

УДК: 539.3

***ФИКСИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО
ЗРЕНИЯ***

Шапошников Д.М.А.

студент

*Московский государственный технический университет имени Н. Э.
Баумана,*

Москва, Россия

Автаев В.В.

Ведущий инженер

НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ,

Москва, Россия

Зубарев К.М.

Старший преподаватель кафедры

*Московский государственный технический университет имени Н. Э.
Баумана,*

Москва, Россия

Аннотация. В работе представлено исследование, в котором применяется компьютерное зрение для анализа усталостного разрушения металлических материалов. В статье описывается методика обработки изображений, которая позволяет выявить и классифицировать повреждения, вызванные усталостным разрушением. Для этого используются различные алгоритмы компьютерного зрения, такие как сегментация изображений, распознавание текстур и форм, а также анализ статистических характеристик. Исследование

включает в себя экспериментальное исследование различных образцов металлических материалов с целью создания базы данных изображений повреждений, полученных в результате усталостного разрушения. Затем эти изображения подвергаются анализу с использованием разработанных методов компьютерного зрения. Результаты исследования позволяют получить информацию о характере и распределении повреждений на поверхности материала. Это помогает не только фиксировать усталостное разрушение, но и определять его кинетику, что может быть полезно для принятия решений о замене или ремонте металлических конструкций.

Ключевые слова: усталостное разрушение, компьютерное зрение, разрушение металлических конструкций, фиксация трещины, уравнение Периса, кинетическая диаграмма усталостных разрушений.

***DETECTING FATIGUE FAILURE OF METAL MATERIALS USING
COMPUTER VISION METHOD***

Shaposhnikov D.M.A.

student

Bauman Moscow state technical University,

Moscow, Russia

Avtaev V.V.

Lead Engineer

National Research Centre Kurchatov Institute–VIAM

Moscow, Russia

Zubarev K. M.

Senior Lecturer

Bauman Moscow state technical University,

Moscow, Russia

Abstract. The paper presents a study that uses computer vision to analyze the fatigue failure of metallic materials. This article describes an image processing technique that can identify and classify damage caused by fatigue failure. For this purpose, various computer vision algorithms are used, such as image segmentation, texture and shape recognition, and analysis of statistical characteristics. The research involves experimental testing of various samples of metallic materials to create a database of images of damage resulting from fatigue failure. These images are then analyzed using developed computer vision techniques. The results of the study make it possible to obtain information about the nature and distribution of damage on the surface of the material. This helps not only to record fatigue failure, but also to determine its kinetic, which can be useful for making decisions about replacing or repairing metal structures.

Key words: fatigue failure, computer vision, failure of metal structures, crack fixation, Paris equation, kinetic diagram of fatigue failure.

Введение

Усталостное разрушение является одной из основных причин повреждения металлических конструкций, и его фиксирование имеет важное значение для обеспечения безопасности и долговечности различных инженерных систем [1,2,3].

Данная работа актуальна, так как вопросы прочности и надежности конструкций остаются ключевыми в инженерной практике. Кроме того, данная работа имеет практическую значимость, поскольку предлагает новый подход к решению проблемы фиксирования результатов усталостных испытаний, который может быть применен в различных отраслях промышленности [4,6,7]. Методы компьютерного зрения, используемые в работе, позволяют автоматизировать процесс анализа трещин, что значительно ускоряет оценку характеристик циклической трещиностойкости при испытаниях с повышением точности измерений.

Применение методов компьютерного зрения для фиксирования усталостного разрушения металлических материалов имеет большой потенциал в области инженерии и материаловедения [5]. Разрабатываемые подходы позволят автоматизировать процесс анализа повреждений при эксплуатации металлических конструкций, что может существенно сократить время и затраты на диагностику и их обслуживание. Кроме того, результаты исследования могут быть использованы для прогнозирования долговечности материалов, что способствует повышению безопасности и надежности различных инженерных систем [9,10,11].

Методика обработки результатов

Важной составляющей обработки результатов является построение кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) – зависимости скорости роста трещины dl/dN от размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK [6,9]. КДУР позволяет определить предельное состояние материала с трещиной при усталостных нагрузках и предсказать его поведение при различных условиях эксплуатации (рис. 10).

