

УДК 541.15

**В.А. Ермишкин, С.П. Кулагин,  
Н.А. Минина, М.А. Севастьянов**  
ИМЕТ РАН, г. Москва, Россия  
Тел.74991359668, e-mail: [eva@imet.ac.ru](mailto:eva@imet.ac.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ СПЛАВА ЦМ-2А МЕТОДОМ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

*Изучены результаты испытаний на разрушение с использованием фотометрического анализа видеозаписей процессов развития трещины в образцах тонких листов сплава ЦМ-2А, определяется его структурные особенности и характеристики местного напряженного состояния, соответствующего первым двум этапам разрушения. Показано, что последовательность разрушения включает три стадии.*

**Ключевые слова:** фотометрический, структура, разрушение, развитие трещин

При исследовании разрушения конструкционных материалов основное внимание уделяется определению механических характеристик, которые позволяют оценить их сопротивление развитию трещин. В виду того, что магистральное направления в разработке этой проблемы принадлежит механике разрушения [1, 2], то основное место в ней занимают методы оценки коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) конструкционных материалов для трех мод разрушения, которые анализируются в механике разрушения. Через эти коэффициенты выражаются компоненты напряженного состояния материала вблизи вершины трещины. Определение критических значений этих коэффициентов определяют предельные условия равновесия тел с трещинами и надежная оценка условий, при которых начинается катастрофическое распространение трещины имеет несомненное значение. Однако за пределами механики разрушения оказались механизмы зарождения и развития трещин. При тех размерах трещин-разрезов, которые применяются в образцах для определения КИН, эксплуатация машин и оборудования, как правило, не допускается. Известно, что время зарождения трещины и ее рост до критических размеров, при которых он приводит к возникновению аварийных ситуаций, составляет 70-90% от их рабочего ресурса [3]. Структурная зависимость прочностных характеристик материалов давно уже стало хрестоматийной истиной, однако при изучении процессов разрушения ей уделяется недостаточное внимание. В этом плане изучение структурных механизмов разрушения различных конструкционных материалов представляется достаточно важным. Предметом исследования в настоящей работе является структурный механизм разрушения образцов из тонколистового молибденового сплава ЦМ-2А (толщина 0,8 мм). Разрушение образцов таких толщин анализируется в приближении плоского напряженного состояния. Для оценки КИН были выбраны образцы для испытаний по схеме внецентренного растяжения. На рис.1 используемый образец показан в натуральную величину.

В образцах с помощью электроэрозионной резки создавался надрез длиной 15 мм и шириной 0,5 мм, который имитировал исходную трещину. Их исходное структурное состояние было сформировано в результате прокатки с 2 мм до 0,8 мм с

последующим отжигом для снятия остаточных напряжений. Образцы растягивали в захватах универсальной испытательной машины типа «Инстрон-3382» со скоростью нагружения 0,5 мм/мин. Были испытаны образцы двух типов - с надрезами, ориентированными перпендикулярно и параллельно оси направлению прокатки. На рис.2 показаны типичные кривые растяжения образцов обоих типов.

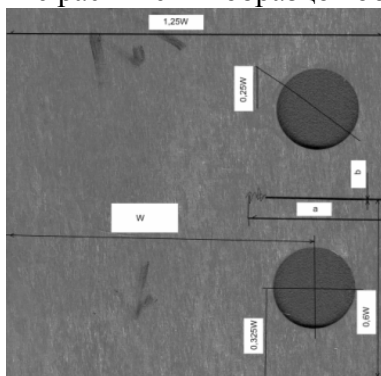


Рис.1. Образец для определения  $K_I$  при внецентренном растяжении

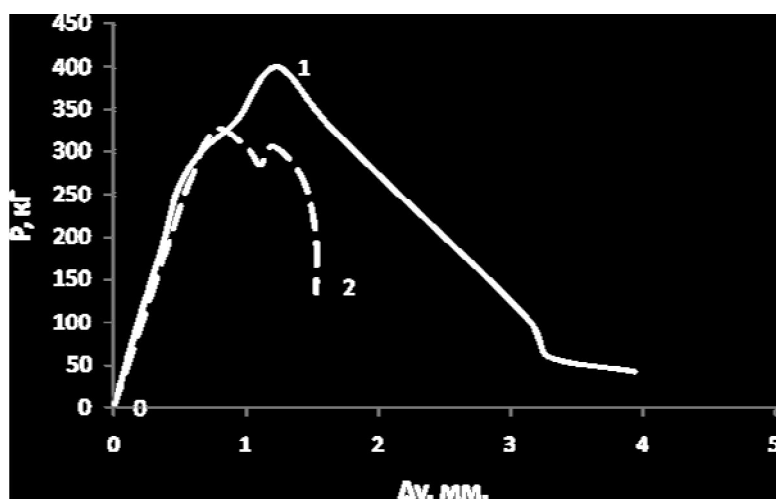


Рис.2. Кривые растяжения образцов сплава ЦМ-2А с надрезом перпендикулярным направлению прокатки (1) и параллельным ей (2)

