

УДК 670.191.33

Ясний П. В.  
Марущак П. О.  
Панин С. В.  
Любутин П. С.

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ И МЕЗОМЕХАНИЗМОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА В ВЕРШИНЕ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ

Кинетика роста усталостной трещины определяется процессами развития накопления и локализации циклической пластической деформации в ее вершине [1, 2]. Закономерности пластического деформирования зависят от структурного состояния, степени негетогенности, запаса пластичности материала и могут быть описаны параметрами мезомеханики.

Пластические деформации в вершине трещины, могут быть информативным параметром оценки состояния материала, и выступать интегральной характеристикой напряженно-деформированного состояния локальных зон материала. Известен ряд работ, в которых степень поврежденности материала при циклическом деформировании оценивали на основе анализа фрактальной размерности цифровых изображений анализируемых участков [3].

При этом известные методы позволяют определить численное значение фрактальной размерности с высокой точностью. Это дает возможность численно анализировать различные масштабные уровни пластической деформации, процессы накопления структурной поврежденности в пластических зонах, находящих отражение в механизмах разрушения [4, 5].

Таким образом, представляется перспективным использование фрактальной размерности для оценки локализации деформаций в вершине усталостной трещины и установления взаимосвязи фрактальной размерности и параметров физической мезомеханики.

Целью данной работы была разработка методологического подхода совместного использования параметров мезомеханики и фрактальной геометрии для анализа пластических зон в вершине усталостной трещины.

Методика исследований. Известно, что рост усталостной трещины это стадийный процесс: на первой стадии наблюдали квазихрупкий рост доминирующей трещины, сменяющийся на второй стадии ее хрупко-пластическим ростом до разрушения с образованием зоны пластической вытяжки и разрушением образца. Вторая стадия, как правило, наиболее продолжительна, включает в себя состояние предразрушения и поэтому является ключевой в процессе усталостного разрушения материала [3]. Исследование циклической трещиностойкости проводили на машине СТМ-100 при одноосном растяжении, при максимальной нагрузке цикла  $P_{max} = 27000$  Н и частоте нагружения 0,1 Гц. Для оценки степени накопления усталостных повреждений в работе применялся оптико-телевизионный комплекс «ТОМСС», позволяющий измерять поля векторов необратимых смещений элементарных участков поверхности нагруженного материала и рассчитывать значения компонент тензора пластической дилатации [3].

В качестве параметра, характеризующего развитие пластической деформации в процессе роста трещины, использовали среднее значение интенсивности деформации сдвига  $\gamma_{avg}$  (ИДС) [3]:

$$\gamma = \sqrt{\frac{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + 4\varepsilon_{xy}^2}{\Delta N}}; \quad \gamma_{avg} = \frac{1}{wl} \sum_{i=0}^{l-1} \sum_{j=0}^{w-1} \gamma, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – ИДС;  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ ,  $\varepsilon_{xy}$  – компоненты тензора пластической деформации;  $\Delta N$  – приращение циклической нагрузки между двумя кадрами;  $l$ ,  $w$  – размер по горизонтали и вертикали области, для которой рассчитывается ИДС.

Локализация деформации при подрастании трещины приводит к изменению рассеивания света на поверхности, что проявляется в наличии более темных участков при наблюдении через оптический микроскоп (рис. 1). Обработка цифровых фотографий поверхности позволяет количественно оценить насыщенность поверхности следами микропластической деформации и соответствующее накопленное усталостное повреждение по фрактальной размерности ( $D$ ).