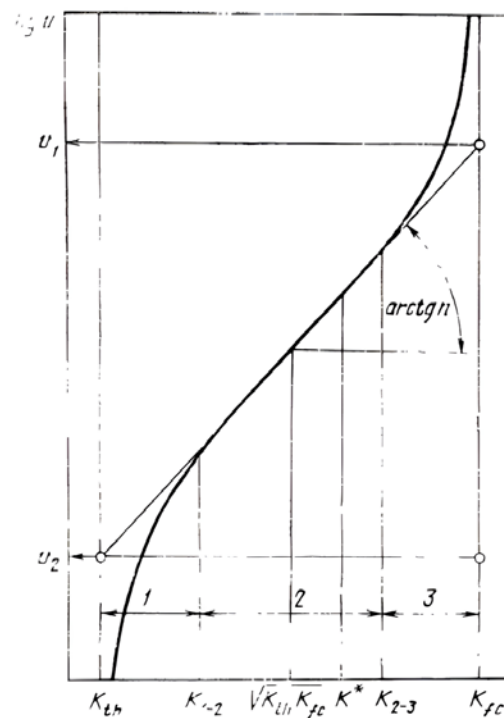


Рис. 1 – Кинетическая диаграмма усталостного разрушения [8]

Из наиболее применяемых аппроксимирующих выражений (моделей) можно выделить уравнение Периса [13-16]:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (1)$$

Метод фиксации длины усталостной трещины

Суть метода фиксации длины усталостной трещины заключается в определении локальных смещений фрагментов изображения поверхности образца с растущей трещиной, которые расположены по двум ее сторонам (сверху и снизу) и вдоль ее предполагаемого роста в процессе испытаний. По разнице локальных смещений двух фрагментов изображения, расположенных по двум сторонам трещины, судят о наличии или отсутствии трещины [5]. Поскольку рост трещины связан с локальным снижением жесткости материала, при ее прохождении между парой фрагментов изображения будет наблюдаться резкое увеличение их взаимных смещений в

цикле усталостного нагружения. В дальнейшем термины «фрейм» и «сабфрейм» будут рассматриваться как изображение и фрагмент изображения соответственно.

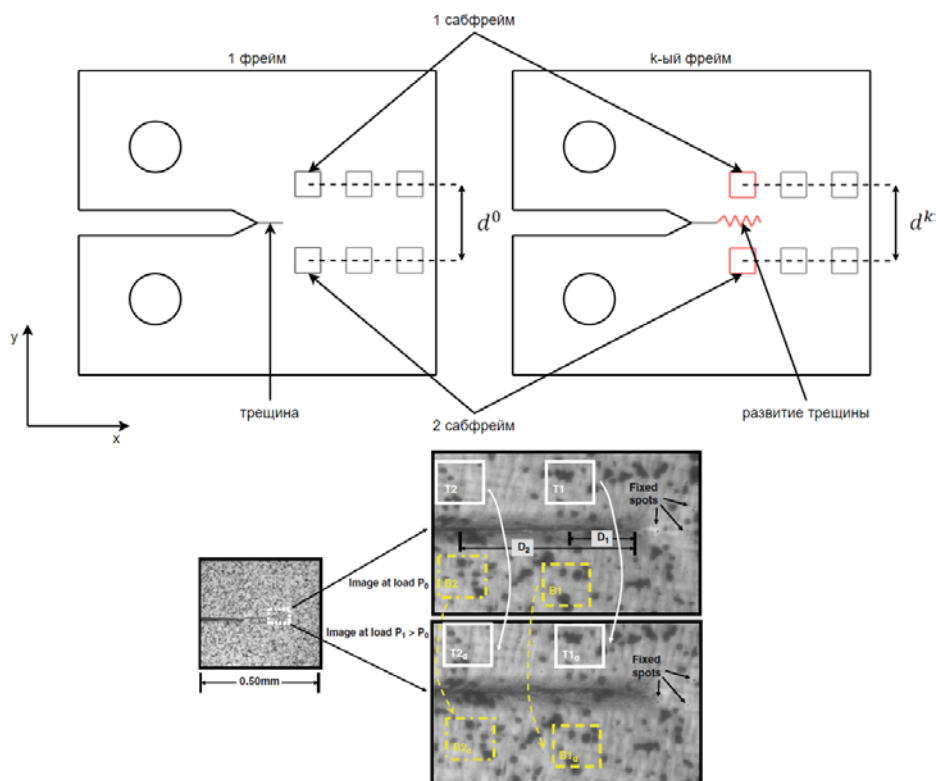


Рис. 2 – Схематическое изображение метода фиксации длины трещины [16]

Процедура метода, позволяющего зафиксировать длину усталостной трещины, заключается в следующих операциях (рис. 2):

