УДК 621.179

Костенюк Д.Н.
Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

ОПТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ПЛАСТИЧЕСКИХ ЗОН ТРЕЩИН В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

Kosteniuk D.
National Aviation University, Kiev, Ukraine (kostenjuk@ukr.net)

OPTICAL METHOD FOR DETERMINATION OF THE CRACK TIP PLASTIC ZONE SIZES AND SHAPE IN ALUMINUM ALLOYS

В статье предложена оптическая методика определения размеров и формы пластических зон (ПЗ) трещин по характерным изменениям изображения поверхности металла вблизи трещины, которые наблюдаются с помощью металлографического микроскопа при его расфокусировке. Для применения методики поверхность металла полировалась перед распространением трещины. Используя данную методику, экспериментально определены размеры монотонной ПЗ усталостной трещины в алюминиевом сплаве Д-16АТ. Для этой же трещины проведен теоретический расчет размеров монотонной ПЗ, а именно расстояния от вершины трещины до границы ПЗ по нормали к плоскости трещины. Расчет проводился для различных значений длины трещины. Выполнено сопоставление теоретических и экспериментальных размеров монотонной ПЗ с применением непараметрического критерия Уилкоксона. Экспериментально исследовано влияние на размеры ПЗ плакирующего слоя.

Ключевые слова: *пластическая зона; усталостная трещина; плакирующий слой.*

Введение

Исследование ПЗ в кончике трещин имеет первостепенную важность для описания процесса разрушения с макроскопической точки зрения и для разработки различных критериев разрушения [1]. Различные характеристики ПЗ, к которым относятся ее форма и размеры служат обоснованием для введения некоторых моделей трещин [2]. В работе [3] отмечено, что прямые измерения размеров ПЗ и их связь с поведением трещины очень важны для развития физических моделей роста трещины. Форма и размеры ПЗ оказывают влияние на выбор критериев прочности механики разрушения. Оценка размеров ПЗ позволяет уточнять достаточные критерии прочности, и осуществлять их практическую реализацию [4]. Кроме того, длина ПЗ входит в эффективную длину трещины, используемую в расчетах величины критической нагрузки и остаточного ресурса конструкции [5].

Форму и размеры ПЗ можно определять как экспериментально, так и теоретически. Для теоретического определения формы и размеров ПЗ разработан ряд методов, часть которых описана в [6, 7]; на сегодняшний день широко применяется метод конечных элементов, например в работах [1, 8, 9]. Несмотря на большой прогресс, достигнутый в этой области, различные теоретические методы часто по-разному описывают формы ПЗ, и дают разные их размеры, поэтому важной задачей является экспериментальная проверка результатов аналитических выкладок, что и отмечается в работах [6, 10].

В работе [11] показана принципиальная возможность с помощью экспериментального определения размеров ПЗ оценивать такую важную характеристику разрушения, как трещиностойкость; а в [12] описаны методы оценки статической трещиностойкости и максимального значения напряжения цикла (приведшего к разрушению конструкции или детали), по глубине ПЗ под поверхностью изломов, определенной с помощью рентгеновской фрактодиагностики.

Для экспериментального определения формы и размеров ПЗ разработан ряд методов, описание которых приведено в [13, 14]. Кроме описанных в этих работах методов, нашел свое применение метод прямого наблюдения ПЗ на предварительно подготовленной (перед распространением трещины) боковой полированной поверхности образца [15, 16, 17, 18]. Данный метод представляет интерес тем, что отличается относительно небольшой трудоемкостью и не требует применения какого-либо оборудования. Проводимое при использовании этого метода визуальное наблюдение ПЗ, непосредственно на блестящей полированной поверхности, возможно из-за изменения состояния поверхности металла в ПЗ. Такое изменение вызвано деформацией зерен (изменение их формы и размеров) и их относительным смещением (перемещение и поворот относительно друг друга). Применение данного метода в работе [17] позволило наблюдать изменение формы и размеров ПЗ на поверхности стальных пластин с трещиновидным концентратором при их растяжении. ПЗ наблюдалась сначала в виде матовых пятен, которые при увеличении нагрузки принимают каплевидную форму, потом форму длинного узкого клина направленного вдоль оси концентратора (возникают полосы пластичности), затем появляются полосы пластичности, наклоненные под углом к оси концентратора, их количество увеличивается и они сливаются. Недостаток данного метода заключается в том, что он не позволяет определить форму и размеры ПЗ трещины, если пластическая деформация в ее кончике не сопровождается достаточными для визуального наблюдения изменениями состояния поверхности металла. Также с помощью данного метода затруднительно обнаружить и измерить с достаточной точностью ПЗ небольших размеров, из-за субъективных факторов, влияющих на визуальное наблюдение. Другие методы определения формы и размеров ПЗ, в определенной мере лишенные этих недостатков, являются более трудоемкими, чем метод прямого наблюдения, и требуют использования сложного оборудования.

