

УДК 621.9

В.А. Ермишкин, С.П. Кулагин, Н.А. Минина, Ю.Б. Соловьева
ИМЕТ РАН, Москва, Россия
Тел./факс: +7(499)1359668; e-mail: eva@imet.ac.ru

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ У ВЕРШИНЫ НАДРЕЗА В ОБРАЗЦЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В95

В статье обсуждаются результаты фотометрического анализа структурных изображений (PHASI) для оценки напряженного состояния материала в окрестности вершины электроискрового надреза, трещины в образце при внецентренном растяжении алюминиевого сплава V95. Используя эти результаты были получены оценки коэффициента интенсивности напряжений (ФСС), которые сравнивались со значениями определяли по стандартной методике, разработанной в отношении зубчатый для эксцентричного растяжения. Условия, при которых наш метод оценки Кин производит результаты идентичны стандартным. Разработанный метод имеет преимущество по сравнению со стандартным, как на основе анализа результатов экспериментов, а не численное моделирование, которое составляет основу стандартного метода.

Ключевые слова: фотометрический анализатор структурных изображений, спектры яркости отражения видимого света от поверхности образцов

V. Ermoshkin, S. Kulagin, N. Minina, Y. Solovyeva

ANALYSIS OF THE STRESS STATE NEAR THE TOP OF THE NOTCH IN THE SPECIMEN ALUMINUM ALLOY B95

The paper discusses the results of a photometric analysis of the structural imaging (PHASI) to estimate the stress state of the material in the vicinity of the top of the electric-notch, a crack in the sample for the eccentric tension of aluminum alloy V95. Using these results were obtained evaluating the stress intensity factor (SIF), which were compared with the values determined by the standard method, developed in relation to the notched for eccentric stretching.

The conditions under which our method of evaluation ORF produces results identical to standard. The developed method has an advantage over the standard, as based on the analysis results of the experiments, rather than the numerical simulation, which is the basis of the standard method.

Key words: photometric analyzer of structural images, spectra of the brightness of visible light reflection from the surface of the samples.

Цель настоящей работы состояла в проверке возможности использования фотометрического анализа структурных изображений (ФАСИ) для оценки напряженного состояния в окрестности электроискрового надреза в образце предназначенного для определения трещиностойкости материалов при внецентренном растяжении. Авторский коллектив имеет успешный опыт применения ФАСИ для оценки физических характеристик ряда материалов и постоянно работает над расширением его методических возможностей. Выбор образцов для оценки трещиностойкости в качестве объекта исследования обусловлен тем, что такие образцы для определения КИН находят широкое применение на практике [1]. При этом исследование, как правило, ограничиваются определением значения K_i (КИН) без внимания к структурным проявлениям разрушения исследуемого материала. В этом отношении информативность ФАСИ существенно превышает возможности стандартной методики, ориентированной только на исследовании механического поведения материала. Выбор материал предопределен тем, что алюминиевый сплав В95 отличается достаточно высокими прочностными характеристиками и до настоящего времени находит применение в авиастроении.

1. Материал и методика исследования

Образцы для исследования были приготовлены из холодно-прокатанного листа с толщиной 6 мм. Химический состав сплава согласно паспортным данным приведен в таблице №1 [2]. 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 об их истинных размерах. 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.2 показана кривая деформирования одного из испытанных образцов в координатах «нагрузка Р - стрела прогиба - f».

Таблица №1. Химический состав сплава В95 в масс. %

Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Al	Fe	Si	прочие	
								каждая	Σ
5,0-7,0	1,8-2,8	1,4-2,0	0,2-0,6	0,1-0,25	основа	0,5	0,5	0,05	0,1

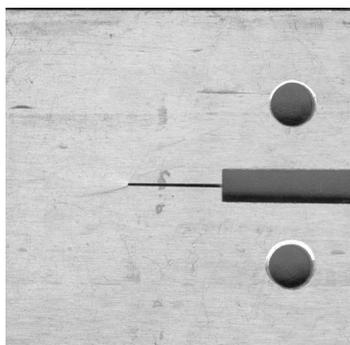


Рис.1. Образец для оценки трещиностойкости из сплава В95, использованный в настоящей работе (? 1)