1) На первом (нулевом) фрейме по обеим сторонам от трещины усталости (сверху и снизу) и вдоль предполагаемого её роста выделяют сабфреймы (координаты их центров x_{ij}^0, y_{ij}^0 известны, фиксированное расстояние между ними - d_j^0);

2) На последующих k -ых фреймах с помощью выбранного метода определяют новые координаты центров x_{ij}^k, y_{ij}^k выделенных сабфреймов и расстояние между ними d_j^k ;

3) Для каждой пары сабфреймов на k -ом фрейме строят зависимость координаты центров пары сабфреймов x_{ij}, y_{ij} (вдоль длины трещины) от времени и от расстояния d_j (рис. 12);

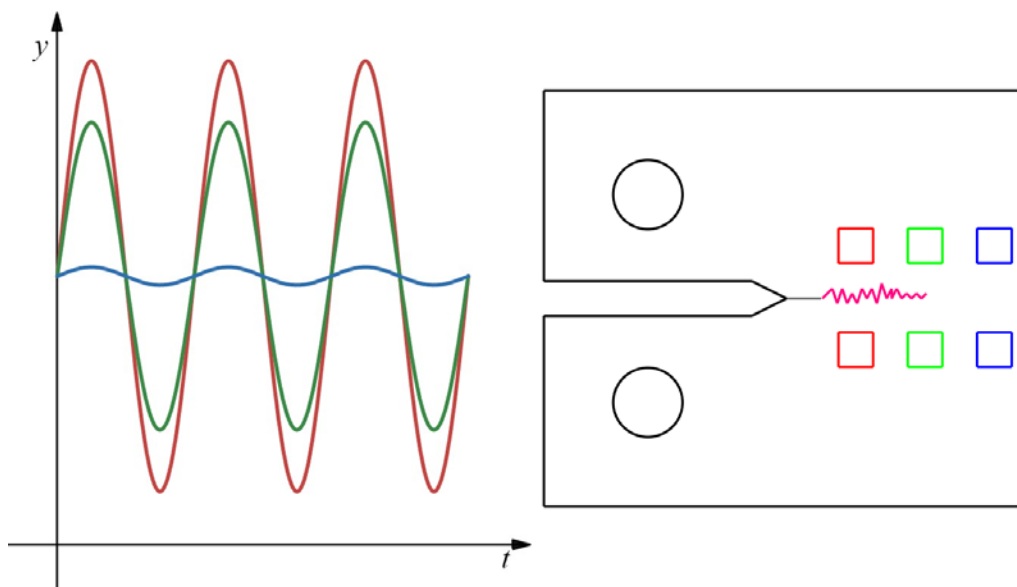


Рис. 3 – Теоретические графики зависимости координаты $y(t)$ центров сабфреймов (цвета графиков справа соответствуют случаям на детали слева).

Авторская разработка.

4) Для определения прохождения трещины усталости между парой сабфреймов на k -ом фрейме используют два критерия:

$$x_1^* = \operatorname{argmax} \left(\frac{\Delta d_j}{\Delta x_{ij}} \right), \quad (2)$$

$$x_2^* = \operatorname{argmax} (\Delta d_j \mid \Delta d_j > d^*)$$

где d^* – пороговое изменение локальных смещений, установленное для заданного материала образца и заданных условий его нагружения при усталостных испытаниях.

5) Длину трещины усталости для каждого k -го фрейма определяют по значению координаты вершины трещины с учетом фактических размеров образца (например, по нанесенным на поверхность размерным меткам).

Реализация разработанного алгоритма

Работоспособность алгоритма была протестирована на видеофрагменте усталостных испытаний образца титанового сплава Вт6. На рисунке 4 представлены результаты работы алгоритма в части обнаружения трещины.

