

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СПЛАВА В95 В ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОМ И ЗАКАЛЕННОМ СОСТОЯНИЯХ МЕТОДОМ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Ермишкин В.А., Кулагин С.П., Минина Н.А., Соловьева Ю.Б.
(ИМЕТ РАН, Москва, Россия)

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

Abstract: The results of a photometric analysis of the kinetics of the destruction of the alloy V95 in the hardened and cold conditions are presents. It is shown that in the quenched state deforming load is almost twice higher than in cold; 1.42 times the time before a catastrophic crack growth of 1.26 times lower than the speed of crack development in the step of hardening the lung. In the alloy samples with V95 electric-notch, loads in the introduction of the wedge incision, were determined stress intensity factors for the samples investigated in two states. It is found that the cracks and plastic zones develop in the oscillatory mode. Thus the development of plastic zones is out of phase with the development of cracks.

1. Введение

Фактором, который лимитирует применение высокопрочных материалов, является трещиностойкость. Ее достоверная оценка является неотъемлемой частью аттестации конструкционных материалов. В настоящее время она осуществляется методами механики разрушения, которая дает критерии разрушения для трех его мод, которые принято рассматривать в механике: нормальный отрыв, поперечный и продольный сдвиги [1, 2]. Эти критерии получили название коэффициентов интенсивности напряжений (КИН). Они входят в формулы для вычисления напряжений, действующих в радиальном и азимутальном направлениях от фронта трещины. Значения КИН существенно зависят от толщины образцов, на которых определяют их значения. Наименьшие значения КИН характерны для разрушения в условиях плоской деформации, которые имеют место при больших толщинах образцов. Условия плоского напряженного состояния характерны для малых толщин материалов. В реальных условиях высокопрочные материалы используются для изготовления тонкостенных оболочек и тонких листов. По этой причине исследование КИН листовых высокопрочных материалов является актуальной научной задачей.

2. Материалы и методика исследования

В качестве материала исследования был использован высокопрочный алюминиевый сплав В95 в холоднодеформированном и закаленном состояниях. Химический состав сплава согласно паспортным данным приведен в таблице №1 [3].

Таблица 1 - Химический состав сплава В95

Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Al	Fe	Si	прочие	
								каждая	Σ
не более									
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

Из листа толщиной 6 мм. были вырезаны образцы с размерами 20×20×6 мм., на которые по вертикальной оси симметрии с помощью электроискровой резки были нанесены надрезы с шириной 0,4 мм. и длиной 4 мм. У начала надреза снимались фаски с катетом 9Б2 мм. Образцы нагружались внедрением клина в надрез со скоростью 1

мм/мин. Нагружение образцов проводилось в испытательной машине Инстрон-3382 так, как это показано на рис.1.

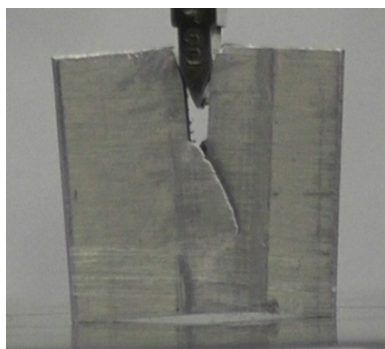


Рис.1. Образец под нагрузкой

Часть образцов была закалена по режиму: закалка в воду с $T = 450^{\circ}\text{C}$ после выдержки при этой температуре 30 мин. В процессе нагружения синхронно с ним проводилась съемка рабочей поверхности образцов на видеокамеру с последующим анализом видеок кадров с заданной периодичностью (10с., 5 с., 2с.) с помощью фотометрического анализатора структурных изображений (ФАСИ), который был разработан в авторском коллективе. В его основу положен сравнительный анализ по дифференциальной схеме видеоизображений и спектров яркости отражения от них, отснятых до начала нагружения и в заданные моменты времени в процессе нагружения.

