

Исследование различных критериев оценки серии оптических изображений в методе датчика деформации интегрального типа*

С. В. ПАНИН^{1,2}, П. С. ЛЮБУТИН¹, М. В. БУРКОВ^{1,2}, Ю. А. АЛТУХОВ¹,
С. А. ХИЖНЯК³, В. П. КУЗНЕЦОВ⁴

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия

³ОАО Опытное конструкторское бюро Сухова, Москва, Россия

⁴Курганский государственный университет, Россия

e-mail: svp@ispms.tsc.ru

Панин С.В., Любутин П.С., Бурков М.В., Алтухов Ю.А., Хижняк С.А., Кузнецов В.П. Исследование различных критериев оценки серии оптических изображений в методе датчика деформации интегрального типа // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19, № 3. С. 103–118.

Проведено исследование различных критериев оценки оптических изображений алюминиевой фольги, наклеенной на образец углепластикового композита, как датчика деформации интегрального типа с целью оценки величины наработки. Используются подходы, предназначенные как для оценивания качества изображений, так и для количественной оценки рельефа поверхности. Исследована чувствительность всех рассмотренных критериев оценки оптических изображений к внешним воздействиям, в частности, к зашумлению, размытию, компрессии. Основной целью исследований является поиск наиболее чувствительных к деформации и наименее чувствительных к искажениям критериев количественной оценки изображений поверхности датчика деформации интегрального типа.

Ключевые слова: критерии оценки изображений, датчик деформации интегрального типа, шум, размытие изображений, сжатие изображений.

Panin S.V., Lyubutin P.S., Burkov M.V., Altukhov Yu.A., Khizhnyak S.A., Kuznetsov V.P. Investigation of various criteria for optical images series evaluation in technique of strain sensor of integral type // Computational Technologies. 2014. Vol. 19, No. 3. P. 103–118.

A technique for assessment of cyclic deformation using aluminum foil sensors glued onto the specimen surface was addressed. The fatigue tests for carbon fiber reinforced polymers were carried out. A digital single-lens reflex camera mounted onto an optical microscope was used for capturing the images of sensors in order to reflect the strain induced relief. The relief was numerically estimated using various informative parameters in order to obtain the cyclic deformation assessment of the composite.

We use the parameters that needed for evaluation of the quality of images, as well as the ones needed for the quantification of the surface relief on images. They were

*Работа выполнена при поддержке СО РАН (проект № III.23.1.3), РФФИ (гранты № 13-07-00009 и 14-08-31747 мол_а) и грантов Президента РФ № СП-816.2012.5 и СП-3788.2013.3.

investigated for determination of sensitivity to negative external influences, in particular of digital noise, blur and compression. The original images were subjected to Gaussian noise, Gaussian blur and JPEG compression with different degrees of impact and then the set of informative parameters were calculated.

The aim of the present study is to find the parameter that makes the process of estimation for sensor images to be the most sensitive to deformation and the least sensitive to distortions. The results are discussed for applications of this technique for the development of the Structural Health Monitoring method used for polymer based structures reinforced by carbon fiber.

Keywords: image evaluation criteria, thin foil sensor (smart sensor), digital noise, image blurring, image compression.

Введение

Применение композиционных материалов (КМ) на основе углеродных волокон при создании конструкций позволяет значительно повысить их прочностные характеристики. Последнее обусловлено высокими механическими свойствами КМ по сравнению с металлическими сплавами. Кроме того, производство изделий из КМ имеет более низкую стоимость, так как в этом случае используются высокопроизводительные методы (например намотки), что позволяет изготавливать крупногабаритные детали с минимумом необходимых соединений (болтовых, заклёпочных и т. п.). Таким образом, доля КМ в конструкциях, например, современных пассажирских самолетов постоянно растёт, достигая по массе 50 % (Boeing-787, Airbus-A350XWB).

В процессе эксплуатации подобные конструкции испытывают действие циклических нагрузок, которое может приводить к усталостному разрушению. Поэтому разработка методов контроля их механического состояния является актуальной научно-технической задачей.

Одним из подходов к проведению встроенного контроля деталей машин и элементов конструкций является применение датчиков деформации интегрального типа (ДДИТ) [1]. Методика ДДИТ основана на регистрации оптических изображений поверхности тонкого (алюминиевого) чувствительного элемента (фольги), наклеенного на исследуемые материал или деталь. За счёт циклических деформаций в процессе нагружения на поверхности фольги формируется рельеф, оптическое изображение которого регистрируется с помощью видеодатчика. Анализируя этот рельеф, можно оценивать наработку материала и его механическое состояние.