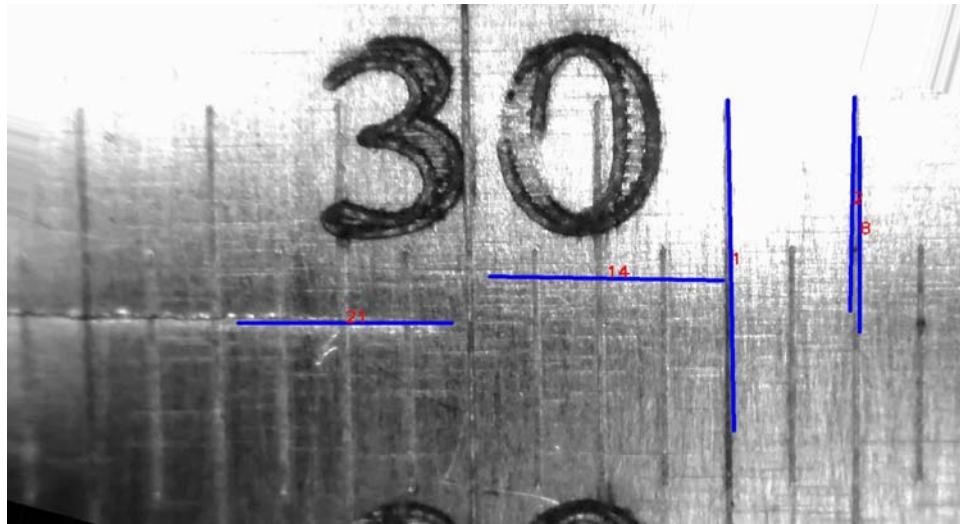


Рис. 4 – Выделение линий трещины и рисунок. Авторская разработка.

В основе метода фиксации развития усталостной трещины лежит процедура трансформации фрейма относительно другого путём определения корреляционной связи их текстур, в результате которой получены координаты смещения фреймов. При трансформации сабфреймов могут возникать неточности при нахождении локальных смещений, что приводит к возникновению «шумов». Поэтому данные обрабатываются с помощью фильтра скользящего среднего:

$$y_n = \frac{1}{4}(x_n + x_{n-1} + x_{n-2} + x_{n-3}). \quad (3)$$

В результате работы метода получают графики изменения координат центра каждого из сабфреймов и расстояний между каждой из пар (рис. 5-7):

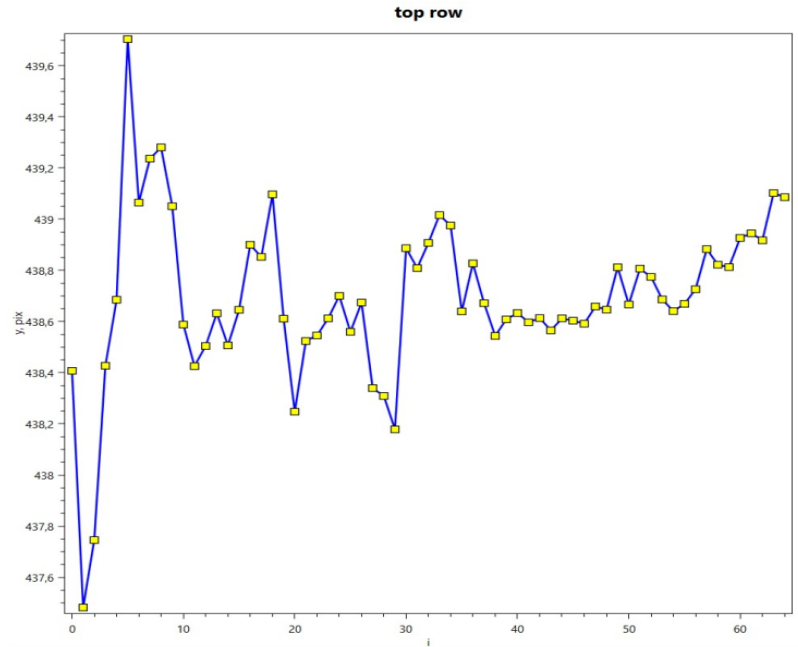


Рис. 5 – Графики изменения координат центра верхнего ряда сабфреймов.

Авторская разработка.