После испытаний производился покадровый анализ видеозаписи с заданной периодичностью. Для анализа были выбраны фрагменты поверхности образца, окружающей вершину с помощью фотометрического анализатора структурных изображений (ФАСИ). 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, снятых до и после начала деформирования. Достаточно подробное изложение принципа работы ФАСИ и его методических возможностей содержится в [3, 4], поэтому здесь ограничимся только краткой информацией об его методических возможностях. Сравнимые фрагменты поверхности образца вместе со спектрами яркости отражения от них видимого света выводятся в виде, представленном на рис.3. Спектры яркости отражения представлены в координатах «спектральная плотность отражения с яркостью Р(I) - яркость отражения I». В результате анализа напряженного состояния у вершины надреза предполагалось получить зависимости напряжений от

координат с началом в вершине надреза, азимутальные зависимости напряжений при фиксированных значениях величины радиусов векторов, проведенных из начала координат в точку измерения напряжения, временные зависимости напряжений в трех выбранных направлениях. Для проверки полученных результатов было намечено получить с их помощью значения КИН и сравнить их с данными определения КИН, определенными по стандартной методике.

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

Для выполнения намеченной программы на поверхности изображений фрагментов образца, соответствующих достижению определенных стадий в развитии разрушения образцов. Эти стадии соответствовали началу нагружения, окончанию упругого нагружения образца (90 с.) и переходу к росту трещины в ускоренном режиме (130с.). На поверхности изображений фрагментов вдоль трех выделенных направлений под углами к горизонтальной оси симметрии образца ($\alpha = 0^\circ, \alpha = 17^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$) выделялись микро фрагменты с площадью $\sim 1,44\text{мм}^2$. Первое направление соответствует оси симметрии образца, по которой ориентирован надрез, второе - направлению последующего роста микротрещины от вершины надреза, третье является направлением, в котором касательные напряжений достигают максимальных значений. С помощью ФАСИ были определены энергии излучаемые поверхностями всех выделенных микро фрагментов. Необходимо отметить, что площади под спектральными кривыми яркости отражения видимого света по своему физическому смыслу являются удельными энергиями излучения U , выраженные в условных единицах. Известно, что энергия излучения тела с внутренней энергией Q , выражается формулой [5]:

$$U = A \cdot Q \quad (1)$$

где: A - коэффициент, определяющий вероятность спонтанного излучения телом с внутренней энергией Q . С учетом того, что удельную внутреннюю энергию можно записать в виде (2):

$$Q = C_p \rho \Delta T \quad (2)$$

Определив методом ФАСИ энергию излучения в условных единицах ϕ при комнатной температуре и подставив его вместе со значением Q в формулу (1) определим значение коэффициента A . Располагая значением коэффициента A , можно перевести значения энергии в условных единицах в физические единицы с помощью формулы (1). Тогда, принимая во внимание, что разность энергий образца в нагруженном и разгруженном состоянии равна упругой энергии, мы имеем:

$$\Delta U = U_\sigma - U_0 = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (3)$$

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

$$\sigma = \sqrt{2E\Delta U} \quad (4)$$

Получив с помощью ФАСИ значения ϕ_i для всех выделенных микро фрагментов и выразив их с помощью (1) в физических единицах, по формуле (4) определим значения действующих в микро фрагментах для известных координат их центров. По этим данным были построены зависимости: $\sigma = f(t)$, $\sigma = f(r)$ и $\sigma = f(\alpha)$ для пластической зоны надреза. На рис.4 показана временная зависимость напряжений при фиксированных значениях координат для направления радиуса вектора с $\alpha = 0^\circ$. Из

рисунка видно, что с увеличением расстояния от фронта надреза напряжения падают, но максимальное значение напряжений достигается на удалении 5,82 мм. от фронта надреза. Напряжения растут по мере роста нагрузки, после чего они начинают плавно снижаться. На рис.5 и рис.6 показаны зависимости $\sigma = f(r)$ соответственно для направлений радиуса вектора с $\alpha = 17^\circ$ и $\alpha = 0^\circ$. Можно видеть, что в направлении с $\alpha = 17^\circ$ действующие напряжения имеют более высокие значения по сравнению с направлением с $\alpha = 0^\circ$ на всем протяжении пластической зоны перед фронтом надреза. При этом на момент окончания упругого участка кривой деформирования для обоих направлений радиуса вектора напряжения в пластической зоне имеют более высокие значения, чем на момент перехода к ускоренному росту трещины. С учетом такого характера зависимостей $\sigma = f(r)$ становится понятно, почему трещина развивается в пластической зоне надреза в направлении под углом $\alpha = 17^\circ$ к линии горизонта.

