

Научная статья

УДК 66.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-215-225

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВЕРШИНЫ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ПО РАЗНОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.В. Автаев¹, Н.О. Яковлев¹, В.А. Солдатов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлен метод автоматизированного измерения вершины усталостной трещины по анализу приращения интенсивности изображений поверхности образца, который позволяет выявлять локальные изменения в зоне развития трещины, учитывает общие и локальные смещения на поверхности образца. Результаты опробования метода при усталостных испытаниях показали возможность корректного определения положения вершины трещины. Предлагаемый метод может быть применен в системах неразрушающего контроля и при испытаниях авиационных материалов для повышения надежности оценки циклической трещиностойкости.

Ключевые слова: усталостная трещина, измерение, интенсивность, изображение, СРТУ, оптические измерения, текстура

Для цитирования: Автаев В.В., Яковлев Н.О., Солдатов В.А. Метод измерения вершины усталостной трещины по разности интенсивности изображений // Труды ВИАМ. 2026. № 7 (161). С. 215–225. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-215-225.

Scientific article

METHOD FOR MEASURING THE TIP OF A FATIGUE BY IMAGE INTENSITY DIFFERENCE

V.V. Avtaev¹, N.O. Yakovlev¹, V.A. Soldatov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The paper presents an automatic measurement of fatigue crack peak based on the analysis of image intensity on the sample surface, which detects local changes in the crack development area and takes into account general and local shifts on the sample surface. The fatigue tests results showed the possibility to determine the crack tip position correctly. The proposed method can be used in non-destructive testing systems and in testing aviation materials to improve the reliability of cyclic cracking assessment.

Keywords: fatigue crack, measurement, intensity, image, FCGR, optical measurements, texture

For citation: Avtaev V.V., Yakovlev N.O., Soldatov V.A. Method for measuring the tip of a fatigue by image intensity difference. *Trudy VIAM*, 2026, no. 7 (161), pp. 215–225. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-215-225.

Введение

Безопасная эксплуатация современных авиационных изделий во многом определяется применением современных принципов конструирования. Для деталей из обшивочных материалов малой толщины (панели крыла и фюзеляжа), которые в гражданской авиации традиционно изготавливают из алюминиевых сплавов, а для военной – из титановых, безопасность эксплуатации основана на принципе безопасной повреждаемости, который определяет способность конструкционного материала вязко разрушаться с длительным периодом роста трещины до момента лавинообразного катастрофического разрушения. Оценку вязкого (замедленного) разрушения материала проводят в соответствии с РЦ-АП23 (25, 27, 29)-613 при циклических испытаниях образца с трещиной с определением скорости роста трещины усталости (СРТУ). На основании результатов квалификационных испытаний серии образцов определяют статистические показатели выборки, по которым на характеристику СРТУ назначают коэффициенты запаса и определяют интервалы осмотров при эксплуатации изделия [1–4].

Расчетные значения характеристик циклической трещиностойкости занижают «в запас» пропорционально величине среднеквадратичного отклонения логарифма СРТУ, вычисленного на среднем (пэрисовом) участке роста макротрещины. Кроме свойств материала, на данную величину может влиять точность и кратность измерения длины трещины, которая зависит от выбранного метода ее измерения.

При априорном знании упругих характеристик структурно-однородных (в макромасштабе) полуфабрикатов достаточной толщины [5], при которой эффекты местной потери устойчивости образца не оказывают значимого влияния, методы на основе податливости обладают высокой точностью. Далее обязательно проводят проверку экспериментальных измерений с помощью визуальной оценки длины трещины по излому. При соблюдении чрезвычайно высоких требований по изолированию системы с образцом, поддержанию стабильного режима электрического напряжения (постоянного или переменного) и отсутствию локальных перегревов, методы на основе измерения разницы электрических потенциалов также имеют высокую точность [6]. При прямом измерении длины трещины наиболее широко (из-за простоты реализации) применяются методы на основе оптических (визуальных) измерений [7, 8]. Тем не менее до настоящего времени для данного метода не существует универсальной автоматизированной процедуры измерений – все измерения преимущественно проводят операторы. Визуальное измерение длины трещины оператором субъективно и плохо поддается количественной оценке как с позиции неопределенности измерений, так и по их повторяемости. В сравнении с другими методами оценки трещины [9–11], данные от оператора существенно ограничены как по объему, так и по возможности фиксации быстропротекающих процессов разрушения.