Стремление к увеличению эффективности исследований и решений задач механики разрушения применительно к конструкциям из алюминиевых сплавов, привело к необходимости разработки методики определения формы и размеров ПЗ, которая компенсируя недостатки метода прямого наблюдения, обладала бы меньшей трудоемкостью и использовала бы более простое и доступное оборудование, чем другие применяемые для этого методы.

Целью данной работы является разработка и экспериментальное обоснование оптической методики определения размеров и формы ПЗ трещин, которая:

- обеспечивает определение размеров и формы ПЗ с помощью металлографического микроскопа путем выявления на поверхности металла зон с деформацией и относительным смещением зерен;
- позволяет определять размеры и форму ПЗ при величинах деформации и относительного смещения зерен в ПЗ недостаточных для применения метода прямого наблюдения;
- не требует дополнительного оборудования;
- обладает как можно меньшей трудоемкостью.

Предложенная в данной работе методика определения формы и размеров ПЗ основана на изменении рельефа полированной поверхности металла при его пластической деформации. Из-за появления деформационного рельефа [19], изображения поверхностей пластически деформированного и недеформированного металла, при расфокусировке металлографического микроскопа, имеют существенные различия, в то время как при фокусировке соответствующей максимальной резкости эти различия незаметны. В данной статье под расфокусировкой микроскопа подразумевается смещение объектива микроскопа относительно его положения соответствующего максимальной резкости изображения, в направлении «к» или «от» наблюдаемой поверхности металла, в пределах позволяющих фиксировать описанные ниже, в алгоритме методики, характерные изменения изображения. Граница между участками поверхности, изображение которых изменяется по-разному (см. алгоритм методики) при расфокусировке, является границей между пластически деформированным и недеформированным металлом, то есть границей ПЗ, а для усталостной трещины - границей монотонной ПЗ. Такой вывод позволило сделать наблюдение за распределением полос скольжения, являющихся следствием пластической деформации, на поверхности плакирующего слоя вблизи берегов трещины. Полосы скольжения наблюдались (часть при максимальной резкости и часть при расфокусировке) во всех зернах находящихся между берегом трещины и границей разделяющей изменяющиеся по-разному при расфокусировке части изображения поверхности. За пределами этой границы (дальше от берега трещины) распределение зерен с видимыми полосами скольжения являлось менее плотным, не зависело от расстояния до трещины, носило случайный характер. Очевидно, появление полос скольжения в зернах за пределами границы, обусловлено их благоприятной для этого кристаллографической ориентацией, а не напряженным состоянием в кончике трещины. Так как пластическая деформация вызванная напряжениями в кончике трещины сосредоточена между трещиной и границей между частями поверхности, изображение которых изменяется по-разному при расфокусировке, то можно утверждать, что эта граница является границей ПЗ.

Алгоритм методики определения формы и размеров ПЗ

Алгоритм методики определения формы и размеров ПЗ состоит из следующих пунктов:

1. Подготовка контролируемой зоны вероятного распространения трещины (до нагружения испытываемого образца) заключается в полировке поверхности металла в этой зоне до качества металлографического шлифа.

2. Настройка оптического металлографического микроскопа включает в себя выбор необходимого увеличения и освещения. Увеличение должно быть таким, чтобы в поле зрения попадала, как можно большая площадь поверхности при сохранении возможности с необходимой точностью измерять расстояния в пределах размера зерна. Оптимальным увеличением для определения формы и размера ПЗ на поверхности Д-16АТ является увеличение в 50-80 раз. Увеличение при выполнении эксперимента составило 80^X, фокусное расстояние объектива равнялось 25 мм, все указанные в данной работе изменения фокусировки проводились при этом фокусном расстоянии объектива.

3. Определение границ ПЗ требует выполнения следующих действий:

3.1. Навести микроскоп на то место исследуемого образца, где необходимо определять границы ПЗ, и сфокусировать его на максимально резкое изображение поверхности металла.

3.2. Плавно изменяя фокусировку (во время эксперимента она изменялась в пределах ±250 мкм от фокусировки соответствующей максимальной резкости), приближая или удаляя объектив от образца, наблюдать за изменением изображения поверхности. Если при изменении фокусировки изображение становится равномерно расплывчатым (равномерно изменяется резкость), то пластическая деформация в этой зоне отсутствует.