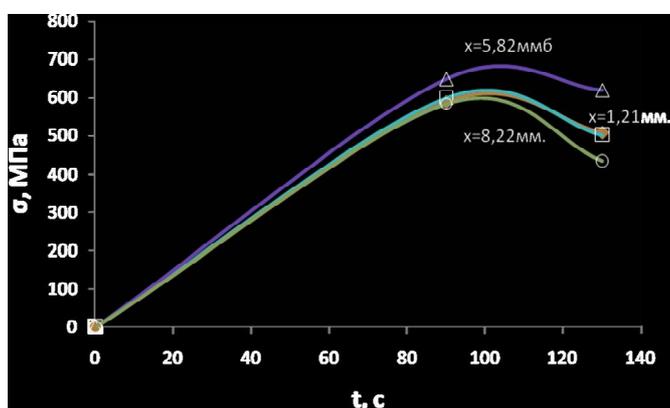


Рис.4. Временные зависимости действующих напряжений перед фронтом надреза в направлении с $\alpha=0^\circ$

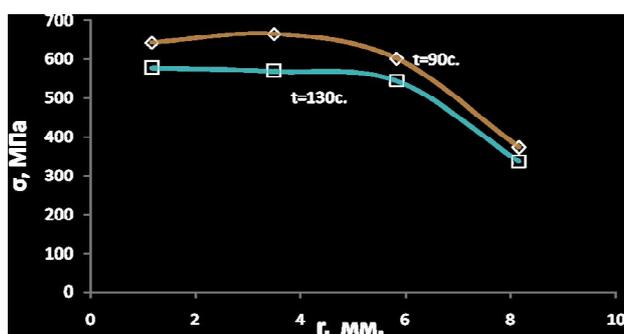


Рис.5. Зависимости $\sigma = f(r)$ в направлении $\alpha = 17^\circ$ к горизонту в образце сплава В95

Зависимость $\sigma = f(\alpha)$ построена по 3 точкам и с учетом того, что она является функцией, как угла α , так и КИН, ее характер выявлен приближенно, но в виду плавного характера ее поведения можно ожидать, что это приближение не слишком грубое. Эта зависимость приведена на рис.7 и из нее видно, что она имеет максимум в диапазоне углов $15 - 20^\circ$, т.е. в него попадает направление распространение трещины,

берущей начало в вершине надреза. Следует отметить, что характер изменения напряжений в азимутальном направлении становится более четко выраженным, зависимость с ростом угла наклона к горизонту становится более крутой. Для проверки полученных результатов с их помощью были определены значения КИН, которые сравнили со значениями КИН, которые были вычислены по стандартной методике для образцов, деформируемых в условиях внецентренного растяжения.

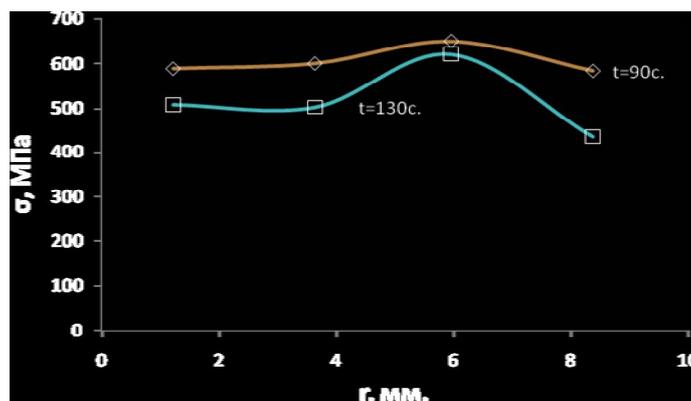


Рис.6. Зависимости $\sigma=f(r)$ в горизонтальном направлении в образце сплава В95