В данной работе представлены результаты разработки алгоритма для метода автоматизированного измерения вершины усталостной трещины по изображениям поверхности образцов, зафиксированным в процессе проведения испытаний на СРТУ. По сравнению с разрабатываемыми методами на основе искусственного интеллекта, предлагаемый в данной статье метод не требует реализации процедуры предварительного обучения нейросетевой модели [12–14], а также высоких вычислительных мощностей для проведения расчетов. Основа метода – знание элементарных закономерностей поведения материала с трещиной, что позволит не только идентифицировать на образце трещину и ее вершину, но и получить дополнительные данные о ее развитии в материале [15, 16].

Материалы и методы

Визуальные наблюдения процесса роста трещины при испытаниях на СРТУ, а также известные представления о линейной механике разрушения [17–19] позволяют заключить, что наибольшие различия образца без трещины от этого же образца с трещиной будут определены только в узкой зоне этой трещины с полным сохранением остальной поверхности образца без изменений. При совмещении двух таких изображений – базового изображения образца с изображением после подрастания трещины в образце – и последующего вычитания интенсивности пикселей, результирующее изображение укажет на зону максимальных отличий – зону развития трещины усталости (рис. 1).

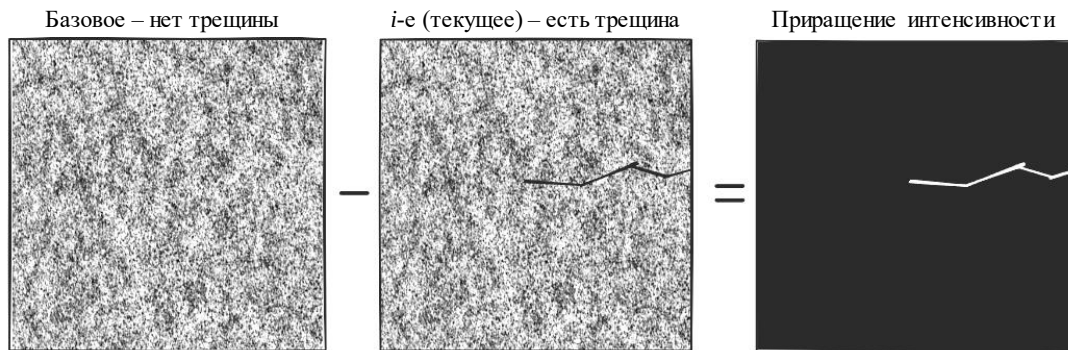


Рис. 1. Принципиальная схема оценки приращения интенсивности для поиска трещины по изображениям

Для корректной идентификации трещины усталости по указанному методу, оценки ее размеров и траектории необходимо дополнительно выделить задачи, возникающие при съемке поверхности образца неподвижной камерой.

Общее смещение образца. Смещение v образца характеризуется его нагружением вдоль оси y с плавным увеличением (градиентом) смещения к активному захвату: $dv/dy = \text{const}$. При прохождении трещины (при $y = c$) вдоль некоторого поперечного сечения смещение характеризуется в общем случае разрывом.

Совмещение изображений смещенного объекта с исходным [20]. На анализируемом изображении поверхность образца может быть смещена по отношению к аналогичной поверхности образца на базовом изображении (например, из-за различий действующей в данный момент силы), а эффекты от дисторсии объектива видеокамеры могут приводить к искажениям пропорций объекта съемки (рис. 2). Для совмещения двух изображений, полученных с одной или нескольких камер с совпадением оси съемки, когда идентифицируемый объект смещается в плоскости, перпендикулярной оси съемки, достаточно использовать аффинное преобразование, в противном случае – преобразование по проекции. Когда требуется совмещение двух изображений с разных камер (без совпадения осей съемки), на которых идентифицируемый объект смещается в 3D-пространстве, необходимо преобразовывать (деформировать) форму изображения к исходному изображению методами гомографии. В результате для каждого изображения может быть получена матрица смещений (U_i , V_i – смещения вдоль осей x и y для i -го изображения соответственно), поворотов, искажений и др. (в зависимости от выбранного преобразования), которая может быть использована для последующей реконструкции циклического нагружения образца, без необходимости записывать сигнал с датчика силы испытательной машины и синхронизировать его с видеосистемой.