ФАСИ представляет собой программно-аналитический комплекс, который позволяет окрашивать выбранные интервалы спектра соответствующим цветом, перенести эти цвета на изображения фрагментов анализируемых изображений и определить их спектральные плотности. Типичная форма представления получаемой информации показана на рис.2

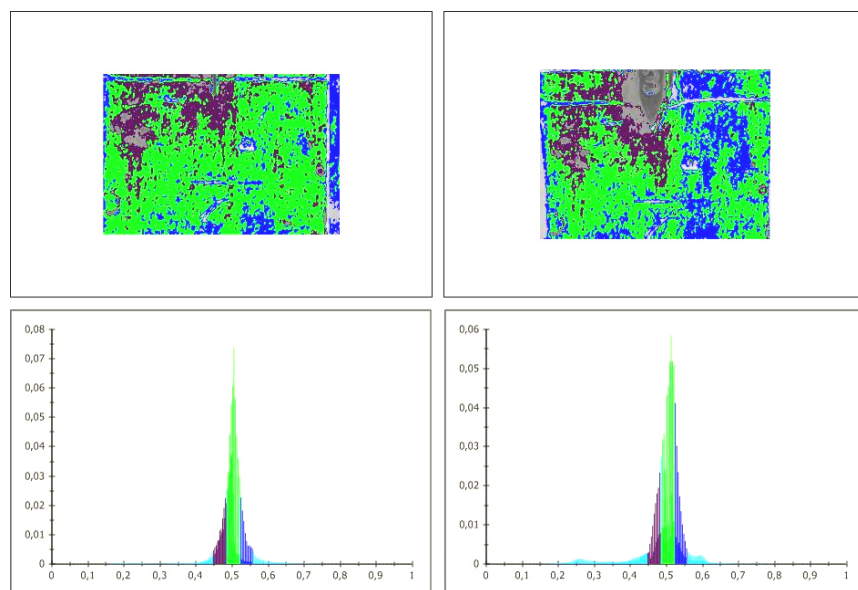


Рис.2. Форма представления видеоинформации в ФАСИ на примере закаленного образца Z-1 (слева – до нагружения, справа после деформирования в течение 245 с.)

Спектр яркости отражения видимого света от выделенного фрагмента поверхности образца строится в координатах: ось абсцисс - относительная яркость отражения, а по оси ординат - соответствующая ему спектральная плотность. Относительная плотность яркости отражения измерялась по линейной шкале за нулевое значение было принято абсолютное поглощение видимого света, а за единицу – его полное отражение. Под спектральной плотностью отражения понимается отношение числа пикселей, окрашенных в определенный цвет к общему числу пикселей, на

которое разбито анализируемое изображение. ФАСИ позволяет вывести информацию о величине площади под спектральной кривой относительных долей каждого из выбранных цветов в изображении фрагмента. Более подробную информацию об аналитических возможностях ФАСИ и принципах ее работы можно найти в работах [4, 5]. Для оценки действующих напряжений требуется оценить коэффициент связывающий энергии отражения света от одного и того же фрагмента образца в нагруженном и разгруженном состояниях. Согласно [6] энергия, излучаемая поверхностью объекта (U), связана с его внутренней энергией (Q) формулой:

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

где: A - коэффициент, определяющий вероятность спонтанного излучения телом с внутренней энергией Q. Внутренняя энергия вблизи вершины надреза может быть определена по формуле [7]:

$$Q = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (2)$$

где: σ - локальное действующее напряжения, E - нормальный модуль упругости материала образца. Действующее напряжение у вершины надреза можно определить по формуле для защемленной балки, подвергаемой изгибу [7]:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (3)$$

где: $M = P \cdot l$ – момент силы P на плече l, W - момент сопротивления сечения балки, равный: $bh^2/6$, b - толщина образца, h - полуширина образца за вычетом полуширины надреза. Для малой области у вершины образца справедливо равенство:

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

где: U_σ - удельная энергия элементарного фрагмента нагруженного образца, U_0 – тоже разгруженного образца. С учетом того, что из (1) следует, что величину локального действующего напряжения можно выразить в физических единицах как:

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

были построены, временная, радиальная и азимутальная зависимости напряжений в окрестности фронта трещины. Для этого перед фронтом в заданных направлениях выделялись последовательности квадратных микро фрагментов с площадью 4 мм.². На них измерялись изменения внутренней энергии, происшедшие в результате деформирования образца, с последующим определением локальных напряжений по формуле (5). В виду того, что оценка кинетики развития трещины с помощью измерений длины трещины или ее раскрытия при сложных траекториях сопряжено с большими трудностями, для этой цели был также использован фотометрический анализ, позволяющий определять изменения площади, занимаемой трещины. Он был использован и для изучения кинетики развития деформаций.