Изменение изображения зон, где произошла пластическая деформация металла, имеет следующие особенности:

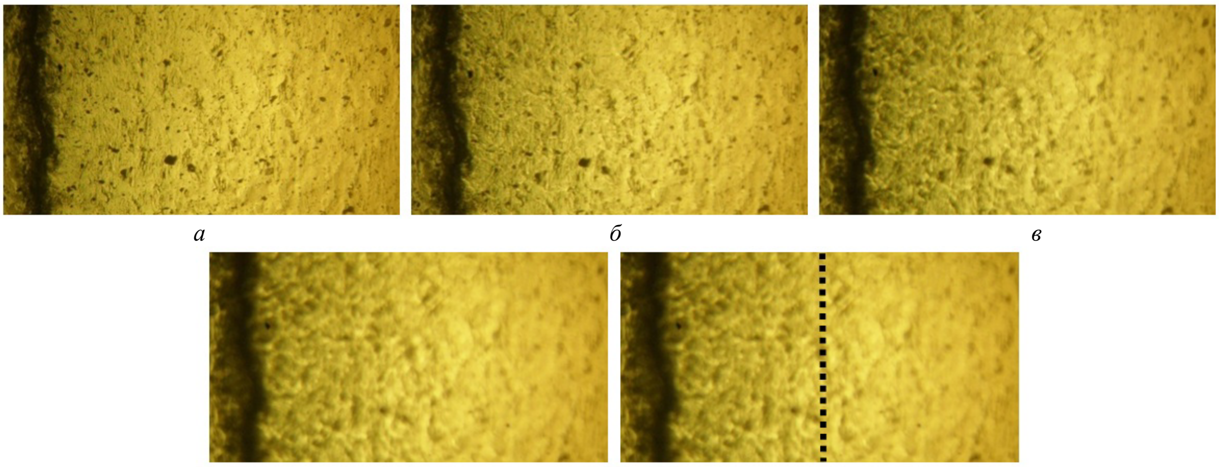
- при изменении фокусировки в пределах ±50 мкм от фокусировки соответствующей максимальной резкости изображения, пропадают одни и появляются другие полосы скольжения (характерно только для сплавов, на поверхности которых появляются полосы скольжения после их нагружения);

- при изменении фокусировки в пределах ±100 мкм от фокусировки соответствующей максимальной резкости, изображение насыщено деталями в той или иной мере сохраняющими свою резкость (вершины или впадины деформационного рельефа поверхности);

- при еще большем изменении фокусировки изображение представляет собой чередующиеся равномерно расплывающиеся при изменении фокусировки черные и белые пятна. Эта особенность изменения изображения может учитываться для определения границ ПЗ только при условии выполнения одной из предыдущих.

Описанные выше особенности изменения изображения в процессе расфокусировки можно наблюдать на рис. 1. На снимках одного и того же места возле трещины, выполненных с увеличением 80^X и фокусным расстоянием объектива 25 мм, при разной фокусировке, можно видеть разницу в изменении изображения в левой и правой частях снимков.

Граница между участками поверхности, изображение которых изменяется по-разному, соответствует границе ПЗ.



а *б* *в*

г *д*

Рис. 1. Изменение изображения поверхности образца вблизи трещины в процессе расфокусировки (увеличение 80^X, фокусное расстояние объектива 25 мм, объектив приближался к поверхности): а - фокусировка соответствует максимально резкому изображению всей поверхности; б – фокусировка изменена на 25 мкм; в – фокусировка изменена на 75 мкм; г – фокусировка изменена на 125 мкм; д – фокусировка изменена на 125 мкм, пунктирной линией показана граница ПЗ

Из-за неравномерности освещения изображения в окуляре, точно определить границу ПЗ можно, только если она будет находиться в центре окуляра.

При этом возможность четко различать участки, изображение которых изменяется по-разному, определяет границы применения методики. Так, при экспериментальном определении размеров ПЗ в данной работе, удавалось определить границы ПЗ для трещин длиною до 25 мм (максимальный коэффициент интенсивности напряжений: K_{max}=42,7 МПа $\sqrt{м}$).

4. Определить размеры ПЗ можно измерив, расстояние от берега или кончика трещины до границы ПЗ с помощью установленной в окуляре шкалы.

5. Определить форму ПЗ можно или непосредственно наблюдая ее в окуляре микроскопа, или нанеся ее границы на предварительно выполненную с помощью микроскопа панорамную фотографию контролируемой зоны.

Методика и результаты экспериментального определения размеров ПЗ

Экспериментально монотонная ПЗ определялась на листовых образцах толщиной 1,2 мм, изготовленных из сплава Д-16АТ (рис.2). Для определения влияния плакирующего слоя на размеры ПЗ, на одном из испытываемых образцов, с одной стороны, в зоне вероятного распространения трещины, был удален плакирующий слой; толщина образца в этой зоне составила 1,1 мм. Максимальное напряжение цикла нагружения в образце без трещины (в зоне с удаленным с одной стороны плакирующим слоем) составило 89,2 МПа, коэффициент асимметрии R=0, частота нагружения 11 Гц. Параметры настройки микроскопа и величины изменения фокусировки указаны в алгоритме методики.