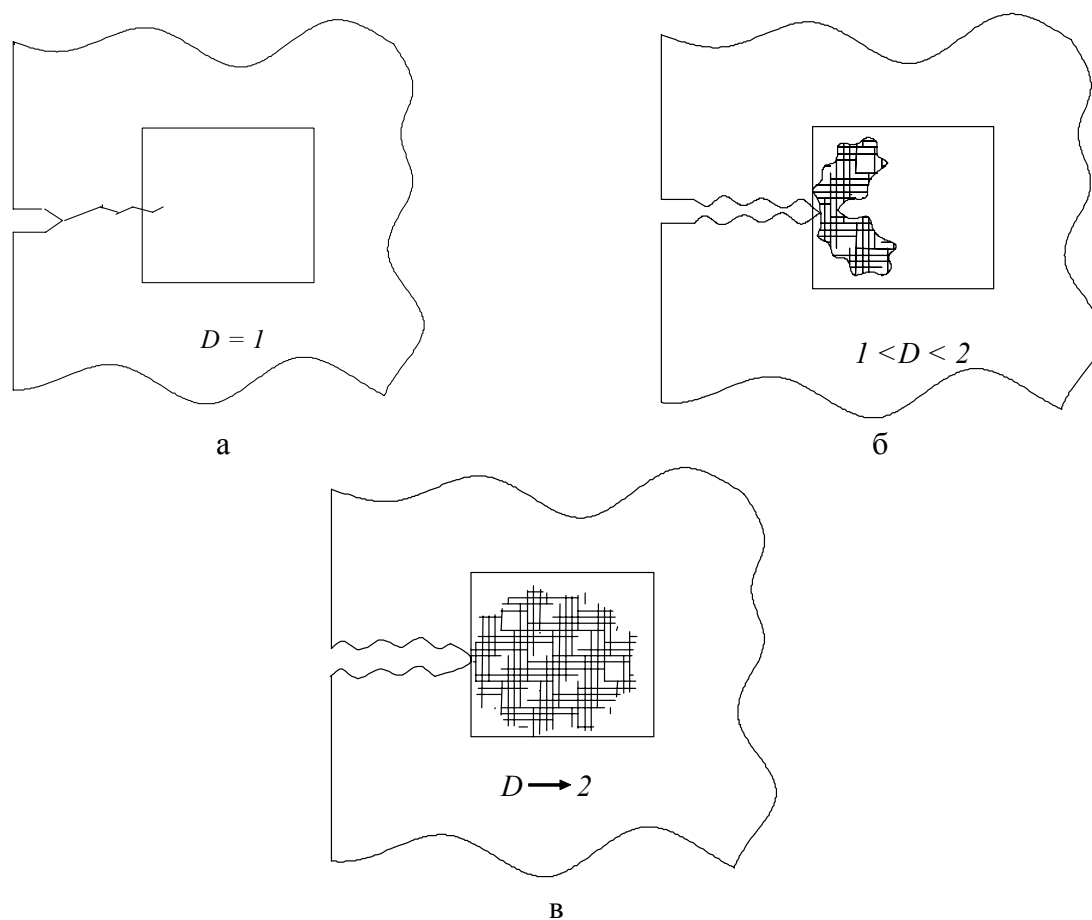


Рис. 1. Схема оценки фрактальной размерности зоны пластических деформаций в вершине усталостной трещины

Для исследования фрактальной размерности полученных изображений использовали метод сеток (клеточный) и метод корреляционной функции. Расчет фрактальности осуществляли известным программным комплексом «Fractalyse». В применении к зонам пластических деформаций величина  $D$  будет характеризовать степень заполнения ими анализируемого участка поверхности материала вблизи вершины трещины, и принимать значения от 1 до 2:  $D = 1$  означает, что деформации на исследуемой поверхности отсутствуют;  $D = 2$  – что вся площадь практически полностью деформирована.

Результаты исследований. Известно, что фрактал – это грубая или фрагментированная геометрическая форма, которая может быть разделена на части, каждая из которых представляет собой уменьшенную копию всего целого. Фрактальная размерность является количественной характеристикой объектов сложной геометрической формы, обладающих самоподобием и масштабно независимой величиной [5–7]. Однако природные объекты, имеют фрактальные свойства в ограниченном интервале пространственных масштабов. Это и позволяет использовать формирование фрактальной структуры анализируемого изображения использовать для анализа кинетики процессов, например для различных длин трещины, рис. 2.