3. Обсуждение полученных результатов

Нами разработана методика, позволяющая определять трещиностойкость исследуемых материалов как методом механики для образцов, нагружаемых внецентренно, так и использованием ФАСИ. На рис.3. показана типичная кривая нагружения.

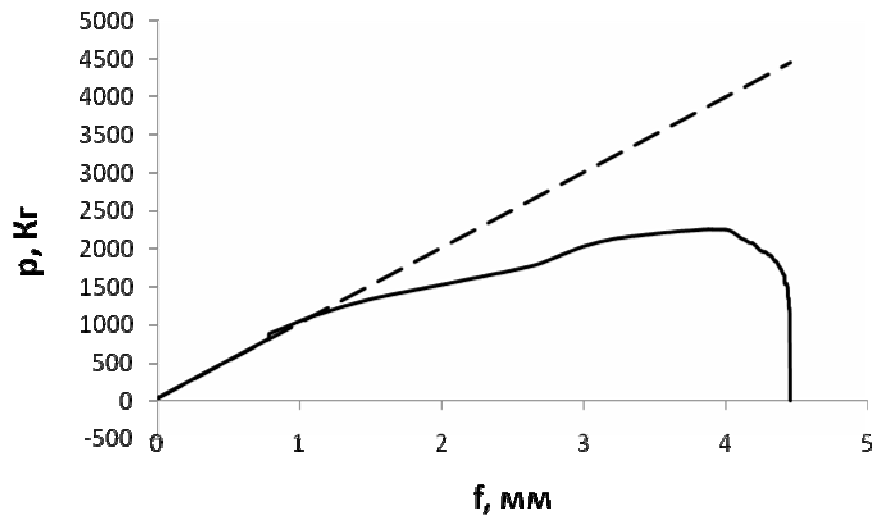


Рис. 3. Кривая нагружения образца сплава В95 внедрением клина в надрез

Для удобства определения максимальной нагрузки в пределах упругого поведения материала на рисунке нанесена линия тренда. На кривой можно выделить границы характерных стадий поведения сплава: упругого поведения, легкого упрочнения, интенсивного упрочнения, разрушения. На рис.4 показаны значения спектральных плотностей интенсивности отражения в моменты достижения материалом границ стадий.

