

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В-95

Ермишкин В.А., Кулагин С.П., Минина Н.А., Соловьева Ю.Б.

(ИМЕТ РАН, Москва, Россия)

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

Abstract: *The paper discusses the results of a study such as the destruction of the samples to determine the BP crack resistance of materials under eccentric tension. Sample material - high-strength aluminum alloy V95. The process of deformation of the samples was captured on video. The subsequent video frame by frame analysis was performed using photometric analyzer of structural images (PHASI). We investigated samples of the surface area is adjacent to the notch. The results on the kinetics of crack and evolution of structure in the area of pre-destruction were received. The characteristics of the stress state according to the analysis of the spectra of the brightness of visible light reflection from the surface of the samples before and after loading were identified.*

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

Исследование характеристик разрушения конструкционных материалов имеет важное практическое значение, так как они определяют предельное состояние, с достижением которого конструкции теряют свою работоспособность. Важны не только значения этих характеристик, но и кинетика структурных изменений в материале по мере его приближения к предельному состоянию. Особый интерес к этим вопросам неизбежен при изучении разрушении высокопрочных материалов. В методическом отношении практика исследования трещиностойкости базируется на результатах, полученных в механике разрушения. Следует отметить, что для изучения структурных аспектов поведения материалов при разрушении механика разрушения не располагает методическими средствами [1, 2]. До последнего времени в исследовании проблемы разрушения структурные исследования играли в основном иллюстративную роль. В лучшем случае они использовались для классификации видов разрушения и качественной идентификации механизмов разрушения [3, 4]. Примеры успешного применения результатов структурных исследований для обоснованного определения микромеханизмов разрушения и оценки структурных параметров поверхности разрушения однозначно связанных с данными о локальном напряженном состоянии материала в местах развития трещин и кинетикой его изменения в процессе эксплуатации изделий пока не получили должного распространения среди специалистов, работающих над проблемами прочности [5, 6].

В настоящей работе предпринята попытка увязать результаты структурных наблюдений за развитием процесса разрушения в окрестности вершины тонкого надреза с данными оценки локального напряженного состояния, которые пространственно и синхронно находятся во взаимно однозначном соответствии.

1. Материал и методика исследования.

Образцы для определения трещиностойкости по результатам испытания при внецентренном растяжении были изготовлены из листа алюминиевого сплава В95 толщиной 6 мм. Геометрия образцов и соотношения между его размерами соответствовали рекомендациям для образцов типа woll с $w = 60$ мм. Исключение составила толщина образца, которая была такой же, как у листа, из которого они были приготовлены. По горизонтальной оси симметрии в образцах располагался фрезерованный паз шириной 6 мм, который заканчивался электроискровым надрезом с длиной 19 мм и шириной 0,32 мм. 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. После испытаний производился покадровый анализ видеозаписи с заданной периодичностью 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, отснятых до и после начала деформирования. Для анализа были выбраны фрагменты поверхности образца, окружающей вершину надреза с площадью 836 мм². Достаточно подробное изложение принципа работы ФАСИ и его методических возможностей содержится в [7, 8], поэтому здесь ограничимся только краткой информацией о нем. Одно из сравниваемых изображений служит эталоном, сравнение с которым позволяет обнаружить участки поверхности, которые при деформировании претерпели наибольшие изменения. Такие участки выявляются с помощью выполнения алгебраических операций над спектрами яркости отражения, полученных от исследуемых фрагментов, отснятых до и после деформирования. На рис.1. в качестве примера показан результат сравнения в ФАСИ фрагментов исследуемого образца до испытания и после его окончания.