Из рисунка видно - направление прокатки существенно влияет на величину нагрузки, ограничивающей упругое поведение образцов и, и на величину раскрытие трещин при одинаковых значениях нагрузки, тогда как образцы не различались между собой по величине максимальной нагрузки, достигнутой в процессе испытания. Наблюдения за поверхностью образцов в процессе испытания непрерывно записывались видеокамерой. Результаты наблюдений в характерных точках диаграмм растяжения были проанализированы с помощью фотометрического анализатора структурных изображений (ФАСИ), которая была разработана ранее в авторском коллективе. Досточно подробное описание принципа его работы и методических возможностей изложено в ряде публикаций [4, 5], поэтому здесь на них можно останоаиться кратко. Метод основан на сравнительном количественном анализе структуры и спектров

яркости отражения видимого света от одних и тех же фрагментов по дифференциальной схеме до и после нагружения образца. Это дает возможность выявить те элементы структуры, которые появились в процессе испытания. Синхронное сопоставление моментов их появления с диаграммой растяжения позволяет сделать выводы о значениях нагрузки, при которых они появились. Сочетание информации о структурных и геометрических характеристиках образцов с соответствующими данными о действующих нагрузках позволяет оценить параметры локального напряженного состояния у вершины трещины надреза в моменты качественного изменения структурного состояния материала у вершины трещины. Полный анализ полученных результатов еще не закончен, но некоторые общие выводы о механизме развития трещин уже можно сделать. На упругом участке диаграммы растяжения развитие трещины от вершины надреза идет в условиях близких к схеме чистого отрыва. На этой стадии раскрытие образца по берегам трещины-надреза практически постоянно, а у его вершины формируется зона пластических деформаций. Их развитие осуществляется по механизму межзеренного проскальзывания. Оценку К<sub>I</sub> на этой стадии для образцов использованного типа можно выполнить по методике, изложенной в [6]. Расчетные формулы для этого были получены методом граничной коллокации. Точность оценки К<sub>I</sub> по соответствующей формуле оценивается как 0,5% при 0,2 < a/W < 1,0

$$K_I = \frac{P}{tW^2} \times f_1(\alpha), \quad \alpha = \frac{a}{W},$$

$$f_1 = ((2 + \alpha) \cdot (0,886 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4)) / ((1 - \alpha)^{3/2}). \quad (1)$$

Результаты расчетных оценок К<sub>I</sub> для обоих типов образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика образцов и результаты их испытаний на стадии упругого нагружения

№	Прокатка		Состояние	δ, мм	P <sub>max</sub> , кгс	K <sub>I</sub> МПа <sup>1/2</sup>
	На стане	После т/о				
1	кварто	с 2 до 0,8	Отжиг, 2/2↑	0,82	398,4	111,599
2	кварто	с 2 до 0,8	Отжиг, 2/2←	1,34	320,9	60,045

На этой стадии различия в механическом поведении обоих типов образцов минимальны. Стадия заканчивается появлением в пластической зоне надреза цепочки микротрещин, формирующихся по границам зерен. Последовательность их возникновения связана с их ориентацией по отношению к направлению нагрузки. Преимущественное зернограничное скольжение происходит на границах с максимальными касательными напряжениями. На этой стадии отмечаются различия в характере развитии зернограничных трещин в зависимости от ориентации направления прокатки по отношению к направлению нагрузки. Это можно увидеть из рисунка 3. Об этом свидетельствует отклонение траектории трещины от направления, заданного надрезом. Это приводит к изменению характера формирования трещины от чистого отрыва к комбинации отрыва с поперечным сдвигом. На стадии развития рост магистральной трещины происходит как в результате поглощения магистральной трещиной микротрещин, расположенных перед ее вершиной, так и путем непрерывного

перемещения фронта магистральной трещины. Анализ напряженного состояния перед вершиной на этой стадии был выполнен применительно к моменту окончания второй стадии, который наступает при достижении максимальной нагрузки. Расчетная схема для развития разрушения в условиях комбинации отрыва и поперечного сдвига при произвольном наклоне трещины к оси приложения нагрузки рассмотрена в монографии [6]. Для этого случая параметры напряженное состояние находят как суперпозицию компонент напряжений от отрыва и поперечного сдвига, которые вычисляются с помощью КИН  $K_I$  и  $K_{II}$ , определяемые по формулам [5].

