

УДК 670.191.33

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОЦЕНКА КИНЕТИКИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СЕНСОРА УСТАЛОСТИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА

И. В. Коноваленко¹, М. В. Карускевич², П. О. Марущак¹,
С. Р. Игнатович²

¹ Тернопольский национальный технический университет им. Ивана Пулюя,
46001, Украина, г. Тернополь, ул. Русская, 56

² Национальный авиационный университет,
03058, Украина, г. Киев, просп. Космонавта Комарова, 1
E-mail: Maruschak.tu.edu@gmail.com

Проведены цифровая идентификация и оценка кинетики накопления повреждений на поверхности сенсора усталости с использованием метода обработки цифровых изображений. Оценка накопления дефектов дана на основании анализа результатов диагностики отдельных этапов циклического деформирования. Установлено, что определённым стадиям повреждённости соответствуют определённые параметры изображения. На основе последовательной обработки данных поверхностных повреждений выявлены основные закономерности развития сдвиговых процессов. Представлены теоретические предпосылки и экспериментальные результаты.

Ключевые слова: циклическое нагружение, деформационный рельеф, анализ изображения, диагностика.

Введение. Известно, что кинетика накопления усталостных повреждений и механизмы разрушения материалов определяются внутренней структурой материала и его деградацией в течение наработки [1]. Поэтому исследования накопления повреждённости и локализации пластической деформации на различных масштабных уровнях позволяют оценить кинетику процесса и прогнозировать предельное состояние материала [2]. Исследованию этих процессов посвящён ряд работ [3–5], в которых обоснованы главные физические предпосылки и техническая реализация структурно-чувствительных сенсоров усталости для авиационной техники. Их использование является достаточно эффективным, так как позволяет проводить оценку фактического состояния эксплуатируемых авиаконструкций высокоточными неразрушающими методами.

Из [6–8] известна методология масштабных и структурных уровней, а также концепция элементарных носителей деформации, которая даёт возможность рассматривать процесс деформирования материала как иерархическую систему, склонную к структурно-механической самоорганизации. Такой подход является базой для реализации численных алгоритмов оценки состояния системы и анализа повреждений, выявленных в поверхностном слое [9, 10], он также создаёт предпосылки оценки реального технического состояния объекта между плановыми осмотрами.

В работах [11, 12] обоснованы параметры двумерных, трёхмерных и фрактальных показателей деформационного рельефа, количественно описаны деформационные образования и соответствующие уровни накопленного усталостного повреждения. Разработаны [4] конструкции структурно-чувствительных образцов-свидетелей (сенсоров) усталостного повреждения, применение которых базируется на количественной оценке накопленного усталостного повреждения по параметрам деформационного рельефа поверхности. Чувствительность образцов-свидетелей может быть оптимизирована в соответствии с ре-

жимами эксплуатационного циклического нагружения конструкций [4]. Именно поэтому является актуальным создание эффективных алгоритмов идентификации, анализа и обобщения полученных данных поверхностной поврежденности с учётом ориентации дефектов [13, 14].

Цель предлагаемой работы — создание алгоритма автоматизированной оценки усталостной поврежденности фольгового сенсора как нелинейной иерархически организованной структурно-механической системы.

Физико-механические предпосылки диагностики накопления дефектов. Любую поверхность с имеющимися повреждениями можно рассматривать как совокупность структурных дефектов, расположенных в пределах исследуемой области. Здесь дефекты — проявления микросдвиговых и ротационных процессов, повреждения границ зёрен и др. Увеличение циклической наработки, как правило, приводит к появлению линий скольжения и их развитию с формированием локализованных сдвиговых образований, являющихся одним из способов релаксации напряжений в условиях циклического нагружения. Фольговый сенсор закрепляли на образце сплава Д16АТ, который испытывался при максимальном напряжении нагружения $\sigma_{\max} = 180,0$ МПа при частоте 11,0 Гц и асимметрии цикла $R = 0$ [11]. Сенсор усталости позволяет проводить мониторинг кинетики накопления и локализации усталостных повреждений в поверхностном слое материала с использованием подходов физической мезомеханики. Элементарным актом пластического течения во время накопления усталостных повреждений в материале является «смещение + поворот» структурных элементов [6]. Это приводит к возникновению диссипативных мезоструктур и накоплению усталостных дефектов на сенсорах усталости.

Алгоритм расчёта параметров деформационного рельефа. Параметры рельефа поверхности поликристаллического алюминиевого сенсора усталости определяли с использованием анализа исходного фотоизображения $I_0(x, y)$ (рис. 1, $a—c$).