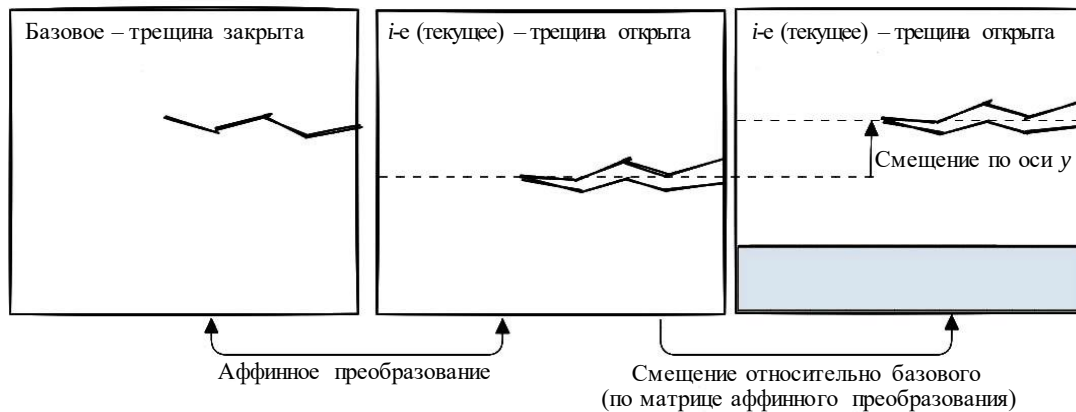


Рис. 2. Схема смещения текущего i -го изображения относительно базового по результатам аффинного преобразования

Контур трещины. В зависимости от действующей в цикле нагрузки, трещина у вершины может быть открыта либо закрыта [17]. Первый вариант обеспечивает хорошую идентификацию трещины по ее контуру, но сильно ограничивает возможности ее идентификации по произвольному изображению. Второй вариант, в особенности характерный для роста малых трещин, не подходит для идентификации по контуру, поскольку приводит к занижению длины трещины и неконсервативной оценке напряженности материала. Метод приращения интенсивности пикселей инвариантен по определению, поскольку идентификация трещины реализуется идентификацией любых локальных изменений по двум изображениям.

Пластическая зона. Возникновение перед фронтом трещины зоны интенсивного деформирования отображается на изображении дополнительными локальными смещениями. Из-за необратимости пластических деформаций данные смещения могут быть зафиксированы по приращению интенсивности в любой момент усталостного нагружения образца с трещиной, что позволит определять трещину усталости, в том числе в закрытом состоянии, без видимого на изображении контура трещины. Поскольку с помощью метода приращения интенсивности потенциально возможно определять форму пластической зоны, а также нагрузку, действующую на образец автономно, т. е. без синхронизации с испытательной машиной, следует действовать согласно представленной далее логике вычислений:

$$r(\vartheta) = f(K_I, \sigma_{0,2}) \rightarrow K_I = f(P, l, b, t), \quad (1)$$

где $r(\vartheta)$ – радиус пластической зоны в зависимости от угла ϑ относительно оси движения трещины; $f(K_I, \sigma_{0,2})$ – аналитическая функция для вычисления пластической зоны (например, по уравнению Ирвина); K_I – коэффициент интенсивности напряжений для трещины отрыва; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести материала исследуемого образца; $f(P, l, b, t)$ – аналитическая функция для вычисления K_I с учетом поправки на геометрическую форму образца; P – нагрузка, действующая на образец; l – длина трещины; b, t – ширина и толщина образца соответственно.

Оптимальное совмещение изображений. Поскольку метод приращения интенсивности основан на процедуре попиксельного вычитания, разница между изображениями раскрытой и нераскрытой трещины будет максимальной в зоне трещины, удаленной от ее вершины. Для определения положения вершины трещины в конкретный момент времени необходимо найти такое изображение, совмещение которого с базовым изображением обеспечит подобие на тех частях изображения, где наблюдается наиболее заметная разница при раскрытии/закрытии трещины в цикле. Нахождение

оптимального изображения возможно по серии записанных при циклическом нагружении изображений, т. е. по условию тождественности момента нагружения базового изображения с анализируемым. Например, если базовое изображение зафиксировано без нагрузки на образец, то оптимальное совмещение изображений будет наблюдаться также для всех последующих изображений ненагруженного образца с трещиной. При этом определение оптимальных изображений x_i по любому набору (сериям) изображений X может быть выполнено по следующему условию:

$$I_i \in I : f(I_i) = \min_x (\sum \Delta I_i(m, n)), \quad (2)$$

где I – серия изображений (например, серия зафиксированных изображений в течение 1 с, что при частоте 15 Гц обеспечит серию из 15 изображений, а при частоте циклического нагружения 5 Гц на один цикл нагружения – по 5 изображений); I_i – оптимальное в серии X i -е изображение; $\Delta I_i(m, n)$ – приращение интенсивности пикселей изображения x_i с размерами $m \times n$ пикс (матрица приращения интенсивности).