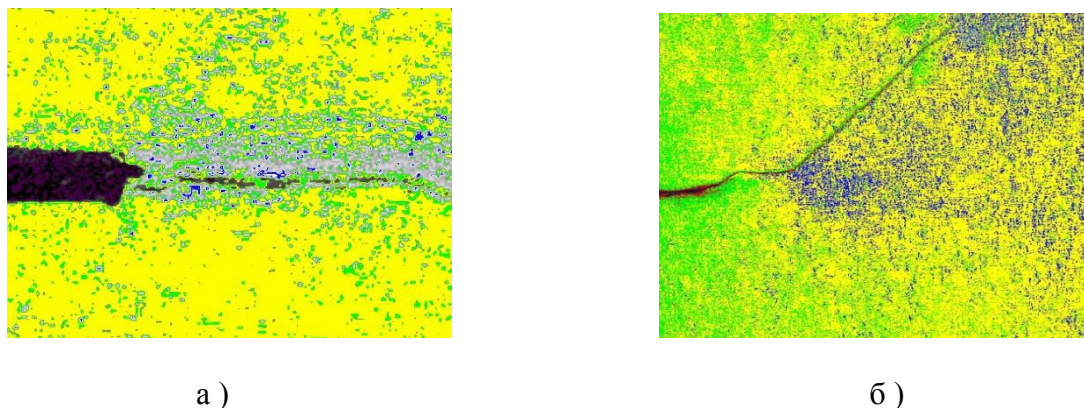


Рис.3. Характер развития микротрещин в пластической зоне перед магистральной трещиной в образцах с надрезм, поперек направления прокатки (а) и вдоль него (б) (?28)

$$K_I = \sigma \cdot F_I \cdot \sqrt{\pi c} \quad K_{II} = \sigma \cdot F_{II} \cdot \sqrt{\pi c} \quad , \quad (2)$$

где:  $c$ -полудлина проекции на направление, нормальное к оси приложения нагрузки,  $\sigma$  - приложенные напряжения,  $F_I$  и  $F_{II}$  табулированные функции отношения  $b/a$ ,  $b$ -длина наклонного участка трещины,  $a$  - длина участка трещины нормального к оси приложения нагрузки. При этом формулы для определения компонент тензора напряжений перед вершиной трещины приобретают вид [6]:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r} \cdot \cos \theta} \frac{\theta \left( \frac{1 - \frac{\sin \theta}{2} \sin 3\theta}{2} \right) - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \theta \left( \frac{2 + \frac{\cos \theta}{2} \cos 3\theta}{2} \right)}{2} , \\ \sigma_{yy} &= \frac{\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \theta \left( \frac{1 + \frac{\sin \theta}{2} \sin 3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \theta \cos \theta}{2} \frac{\cos 3\theta}{2} , \\ \tau_{xy} &= \frac{\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \theta \sin \theta \cos 3\theta}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \theta \left( \frac{1 - \frac{\sin \theta}{2} \sin 3\theta}{2} \right) , \end{aligned} \quad (3)$$

где:  $r$  - радиус-вектор, соединяющий вершину трещины с точкой, в которой определяется напряжения,  $\theta$  - угол между радиусом – вектором и осью, нормальной к оси приложения нагрузки. Исходные данные для определения напряжений по формулам (3) приведены в таблице 2.