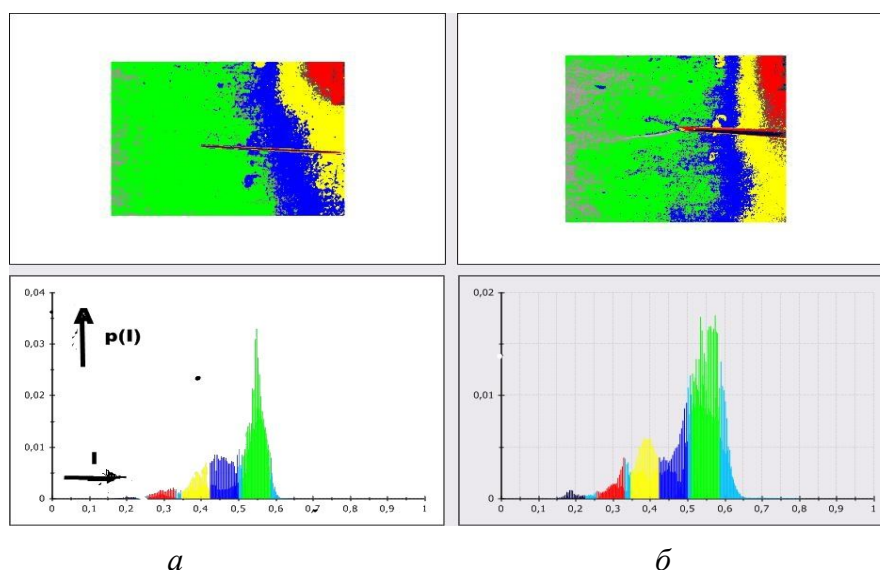


Рис. 1. Результат сравнения фрагментов изображения и спектров яркости отражения света от них для сплава В95 а) до деформирования, б) после него (?0,5)

На рис.1. 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. В качестве эталона полного поглощения света была использована оберточная бумага

чувствительных пластин для регистрации фотоизображений, а эталоном полного отражения видимого света служила белая высококачественная бумага для принтеров. 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 удастся обнаружить те структурные элементы, которые появились в результате внешнего воздействия и которые исчезли при этом, их распределение по размерам и по размещению на плоскости наблюдения. В качестве количественной меры структурных изменений в исследуемом объекте используется структурная поврежденность (D_s) исследуемого материала, вызванная внешним воздействием. Ее можно ввести разными способами, используя данные количественных измерений фотометрических характеристик спектров яркости отражения, но при этом должны выполняться начальные и конечные условия, налагаемые на функцию повреждаемости $\varphi(t)$, ранее введенную Мейнером и Качановым [8, 10]:

$$\varphi(t) = \begin{cases} t = 0 & \varphi(0) = 0 \\ t = t_r & \varphi(t_r) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

В частности, можно выразить структурную повреждаемость материалов D_s независимо от причин ее возникновения с помощью формулы:

$$D_s = \frac{D_t - D_0}{D_{max} - D_0} \quad (3)$$

где: D_t - площадь под спектральной кривой в некоторый промежуточный момент времени испытаний t , численно равная энергии излучения поверхности, D_0 площадь под спектральной кривой отражения света от исследуемой поверхности до начала испытаний, D_{max} - площадь под спектральной кривой отражения от образца после испытания. С учетом того, что распространение трещины от надреза сопровождается их раскрытием, в качестве меры развития трещины принято текущее значение ее площади суммарного раскрытия трещины и надреза. ФАСИ позволяет получить величины площадей, в которые были окрашены структурные составляющие материала в исследуемых фрагментах. По этим данным была изучена кинетика структурной эволюции на поверхности разрушаемого фрагмента. По данным анализа энергии отражения видимого света была разработана методика оценки средних напряжений в области развития трещины. По этим данным была построена зависимость поврежденности образцов в результате развития трещин в зоне предразрушения от уровня действующих напряжений.

2. Анализ полученных результатов

Известно, что энергия излучения твердых тел U связана с их внутренней энергией Q соотношением [10]:

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

где: A - коэффициент, характеризующий вероятность спонтанного излучения лучистой энергии твердым телом. Запас внутренней удельной энергии телом, находящимся при температуре можно выразить формулой:

$$Q = C_p \rho \Delta T \quad (5)$$

где: C_p - удельная теплоемкость исследуемого материала, ρ - его плотность, ΔT разность температур, отсчитанная от заданного уровня. Площадь под спектральной кривой яркости отражения видимого света от исследуемой поверхности, измеряемая методом ФАСИ по своему физическому смыслу равна U , но выражается в условных единицах ф. Тогда значение переводного коэффициента C , связывающего энергию излучения в условных единицах и в физических единицах можно определить из равенства:

(6)