Алгоритм состоит из двух этапов (рис. 2). Первый, подготовительный этап содержит операции выравнивания освещённости, фильтрации, бинаризации и определения наклона (рис. 1, $d—f$). На втором этапе путём анализа полученного изображения вычисляли количественные интегральные характеристики, позволяющие оценить общее состояние сенсора [2]. Необходимо отметить, что особое внимание уделяли мониторингу разориентации линий сдвига, которая является одним из фундаментальных проявлений кинетических закономерностей накопления повреждений [6–8]. Локальные микросдвиги на отдельных участках полос вызывают изменение их интегральной ориентации. Происходит переход от одноориентированной структуры сдвигов к частично разориентированной с постепенным увеличением количества микроискажений геометрии деформационного рельефа.

Наличие этого явления подтверждается диаграммой ориентации рельефных образований (рис. 1, $g—i$). Заметно, что деформационные образования сначала однонаправлены, а потом возникают механизмы их самоорганизации как результат влияния локальных релаксационных процессов мезоуровня. Для анализа углов распространения рельефных образований использовали алгоритм идентификации [15].

Предварительная обработка изображения. Для выравнивания освещённости изображения устранялось влияние затенённых областей исходного изображения на результаты анализа. Эту операцию выполняли с помощью свёртки изображения с низкочастотным фильтром и последующего устранения низкочастотной составляющей.

Для фильтрации использовался гауссовый фильтр с достаточно большим размером ядра, в результате чего получилось приблизительное изображение освещённости $l'(x, y)$ (где x — индекс столбца, $x \in (1, \dots, m)$; y — индекс ряда изображения I_0 , $y \in (1, \dots, n)$).