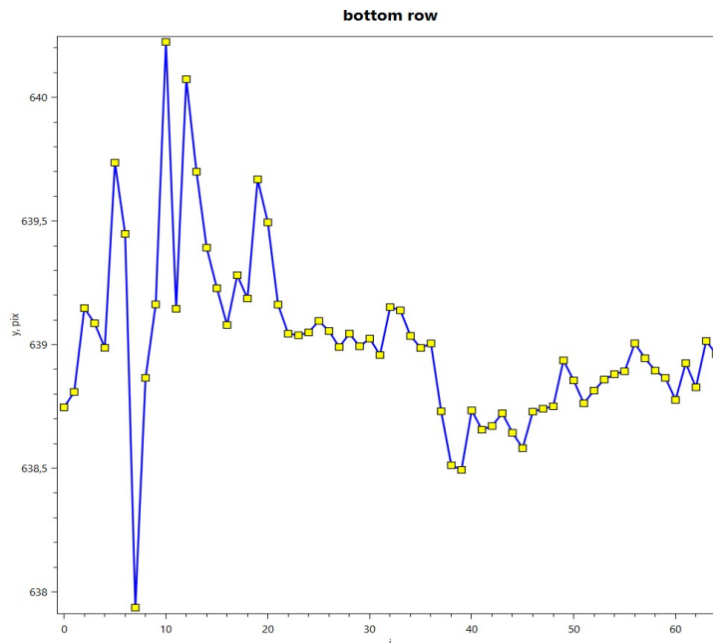


Рис. 6 – Графики изменения координат центра нижнего ряда сабфреймов.

Авторская разработка.

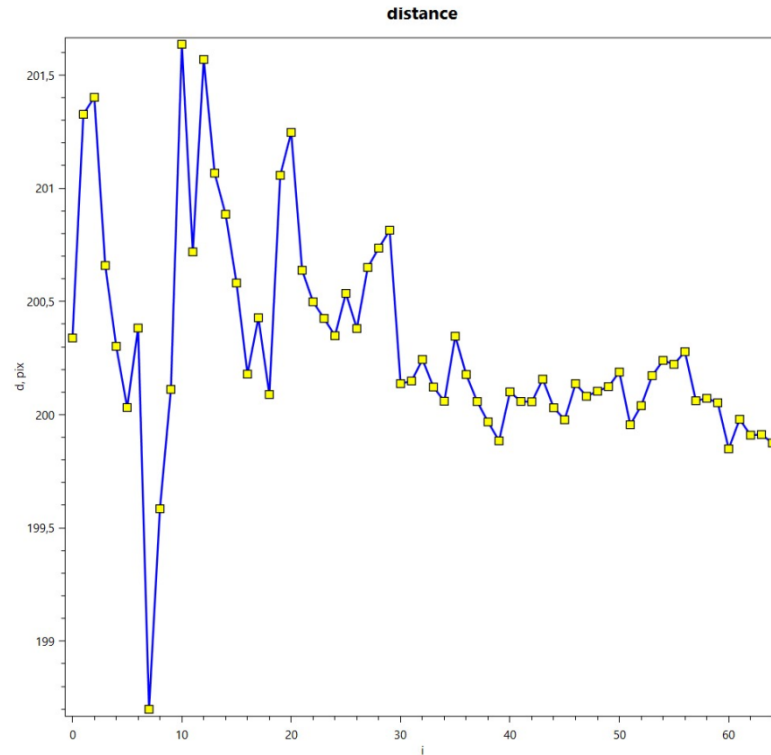


Рис. 7 – График изменения расстояния между каждой парой сабфреймов.
Авторская разработка.

Далее для обработки полученных результатов используется наиболее распространенное аппроксимирующее выражение – уравнение Периса. По результатам измерений строится график зависимости длины трещины от циклов нагружения (рис. 8). Далее получают график зависимости скорости роста трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений и логарифмируют (рис. 9-10). Данные аппроксимируют с помощью метода наименьших квадратов и получают график КДУР (рис. 11-12).