Откуда следует, что $A = 1/C$. Значение C определяется из (6) с помощью значения ϕ , определяемого методом ФАСИ при комнатной температуре. Полагая, что внутренняя энергия деформированного тела в нагруженном и разгруженном состоянии отличается на величину упругой энергии, получаем соотношение:

$$U_\sigma - U_0 = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (7)$$

Откуда среднее значение напряжений, действующих в исследуемом фрагменте, можно определить из формулы:

$$\sigma = \sqrt{2E\Delta U} \quad (8)$$

На рис.2 показана кинетическая кривая развития трещины, полученная по данным обработки видеозаписи процесса деформирования образца типа ВР (внецентренное растяжение). Из рисунка видно, что распространение трещины начинается не ранее момента приложения нагрузки 80 сек. Она выходит на стадию ускоренного роста на 130 сек. и при этом максимальная нагрузка достигается на 140 сек., после чего на диаграмме растяжения наблюдается срыв нагрузки, связанный со скачкообразным зарождением трещины в пластической зоне надреза. После этого наблюдается плавное снижение нагрузки и медленное подрастание трещины в пределах пластической зоны надреза. Используя цвет окраски в исследованных фрагментах были, выделены основные типы структурных составляющих, соответствующих пикам в исходном спектре и в спектрах на разных этапах деформации образцов.

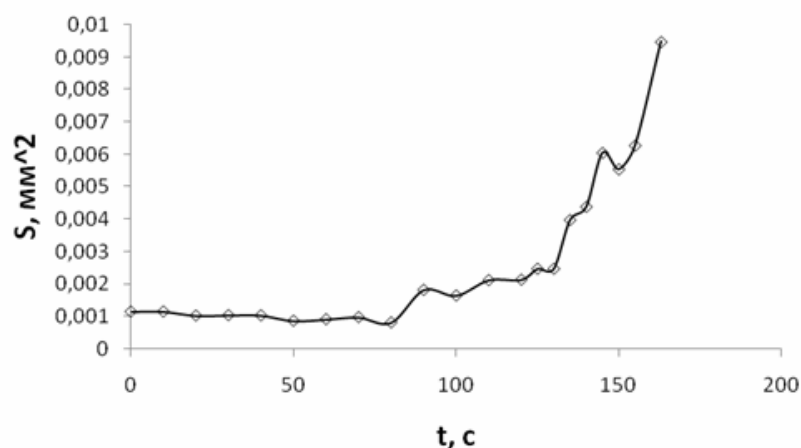


Рис. 2. Кинетическая кривая развития трещины из надреза образца сплава В95 с учетом их раскрытия

На рис.3 показаны данные по эволюции суммарных площадей, занятых этими структурными составляющими.

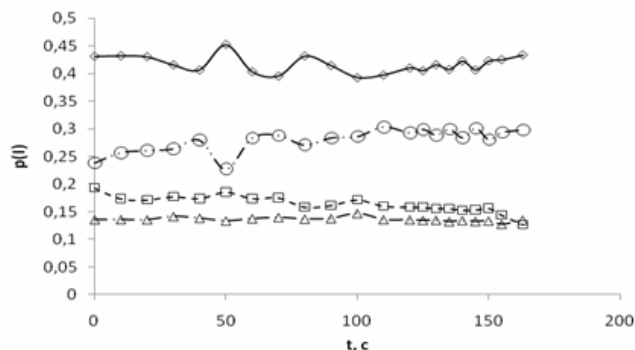


Рис. 3. Кинетические кривые эволюции площадей, занятых структурными составляющими сплава В95, соответствующие: 1 - \diamond - наибольшему пику спектральных кривых на рис.1, 2 - \square - второму по величине пику на спектральной кривой 1а, 3 - Δ - второму по величине пику в спектре рис.1б, 4 - \circ - площади неокрашенных поверхностей на исследованных фрагментах

видеть на рис. 4. Видно, что в области упругого нагружения рост напряжений идет без заметно прироста трещины и раскрытия надреза. Переход к стабильному медленному росту трещины и к стадии скачкообразного зарождения приращения трещины в ее пластической зоне сопровождается срывами действующих напряжений. Для дальнейшего представляет интерес сравнить полученные результаты с расчетом напряженного состояния материала методами механики разрушения. На рис.5 показан рост микротрещины из вершины надреза в пластическую зону трещины. Видно, что симметрично с образовавшейся микротрещиной формируется еще одна трещина под тем же углом, что и первая. По траекториям роста трещин наблюдаются вкрапления структурной составляющей, обозначенной выше цифрой 3. Возможно, это является следствием фазового превращения инициированного пластической деформацией.