После этого имеем изображение с выровненной освещённостью

$$I_L(x, y) = K_L \frac{I_0(x, y)}{l'(x, y)}, \quad (1)$$

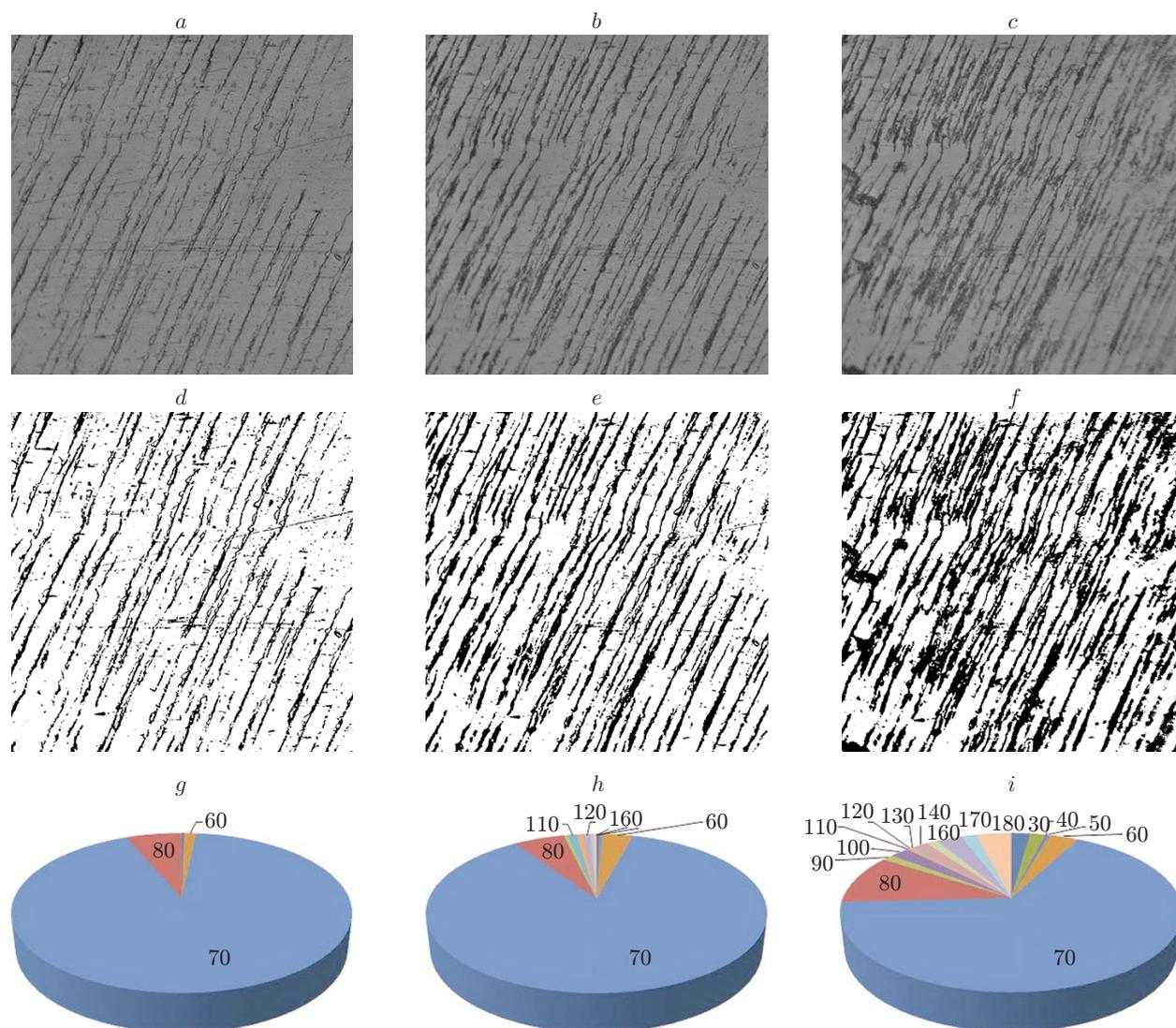


Рис. 1. Поверхность поликристаллического алюминиевого сенсора усталости и данные её анализа после 10^4 , $4 \cdot 10^4$ и $2 \cdot 10^5$ циклов нагружения (столбцы соответственно): исходное многоградационное (a—c) и конечное бинаризованное (d—f) изображения и диаграммы распределения углов ориентации рельефных образований (g—i)

где $K_L = \max(l'(x, y))$ — коэффициент выравнивания освещения.

Для устранения незначительных шумов на полученном изображении, вызванных особенностями работы фотоматрицы, использовался медианный фильтр. Результатом обработки становилось изображение I_f .

После предварительной обработки и улучшения качества исходного изображения I_0 проводили его сегментацию с помощью бинарного преобразования. На изображении выделяли информативные пиксели (точки интереса), которые соответствуют зонам деформационного рельефа.

Для этого на диаграмме яркости изображения определяли граничное значение $I_{B_{lim}}$, отделяющее пиксели фона от информативных пикселей. Результатом является бинарное изображение I (см. рис. 1, d—f), на котором элементам деформационного рельефа соответствуют чёрные пиксели (информативные), а фону — белые.

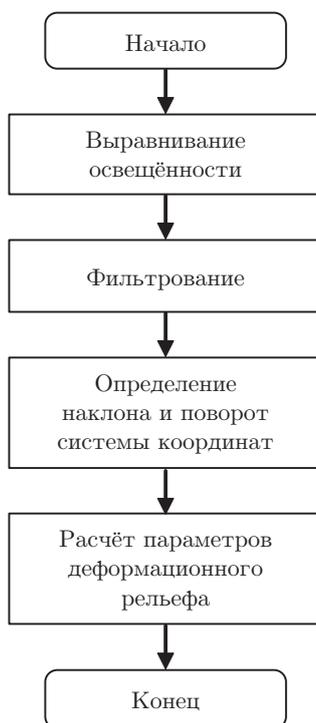


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения параметров деформационного рельефа

Деформационный рельеф на поверхности поликристаллического алюминиевого сенсора усталости характеризуется наличием многочисленных линейных фрагментов (см. рис. 1). Предпосылкой получения интегральных количественных показателей таких изображений [2] является система координат, одна из осей которой совпадает с направлением распространения линейных фрагментов деформационного рельефа.

Поворот оси координат. Направление распространения линейных фрагментов деформационного рельефа определяли с помощью преобразования Хафа, заключающегося в сравнении изображения с параметрическим пространством прямых [16]. Пусть семейство прямых на плоскости описывается параметрическим уравнением

$$h(\theta, \rho, x, y) = x \cos \theta + y \sin \theta - \rho, \quad (2)$$

где (x, y) — параметрическое пространство изображения I ; (θ, ρ) — параметрическое пространство семейства прямых, представленных на изображении (θ, ρ — составляющие нормального уравнения прямой).

В преобразовании Хафа вычисляли матрицу аккумуляторов S в пространстве параметров (θ, ρ) с дискретностью $\Delta\theta, \Delta\rho$ (на практике при анализе изображений (см. рис. 1) принимали $\Delta\theta = 1^\circ, \Delta\rho = 4$ пикселя). Каждой ячейке фазового пространства соответствует аккумулятор с определённым количеством информативных точек на изображении. Принимали, что принадлежность точки $i(x, y)$ изображения I прямой h задана ячейкой параметрического пространства $S(\theta, \rho)$:

$$r(x, y, \theta, \rho) = \begin{cases} 1, & \text{если } d(i(x, y), h(\theta, \rho, x, y)) \leq d_{\text{lim}}, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (3)$$

где $d(i(x, y), h(\theta, \rho, x, y))$ — расстояние от точки $i(x, y)$ до прямой $h(\theta, \rho, x, y)$; d_{lim} — граничное значение.