Таблица 2. Геометрические параметры для определения напряжений у вершины трещины

№	$\Theta_0, ^\circ$	$\Theta, ^\circ$	a, мм	b, мм	b/a	$F_I(b/a)$	$F_{II}(b/a)$
1	90	13	1,63	20,90	0,078	0,98	-0,25
2	90	28	4,49	18,25	0,25	0,8	-0,44

Данные таблицы 2 получены из фотометрического анализа видеозаписей деформирования образцов №1 и №2. Максимальные нормальные напряжения достигаются на главной площадке, наклон которой к оси нагружения можно найти из условия, отсутствия на ней касательных напряжений. Его можно найти из уравнения, которое получаем, приравнявая последнее из уравнений (3) нулю. Тогда получаем:

$$\frac{\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \theta}{2} \frac{\sin \theta}{2} \frac{\cos 3\theta}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \theta \left( \frac{1 - \frac{\sin \theta}{2} \sin 3\theta}{2} \right) = 0 \quad (4)$$

После простейших преобразований и подстановки в него формул (2) уравнение (4) можно записать в виде:

$$\frac{F_I \cos 3\theta}{2} + \frac{F_{II} \sin 3\theta}{2} = -\frac{F_{II}}{\frac{\sin \theta}{2}} \quad (4')$$

После определения углов наклона главных площадок для обоих образцов по формулам (3) были рассчитаны значения главных напряжений. Результаты этих расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты определения главных напряжений в точке удаленной на 1 мм от вершины трещины

№	$\Theta$ , рад	b/a	C, мм	$\sigma_{F_I}$ , МПа	$\sigma_{F_{II}}$ , МПа	$\sigma_1$ , МПа	$\sigma_{11}$ , МПа
1	0,79	0,08	12,2	9,71	1,56	38,80	14,25
2	0,86	0,174	7,13	7,47	2,28	22,68	12,68

Данные таблицы свидетельствуют, что характеристики локального напряженного состояния у вершины трещины имеют более высокие значения для сплава ЦМ-2А в случае, когда образцы ориентированы для растяжения вдоль направления прокатки. Это, по-видимому, связано, с тем, что при прокатке материал приобретает волокнистое строение, при котором волокна разделены строчными выделениями неметаллических примесей. После достижения максимальной нагрузки дальнейшее деформирование образцов приводит к потере ими поперечной устойчивости. Обе части образца, разделенные трещиной, отгибаются в разные стороны и в результате к модам разрушения, которые связывают с отрывом и поперечным изгибом добавляется мода продольного изгиба.

**Заключення:**

1. Проведенные эксперименты показали, что образцы для внецентренного растяжения из тонколистового сплава ЦМ-2А разрушаются в три стадии, при этом каждая стадия характеризуется включением дополнительной моды разрушения.

2. Развитие трещин от вершины трещины-надреза происходит в результате межзеренного проскальзывания.

3. Распространение трещин происходит как в результате перемещения вершины магистральной трещины в результате межзеренного проскальзывания, так и путем поглощения микротрещин, образовавшихся в ее пластической зоне также по механизму межзеренного проскальзывания.

**Список литературы:**

1. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.:Наука.1974. 311с.
2. Нотт Д.Ф. Основы механики разрушения. М.: Металлургия, 1978, 256 с.
3. Р. Хоникомб., Пластическая деформация металлов. М.:Мир, 1972, 408 с.
4. Ермишкин В.А., Мурат Д.П., Подбельский В.В. Информационные технологии фотометрического анализа усталостной 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. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. п/р Ю. Мураками. М.:Мир, 1990, т.1, С. 57, С. 265-266.

Надійшла до редакції 12.06.2014

**V. Ermishkin S. Kulagin N. Minin, M. Sevastiyarov**

**RESEARCH STRUCTURAL CRACK MECHANISM ALLOY CM-2A METHOD OF PHOTOMETRIC ANALYSIS**

*On the basis of photometric analysis of video recordings of crack development processes from the top notch in the samples of thin sheets of alloy CM-2A studied staging destruction, determined its structural features and characteristics of the local stress state corresponding to the first two stages of destruction. It is shown that the sequence of fracture involves three stages.*

**Key words:** photometric analysis, structure, destruction, crack development.

**В.А. Ермішкін, С.П. Кулагін, Н.А. Мініна, М.А. Севастьянов**

**ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНОГО МЕХАНІЗМУ РУЙНУВАННЯ СПЛАВА CM-2A МЕТОДОМ ФОТОМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ**

*Вивчено результати випробувань на руйнування з використанням фотометричного аналізу відеозаписів процесів розвитку тріщини в зразках тонких листів сплаву CM-2A, визначається його структурні особливості та характеристики місцевого напруженого стану, відповідного першим двом етапам руйнування. Показано, що послідовність руйнування включає три стадії.*

**Ключові слова:** фотометричний, структура, руйнування, розвиток тріщин.