В то же время оптические изображения рельефа могут характеризоваться значительным количеством факторов, способных заметным образом отразиться на величине рассчитываемых критериев (информативных параметров), используемых для подобной оценки. Речь идёт о шумах, помехах, уровне освещённости и её неравномерности, размытии и пр. Поэтому от качества исходных регистрируемых оптических изображений во многом зависит достоверность результатов обработки и анализа экспериментальных данных.

Поскольку при реализации датчика деформации интегрального типа оптические изображения являются образом (pattern) рельефа на поверхности фольги, выбор информативных параметров является крайне важным с точки зрения исключения (или минимизации) влияния таких факторов, как освещённость, зашумленность, степень размытия. В работе [2] было исследовано применение адаптивной билатеральной филь-

трации для обработки серии изображений; при этом в качестве информативного признака для оценки деформации использовалась фрактальная размерность.

В настоящей работе поставлена задача исследовать влияние шумов, размытия (имитирующего расфокусировку) и степени сжатия на характер изменения значения информативных признаков при обработке изображений алюминиевой фольги в ДДИТ при оценке циклической деформации (наработки) образца композиционного материала. Следует отметить, что далее в тексте для обозначения использованных количественных характеристик применяется как термин “критерии”, так и термин “информативные параметры”.

1. Материал и методика исследований

Прямоугольные плоские образцы углеродно-эпоксидного композитного материала (УЭКМ) с двумя центральными V-образными надрезами (КМ системы углеродное волокно/эпоксидная матрица) размерами $70 \times 13 \times 3.5$ мм испытывали на одноосное циклическое растяжение с асимметрией цикла $R = 0.1$ на сервогидравлической испытательной машине UTM Biss-00-201. В качестве видеодатчика использовался цифровой зеркальный фотоаппарат Canon EOS 550D с оптическим трактом от микроскопа МБС-9. Фотоаппарат подключался через переходное кольцо вместо системы с окулярами. Данная система позволяет получать изображения с физическими размерами 12×8 мм (разрешение получаемых снимков составляет 5184×3456 пикселей). На поверхность образцов наклеивалась поликристаллическая алюминиевая фольга. Для количественной обработки из середины кадра вырезались квадратные фрагменты размером 1024×1024 пикселя.

Использованная в работе схема освещения фольги взаимосвязана с методикой подготовки фольги, но отличается от методик, описанных в литературе. Так, в [1], используя ацетон, фольгу отклеивали от образца и фотографировали с помощью микроскопа МБС-9 в отражённом свете, получая светлые недеформированные участки и тёмные складки деформированного материала. В [3] фотографирование фольги, наклеенной на образец, осуществляли, не извлекая последний из захватов испытательной машины, однако благодаря диффузному освещению также получали изображения со светлыми недеформированными областями и тёмными складками.

В настоящей работе для освещения образца использовали два источника: галогенный студийный осветитель и точечную светодиодную лампу (рис. 1). Первый располагали в плоскости xz под углом 45° к оси x для формирования общего фона изображения.

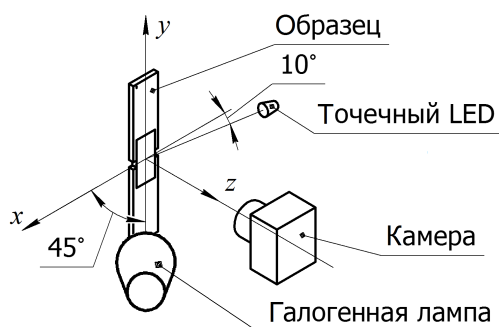


Рис. 1. Схема освещения и съёмки образца

Точечный светодиодный источник для увеличения контраста формирующихся деформационных складок был расположен в плоскости xz под углом $\sim 10^\circ$ к “отрицательной” оси x . Такая схема освещения зеркальной фольги позволяет получить на начальных этапах циклического нагружения тёмное однотонное изображение, так как отражённый свет не попадает в объектив микроскопа. Далее по мере наработки формируется деформационный рельеф, на элементах которого происходит рассеянное отражение, поэтому области со сформировавшимся рельефом выглядят более светлыми.

Опыт по выбору схемы был получен в ходе предварительного исследования по испытанию металлических образцов с наклеенными ДДИТ [3]. Фольгу полировали для получения зеркальной поверхности. Таким образом, начальное состояние фольги у разных образцов было одинаковым. В сравнении с химически травленной фольгой (матовая поверхность) на зеркальной фольге значительно улучшилась повторяемость результатов, а сопоставление образцов с разной наработкой стало более корректным. Поэтому одним из ограничений при выборе угла освещения галогенного осветителя была невозможность освещать поверхность под углом более 60° , в силу чего свет отражается от зеркальной поверхности и происходит засветка изображения. Располагать осветитель под углом менее 10° не позволяла колонна испытательной машины. Конечное значение угла освещения определяли визуально — по качеству получаемых изображений.