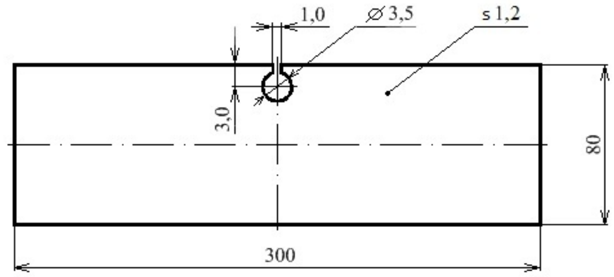


Рис. 2. Образец для усталостных испытаний

Результаты экспериментального определения размеров монотонной ПЗ на стороне с плакирующим слоем и на стороне без плакирующего слоя показали, что плакирующий слой не влияет на размеры и форму ПЗ (наявность плакирующего слоя можно не учитывать при аналитическом расчете ПЗ), а также подтвердили возможность использования метода как для плакированных, так и неплакированных сплавов.

Результаты экспериментального определения монотонной ПЗ представлены на диаграмме (рис.3).

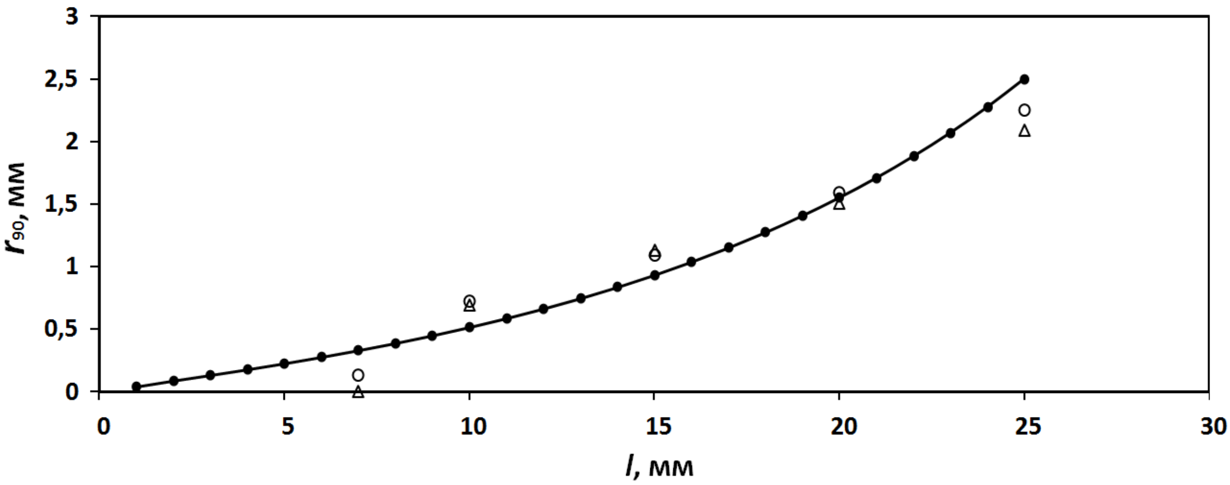


Рис. 3. Зависимость расстояния от вершины трещины до границы монотонной ПЗ, по нормали к плоскости трещины, от длины трещины: ○ - экспериментальные значения на поверхности без плакирующего слоя, Δ - экспериментальные значения на поверхности с плакирующим слоем, ● – данные аналитического расчета

Теоретический расчет размеров ПЗ

Чтобы установить, не выходят ли экспериментально определенные размеры монотонной ПЗ за пределы их теоретически возможных значений, и для оценки различий между экспериментальными и расчетными данными, выполнен теоретический расчет размеров ПЗ.

Расчет размеров монотонной ПЗ производился по формуле [7]:

$$r_{90} = \alpha_{90}\left(\frac{K_{\max}}{\sigma_T}\right), \qquad (1)$$

где: r_{90} - расстояние от вершины трещины до границы монотонной ПЗ по нормали к плоскости трещины, α_{90} - коэффициент который зависит от угла между плоскостью трещины и направлением в котором производится измерение расстояния от вершины трещины до границы ПЗ, в данном случае этот угол равен 90º. Для большинства материалов [20] α_{90} при плоской деформации принимает значения от 0,05 до 0,1, и при плоском напряженном состоянии от 0,1 до 0,17. Примем для расчета α_{90}=0,1. σ_T - предел текучести материала, для Д-16АТ равен 270 МПа.

$K_{\max}$ рассчитывался по формуле [21]:

$$K_{\max} = \sigma_{\max}\sqrt{l}\ Y(\lambda), \tag{2}$$

где: $\sigma_{\max}$ - максимальное напряжение цикла нагружения, l – эффективная длина трещины (размер самой трещины плюс размер концентратора напряжений образца для испытаний), $\lambda = l/b$, b – ширина образца, $Y(\lambda)=1{,}99-0{,}41\,\lambda+18{,}7\,\lambda^2-38{,}48\,\lambda^3+53{,}85\,\lambda^4$.