Гауссово размытие. При прямом вычитании интенсивности базового изображения с оптимальным изображением в данной серии и предварительно подготовленным для совмещения (преобразованным изображением одним из методов – например, с использованием аффинного преобразования) оценка по максимуму приращения интенсивности будет некорректна. В связи с наличием на светочувствительной матрице камеры статического электричества, приводящего к появлению на изображениях цифровых шумов, максимальное приращение не будет соответствовать зоне развития трещины. Основные различия пиков – в их высоте и площади: для шумов – максимальная интенсивность при малой площади (1 пикс = 3 сенсора светочувствительной матрицы); для трещины – меньшая интенсивность при большом «пятне», площадь которого определяется пластической деформацией.

Подобласти. Использование аффинного преобразования всего изображения подходит только для поиска оптимального в серии изображений, но не подходит для точного поиска вершины трещины. Максимальное подобие изображений через данное преобразование не обеспечит подобие локальное, особенно от дисторсии объектива, которая при смещении образца по одной оси (при циклическом одноосном нагружении в процессе испытания) будет искажать области изображения поверхности образца нелинейно. В этих областях у края изображения приращение интенсивности, вычисленное по всей площади, может давать более высокие значения, чем приращение в зоне развития трещины.

Для локальной оценки приращения интенсивности при поиске вершины трещины предлагается далее (после первого смещения изображения на величины U_i и V_i) разделять оптимальное смещенное изображение на локальные подобласти, для которых проводить раздельное аффинное преобразование по отношению к соответствующим подобластям базового изображения. Для исключения вероятных ошибок в оценке максимального приращения при его расположении на границе подобластей предлагается также выделять подобласти с взаимным частичным перекрытием (рис. 3). В результате будут получены величины смещения локальных областей u_{ijk}^{loc} и v_{ijk}^{loc} относительно аналогичных подобластей на базовом изображении, по которым могут быть вычислены смещения подобластей с учетом исходных положений:

$$\begin{cases} u_{ijk} = U_i + u_{ijk}^{loc} \\ v_{ijk} = V_i + v_{ijk}^{loc} \end{cases} \quad (3)$$