Положение LED-осветителя выбирали таким образом, чтобы увеличить контраст деформационных складок, стараясь не вносить изменений в общее освещение (в данном случае руководствовались также визуальными оценками качества получаемых изображений). Поэтому угол выбирали наименьший (10°); ограничением здесь являлась и колонна испытательной машины.

Фотографирование в процессе циклического нагружения осуществляли по следующей схеме: с шагом 100 циклов до наработки 2000 циклов, с шагом 200 — от 2000 до 10 000 циклов, с шагом 500 — от 10 000 до 30 000 циклов, с шагом 1000 — свыше 30 000 циклов до разрушения. В этих точках программа управления испытательной машиной осуществляла остановку циклического нагружения и производилось фотографирование [3]. На рис. 2 показаны исходные изображения данной серии, полученные при разном числе циклов нагружения N (разной величине наработки). Заметим, что при использованном методе освещения изображение недеформированной фольги является тёмным и характеризуется однородным распределением яркости. При количестве циклов $N = 1600$ выявляются признаки формирования деформационного рельефа, однако в целом изображение продолжает оставаться тёмным (рис. 2, б). Возрастание наработ-

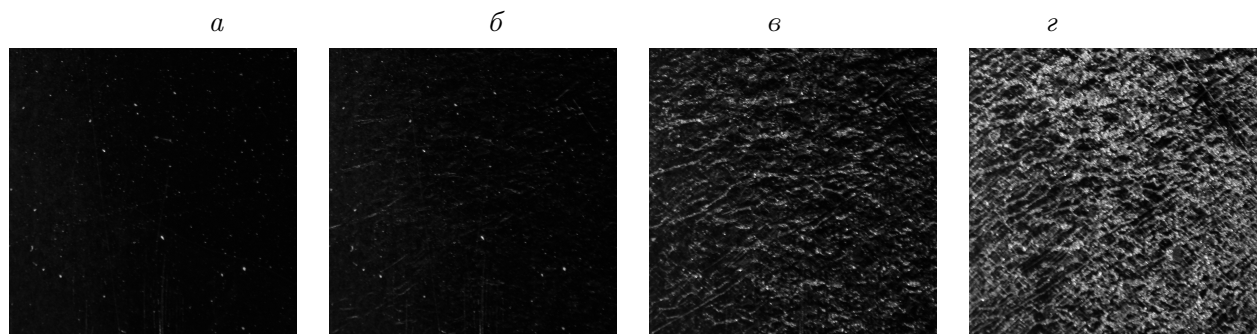


Рис. 2. Исходные оптические изображения ДДИТ; число циклов нагружения N : a — 100, b — 1600, c — 6400, d — 29 000

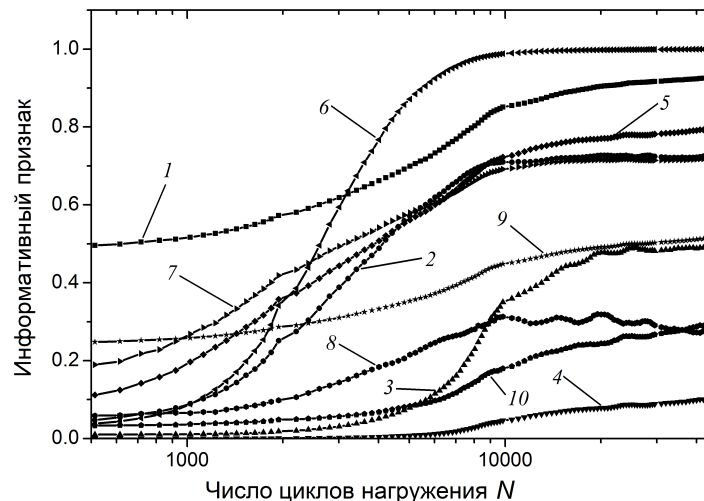


Рис. 3. Графики зависимости различных критериев оценки качества исходных экспериментальных изображений от числа циклов нагружения N : 1 — H , 2 — F_d , 3 — $E_{\text{ФС}}$, 4 — MSE, 5 — PSNR, 6 — UIQ, 7 — VSNR, 8 — S_q , 9 — H -MSE, 10 — $I_{\text{ср}}$

ки до $N = 6400$ сопровождается значительным формированием деформационного рельефа в виде мелких складок, при этом уровень яркости изображения увеличивается (рис. 2, в). Наконец, при $N = 29\,000$ рельеф практически не меняется, однако изображение становится ещё более светлым (рис. 2, з). График, характеризующий изменение среднего уровня яркости изображения $I_{\text{ср}}$ как функции от величины наработки, приведён на рис. 3 (кривая 10).