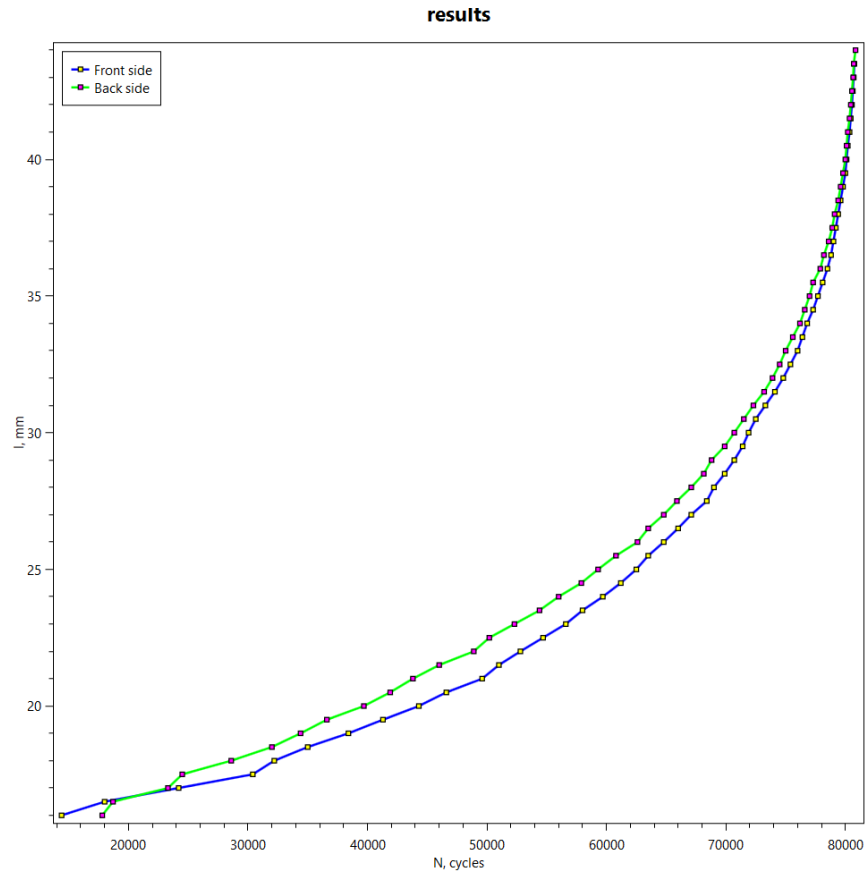


Рис. 8 – Результаты измерений длин трещин методом компьютерного зрения с лицевой и оборотной сторон. Авторская разработка.

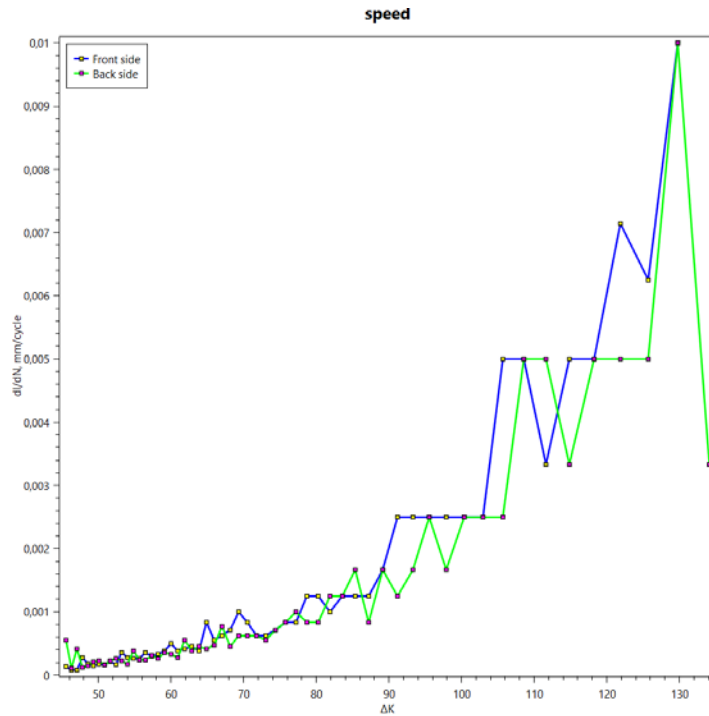


Рис. 9 – Скорость роста усталостных трещин с лицевой и оборотной сторон .
Авторская разработка.