Результаты аналитического расчета ПЗ представлены на диаграмме (рис.3).

Сравнение экспериментальных и теоретических данных

Оценим, являются ли различия теоретических и экспериментальных значений размера монотонной ПЗ (индексы «т» и «э» в табл.1 и 2) существенными (значимыми) или случайными. Для этого используем критерий Уилкоксона - непараметрический статистический критерий, применяемый для оценки различий между двумя зависимыми выборками, взятыми из закона распределения, отличного от нормального. Объем сравниваемых выборок (по 5 элементов в каждой) позволяет нам применить данный метод для статистического анализа.

В табл. 1 приведены соответствующие теоретические и экспериментальные значения ПЗ измеренные на поверхности плакирующего слоя, а также дополнительные столбцы, необходимые для работы по критерию Уилкоксона.

Воспользуемся следующим алгоритмом:

1. Вычислим разности между экспериментальными и теоретическими значениями r_{90} для заданных значений эффективной длины трещины (столбец 4).

2. Найдём модули полученных разностей (столбец 5) и произведём их ранжирование в порядке возрастания (столбец 6).

Таблица 1

Таблица для расчета критерия Уилкоксона при сравнении теоретических и экспериментальных размеров монотонной ПЗ, измеренных на поверхности плакирующего слоя

Эффективная длина трещины l, мм	Размер ПЗ теоретический r_{90}^{T}, мм	Размер ПЗ экспериментальный $r_{90}^{Э}$, мм	Разность показателей, мм	Модуль разности, мм	Ранг модуля разности
1	2	3	4	5	6
7	0,328	0	-0.328	0.328	4
10	0,513	0,69	0.177	0.177	2*
15	0,929	1,125	0.196	0.196	3*
20	1,549	1,5	-0.049	0.049	1
25	2,498	2,09	-0.408	0.408	5

3. Отметим ранги (в таблице отмечены звездочкой), соответствующие сдвигам в нетипичном направлении. Так как для большего числа значений эффективной длины трещины теоретически определенные размеры ПЗ превышают экспериментальные, то нетипичным сдвигом будем считать превышение экспериментальных значений над теоретическими.

4. Эмпирическое значение критерия определяется как сумма рангов, соответствующих нетипичным сдвигам. В данном случае есть два таких сдвига, которым соответствуют ранги 2 и 3. Поэтому эмпирическое значение критерия будет численно равно: $T_{эмп}$=2+3=5.

5. Сравним полученное значения критерия $T_{эмп}$ с его критическим значением ($T_{кр}$). Если отклонения между теоретическими и экспериментальными значениями носят случайный характер, то $T_{эмп}$ должно быть больше чем $T_{кр}$. $T_{кр}$ найдем в специальной таблице [22]. Пусть уровень значимости равен 0.05, тогда для 5 сравниваемых пар табличное значение критерия $T_{кр}(0.05)=0$. Так как $T_{эмп}>T_{кр}$ (5>0), то отклонения экспериментальных данных от теоретических носят случайный характер.

Проведем аналогичную оценку различий теоретических и экспериментальных значений размеров монотонной ПЗ, измеренных на поверхности без плакирующего слоя. Данные для этой оценки приведены в табл.2.

Таблица 2

Таблица для расчета критерия Уилкоксона при сравнении теоретических и экспериментальных размеров монотонной ПЗ, измеренных на поверхности без плакирующего слоя

Эффективная длина трещины l, мм	Размер ПЗ теоретический r_{90}^{T}, мм	Размер ПЗ экспериментальный $r_{90}^{Э}$, мм	Разность показателей, мм	Модуль разности, мм	Ранг модуля разности
1	2	3	4	5	6
7	0,328	0,125	-0.203	0.203	3*
10	0,513	0,72	0.207	0.207	4
15	0,929	1,09	0.161	0.161	2
20	1,549	1,59	0.041	0.041	1
25	2,498	2,25	-0.248	0.248	5*

пользуясь тем же алгоритмом получим: $T_{эмп}$=8, $T_{кр}$=0. Так как $T_{эмп}$>$T_{кр}$ (8>0), то отклонения экспериментальных данных от теоретических носят случайный характер.

Выводы

В основу предлагаемой методики положена возможность с помощью металлографического микроскопа выявлять участки полированной поверхности металла с измененным в результате пластической деформации рельефом. Рассматривая при максимальной резкости изображение деформационного рельефа поверхности, выявить границу между пластически деформированными и недеформированными участками не представляется возможным. С этой целью применяется расфокусировка микроскопа, то есть смещение объектива микроскопа вдоль его оптической оси, относительно его положения соответствующего максимальной резкости изображения. По характерному изменению изображения поверхности в процессе расфокусировки можно определить участки пластически деформированного и недеформированного металла, а соответственно и границу ПЗ.