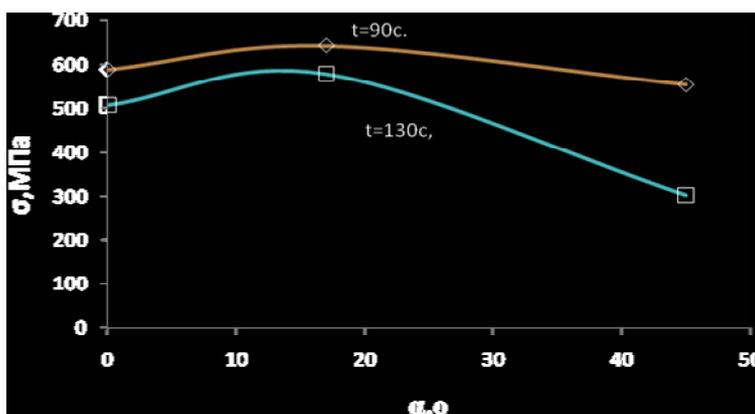


Рис.7. Азимутальная зависимость действующих напряжений в пластической зоне надреза в образце сплава В95.

Коэффициенты интенсивности напряжений по данным фотометрического анализа вычисляли по формуле [6].

$$K_I = \sigma_{\text{ж}} \cdot \sqrt{2\pi r} \quad (5)$$

Для оценки КИН по формуле механики разрушения для образца, нагружаемого по схеме внецентренного растяжения в справочнике [7] приведена формула:

$$K_I = \frac{P}{tW^{\frac{1}{2}}} \cdot f(\alpha) \quad (6)$$

где: P - максимальная нагрузка на упругом участке диаграммы растяжения, t - толщина образца, W - базовое расстояние образца, f(α) - коэффициент, определяемый по формуле:

$$f(\alpha) = (2 + \alpha) \cdot (0,8072 + 8,858\alpha - 30,23\alpha^2 + 41,088\alpha^3 - 24,15\alpha^4 + 4,951\alpha^5) \cdot (1 - \alpha)^{-3/2} \quad (7)$$

где: $\alpha = a/W$, a - длина трещины от ее вершины до оси приложения нагрузки. В таблице №2 в двух последних строках результаты получены при значениях нагрузки $P = 601,78$ и $656,71$ кгс, которые соответствуют нагрузкам окончанию упругой стадии нагружения и стадии перехода к стабильному росту трещины. Из таблицы видно, что значения КИН на соответствующих стадиях развития разрушения имеют близкие значения. Результаты расчетов КИН по формулам (5) и (6) приведены в таблице №2.

Таблица № 2. Расчетные значения КИН по формулам (5) и (6)

№	Метод оценки	г, мм.	K_I , МПа ^{1,2}
1	ФАСИ	1,165	51,32
2	По формуле (5)	3,495	92,65
3		5,625	125,65
4		8,155	183,91
5	Стандартный	2,36	49,12
6	По формуле (6)	2,36	114,52

ВЫВОДЫ:

1. Разработан метод оценки локального напряженного состояния в окрестности надреза по данным фотометрического анализа структурных изображений.
2. Разработанный метод оценки анализа напряженного состояния позволяет определить КИН и координатные и азимутальную зависимости действующих напряжений.
3. Оценки КИН, полученные по данным ФАСИ, близки к результатам, полученным по стандартному методу определения КИН на соответствующих стадиях развития разрушения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-08-00417а)

Список литературы:

1. Нотт Д.Ф. Основы механики разрушения. М.:Металлургия, 1975. 256 с.
2. Справочник по авиационным материалам, п/р Туманова А.Т. ч.1 М.:Машиностроение. 455 с.
3. Ермишкин В.А., Мурат Д.П., Подбельский В.В. Информационные технологии фотометрического анализа усталостной повреждаемости материалов. Информационные технологии 2007. №11, С. 65-70.
4. 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.
5. В.А. Астапенко Взаимодействие излучения с атомами и наночастицами. Долгопрудный:Ид Интеллект. 2010. 492 с.
6. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.:Наука. 1974. 640 с.
7. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений, п/р Ю. Мураками М.:Мир. ч.1. 1990. 448 с.

Поступила в редколлегию 07.04.2015 г.