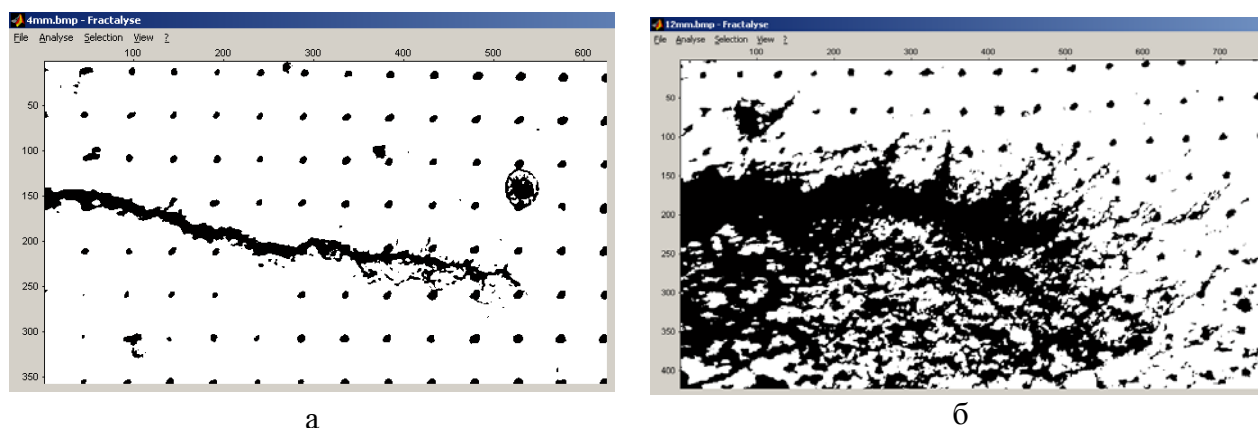


Рис. 2. Зависимость фрактальной размерности ( $D$ ) от длины усталостной трещины (а) ( $l = 4,0$  мм) и ( $l = 12,0$  мм) (б) в образцах стали 25Х1М1Ф ( $\times 70$ )

Начальная стадия разрушения соответствовала гладкой, зеркальной поверхности образца. Увеличение длины трещины сопровождается интенсивным изменением внешнего вида поверхности образца. Для трещины  $l = 4,0$  мм в вершине трещины наблюдается локальная деформация поверхности, рис. 2, а.

Первые устойчивые полосы локализованной деформации наблюдали на ранней стадии испытания при  $l = 8,0$  мм.

При  $l = 10...12$  мм на счет повышения интенсивности деформирования изолированные дефекты взаимодействуют между собой, рис. 2, б. При последующем циклическом нагружении происходит расширение области пластической деформации с увеличением количества полос и их размера. С развитием циклической деформации наблюдается поперечная утяжка сечений образца в пределах пластической зоны, что отражается на фрактальной размерности.

При деформировании в вершине трещины образуется зона интенсивных пластических деформаций. Для преодоления этих участков требуется большее количество энергии на подрастание усталостной трещины.

Рост усталостной трещины сопровождается монотонным увеличением фрактальной размерности, рис. 3.

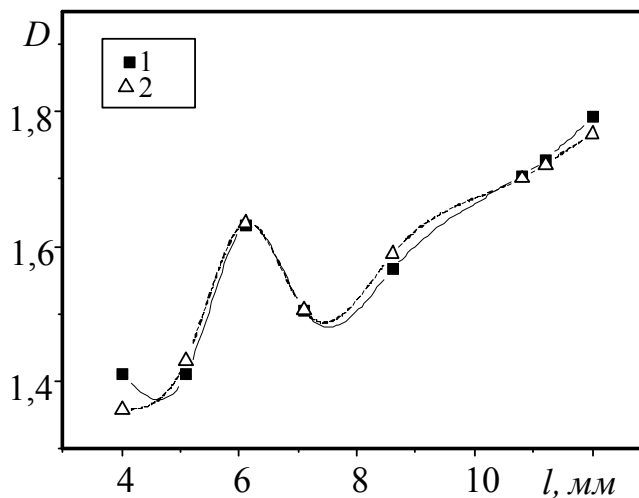


Рис. 3. Зависимость фрактальной размерности ( $D$ ) от длины усталостной трещины ( $l$ ) в образцах стали 25Х1М1Ф, полученных различными методами:

1 – метод сеток; 2 – метод корреляционной функции

При  $l = 6$  мм, на рис. 3, видно пик увеличение фрактальности, что может быть связано с развитием процессов ветвления магистральной трещины. При ветвлении образуются небольшие трещины («микроветвление»), образующие с направлением развития трещины острые углы. Концентрация, размеры и расположение этих дефектов зависят от величины и направления максимального растягивающего напряжения, а также локальной неоднородности деформирования материала и интегрально отражается на скачке фрактальной размерности, рис. 3. Можно предположить, что увеличение фрактальной размерности с увеличением длины трещины (рис. 3) и фрактальной размерности от количества циклов нагружения (рис. 4) интегрально характеризует трещиностойкость материала.

С развитием макрзоны наблюдается поперечная утяжка, распространяющаяся от вершины надреза, где формируется сильнодеформированная циклическая микрзоны. На рис. 4 приведена графическая зависимость  $N = f(D, \gamma_{avg})$ ; можно отметить увеличение  $\gamma_{avg}$  с увеличением наработки образца и длины трещины. Это хорошо согласуется с данными фрактального анализа фронта трещины во всем исследованном диапазоне и известными литературными данными [9, 10].

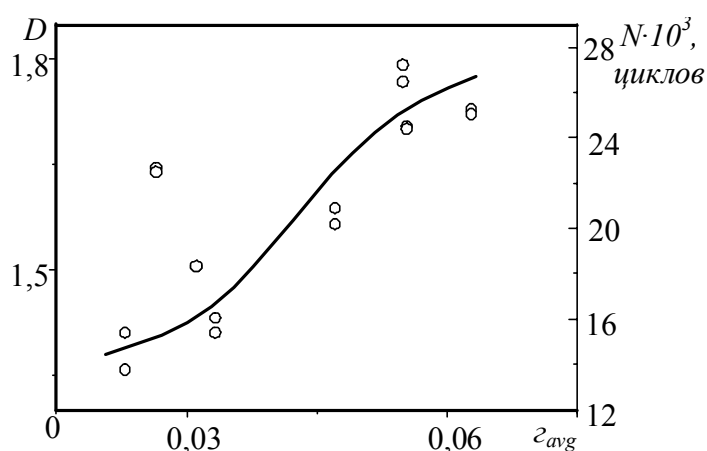


Рис. 4. Зависимость фрактальной размерности ( $D$ ) от длины усталостной трещины ( $l$ ) в образцах стали 25X1M1Ф

На основании полученных количественных описаний пластических зон становится возможным сравнительный анализ их пространственной структуры: высокие значения параметра  $D$  указывают на увеличение пластической зоны материала. Для одинаковых размеров пластической зоны, они свидетельствуют о наличии разветвлений, рельефности, а невысокие значения фрактальной размерности - на малый поврежденный периметр и разреженность полос пластической деформации, и их небольшую извилистость (меньшую степень заполнения поверхности образца) [9,10]. Следовательно, различия в пределах каждой области можно рассматривать как процессы управляемые разными механизмами развития повреждаемости.

## ВЫВОДЫ

Установлена фрактальная природа зоны пластической деформации в вершине усталостной трещины. Получено значение фрактальной размерности для различных уровней деформации сдвига. Предложены интервальные значения обобщенного количественного показателя локализации деформаций в виде фрактальной размерности для трещины различной длины.

Значение фрактальной размерности соответствует определенной поврежденности среды (вследствие роста с деформацией и циклической наработкой плотности дефектов), которую также можно оценить интенсивностью деформации сдвига. Таким образом, каждому иерархическому уровню деформации отвечает свой порог адаптивности системы к росту дефектов, а значит, и своя определенная фрактальная размерность.

