрузки, плоскостей трещин и их фронтов. Современная методология экспериментального определения характеристик трещиностойкости построена на механике хрупкого разрушения. Преимуществом этой методологии является возможность выразить характеристики напряженного состояния (компоненты тензора

напряжений) через КИН и геометрические характеристики исследуемой локальной области. Эти данные удобно использовать в инженерной практике расчетов на прочность. Ясно, что испытания образцов с надрезом, который имитирует трещину, не позволяют оценить энергию зарождения трещин, но может дать оценку предельных условий тела с трещиной. Однако в рамках механического подхода не удастся объяснить наблюдаемые фрактографические картины изломов, элементарные механизмы разрушения и установить кристаллографические особенности поверхности излома. Кроме того, существуют размерные ограничения, накладываемые на образцы, и требуется мощное испытательное оборудование для корректного определения КИН. По этим причинам становится актуальным исследование микроскопических аспектов разрушения. Исследования механизмов разрушения методами электронной микроскопии очень содержательны при изучении качественной стороны разрушения. Однако, при этом невозможно установить параметры разрушения, которые можно было бы сопоставить с макроскопическими характеристиками разрушения. Целью настоящей работы явилось разработать методику оценки характеристик трещиностойкости по данным микроскопических измерений и сравнить результаты определения КИН методами макромеханики и микромеханики разрушения. Экспериментальная часть работы была выполнена на высокопрочном сплаве В95. В этих исследованиях были использованы малогабаритные образцы из листов исследуемого сплава, которые были испытаны внедрением клина в надрез на образце.

2. Материал и методика экспериментов.

Образцы для исследований трещиностойкости приготавливались из листов сплава В95 толщиной 5 мм. в холоднодеформированном состоянии. Образцы имели форму квадратов со стороной 20 мм. Посередине одной из сторон наносился электроискровой надрез шириной 0,4мм. и длиной 4 мм. Образцы нагружали внедрением клина, закрепленного в захвате образца, в надрез, в верхней части которого были нанесены фаски. Схема нагружения была аналогична той, которую ранее использовал Гилман [2].

Образцы нагружали до появления максимума на кривой деформирования в захватах испытательной машина типа «Инстрон-3382» со скоростью 1 мм./мин. В процессе деформирования поверхность образцов непрерывно записывалась на видеокамеру синхронно с записью кривой деформирования. На рис.1. показана кривая нагружения одного из испытанных образцов в координатах «нагрузка Р - стрела прогиба f» и нанесена линия тренда для линейного участка кривой деформирования.

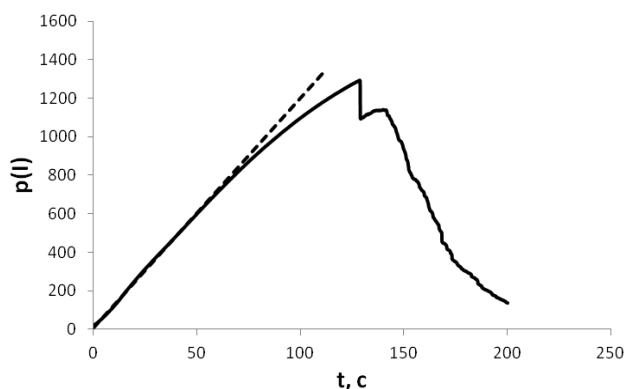


Рисунок 1. Кривая деформирования образца сплава В95, нагружаемого внедрением клина в надрез образца

Методами фотометрического анализа структурных изображений (ФАСИ) с периодичностью 10 с. была проанализирована поверхность исследуемого образца вблизи вершины трещины - надреза. ФАСИ представляет собой программно-аналитический комплекс, в котором выполняется сравнительный анализ по дифференциальной схеме изображений фрагментов исследуемого объекта и спектров яркости отражения от них видимого света, отснятых до и после начала деформирования. Достаточно подробное изложение принципа работы ФАСИ и его методических возможностей содержится в [3], поэтому здесь ограничимся только краткой информацией об измерениях с ее помощью. В ФАСИ сравнение спектров яркости отражения проводится в координатах «спектральная плотность яркости отражения $p(I)$ - интенсивность яркости отражения I ». Под спектральной плотностью понимается отношение числа пикселей с интенсивностью I_i - $n(I_i)$ к общему числу пикселей, на которое разбито изображение - N :

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

Интенсивность яркости отражения измеряется в условных единицах линейной шкалы, в которой за нуль принято состояние поверхности фрагмента, при котором происходит полное поглощение падающего на него видимого света, а за единицу - ее состояние с полным отражением света от него. На рис.2 показан пример результата сравнения структуры фрагмента вместе со спектрами яркости отражения от них видимого света до нагружения образцов и после него в момент времени $t=10$ с.