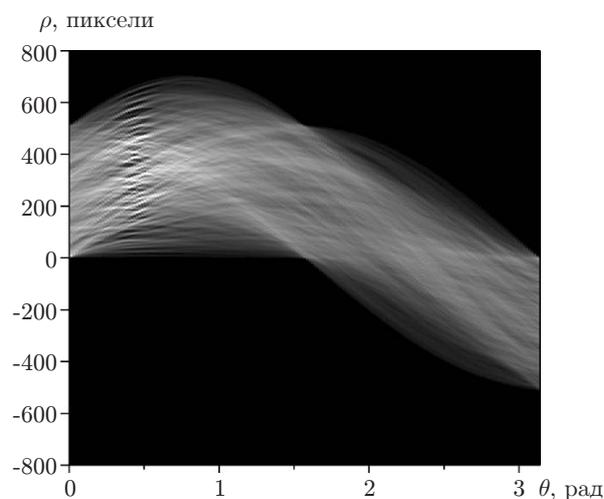


Рис. 3. Вид функции $H(S(\theta, \rho))$ для анализируемого деформационного рельефа

Таким образом, функция преобразования Хафа имеет следующий вид:

$$H(S(\theta, \rho)) = \sum r(x, y, \theta, \rho). \quad (4)$$

Количественный анализ аккумуляторов в параметрическом пространстве позволил найти на изображении прямые с наибольшим количеством информативных точек. Зоны, в которых функция $H(S(\theta, \rho))$ достигает максимальных значений, соответствуют более выраженным прямым. Значение параметра $\theta = \theta_{\text{base}}$ позволяет установить преобладающее направление распространения информативных точек (элементов деформационного рельефа). Вид функции $H(S(\theta, \rho))$ для изображения на рис. 1, *e* представлен на рис. 3, 4.

Далее рассматривали изображение I в системе координат (x^φ, y^φ) после поворота относительно начала координат осей (x, y) на угол $\varphi = \theta_{\text{base}} - \pi/2$ (см. рис. 4). Для изображения, представленного на рис. 1, *e*, угол $\theta_{\text{base}} = 0,47$ рад = 27° .

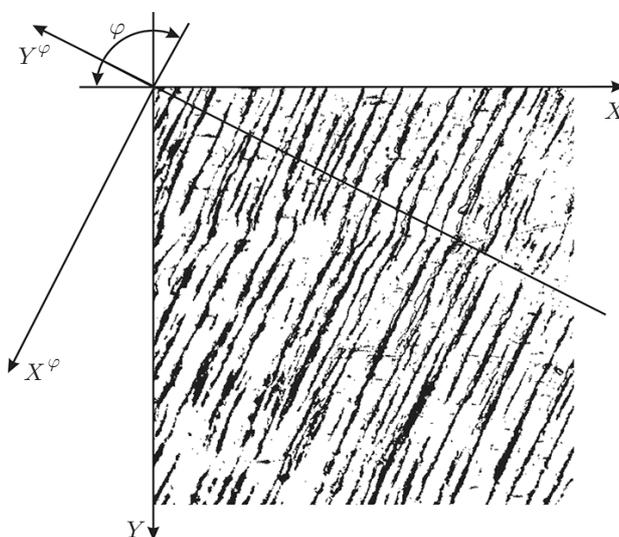


Рис. 4. Поворот системы координат изображения в направлении развития элементов деформационного рельефа

Заметим, что вычисление преобладающего наклона рельефных образований возможно только при продолговатой форме и наличии тенденции к ориентации повреждений в определённом направлении. В противном случае на параметрической плоскости преобразования Хафа будут отсутствовать ярко выраженные зоны, соответствующие определённому углу наклона. Тогда шаг алгоритма с поворотом системы координат можно пропустить, перейдя сразу к вычислению количественных параметров, которые будут рассчитываться в начальной системе координат изображения и без выраженного различия для обеих осей координат.

Количественная оценка параметров рельефа. В целях количественной оценки состояния деформационного рельефа поверхности сенсора усталости использовали ряд параметров, рассчитанных с помощью анализа обработанного многоградационного изображения I_f и бинарного изображения I .