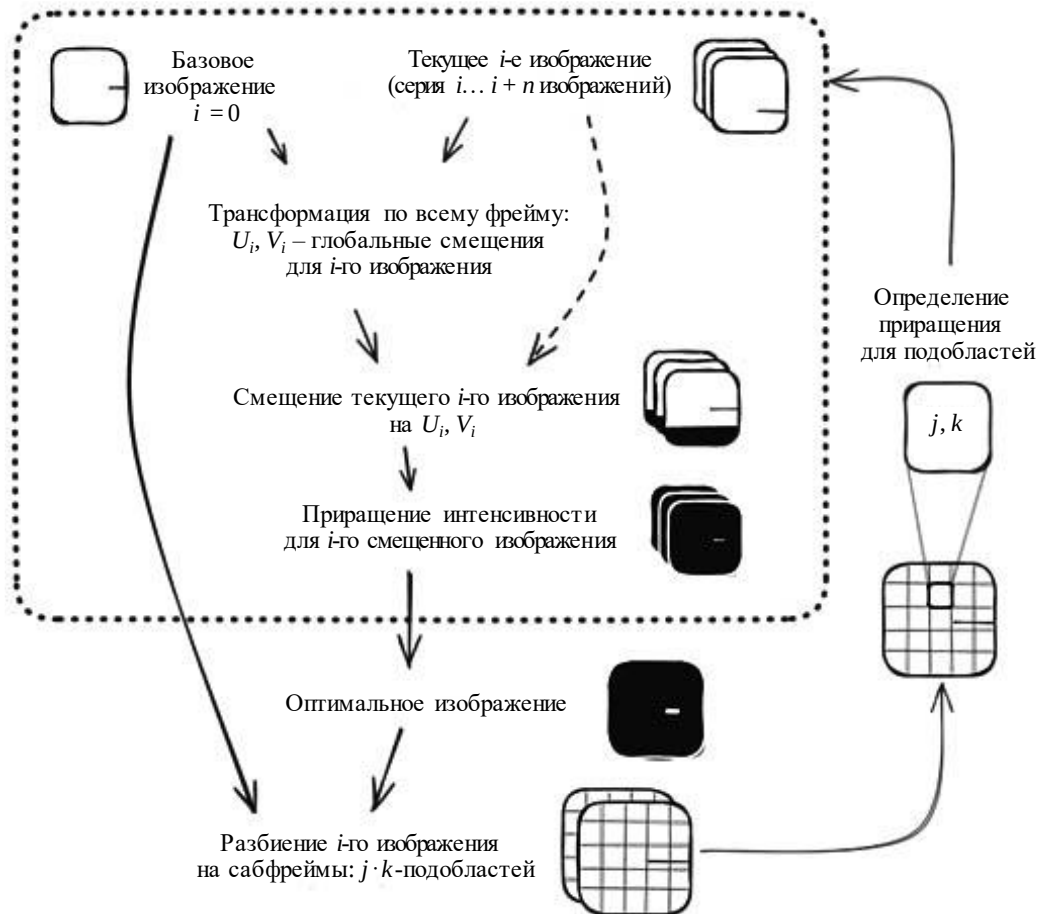


Рис. 3. Схема определения приращения локальной интенсивности на изображениях для оценки вершины трещины

По матрице приращения интенсивности $\Delta I_{ijk}(x, y)$ каждой подобласти проводят раздельное суммирование вдоль осей x и y – система (4). На основании полученных сумм-векторов по максимумам интенсивности определяют по формулам (5) координаты максимальной интенсивности на каждой подобласти x_{jk}^{loc} и y_{jk}^{loc} :

$$\begin{cases} S_x(y) = \Delta I_{ijk} \cdot 1_n \\ S_y(x) = \Delta I_{ijk}^T \cdot 1_m, \end{cases} \quad (4)$$

где $S_x(y)$ – вектор суммы интенсивности по строкам ($y = 1 \dots m$) вдоль оси x ; $S_y(x)$ – вектор суммы интенсивности по столбцам ($x = 1 \dots n$) вдоль оси y ;

$$\begin{cases} x_{jk}^{loc} = \operatorname{argmax}_{1 \leq y \leq m} (S_x(y)) \\ y_{jk}^{loc} = \operatorname{argmax}_{1 \leq x \leq n} (S_y(x)). \end{cases} \quad (5)$$

Окончательные координаты вершины трещины на оптимальном i -м изображении определяют с учетом размера подобластей:

$$\begin{cases} x_i = x_{jk}^{loc} + j \cdot m \\ y_i = y_{jk}^{loc} + k \cdot n. \end{cases} \quad (6)$$

Алгоритмы коррекции

Необходимо отметить, что предложенный алгоритм оценки координат по максимуму интенсивности эффективен, поскольку рост трещины сопровождается ростом пластической зоны. Однако увеличение приращения длины трещины также сопровождается увеличением неоднородных смещений поверхности образца – текстуры поверхности, разделенной на подобласти. Если в границах одной подобласти оптимального изображения неоднородные смещения не исключены полностью с помощью выбранной трансформации, то приращение интенсивности по отношению к аналогичной подобласти базового изображения может быть значительным и сравнимым с приращением в зоне вершины трещины. Поэтому при росте трещины для некоторых вариантов возможна неточная оценка ее вершины.

В качестве решения проблемы локальной нелинейности подобластей предлагается два варианта. Во-первых, уменьшение размера подобластей до величин, когда локальные искажения подобластей будут незначительны. Этапов уменьшения размеров подобластей может быть несколько. Для ускорения расчетов предлагается использовать схему, подобную гауссовой пирамиде (с уменьшением детализации – размытием): на верхнем размерном уровне размер подобласти равен размеру изображения (этап поиска оптимального изображения) и далее на каждом уровне размер подобласти кратно уменьшается. Второй вариант решения – когда локальные несоответствия подобластей могут быть уменьшены при смещении базового изображения, т. е. при выборе изображения образца с большей длиной трещины.