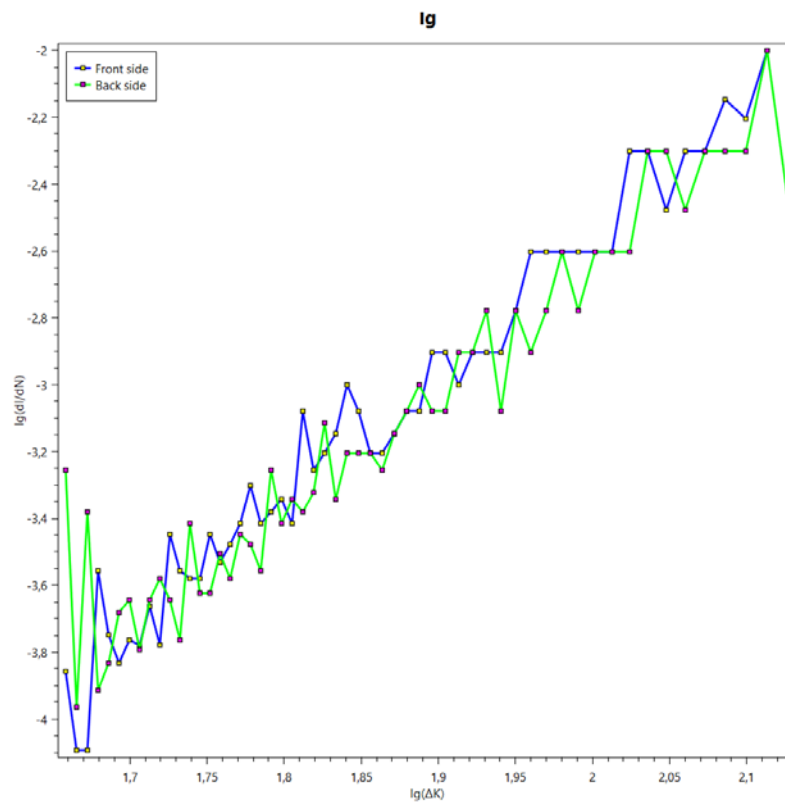


Рис. 10 – Скорость роста усталостных трещин с лицевой и оборотной сторон
после логарифмирования. Авторская разработка.

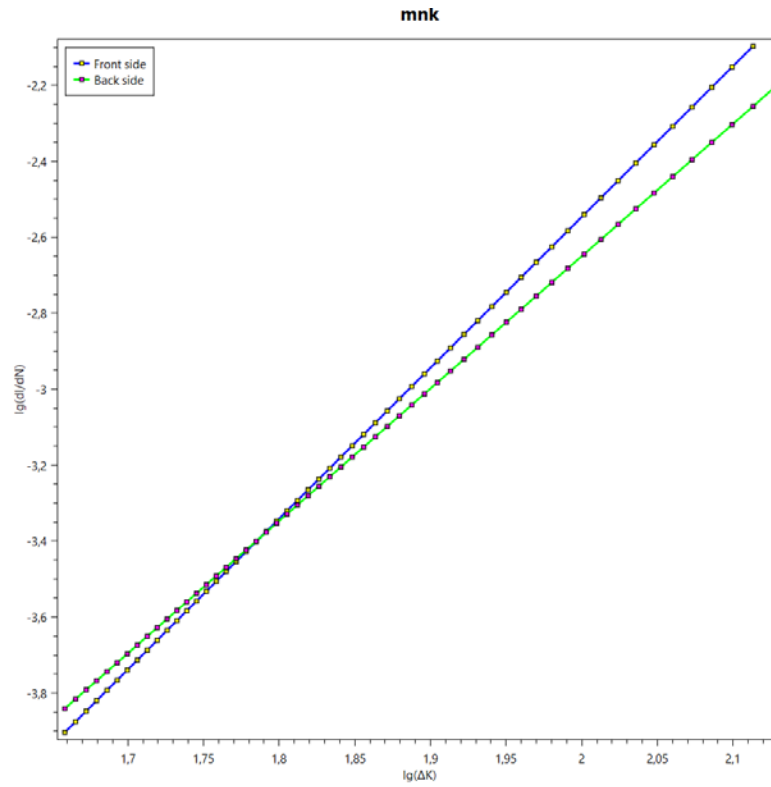


Рис. 11 – Результат работы метода наименьших квадратов (первое испытание). Авторская разработка.

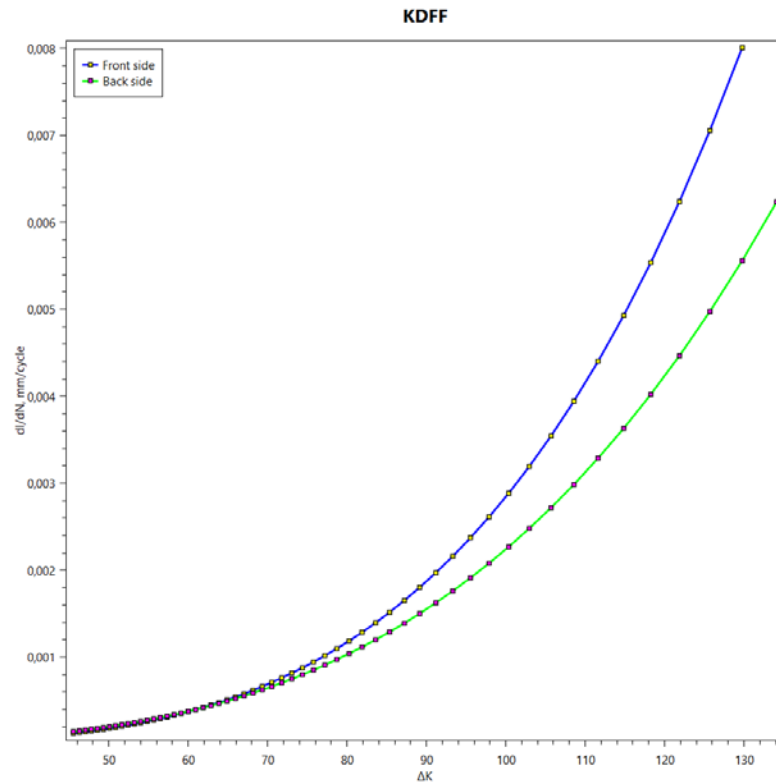


Рис. 12 – Кинетическая диаграмма усталостного разрушения. Авторская разработка.