Для каждого пикселя изображения I_f находили абсолютное значение горизонтального и вертикального градиентов:

$$\nabla I_f^h(x^\varphi, y^\varphi) = \left| \frac{\partial I_f(x^\varphi, y^\varphi)}{\partial x^\varphi} \right|; \quad \nabla I_f^v(x^\varphi, y^\varphi) = \left| \frac{\partial I_f(x^\varphi, y^\varphi)}{\partial y^\varphi} \right|. \quad (5)$$

Обобщённую оценку состояния исследуемой поверхности проводили с использованием среднего значения горизонтального и вертикального градиентов изображения:

$$G_h = \overline{\nabla I_f^h} = \frac{1}{S_I} \iint \nabla I_f^h(x^\varphi, y^\varphi) dx^\varphi dy^\varphi; \quad G_v = \overline{\nabla I_f^v} = \frac{1}{S_I} \iint \nabla I_f^v(x^\varphi, y^\varphi) dx^\varphi dy^\varphi, \quad (6)$$

где $S_I = mn$ — площадь изображения.

Градиент позволяет количественно оценить степень неоднородности исследуемой поверхности вдоль координатных осей. Незначительный градиент свидетельствует о небольшом изменении интенсивности вдоль рассматриваемой оси изображения. На практике это означает более однородную картину упорядоченных структур в определённом направлении [13] и указывает на ось координат, которая соответствует преобладающему направлению ориентации повреждений. Интегральным параметром, позволяющим анализировать состояние сенсора, является относительная площадь повреждений

$$S_d = \frac{S}{mn} \cdot 100 \%, \quad (7)$$

где S — количество пикселей упорядоченных структур изображения I .

Распределение элементов упорядоченных структур вдоль осей (X^φ, Y^φ) изображения описывают вертикальной H_v и горизонтальной H_h гистограммами [2]:

$$H_h(y^\varphi) = \sum_{x^\varphi=1}^{m^\varphi} I(x^\varphi, y^\varphi); \quad H_v(x^\varphi) = \sum_{y^\varphi=1}^{n^\varphi} I(x^\varphi, y^\varphi), \quad (8)$$

где m^φ, n^φ — размеры изображения в системе координат (x^φ, y^φ) вдоль осей X^φ и Y^φ соответственно.

Учитывая, что после поворота системы координат сечения изображения для различных значений x^φ (или y^φ) будут отличаться, для обеспечения возможности сравнительного анализа выполняли нормализацию гистограмм:

$$H_h^n(y^\varphi) = \frac{H_h(y^\varphi)}{d_I(y^\varphi)} \cdot 100 \%; \quad H_v^n(x^\varphi) = \frac{H_v(x^\varphi)}{d_I(x^\varphi)} \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где $d_I(y^\varphi), d_I(x^\varphi)$ — размер изображения для координат вдоль осей Y^φ и X^φ .

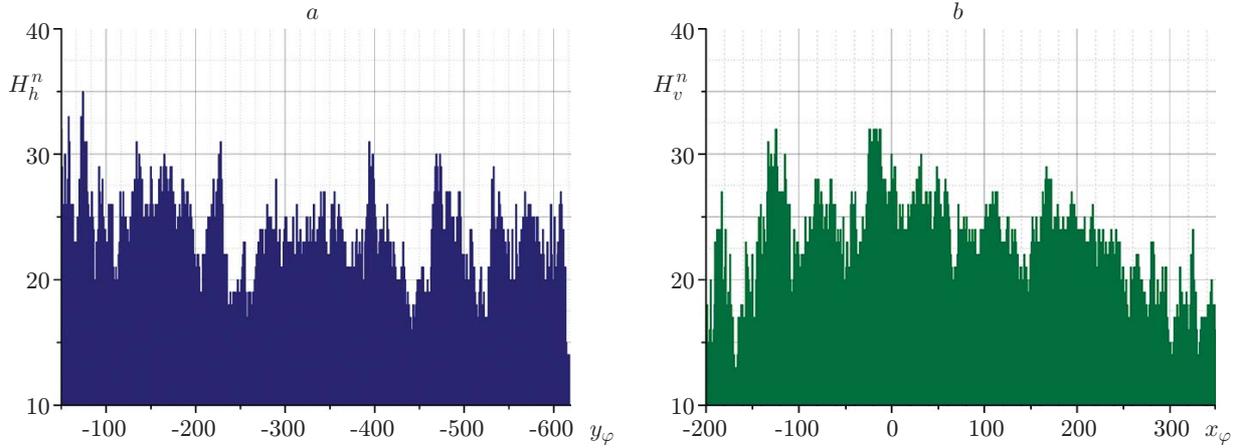


Рис. 5. Гистограммы изображения поверхности поликристаллического алюминиевого сенсора усталости: нормализованные горизонтальная H_h^n (a) и вертикальная H_v^n (b)