Алгоритмы проверки

Предложенный алгоритм в ряде случаев при испытаниях может приводить к ошибкам измерения вершины трещины – например, при сколе фрагмента образца, при существенном изменении освещения или состояния его поверхности (оператор поставил метку или дополнительно зашкурил поверхность). В этих случаях требуется съемка нового базового изображения или применение дополнительных проверочных условий на корректность определения вершины трещины.

1. Условие разрыва перемещений вдоль оси нагружения y в зоне развития трещины (по оси симметрии) в идеальном виде записывается по формуле $[[u_y]] = u_y^+ - u_y^- > 0$.

Для практических задач данное условие можно определить по максимальному градиенту перемещений. Поскольку величины локальных градиентов могут быть крайне чувствительны к погрешностям измерения малых перемещений (в особенности при низкой разрешающей способности камер или небольшом размере подобласти), для трещины отрыва также можно записать условие на антисимметрию по вычисленной площади:

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial \overline{u_y}}{\partial y} \right)_{jk} = \frac{1}{S_{jk}} \iint_{S_{jk}} \frac{\partial u_y}{\partial y} dx dy \\ y_{jk}^{cr} = \underset{j}{\operatorname{argmax}} \left(\frac{\partial \overline{u_y}}{\partial y} \right)_{jk} . \end{cases}$$

2. Условие для направления роста трещины в процессе испытаний записывается по формуле $\theta = \arctan \left(\frac{du_y}{du_x} \right)$. Для трещины отрыва (по *моде* I) допускается отклонение угла θ не более ± 5 градусов; для смешанного разрушения (*моды* I + II) – не более

± 9 градусов. Выполнение данного условия также позволит ограничить поиск вершины движущейся трещины только зонами перед вершиной.

Разработанный метод оценки положения вершины трещины опробован при испытаниях на СРТУ по ОСТ 1 92127–90 компактных образцов из титанового сплава на внецентренное растяжение. Циклическое нагружение проводили на сервогидравлической испытательной машине с частотой нагружения 5 Гц при коэффициенте асимметрии цикла $R = 0,1$.

Фиксацию поверхности образцов осуществляли с помощью цифровой видеокамеры с разрешением 2 Мпикс при частоте съемки 60 Гц. Базовое изображение фиксировали при длине трещины не менее 2 мм. Серии кадров для анализа фиксировали с периодичностью 5 мин и длительностью 1 с. Размер подобласти составлял 200×120 пикс ($1,3 \times 0,75$ мм). Оценку положения вершины трещины по методу приращения интенсивности проводили с помощью разработанного в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ программного обеспечения.

Результаты и обсуждение

На рис. 4 представлен результат применения разработанного алгоритма: фрагмент изображения 1000×500 пикс, по которому проводили оценку вершины трещины методом приращения интенсивности пикселей.

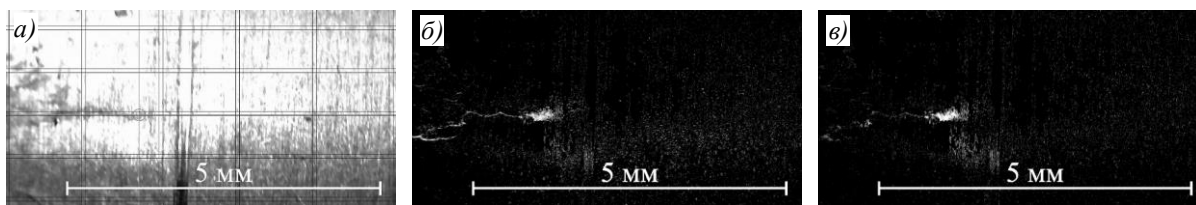


Рис. 4. Фрагмент изображения при подрастании трещины усталости: *а* – оптимальное изображение в серии (сеткой линий показаны подобласти); *б*, *в* – приращения интенсивностей по неоптимальному и оптимальному изображению в серии соответственно

По изображениям приращения интенсивности (рис. 4, б, в) видно, что блики с максимальной яркостью на сравниваемых изображениях приводят к появлению острых локальных пиков интенсивности, преимущественно расположенных на границе «текстура–блик».

Следует также отметить высокую чувствительность метода к смещению объектива относительно нормали к поверхности образца, при котором одна его часть находится в фокусе, а другая нет. В этом случае трещина, проходящая через области без оптической фокусировки, будет ошибочно определена по одной из областей с фокусировкой.