Данная методика может быть применена как для трещин, распространяющихся при однократном нагружении, так и для усталостных трещин. Для усталостных трещин возможно определение размеров и формы только монотонной ПЗ. Методика не дает возможности оценить степень деформации в пределах ПЗ. Отклонения экспериментально определенных, с помощью данной методики, размеров ПЗ от размеров определенных теоретически носят случайный характер. Экспериментально доказано, что предложенная методика может быть применена для плакированных и неплакированных алюминиевых сплавов.

Анотація. *В статті запропонована оптична методика визначення розмірів та форми пластичних зон (ПЗ) тріщин по характерним змінам зображення поверхні металу поблизу тріщини, які спостерігаються з допомогою металографічного мікроскопу при його розфокусуванні. Для використання методики поверхня металу полірувалась перед розповсюдженням тріщини. Використовуючи дану методику, експериментально визначені розміри монотонної ПЗ втомної тріщини в алюмінієвому сплаві Д-16АТ. Для цієї ж тріщини проведено теоретичний розрахунок розмірів монотонної ПЗ, а саме відстані від вершини тріщини до границі ПЗ по нормалі до площини тріщини. Розрахунок проводився для різних значень довжини тріщини. Виконано співставлення теоретичних та експериментальних розмірів монотонної ПЗ з використанням непараметричного критерію Вілкоксона. Експериментально досліджено вплив на розміри ПЗ плакуючого шару.*
Ключові слова: пластична зона; втомна тріщина; плакуючий шар.

Abstract. *The paper presents a method for determination of the crack tip plastic zone size and shape by the metallurgical microscope, which based on changing of the metal surface (polished before the crack propagation) image that occurs due to the focus change. Because the images of the plastic deformed and the undeformed regions of the metal change differently when the microscope focus change (in the paper defocus value equals ±250 µm, focal length equals 25mm, and magnification is* 80^X*), the plastic zone boundary can be determined. The difference in the way images change is explained by evolution of deformation relief on the surface of aluminum alloy due to plastic deformation, the image of deformation relief doesn't enable determination of plastic zone boundary when the image is in focus, that's why the defocus is required. The size of the monotonic plastic zone at the tip of a fatigue crack experimentally measured for clad and unclad aluminum alloy using the method. The results demonstrate that the presence of the cladding layer doesn't influence the plastic zone size. The monotonic plastic zone size calculated with the linear elastic fracture mechanics equation as a distance normal to the crack plane from the crack tip to the plastic zone boundary. The experimental plastic zone sizes are compared with the analytical solutions using the Wilcoxon signed-rank test. This comparison helps to infer that the experimental results of plastic zone size are in good agreement with the results estimated by analytical calculation. The extension of the method to other materials needs further investigation.*
Keywords: plastic zone; fatigue crack; cladding layer.