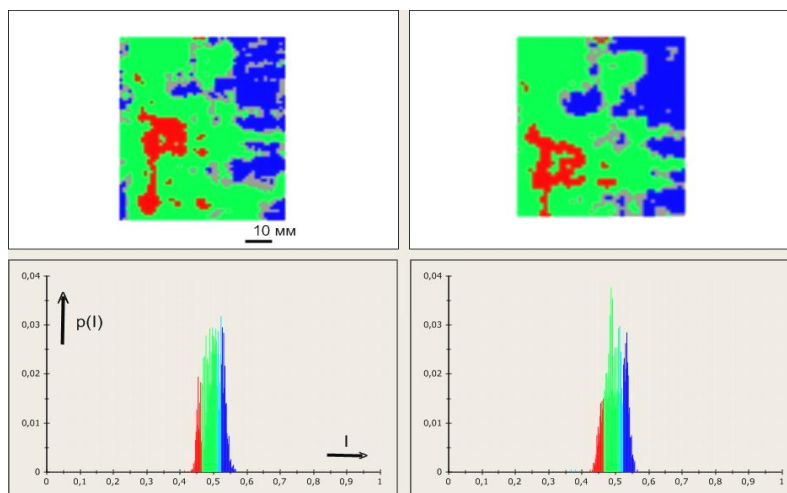


Рисунок 2. Результат сравнения методом ФАСИ фрагментов видеозаписи и спектров яркости отражения от них для моментов времени $t = 0$ (до нагружения) с $t = 10$ с.

Проведенные эксперименты позволили на образцах, использованных в настоящей работе, определить КИН по стандартной методике и с помощью данных, полученных методом ФАСИ. Определить КИН на основе подходов механики разрушения можно, адаптировав к условиям наших экспериментов методику, разработанную для образцов для внецентренного растяжения [4]. В условиях растяжения таких образцов образец подвергается изгибу, а область, окружающую вершину надреза при этом испытывает

действие растягивающих напряжений. Внедрение клина в надрез приводит к аналогичной схеме нагружения образца. КИН на образцах для внецентренного растяжения определяется по формуле, полученной по методу конечных элементов [5] в виде:

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

где: P - нагрузка соответствующая моменту срагивания трещины, t - толщина образца, W - расстояние между осью приложения нагрузки и сжатой стороной образца, $f(\alpha)$ - коэффициент, определяемый по формуле:

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

где: $\alpha=a/W$, a - длина трещины от ее вершины до оси приложения нагрузки. ФАСИ позволяет оценить энергию, отраженного от поверхности образца света (E) в условных единицах, которая численно равна площади под спектральной кривой. Согласно [6] энергия, излучаемая телом, связана с его внутренней энергией (U) формулой:

$$U=AE \quad (3)$$

где: A - коэффициент, отражающий вероятность спонтанного излучения света телом, которое подвергается энергетическим воздействиям соответствующей физической природы. Значение коэффициента A определялось из уравнения (3) после подстановки в него значения упругой энергии для заданного момента времени и ее выражение в условных единицах по измерениям методом ФАСИ. Соответствующее уравнение баланса энергий можно выразить в виде:

$$\Delta U = U_{\sigma} - U_0 = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (4)$$

где: E - нормальный модуль исследуемого материала. Разрешив уравнение (4) относительно напряжений с помощью (3) имеем:

$$\sigma = \sqrt{2AE\Delta U} \quad (5)$$

В вершине надреза выделяли линейную последовательность примыкающих друг к другу микрофрагментов. В их центрах из уравнения (5) определяли действующие напряжения, а далее по формуле (6) [7]:

$$K_I = \sigma_y \sqrt{2\pi r} \quad (6)$$

где: r - расстояние от вершины до центра соответствующего микрофрагмента.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Как видно из рис.1., определить напряжение, соответствующее старту трещины, весьма проблематичны. По этой причине была построена временная зависимость КИН на интервале 0-40с., которую можно видеть на рис. 3. (кривая - 1).

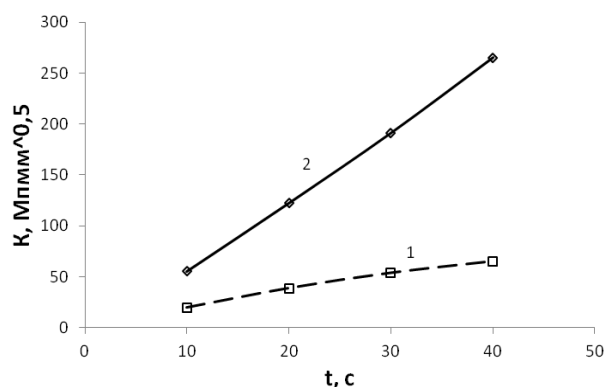


Рисунок 3. Временные зависимости K_I на интервале [0,40с]: 1 - по формуле (2), 2 - по формуле (6) и данным ФАСИ.