Каждый элемент гистограммы содержит количество точек, которые соответствуют объектам упорядоченных структур рельефа в горизонтальном и вертикальном направлениях анализируемого изображения. Функции гистограмм содержат базовый массив информации о распределении упорядоченных структур вдоль координатных осей изображения. Нормализованные гистограммы для рассматриваемого изображения поверхности поликристаллического алюминиевого сенсора усталости (см. рис. 1, e) показаны на рис. 5. Отметим, что горизонтальная гистограмма характеризуется явными пиками, соответствующими блокам одноориентированных элементов рельефа. В то же время вертикальная гистограмма отличается более однородной формой, что указывает на отсутствие ярко выраженных линейных элементов в этом направлении. Количественная оценка вида гистограмм (8) выполнена с помощью спектрального анализа их функций. С использованием быстрого преобразования Фурье функции гистограмм запишем в виде ряда

$$H_h^n(y^\varphi) \approx \sum_{k=0}^{K_h} A_{hk} \cos\left(2\pi \frac{k}{n} y^\varphi - \theta_h\right); \quad H_v^n(x^\varphi) \approx \sum_{k=0}^{K_v} A_{vk} \cos\left(2\pi \frac{k}{m} x^\varphi - \theta_v\right). \quad (10)$$

Количество гармоник K_h , K_v выбрано из условия представления функции гистограммы как суммы гармоник, не меньшей граничного значения ε :

$$\left| H_h^n(y^\varphi) - \sum_{k=0}^{K_h} A_{hk} \cos\left(2\pi \frac{k}{n} y^\varphi - \theta_h\right) \right| \leq \varepsilon; \quad \left| H_v^n(x^\varphi) - \sum_{k=0}^{K_v} A_{vk} \cos\left(2\pi \frac{k}{m} x^\varphi - \theta_v\right) \right| \leq \varepsilon. \quad (11)$$

В качестве информативных параметров выбраны средние амплитуды спектра функций горизонтальной A_{ah} и вертикальной A_{av} гистограмм:

$$A_{ah} = \frac{1}{K_h} \sum_{k=0}^{K_h} A_{hk}; \quad A_{av} = \frac{1}{K_v} \sum_{k=0}^{K_v} A_{vk}. \quad (12)$$

Средняя амплитуда спектра позволяет количественно оценить ориентацию элементов поверхностного рельефа вдоль осей изображения. Увеличение её значения определяется большей поврежденностью вдоль анализируемой оси. Сравнивая значения A_{ah} , A_{av} , можно получить информацию о доминирующей ориентации дефектов поверхности.

Таблица 1

**Значения параметров поверхности сенсора усталости
при различной продолжительности наработки**

Количество циклов наработки N	Градиент		Средняя амплитуда спектра	
	горизонтальный G_h	вертикальный G_v	горизонтальная A_{ah}	вертикальная A_{av}
10000	12,0	17,6	0,5	0,6
40000	16,1	28,8	0,7	0,9
200000	15,8	27,9	1,3	2,0

Наличие обобщённых характеристик — средних градиентов G_h , G_v и средних амплитуд спектра A_{ah} , A_{av} — позволяет получить комплексную интегральную характеристику анализируемого изображения в двух взаимно перпендикулярных координатных направлениях [2].

Исследование накопления усталостных повреждений в сенсоре усталости.

Процесс накопления усталостных повреждений можно условно разделить на два основных этапа [17]: интенсивное образование повреждений и стадию «насыщения», когда происходит преимущественно рост уже имеющихся дефектов (см. рис. 1). Относительная площадь повреждений позволяет провести количественную оценку деформационных элементов на поверхности сенсора. Наибольших значений она достигает на конечной стадии исследования (200000 циклов нагрузки). Осуществляется локальная релаксация напряжений и одновременно генерация локальных напряжений на смежных участках с активацией локальных участков сдвига (табл. 1).

Площадь повреждений использовали в качестве дополнительного параметра состояния поверхности, интегрально учитывающего эти физические закономерности (рис. 6). Однако необходимо отметить, что площадь нечувствительна к пространственному распределению элементарных повреждений и не позволяет оценить степень их упорядоченности. Предлагаемый в этой работе подход даёт возможность глубже понять кинетику процесса накопления структурно-механических повреждений и эволюцию их морфологии.