Библиографический список использованной литературы

1. *Kudari S.K.* Experimental investigation on possible dependence of plastic zone size on specimen geometry / S.K. Kudari, B. Maiti, K.K. Ray // Fracture and Structural Integrity. - 2009. – Vol. 3. - № 7. – P. 57-64.
2. *Партон В.З.* Механика упругопластического разрушения / В.З. Партон, Е.М. Морозов. — М.: Наука, 1985. — 504 с.
3. *Zhang W.* In-situ optical microscopy study on plastic zone size estimation of aluminum alloy 7075-T6 under cyclic loading / Wei Zhang, Zizi Lu, Yongming Liu // Fatigue of Materials: Advances and Emergences in Understanding. – 2010. – P. 419-429.
4. *Кожевникова М.Е.* Достаточные критерии прочности для трещины и узкого выреза с закруглением в вершине при квазихрупком разрушении / М.Е. Кожевникова, В.М. Корнев // Физическая мезомеханика. – 2004. - Т. 7, № 5. – С. 47-62.
5. *Каминский А.А.* Прогнозирование размеров пластической зоны у вершины трещины в ортотропных металлических материалах / А.А. Каминский, В.Н. Бастун // Доповіді Національної академії наук України. – 2009. - № 9. – С. 73-79.
6. *Броек Д.* Основы механики разрушения / Броек Д.; [пер. с англ. В.И. Дорофеева]. - М.: Высш. школа, 1980. - 368 с.
7. *Branco C.M.* Influence of strain rate and strain cycling on fatigue crack-tip plasticity / C.M. Branco, L.Guerra Rosa, J.C. Radon // Proc. ECF 5, ed. EMAS. – 1984. - Vol. 1. – P. 317-326.
8. *Loye C.* The plastic zone ahead of a fatigue crack in 316 stainless steel / C. Loye, C. Bathias, D. Retali, J.C. Devaux // Fatigue Mechanisms: Advances in Quantitative Measurement of Physical Damage, ASTM STP 811, American Society for Testing and Materials. – 1983. – P. 427-444.
9. *Rossi M.* Identification of the plastic zone using digital image correlation / M. Rossi, M. Sasso, G. Chiappini, E. Mancini, D. Amodio // Fracture and Structural Integrity. - 2014. – Vol. 8. - № 30. – P. 552-557.
10. *Czoboly E.* Experimental determination of plastic zones / E. Czoboly, B. Csizmazia, I. Havas // Materials Science. – 1996. – Vol. 32. - № 1. – P. 87-98.
11. *Деревягина Л.С.* Возможности оптико-телевизионного измерительного комплекса TOMSC для анализа процесса разрушения / Л.С. Деревягина, В.Е. Панин, А.И. Гордиенко // Физическая мезомеханика. – 2009. - Т. 12, № 2. – С. 37-43.
12. *Клевцов Г.В.* Закономерности образования пластических зон у вершины трещины при различных видах нагружения и рентгеновская фрактодиагностика разрушения / Г.В. Клевцов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2006. – Т. 2, № 1. – С. 81-88.
13. *Uğuz A.* Plastic zone size measurement techniques for metallic materials / Agah Uğuz, John W. Martin // Materials Characterization. - 1996. – Vol. 37. – Issue 2-3. – P. 105–118.
14. *Yang Y.* Quantitative measurement of plastic strain field at a fatigue crack tip / Y. Yang, M. Crimp, R. A. Tomlinson, E. A. Patterson // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. - 2012. – Vol. 468. – № 2144. – P. 2399–2415.
15. *Красовский А.Я.* Локальная пластическая деформация в вершине трещины и хрупкое разрушение металлов: автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра физ.-мат. наук: спец. 01.04.07 „Физика твердого тела” / Красовский А.Я.– К., 1973.- 48с.
16. *Леонов М.Я.* Теоретическое и экспериментальное исследование упруго-пластических деформаций при растяжении пластинки со щелью / М.Я. Леонов, П.М. Витвицкий, С.Я. Ярема // Теория пластин и оболочек. – К., 1962. – С. 196-198.
17. *Корнилов Т.П.* Плоские образцы с трещиновидным концентратором для экспериментального исследования полос пластичности / Т.П. Корнилов, С.Я. Ярема // Вопросы механики реального твердого тела. - 1962. - Вып. 1. - С. 29-36.
18. *Леонов М.Я.* Полосы пластичности при растяжении пластин с трещиновидными концентраторами / М.Я. Леонов, П.М. Витвицкий, С.Я. Ярема // Доклады АН СССР. – 1963. – Т. 148, № 3. – С. 541-544.
19. *Лычагин Д.В.* Классификация и масштабная иерархия структурных элементов деформации ГЦК-монокристаллов / Д.В. Лычагин, В.А. Старенченко, Ю.В. Соловьева // Физическая мезомеханика. – 2005. - Т. 8, № 6. – С. 67-77.
20. *Lankford J.* Fatigue crack tip plasticity / J. Lankford, D.L. Davidson, T.S. Cook // Cyclic stress-strain and plastic deformation aspects of fatigue crack growth, ASTM STP 637, American Society for Testing and Materials. – 1977. – P. 36-55.
21. *Николаева Е. А.* Основы механики разрушения: учебное пособие / Николаева Е. А. — Пермь: Изд-во Пермского гос. техн. ун-та, 2010. — 103 с.
22. *Таблица* критических значений Т-критерия Вилкоксона [Электронный ресурс]. - Режим доступа к информации: http://statpsy.ru/wilkoxon/tablica-willcoxon/

References

1. *Kudari S.K.*, Maiti B., Ray K.K. Experimental investigation on possible dependence of plastic zone size on specimen geometry. Fracture and Structural Integrity, 2009, Vol. 3, no 7, pp. 57-64.
2. *Parton V.Z.*, Morozov E.M. Mehanika uprugoplasticheskogo razrushenija [Elastic-plastic fracture mechanics]. Moscow: Nauka, 1985, 504 p.
3. *Zhang W.*, Lu Z., Liu Y. In-situ optical microscopy study on plastic zone size estimation of aluminum alloy 7075-T6 under cyclic loading. Fatigue of Materials: Advances and Emergences in Understanding, 2010, pp. 419-429.
4. *Kozhevnikova M.E.*, Kornev V.M. Dostatochnye kriterii prochnosti dlja treshhiny i uzkogo vyreza s zakrugleniem v vershine pri kvazihrupkom razrushenii [Sufficient strength criteria for a crack and elliptic notch at quasi-brittle fracture]. Physical Mesomechanics, 2004, Vol. 7, no 5, pp. 47-62.
5. *Kaminskij A.A.*, Bastun V.N. Prognozirovanie razmerov plasticheskoj zony u vershiny treshhiny v ortotropnyh metallicheskih materialah [Prediction of sizes of a plastic zone near a crack tip in orthotropic metallic materials]. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2009, no 9, pp. 73-79.