Для определения константы A в формуле (3) напряжение в области, сопряженной с вершиной надреза, было определено по формуле для изгиба балки [8], после чего по формуле (5) были определены напряжения в центрах микрофрагментов, использованные для оценки КИН по формуле (6). По этим данным была построена зависимость $K_I = f(r)$, которая представлена на рис.4. и зависимость $K_I = f(t)$ при $r = 1,165$ мм. Последняя зависимость нанесена на рис.3. (кривая - 2). Точки, нанесенные на рис.4., соответствуют значениям нагрузки, достигнутым в моменты времени 10, 20, 30, 40 с.

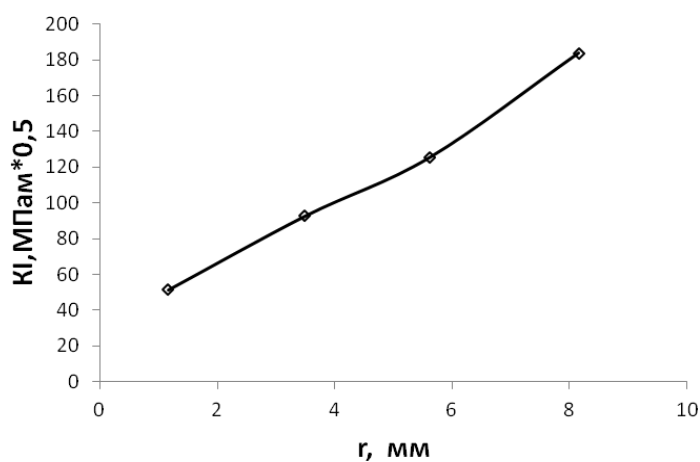


Рисунок 4. Зависимость КИН от расстояния при $r = 1,165$ мм.

Расчетные зависимости, показанные на рис.3. были аппроксимированы аналитическими формулами, которые приведены в таблице №1.

Таблицы №1. Формулы, аппроксимирующие расчетные зависимости $K_I = f(t)$

Формула для оценки K_I	Аппроксимирующие выражения	Критерий значимости
(2)	$K_I = 2,7277 \cdot t^{0,8702}$	0,9943
(6)	$K_I = 6,9875 \cdot t - 16,063$	0,9995

Ранее [4] мы установили условие, при котором значение КИН, определенное по данным ФАСИ, оказывалось близким к его значению, определенному на стандартном образце, с формой и размерами удовлетворяющим требованиям линейной механики разрушения. Для сплава В95 это значение КИН оказалось равным $49,12 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$ для стандартного метода и $51,32 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$. Проведенные эксперименты показали, что при определении КИН для сплава В95 значение $49,12 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$ достигается за 28,20 с., тоже значение при определении по данным ФАСИ за 9,33 с. Обе временные зависимости КИН практически представляют собой линейные зависимости от времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 17-08-00098а).

4. Выводы:

1. Разработан метод оценки определения КИН на малогабаритных образцах, дающий реалистические значения данного параметра.
2. Выявлены условия, при которых определение КИН по данным ФАСИ дает совпадающий результат с его значением, определенным методами механики разрушения.
3. Временные зависимости КИН носят линейный характер с параметрами, которые могут быть определены из аппроксимации экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нотт, Д. Ф. Основы механики разрушения / Д. Ф. Нотт – М.: Металлургия, 1975. – 256 с.
2. Гилман, Д. Скол, пластичность и вязкость монокристаллов. Сб. Атомный механизм разрушения / Д. Гилман – М.: Гос. из-во по черной и цветной металлургии, 1963. – С. 220-253.
3. Ермишкин, В. А. Информационные технологии фотометрического анализа усталостного повреждаемости материалов / В. А. Ермишкин, Д. П. Мурат, В. В. Подбельский // Информационные технологии. – 2007. – №11. – С. 65-70.
4. Ермишкин, В. А. Энергии зарождения трещин по данным фотометрического анализа разрушения образцов конструкционных материалов / В. А. Ермишкин, Ю. Б. Соловьева Ю.Б. // Международная научно-практическая конференция «Машиностроение и техносфера XXI века» сентябрь 2016 г., Россия, Севастополь. – С. 120-127.
5. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. п/р Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 448 с.
6. Астапенко, В. А. Взаимодействие излучения с атомами и наночастицами / В. А. Астапенко – Долгопрудный: Ид Интеллект, 2010. – 492 с.
7. Черепанов, Г. П. Механика хрупкого разрушения – М.: Наука, 1974. – 640 с.
8. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев – М.: Из-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 1999. – 589 с.

Поступила в редколлегию 15.05.2017 г.