Повреждённость поверхности рассматривали в виде многоуровневой иерархической системы упорядоченных дефектов, эволюция которой направлена на минимизацию внеш-

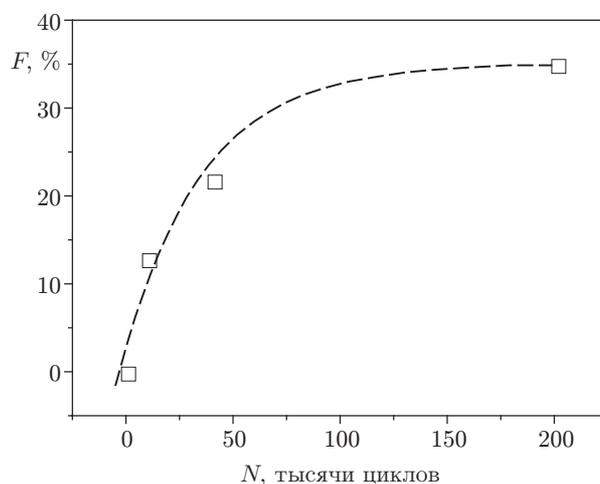


Рис. 6. Изменение площади повреждений F в процессе наработки N

него воздействия на всех масштабных уровнях и обладает свойствами пространственного и временного подобия [18]. Благодаря этому переход на макроскопический уровень рассмотрения проведён без детализации элементарных актов образования дефектов на основе геометрических характеристик структурных повреждений. На начальном этапе (до 10000 циклов) произошло зарождение полос локализованного сдвига, в которых сосредоточена основная часть пластической деформации. При этом деформация смежных областей имеет более низкие значения, что приводит к аккомодации пластического течения и обеспечению сплошности среды [6]. На изображении (см. рис. 1, *a*) заметно наличие полос скольжения. Явно видно значительное преимущество одной системы скольжения, что чётко отражается на значениях параметров оценки повреждённости (см. табл. 1).

При наработке 40000 циклов стремительно возрастает степень повреждённости сенсора, что соответствует быстрому росту вертикального градиента (при этом горизонтальный градиент также увеличивается, однако с меньшей интенсивностью). Рост количества циклов наработки приводит к увеличению ширины и плотности полос скольжения, происходит их объединение в полосы локализованного сдвига, что свидетельствует о наличии элементов деформационного рельефа, ориентированных вдоль горизонтальной оси (в нашем случае X^{φ}). В это же время быстро увеличивается средняя амплитуда спектра вертикальной гистограммы, это отражается в появлении на изображении периодических образований деформационного рельефа.

При длительной наработке горизонтальный градиент вдвое меньше вертикального, что указывает на бóльшую однородность поверхностного рельефа вдоль оси X^{φ} . При высоких нагрузках градиент несколько снижается. Это соответствует фазе насыщения изображения элементами рельефа, при которой изображение становится более структурно-однородным, но уже не за счёт фона (как на протяжении начальной стадии), а за счёт элементов рельефа.

Выявленные закономерности кинетики накопления и взаимодействия полос локализованного сдвига в поверхностном слое сенсора усталости согласуются с теоретическими предпосылками ряда работ [3, 11, 19], а предложенные подходы имеют определённые преимущества перед существующими методами (табл. 2).

Стадийность накопления повреждений, кинетика локализации деформаций зависят от сдвиговой устойчивости материала [9]. Исчерпание пластичности при многоциклового усталости напрямую связано с уровнем локализации деформаций. Этот процесс активизируется с увеличением интенсивности сдвиговых деформаций, обуславливая возникновение диссипативных субструктур на поверхности повреждённого материала [20]. Рассматрива-

Таблица 2

Сравнение параметров оценки поверхностной повреждённости

Способы оценки состояния поверхности	Параметры оценки повреждений			
	площадь дефектов	фрактальная размерность	градиент спектра повреждений	средняя амплитуда спектра повреждений
Наличие и состояние повреждений	+	+	+	+
Локализация повреждений	–	–	+	+
Фиксация наличия трещины	–	–	+	+

емые подходы и вычислительный алгоритм расширяют возможности автоматизированной оценки процессов накопления поверхностных повреждений [21].

Заключение. В данной работе представлен алгоритм интегральной оценки состояния поверхности при циклическом нагружении, состоящий из операций выравнивания освещённости, фильтрации, бинаризации, поворота осей координат и определения количественных параметров изображения. Для количественной оценки состояния поверхности предложено использовать множество интегральных параметров: общую площадь повреждения, средний градиент вдоль координатных осей и среднюю амплитуду спектра функции гистограммы.