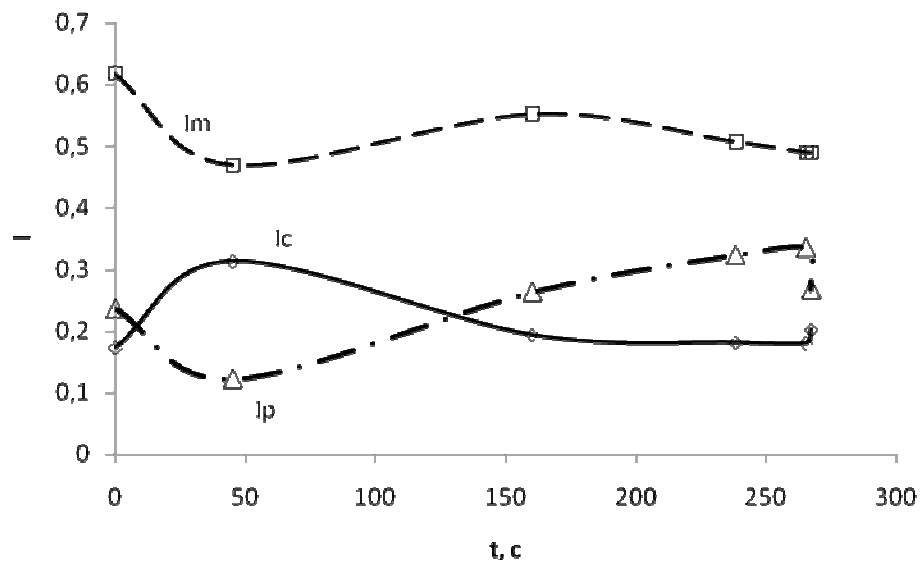


Рис.4. Спектральная плотность яркости отражения на границах стадий деформирования сплава В95 (Im - яркость отражения матрицы, Ic - тоже от трещины, Ip - тоже от зон локализации пластических деформаций)

Из рисунка видно, что зависимости спектральных плотностей яркости отражения от трещины и от пластических зон, в основном локализованных вблизи трещин находятся в противофазе, что объясняется характером разрушения, который состоит в чередовании развития пластических зон перед фронтом трещины, которая при этом раскрывается. При некотором размере пластической зона у вершины трещины возникает острый «клюв» и трещина быстро подрастает на величину пластической зоны и вязнет в матрице, после чего возобновляется рост пластической зоны пред

фронтом трещины, сопровождаемый раскрытием трещины. Автоколебательный характер развитие разрушения даже на упругом участке кривой нагружения был установлен первоначально методом ФАСИ по временным зависимостям роста площадей, занятых трещиной и ее пластической зоной перед фронтом при покадровом анализе видеозаписи, на которой запечатлен весь процесс разрушения. Анализ информационных массивов для нагрузки и для соответствующих значений раскрытия надреза на образце подтвердил эти результаты для холоднодеформированного состояния. На рис. 5 показаны кинетические кривые развития площадей, занятых трещиной для сплава в закаленном и холоднодеформированном состоянии на стадии легкого упрочнения.

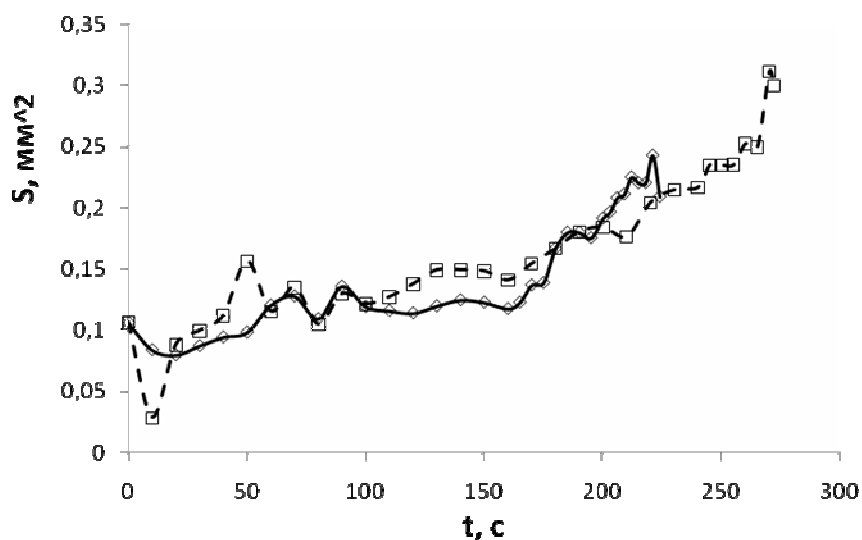


Рис.5. Кинетика развития величины площадей занятых трещинами в сплаве В95 (—□— закаленный, —◇— - холоднодеформированный)

Видно, что зависимости площадей, занятых трещинами сплава В95 в холоднодеформированном и закаленном состояниях представляют собой двух стадийные кривые, отличающиеся между собой скоростями развития трещин. Стадия стабильного роста более протяженная, чем катастрофического роста, но скорости развития трещин на ней на порядок выше, росте, чем при ее устойчивом росте. В таблице №2 приведены результаты сравнения процесса развития трещин сплава В95 в обоих анализируемых состояниях.