Для анализа серий изображений ДДИТ рассчитывали следующие информативные признаки: среднеквадратичная ошибка (MSE — mean square error), информационная энтропия H , фрактальная размерность F_d , энергия фурье-спектра $E_{\text{ФС}}$, пиковое отношение сигнал/шум PSNR, универсальный критерий качества UIQ (universal image quality), визуальное отношение сигнал/шум VSNR, отношение площадей белых пикселей к площадям чёрных пикселей в бинаризованных изображениях S_q [1].

1.1. Размытие изображений

Исходные оптические изображения ДДИТ были подвергнуты размытию с применением фильтра Гаусса. Это низкочастотный фильтр, в котором используется нормальное распределение для вычисления преобразования, применяемого к каждому пикселю изображения. Распределение Гаусса в N измерениях имеет вид [4]

$$G(x, y) = c e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_p^2}},$$

где σ_p — стандартное отклонение в распределении Гаусса, которое задаёт степень размытия, c — масштабирующий коэффициент. В двумерном случае эта формула описывает поверхность, имеющую вид концентрических окружностей. Размер ядра свёртки, которое затем применяется к исходному изображению, принимается равным $6\sigma_p + 1$. Значение каждого пикселя становится средневзвешенным для окрестности. В работе степень размытия σ_p варьировали от 1 до 10.

1.2. Наложение шума

Гауссовый шум представляет собой статистический шум, имеющий функцию плотности распределения вероятности, соответствующей нормальному закону. Иными словами, значения, которые может принимать шум, характеризуются гауссовым распределением. Функция плотности распределения вероятности P гауссовой случайной величины z задается выражением

$$P_G(z) = \frac{1}{\sigma_{\text{ш}}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma_{\text{ш}}^2}},$$

где z — уровень градации серого, μ — среднее значение, $\sigma_{\text{ш}}$ — стандартное отклонение, определяющее амплитуду шума [5]. В работе для зашумления принимали значения $\sigma_{\text{ш}}$ от 0.03 до 0.3.

1.3. JPEG-сжатие изображений

Часто в качестве датчиков видеоинформации используют видеокамеры, реализующие различные принципы сжатия видеоданных. Представляет интерес оценка влияния степени сжатия на изменение информативных признаков. Для этого в работе использовали один из самых распространённых методов компрессии — JPEG-сжатие, который основан на дискретном косинусном преобразовании сигнала. Сжатие выполняли с помощью программы XnView (<http://www.xnview.com>) со следующими параметрами: ДКТ — медленное, коэффициент сглаживания равен нулю, дискретизация (по умолчанию) составляет 2×2 , 1×1 , 1×1 . Степень сжатия варьировали от 10 до 100 с шагом 10 единиц, отражающих величину потерь информации при сжатии.

2. Критерии оценки

2.1. Среднеквадратичная ошибка MSE

Метод расчёта основан на вычислении среднеквадратичной ошибки между двумя изображениями [6]

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{1,i} - I_{2,i})^2,$$

где n — общее количество пикселей в изображении, I_1 , I_2 — яркости пикселей искажённого (например, зашумлённого либо деформированного — при различных величинах наработки) и оригинального (без зашумления либо снятого до начала циклического деформирования образца) изображения соответственно.

2.2. Информационная энтропия изображения H

С целью расчёта данного параметра вначале для исходного изображения строится гистограмма в виде зависимости количества пикселей p для каждого уровня яркости i . Далее (информационная) энтропия H вычисляется по следующей формуле [7]:

$$H(I) = - \sum_{i=1}^{I_{\text{max}}} p(i) \log_2(p(i)),$$

где i — возможное состояние яркости пикселя изображения, I_{max} — максимальное значение яркости, в нашем случае $I_{\text{max}} = 255$.