Заключения

Отметим, что метод приращения интенсивности пикселей является инвариантным и обеспечивает возможность идентификации трещины за счет анализа любых локальных изменений между последовательными изображениями образца. Предложенные алгоритмы совмещения изображений, локализации подобластей и коррекции интенсивности позволили повысить надежность определения координат вершины трещины при циклическом нагружении. Апробация методики на титановых образцах подтвердила ее эффективность и применимость как для открытых, так и для закрытых трещин. Отмечена устойчивость метода к искажениям, вызванным локальными бликами или изменением текстуры поверхности.

Разработанный подход может использоваться в автоматизированных системах контроля и при квалификационных испытаниях авиационных материалов, обеспечивая повышение точности оценки характеристик циклической трещиностойкости и расширяя возможности диагностики процессов разрушения.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [21].

Список источников

1. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М., Неруш С.В., Крупнина О.А. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 1. Материалы и технологии синтеза // Электрометаллургия. 2022. № 1. С. 2–12. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-1-2-12.
2. Каблов Е.Н., Путырский С.В., Яковлев А.Л., Крохина В.А., Наприенко С.А. Исследование сопротивления усталостному разрушению штамповок из высокопрочного титанового сплава BT22M, изготовленных с заключительной деформацией в $(\alpha + \beta)$ - и β -областях // Титан. 2021. № 1 (70). С. 26–33.
3. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984. 312 с.
4. Авиационный справочник. Расчетные значения характеристик авиационных металлических конструкционных материалов. М.: ЦАГИ, 2012. Вып. 4: ОАК. 118 с.
5. Сутубалов А.И., Подживотов Н.Ю., Шершак П.В., Яковлев Н.О. Оценка однородности физико-механических свойств полуфабрикатов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 1 (74). С. 121–135. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
6. Si Y., Rouse J.P., Hyde C.J. Potential difference methods for measuring crack growth: A review // International Journal of Fatigue. 2020. No. 136. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105624.
7. Sun H., Liu Q., Fang L. Research on fatigue crack growth detection of M (T) specimen based on image processing technology // Journal of Failure Analysis and Prevention. 2018. Vol. 18. P. 1010–1016.
8. Rupil J., Roux S., Hild F., Vincent L. Fatigue microcrack detection with digital image correlation // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2011. Vol. 46 (6). P. 492–509.
9. Lopez-Crespo P., Shterenlikht A., Patterson E.A. et al. The stress intensity of mixed mode cracks determined by digital image correlation // Journal Strain Analysis. 2008. Vol. 43. No. 8. P. 769–780.
10. Du Y., Diaz F.A., Burguete R.L., Patterson E.A. Evaluation using digital image correlation of stress intensity factors in an aerospace panel // Experimental Mechanics. 2011. Vol. 51. P. 45–57.
11. Orell O., Jokinen J., Kanerva M. Use of DIC in the characterization of mode II crack propagation in adhesive fatigue testing // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2023. Vol. 122. P. 1–10.
12. Indolia S., Goswami A.K., Mishra S.P., Asopa P. Conceptual understanding of convolutional neural network – a deep learning approach // Procedia Computer Science. 2018. Vol. 132. P. 679–688.
13. Strohmman T., Starostin-Penner D., Breitbarth E., Requena G. Automatic detection of fatigue crack paths using digital image correlation and convolutional neural networks // Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures. 2021. Vol. 44. P. 1336–1348.
14. Ali R., Chuah J.H., Talip M.S. A. et al. Structural crack detection using deep convolutional neural networks // Automation in Construction. 2022. Vol. 133. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580521004404> (дата обращения: 03.06.2026). DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103989.

15. Яковлев Н.О., Селиванов А.А., Гулина И.В., Гриневич А.В. К вопросу о долговечности шарнирно-болтовых соединений // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 79–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-79-85.
16. Морозова Л.В., Левченко А.А. Исследование биметаллических обойм ротора генератора после эксплуатации // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 4 (69). С. 112–122. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-112-122.
17. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М.: Физматлит, 2006. 328 с.
18. Автаев В.В., Яковлев Н.О. Исследование статической трещиностойкости и сопротивления разрушению тонколистового алюминиевого сплава методом корреляции цифровых изображений // *Деформация и разрушение материалов*. 2020. № 2. С. 29–35.
19. Ерак А.Д., Киселев А.С. Связь параметров трещиностойкости с параметрами структуры изломов при испытании на трехточечный изгиб // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). С. 156–166. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-156-166.
20. Потапов А.С. Системы компьютерного зрения: учеб. пособие. СПб: Университет ИТМО, 2016. 161 с.
21. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Монин С.А. Испытания конструкционных металлических материалов на скорость роста трещины усталости в коррозионно-активной среде (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 12 (118). С. 135–144. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-135-144.