Таблица 2 - Сравнительный анализ параметров разрушения сплава В95 в обоих состояниях

Состояние сплава В95	Стадия устойчивого роста трещины			Стадия нестабильного роста трещины		
	Интервал времени, t, с.	$\frac{dS_c}{dt}$, мм ² /с	Нагрузка упругая, P _y , кГ	Интервал времени, t, с.	$\frac{dS_p}{dt}$, мм ² /с	Максимальная нагрузка, P _{max} , кГ
Холоднокатаное	0-166	$9 \cdot 10^{-4}$	601,78	166-216	$1,6 \cdot 10^{-3}$	1290
Закаленное	0-235-	$1,6 \cdot 10^{-3}$	853,90	235-359	$2 \cdot 10^{-3}$	2254,69

Из таблицы видно, что по большинству параметров, характеризующих сопротивление разрушению, закаленное состояние превосходит холоднодеформированное. Это же можно сказать о сопротивлении разрушению, если оценивать по КИН при его оценке по стандартному методу с использованием образцов для внецентренного растяжения [8]: 51,57 для закаленного состояния против 49,12 МПа^{0.5} для холоднодеформированного. Дополнительно КИН определялась по данным ФАСИ. Для этого из формулы (1) была определена константа $A = 0,46826$. КИН определяли из формулы [2]:

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \frac{\sin \theta}{2} \sin 3\theta \right) \quad (6)$$

Определив предварительно $\Delta\varphi$ и σ для кривой нагружения для микро фрагмента у фронта трещины в нашем случае $K_I = K_I$. На рис.6 показаны зависимость $K_{IN} = f(\sigma)$, полученная в предположении, что напряжение у фронта трещины можно определить по формуле для изгиба балки (3). По этим данным было установлено, что значение КИН, измеренное по стандартной методике, совпадает со значением, найденным с помощью ФАСИ, если положить в формуле $r = 5,4$ мм. На рис.7 показаны радиальные зависимости компоненты напряжения, действующего в направлении внедрения клина при разных наклонах к горизонту.

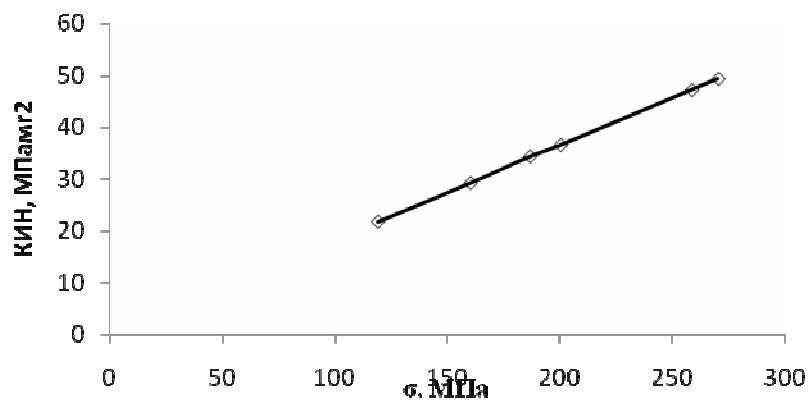


Рис.6. Зависимость КИН от расстояния между фронтом трещины и центром микро фрагмента, в котором методом ФАСИ было определено напряжение.