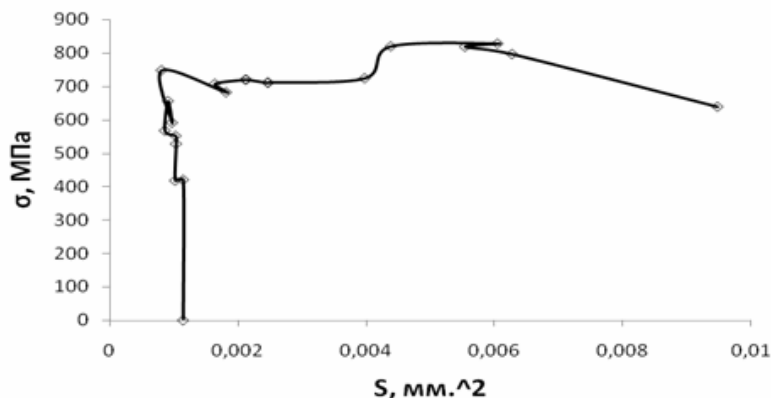


Рис.4. Зависимость действующих напряжений в зоне развития трещины от ее приращения. Образец с надрезом из сплава В95

Из рис. 3. видно, что амплитуды колебаний спектральных плотностей отдельных структурных составляющих заметны только для составляющих 1 и 4. Тенденции их эволюции различны для выделенных составляющих особенно на ранних стадиях деформации. Относительная стабилизация состава в пластической зоне трещины наступает на стадии ускоренного роста трещины. По данным анализа напряженного состояния в зоне развития трещины и кинетики ее роста была построена зависимость показывающая характер взаимосвязи их параметров. Ее можно

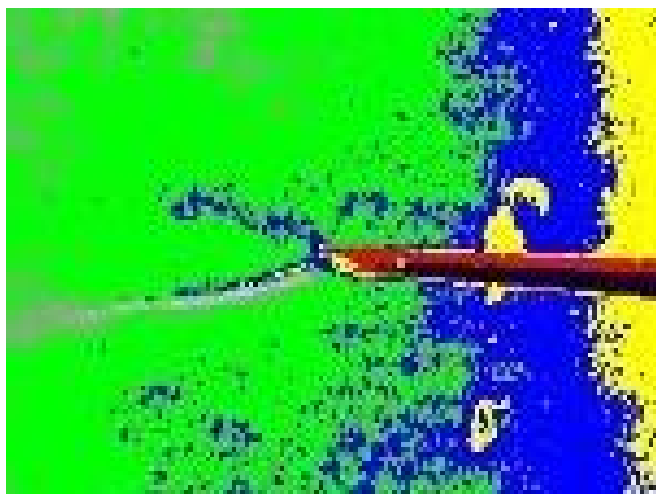


Рис. 5. Рост трещин из вершины надреза в образце сплава В95 (?25)

Выводы:

1. Методом фотометрического анализа структурных изображений исследована кинетика развития трещины из вершины надреза в образце сплава В95 совместно с оценкой уровня действующих напряжений.
2. Подробный анализ наблюдений записанных видеокамерой обеспечивает совместный анализ взаимосвязи параметров структурного и напряженного состояний.
3. По результатам проведенных исследований установлены пороговые значения параметров, характеризующих стадийность процесса 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. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 311 с. 3. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. Челябинск:Металлургия. 1988. 400 с. 4. Ботвина Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. М.:Наука. 1989. 230 с. 5. Туманов Н.В. Механизмы разрушения при однократном циклическом нагружении. Тяжелое машиностроение. 2010. №4. С. 21-25. 6. Туманов Н.В., Черкасова С.А. Физика и механика разрушения прочности-синтез в рамках механизма устойчивого роста усталостных трещин. // Современные проблемы прочности. Труды IV Международного семинара. В 2-х томах. Пол. Ред.В.Г. Малинина. Т. 1. Новгород. Ноа. ГУ., 2000. С. 217-228. 7. Ермишкин В.А., Мурат Д.П., Подбельский В.В. Информационная технологии фотометрического анализа усталостного повреждения материалов. Информационные технологии» 2007. №11, С. 65-70. 8 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. 9. М.А. Miener, Cumulative damage in fatigue. // Jor. Appl. Mech. 1945. v. 12. №9. P. 159-164. 10. В.А. Астапенко Взаимодействие излучения с атомами и наночастицами. Долгопрудный: Ид Интеллект. 2010. 492 с.