References

1. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 1. Materials and synthesis technologies. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 1, pp. 2–12. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-1-2-12.
2. Kablov E.N., Putyrskiy S.V., Yakovlev A.L., Krokhina V.A., Naprienko S.A. Study of fatigue fracture resistance of stampings made of high-strength titanium alloy VT22M, manufactured with final deformation in the ($\alpha+\beta$)- and β -regions. *Titan*, 2021, no. 1 (70), pp. 26–33.
3. Bolotin V.V. *Service Life Forecasting for Machines and Structures*. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 312 p.
4. *Aviation Handbook. Calculated Values of Characteristics of Aircraft Metal Structural Materials*. Moscow: TsAGI, 2012, is. 4: UAC, 118 p.
5. Sutubalov A.I., Podzhivotov N.Yu., Shershak P.V., Yakovlev N.O. Evaluation of homogeneity of physical and mechanical properties of semi-finished products for aviation purpose. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), pp. 121–135. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 14, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
6. Si Y., Rouse J.P., Hyde C.J. Potential difference methods for measuring crack growth: A review. *International Journal of Fatigue*, 2020, no. 136. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105624.
7. Sun H., Liu Q., Fang L. Research on fatigue crack growth detection of M (T) specimen based on image processing technology. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2018, vol. 18, pp. 1010–1016.
8. Rupil J., Roux S., Hild F., Vincent L. Fatigue microcrack detection with digital image correlation. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2011, vol. 46 (6), pp. 492–509.
9. Lopez-Crespo P., Shterenlikht A., Patterson E.A. et al. The stress intensity of mixed mode cracks determined by digital image correlation. *Journal Strain Analysis*, 2008, vol. 43, no. 8, pp. 769–780.
10. Du Y., Diaz F.A., Burguete R.L., Patterson E.A. Evaluation using digital image correlation of stress intensity factors in an aerospace panel. *Experimental Mechanics*, 2011, vol. 51, pp. 45–57.
11. Orell O., Jokinen J., Kanerva M. Use of DIC in the characterization of mode II crack propagation in adhesive fatigue testing. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2023, vol. 122, pp. 1–10.

12. Indolia S., Goswami A.K., Mishra S.P., Asopa P. Conceptual understanding of convolutional neural network – a deep learning approach. *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 132, pp. 679–688.
13. Strohmamm T., Starostin-Penner D., Breitbarth E., Requena G. Automatic detection of fatigue crack paths using digital image correlation and convolutional neural networks. *Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures*, 2021, vol. 44, pp. 1336–1348.
14. Ali R., Chuah J.H., Talip M.S. A. et al. Structural crack detection using deep convolutional neural networks. *Automation in Construction*, 2022, vol. 133. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580521004404> (accessed: June 03, 2026). DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103989.
15. Iakovlev N.O., Selivanov A.A., Gulina I.V., Grinevich A.V. Revisiting the durability of hinged-bolt connections. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 79–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-79-85.
16. Morozova L.V., Levchenko A.A. Research of bimetallic holders of generator rotor after operation. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), pp. 112–122. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 14, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-112-122.
17. Matvienko Yu.G. *Models and criteria of fracture mechanics*. Moscow: Fizmatlit, 2006, 328 p.
18. Avtaev V.V., Yakovlev N.O. Study of static crack resistance and fracture resistance of thin-sheet aluminum alloy using digital image correlation. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2020, no. 2, pp. 29–35.
19. Erak A.D., Kiselev A.S. Correlation between fracture toughness parameters and fracture surfaces structure parameters for three-point bending tests. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 156–166. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 14, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-156-166.
20. Potapov A.S. *Computer vision systems: a tutorial*. St. Petersburg: ITMO University, 2016, 161 p.
21. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Monin S.A. Tests of structural metallic materials for the fatigue crack growth rate in a corrosive environment (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), pp. 135–144. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 14, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-135-144.

Информация об авторах

Автаев Виталий Васильевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Яковлев Николай Олегович, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Солдатов Вячеслав Алексеевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vitaly V. Avtaev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nikolay O. Yakovlev, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vyacheslav A. Soldatov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 27.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.12.2025.
The article was submitted 27.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 17.12.2025.