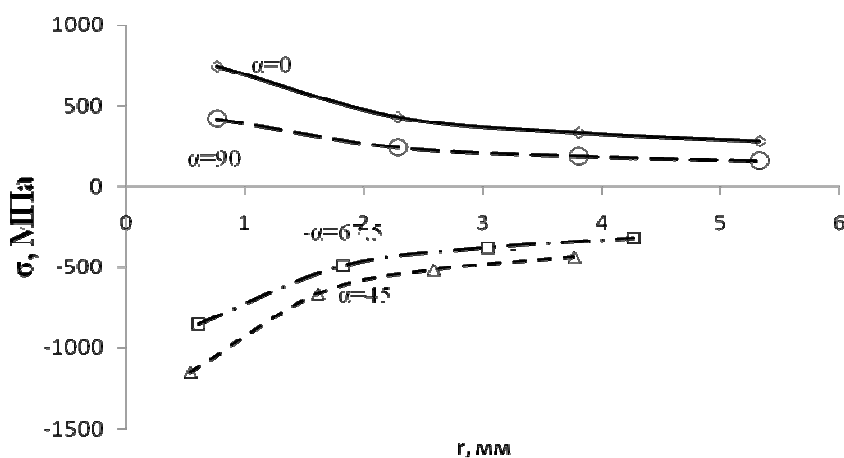


Рис.7. Радиальные зависимости компоненты напряжений $\sigma_y = f(r)$ в разных азимутальных направлениях

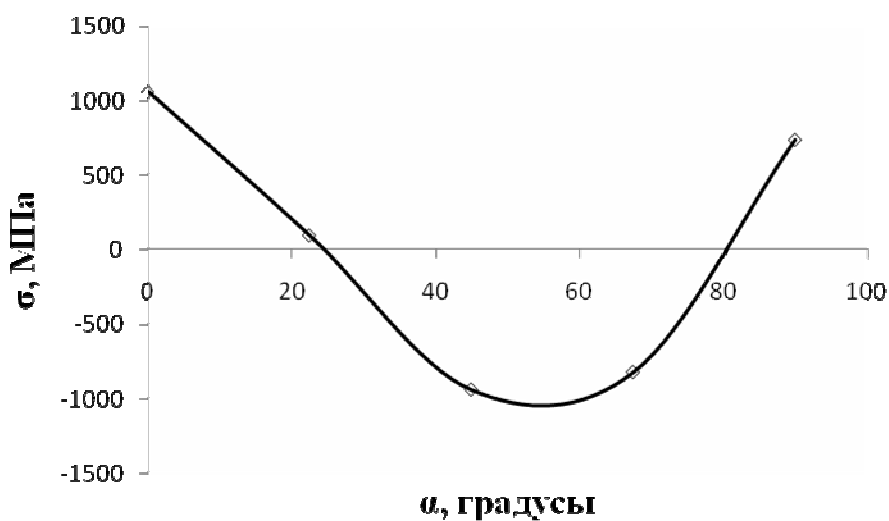


Рис.8. Азимутальная зависимость компоненты напряжений $\sigma_y = f(\alpha)$ у фронта трещины при $k = 1$ мм

Применение ФАСИ дает возможность получить большой объем разнообразной информации, обеспечивающий полноту и детальность представлений о разрушении конструкционных материалов.

Выводы:

1. Разработан комплексный метод анализа развития разрушения малогабаритных образцов с электроискровым надрезом, которые нагружаются внедрением клина, позволяющий изучать кинетику развития трещин и локальных пластических зон в связи с локальным напряженным состоянием у фронта трещины.
2. Метод позволяет определять КИН как стандартным методом, так и по данным ФАСИ. Найдены условия результатов, полученных по обоим методам.
3. Сравнительный анализ трещиностойкости сплава В95 в холоднодеформированном и закаленном состояниях показал лучшее сопротивление разрушению в закаленном состоянии.

Список литературы: 1. Нотт Д.Ф. Основы механики разрушения. М.: Металлургия, 1978, 256 с. 2. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974, 640 с. 3. Справочник по авиационным материалам п/р. Туманова А.Т. ч.1 М.:Машиностроение. 455 с. 4. Ермишкин В.А., Мурат Д.П., Подбельский В.В. Информационные технологии фотометрического анализа усталостного повреждаемости материалов. Информационные технологии» 2007. №11, С. 65-70. 5. 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. 6. Астапенко В.А. Взаимодействие излучения с атомами и наночастицами. Долгопрудный: Изд. Интеллект. 2010. 492 с. 7. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.:Из-во МГТУ им. Н.Э.Баумана. 1999. 589 с. 8. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. п/р. Ю. Мураками, М.: Мир, 1990, 448 с.