Выводы

Применение компьютерного зрения для анализа усталостного разрушения металлических материалов является перспективным направлением исследований в области инженерии и материаловедения. Этот подход позволяет автоматизировать процесс обнаружения и классификации повреждений, что может существенно повысить эффективность диагностики и контроля состояния металлических конструкций.

Кроме того, исследования в этой области могут привести к разработке новых методов прогнозирования долговечности материалов и предотвращения возможных разрушений, что имеет важное значение для обеспечения долговечности и эксплуатационной безопасности различных инженерных систем.

Таким образом, результаты статьи подчеркивают значимость использования компьютерного зрения для фиксирования усталостного

разрушения металлических материалов и указывают на потенциальные перспективы применения данной технологии в инженерной практике.

Библиографический список

1. Горбачёв В.И. Механика сплошных сред. Часть 2. URL: <https://teach-in.ru/file/synopsis/pdf/continuum-mechanics-gorbachev-part3-M.pdf> (дата обращения: 12.12.2023)
2. Димитриенко, Ю. И. Моделирование нелинейных диэлектрических свойств композитов на основе метода асимптотической гомогенизации / Ю. И. Димитриенко, Е. А. Губарева, К. М. Зубарев // Математическое моделирование и численные методы. – 2020. – № 2(26). – С. 26-45. – DOI 10.18698/2309-3684-2020-2-2645. – EDN AJEJAO.
3. Димитриенко, Ю. И. Применение метода асимптотического осреднения для линейной задачи пьезоупругости / Ю. И. Димитриенко, К. М. Зубарев, А. В. Крылов // Дневник науки. – 2022. – № 12(72). – DOI 10.51691/2541-8327_2022_12_28. – EDN LNBMLM.
4. Иванова, Т. Л. Восстановление электрофизических параметров многослойных сред по результатам зондирования постоянным током / Т. Л. Иванова, К. М. Зубарев // Политехнический молодежный журнал. – 2016. – № 4(4). – С. 9. – DOI 10.18698/2541-8009-2016-4-29. – EDN ХХОНХJ.
5. Конушин А.С. Компьютерное зрение. URL: <https://teach-in.ru/file/synopsis/pdf/computer-vision-M.pdf> (дата обращения 10.03.2024)
6. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения. – М.: Издательство «Металлургия», 1978. – 256 с.
7. Партон В.З. Механика разрушения: от теории к практике. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 240 с.
8. РД 50-325-82. Методические указания. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении.
9. Романив О.Н., Ярема С.Я., Никифорчин Г.Н. и др. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. – Киев: Наукова думка, 1990. – 980 с.
10. Терентьев В.Ф., Оксогоев А.А. Циклическая прочность металлических материалов. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2001. – 61 с.

11. Хэйвуд Р.Б. Проектирование с учётом усталости. – М.: Издательство «Машиностроение», 1969. – 504 с.
12. Dimitrienko, Y. I. Modeling nonlinear dielectric properties of laminated composites / Y. I. Dimitrienko, E. A. Gubareva, K. M. Zubarev // Journal of Physics: Conference Series, Moscow, 20 ноября 2020 года. – Moscow, 2021. – P. 012057. – DOI 10.1088/1742-6596/1990/1/012057. – EDN AKRFNF.
13. Jones R. Fatigue crack growth and damage tolerance. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 37 (2014) 463-483.
14. Jones R., Pitt S., Peng D. The generalized Frost-Dugdale approach to modeling fatigue crack growth. Engineering Failure Analysis 15 (2008) 1130-1149.
15. Maierhofer J., Pippan R., Gänser H.-P. Modified NASGRO equation for physically short cracks. International Journal of Fatigue 59 (2014) 200-207.
16. Michael A. Sutton, Jean-José Orteu, Hubert W. Schreier Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications. Springer New York, NY, 2009, 322 p.

Оригинальность 83%