Выявленные закономерности могут быть использованы для технической диагностики интенсивно нагруженных металлоконструкций, основными предельными состояниями которых являются накопленная усталостная поврежденность и развитие усталостных трещин критической величины.

В зависимости от размера исследуемого участка метод может быть использован на микро-, мезо- и макроуровнях, а также при описании перехода деформации с низшего структурного уровня на высший.

Работа выполнена при поддержке ГФФИ Украины в рамках научного проекта 0109U005863.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Харитонов Н. И. Исследование кинетики накопления микропластических деформаций при циклическом нагружении среднеуглеродистой стали / Н. И. Харитонов, Н. Н. Никольский, В. С. Дронов // Пробл. прочн. – 1972. – № 9. – С. 14–17.
2. Casas-Rodriguez J.P. Propagation of delamination zones in bonded joints / J. P. Casas-Rodriguez, I. A. Ashcroft, V. V. Silberschmidt // Proc. Estonian Acad. Sci. (Phys. Math). – 2007. – № 56/2. – P. 170–176.
3. Мезомасштабные критерии диагностики механического состояния и предразрушения циклически нагружаемых сварных соединений / В. С. Плешанов, В. Е. Панин, В. В. Кибиткин, Н. А. Лебедева // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2003. – № 2. – С. 117–124.
4. Influence of the crack morphology on the fatigue crack growth rate: A continuously-kinked crack model based on fractals / A. Carpinteri, A. Spagnoli, S. Vantadori, D. Viappiani // Eng. Fract. Mech. – 2008. – № 75. – P. 579–589.
5. Кузнецов П. В. Фрактальная размерность как характеристика усталости поликристаллов металлов / П. В. Кузнецов, И. В. Петракова, Ю. Шрайбер // Физическая мезомеханика. – 2004. – Спец. выпуск Ч. 1. – С. 389–392.
6. Herrmann H. J. Fractal shapes of deterministic cracks / H. J. Herrmann, J. Kertesz, L. de Arcangelis // Europhysics Letters. – 1989. – № 10. – P. 147–152.
7. Иванова В. С. О связи стадийности процессов пластической деформации с фрактальной структурой, отвечающей смене масштабного уровня деформации / В. С. Иванова, А. А. Оксогов // Физическая мезомеханика. – 2006. – 9. – № 6. – С. 17–27.
8. Игнатович С. Р. Диагностика усталости плакированных алюминиевых сплавов / С. Р. Игнатович, М. В. Карускевич, О. М. Карускевич, В. М. Пантелеев // Вестник НТТУ – «КПИ»: Машиностроение. – 2002. – № 43. – С. 53–55.
9. Игнатович С. Р. Эволюция поврежденности сплава Д-16АТ у концентратора на стадии до зарождения усталостной трещины / С. Р. Игнатович, О. М. Карускевич, М. В. Карускевич // Авиационно-космическая техника и технология – Харьков: ХАИ, 2004. – Вып. 4 (12). – С. 29–32.
10. Оценка накопленного усталостного повреждения по насыщенности и фрактальной размерности деформационного рельефа / М. В. Карускевич, Е. Ю. Корчуж, А. С. Якушенко, Т. П. Маслак // Пробл. прочности. – 2008. – № 6. – С. 128–135.

Ясний П. В. – д-р техн. наук, проф., ректор ТНТУ;

Марущак П. О. – канд. техн. наук, доц. ТНТУ;

Панин С. В. – д-р техн. наук, проф. ИФПМ СО РАН;

Любутин П. С. – канд. техн. наук, мл. науч. сотрудник ИФПМ СО РАН.

ТНТУ – Тернопольский национальный технический университет им. И. Пулюя, г. Тернополь;

ИФПМ СО РАН – Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Россия.

E-mail: Maruschak.tu.edu@gmail.com