Выявлены основные закономерности зарождения и локализации деформационных процессов в поверхностных слоях сенсора усталости и их связь с кинетикой накопления повреждений. Полученные численные данные накопления усталостных повреждений дали возможность установить новые закономерности локализации пластической деформации в сенсоре усталости, что в перспективе позволит повысить точность оценки состояния конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Molent L., Aktepe B.** Review of fatigue monitoring of agile military aircraft // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2000. **23**, N 9. P. 767–785.
2. **Yasniy P., Maruschak P., Konovalenko I.** Measurement of surface mesostrain of plastically deformed steel // *Strain*. 2011. **47**, Suppl. 2. P. 238–241.
3. **Karuskevich M. V., Radchenko A. I., Zasimchuk E. E.** Single-crystal as an indicator of fatigue damage // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 1992. **15**, N 12. P. 1281–1283.
4. **Petrasek M., Ignatovich S., Karuskevich M., Maslak T.** Surface of metal as an indicator of fatigue damage // *Adv. Military Technol.* 2013. **8**, N 2. P. 83–91.
5. **Ignatovich S., Karuskevich M., Maslak T.** Computer aided optical method for aircraft's components fatigue life estimation // *Mater. of the 17th European Conf. on Fracture "Multilevel Approach to Fracture of Materials, Components and Structures"*. Brno, Czech Republic, 2–5 Sept., 2008. P. 2308–2313.
6. **Panin V. E.** Plastic deformation and fracture of solids at the mesoscale level // *Mater. Sci. and Eng. A*. 1997. **234–236**. P. 944–948.
7. **Pleshanov V. S., Kibitkin V. V., Panin V. E.** Mesomechanics of fatigue fracture for polycrystals with macroconcentrators // *Theor. and Appl. Fract. Mech.* 1998. **30**, N 1. P. 13–18.
8. **Makarov P. V., Romanova V. A.** Mesoscale plastic flow generation and development for polycrystals // *Theor. and Appl. Fract. Mech.* 2000. **33**, N 1. P. 1–7.
9. **Romanova V. A., Balokhonov R. R., Schmauder S.** A comparative analysis of the mesoscale stress-strain state in two- and three-dimensional polycrystalline specimens // *Phys. Mesomech.* 2010. **13**, N 3–4. P. 178–183.
10. **Romanova V. A., Balokhonov R. R., Emelyanova O. S.** On the role of internal interfaces in the development of mesoscale surface roughness in loaded materials // *Phys. Mesomech.* 2011. **14**, N 3–4. P. 159–166.
11. **Карускевич М. В., Корчук Е. Ю., Маслак Т. П., Пантелеев В. М.** Структурна пошкоджувальність і руйнування зразків-свідків втомного пошкодження // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. № 9(56). С. 110–114.
12. **Карускевич М. В., Корчук О. Ю.** Діагностичні параметри втоми монокристалів // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2005. Вип. 10(26). С. 79–83.

13. **Maruschak P. O., Panin S. V., Ignatovich S. R. et al.** Influence of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nanocoating // Theor. and Appl. Fract. Mech. 2012. **57**, N 1. P. 43–48.
14. **Park J.-H., Myung M. S., Kim Y.-J.** Tensile and high cycle fatigue test of Al-3 % Ti thin film // Sensors and Actuators A: Phys. 2008. **147**, N 2. P. 561–569.
15. **Yasniy P., Maruschak P., Konovalenko I. et al.** Multiple cracks on continuous caster rolls surface: a three-dimensional view // Proc. of the 4th Intern. Conf. "Processing and Structure of Materials". Palic, Serbia, 2010. P. 7–12.
16. **Duda R. O., Hart P. E.** Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures // Commun. ACM. 1972. **15**, N 1. P. 11–15.
17. **Панин С. В., Бяков А. В., Любутин П. С. и др.** Многомасштабный метод изучения деформации и разрушения нагруженных твёрдых тел по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. **77**, № 9. С. 50–59.
18. **Yasniy P. V., Maruschak P. O., Panin S. V., Lyubutin P. S.** Mesomechanics and hierarchical levels of fatigue crack growth in 25Cr1Mo1V steel // Intern. Journ. Terraspace Sci. and Eng. 2011. **3**, Is. 1. P. 169–175.
19. **Karuskevych M. V., Zhuravel' I. M., Maslak T. P.** Application of fractal geometry to the problems of prediction of the residual service life of aircraft structures // Mater. Sci. 2012. **47**, N 5. P. 621–626.
20. **Siriwardane S., Ohga M., Dissanayake R., Taniwaki K.** Application of new damage indicator-based sequential law for remaining fatigue life estimation of railway bridges // Journ. Constructional Steel Research. 2008. **64**, N 2. P. 228–237.
21. **Коноваленко И. В., Марущак П. О.** Анализ погрешностей алгоритма идентификации трещин термоусталости // Автометрия. 2011. **47**, № 4. С. 49–57.

Поступила в редакцию 14 марта 2013 г.