6. *Broek D.* Elementary Engineering Fracture Mechanics. Leyden, Noordhoff International Publishing, 1974, 408 p.
7. *Branco C.M.*, Rosa L.Guerra, Radon J.C. Influence of strain rate and strain cycling on fatigue crack-tip plasticity. Proc. ECF 5, ed. EMAS, 1984, Vol. 1, pp. 317-326.
8. *Loye C.*, Bathias C., Retali D., Devaux J.C. The plastic zone ahead of a fatigue crack in 316 stainless steel. Fatigue Mechanisms: Advances in Quantitative Measurement of Physical Damage, ASTM STP 811, American Society for Testing and Materials, 1983, pp. 427-444.
9. *Rossi M.*, Sasso M., Chiappini G., Mancini E., Amodio D. Identification of the plastic zone using digital image correlation. Fracture and Structural Integrity, 2014, Vol. 8, no 30, pp. 552-557.
10. *Czoboly E.*, Csizmazia B., Havas I. Experimental determination of plastic zones. Materials Science, 1996, Vol. 32, no 1, pp. 87-98.
11. *Derevjagina L.S.*, Panin V.E., Gordienko A.I. Vozmozhnosti optiko-televizionnogo izmeritel'nogo kompleksa TOMSC dlja analiza processa razrushenija [Capability of the television-optical measuring complex TOMSC for fracture analysis]. Physical Mesomechanics, 2009, Vol. 12, no 2, pp. 37-43.
12. *Klevcov G.V.* Zakonomernosti obrazovanija plasticheskih zon u vershiny treshhiny pri razlichnyh vidah nagruzhenija i rentgenovskaja fraktodiagnostika razrushenija [Plastic zones formation under different types of loading conditions and X-ray diffraction analysis of fracture surfaces]. Messenger of the Orenburg state university, 2006, Vol. 2, no 1, pp. 81-88.
13. *Uğuz A.*, John W. Martin Plastic zone size measurement techniques for metallic materials. Materials Characterization, 1996, Vol. 37, Issue 2-3, pp. 105–118.
14. *Yang Y.*, Crimp M., Tomlinson R. A., Patterson E. A. Quantitative measurement of plastic strain field at a fatigue crack tip. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012, Vol. 468, no 2144, pp. 2399–2415.
15. *Krasovskij A.Ja.* Lokal'naja plasticheskaja deformacija v vershine treshhiny i hrupkoe razrushenie metallov: avtoref. dis. na soisk. uchen. step. d-ra fiz.-mat. nauk [Local plastic deformation at the crack tip and brittle fracture of metals: Extended abstract of the D.Sc. dissertation]. Kiev, 1973, 48 p.
16. *Leonov M.Ja.*, Vitvickij P.M., Jarema S.Ja. Teoreticheskoe i jeksperimental'noe issledovanie uprugo-plasticheskih deformacij pri rastjazhenii plastinki so shhel'ju [Theoretical and experimental investigation of elastic-plastic deformations of tensile plates with a gap]. Theory of plates and shells, Kiev, 1962, pp. 196-198.
17. *Kornilov T.P.*, Jarema S.Ja. Ploskie obrazcy s treshhinovidnym koncentratorom dlja jeksperimental'nogo issledovanija polos plastichnosti [Flat samples with a crack-like stress concentrator for experimental studies of shear bands]. Questions of the mechanics of real solid body, 1962, Issue 1, pp. 29-36.
18. *Leonov M.Ja.*, Vitvickij P.M., Jarema S.Ja. Polosy plastichnosti pri rastjazhenii plastin s treshhinovidnymi koncentratorami [Shear bands in tansioned plates with a crack-like stress concentrator]. Proceedings of the USSR Academy of Sciences, 1963, Vol. 148, no 3, pp. 541-544.
19. *Lychagin D.V.*, Starenchenko V.A., Solov'eva Ju.V. Klassifikacija i masshtabnaja ierarhija strukturnyh jelementov deformacii GCK-monokristallov [Classification and scale hierarchy of FCC single crystal deformation structures]. Physical Mesomechanics, 2005, Vol. 8, no 6, pp. 67-77.
20. *Lankford J.*, Davidson D.L., Cook T.S. Fatigue crack tip plasticity. Cyclic stress-strain and plastic deformation aspects of fatigue crack growth. ASTM STP 637, American Society for Testing and Materials, 1977, pp. 36-55.
21. *Nikolaeva E.A*. Osnovy mehaniki razrushenija [Fundamentals of fracture mechanics]. Perm: Izdatel'stvo permskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta, 2010, 103 p.
22. *Tablica* kriticheskih znachenij T-kriterija Vilkoksona [Table of critical values for the Wilcoxon test] (2015), Available at: http://statpsy.ru/wilkoxon/tablica-willcoxon (accessed 19 August 2015).

Подана до редакції 08.09.2015