2.3. Энергия фурье-спектра мощности $E_{\text{ФС}}$

Для исходного изображения построчно-столбцовой процедурой метода БПФ (быстрое преобразование Фурье) вначале рассчитывается его дискретный фурье-образ $F(\omega_x, \omega_y)$, а затем вычисляется дискретный двумерный спектр мощности [8]

$$P(\omega_x, \omega_y) = |F(\omega_x, \omega_y)|^2.$$

Дискретный фурье-спектр мощности представляет собой двумерный массив чисел P_{ij} , который может быть записан в декартовых $[i, j]$ координатах. Оценка амплитудного фурье-спектра проводилась путём расчёта среднего значения энергии спектра, ограниченного заданной пространственной частотой — радиусом окружности R , который задавался равным 10 % от размера изображения

$$E_{\text{ФС}} = \sum_{i,j \in R} P_{ij}.$$

2.4. Фрактальная размерность F_d (метод изаритм)

Метод изаритм [9] основан на предположении о том, что численную оценку фрактальной размерности (ФР) поверхности изображения можно получить исходя из оценок его контурных изолиний (линий равных значений яркости) — изаритм. Реализация данного метода оценки ФР поверхности начинается с построения серии изаритм с заданным интервалом яркости. Далее для каждой изаритмы оценивается её фрактальная размерность F_d — параметр, вычисляемый через уравнение регрессионной прямой

$$\log(L_i) = C + B \log(P),$$

где L_i — длина изаритмы при текущем шаге P (1, 2, 4, 8, 16, 32, ...), C — константа, B — тангенс угла наклона регрессионной кривой. Длина каждой изаритмы оценивается последовательно с разным шагом P , измеряемым в пикселях. Количество шагов подбирается эмпирически и напрямую влияет на точность оценки параметра F_d , который вычисляется как

$$F_d = 1 - B.$$

Чем больше размер шага, используемого для вычисления длины изаритмы, тем меньше её длина. Это в свою очередь приводит к получению отрицательного тангенса угла наклона регрессионной кривой (так, для линии угол B всегда нулевой). Для бесконечно сложной кривой значение B будет отрицательным и равным (-1) . Параметр F_d поверхности вычисляется как параметр кривой плюс единица, т. е.

$$F_d = 2 - B.$$

Таким образом, при реализации метода изаритм для каждой изаритмы оценивалось своё значение ФР. Последующий расчёт для всего изображения поверхности проводился путём усреднения значений фрактальной размерности всех изаритм.

2.5. Пиковое отношение сигнал/шум PSNR

Данный критерий является “стандартной” мерой качества изображений [6], поэтому авторы использовали его прежде всего для целей сравнения:

$$\text{PSNR} = 10 \log \left(\frac{I_{\max}^2}{\text{MSE}} \right),$$

где I_{\max} — максимальное значение, принимаемое пикселем изображения (в нашем случае 255), MSE — среднеквадратичная ошибка между двумя изображениями (см. выше раздел 2.1).

2.6. Универсальный критерий качества UIQ

Этот критерий также рекомендуют в литературе как “стандартный” способ получения количественной оценки качества изображения [10]:

$$\text{UIQ} = \frac{4\sigma_{12}\bar{I}_1\bar{I}_2}{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)(\bar{I}_1^2 + \bar{I}_2^2)},$$

где \bar{I}_1, \bar{I}_2 — среднеарифметические значения яркости исходного и зашумлённого изображений соответственно:

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{1,i}, \quad \bar{I}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{2,i},$$

здесь n — количество пикселей изображений. Стандартные отклонения значений яркости оригинального и зашумлённого изображений

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{1,i} - \bar{I}_1)^2, \quad \sigma_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{2,i} - \bar{I}_2)^2.$$

Коэффициент взаимной корреляции между двумя изображениями

$$\sigma_{12} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{1,i} - \bar{I}_1)(I_{2,i} - \bar{I}_2).$$

2.7. Визуальное отношение сигнал/шум VSNR

Данный критерий, предложенный в [11], является логическим продолжением параметра PSNR и позиционируется как более эффективный и чувствительный критерий оценки качества изображений. Вычисление предложенной метрики производится в два этапа. На первом этапе для каждого уровня вейвлет-спектра изображения вычисляются пороги различия изображений для обнаружения искажений. Если искажения ниже порога детектирования, VSNR принимается равным бесконечности и дальнейший анализ не проводится. Второй этап основан на оценке различий изображений на низких и средних пространственных частотах. Итоговое значение параметра VSNR вычисляется суммированием коэффициентов, полученных на каждом уровне вейвлет-преобразования.

2.8. Отношение площадей чёрных пикселей к площадям белых пикселей на изображении S_q

Аналогичный подход использован в [1] для оценки изменений, происходящих на поверхности ДДИТ по мере нагружения. Расчёт состоит из двух этапов. На первом производится бинаризация изображения с использованием локального порога, предложенная в работе [12]. Порог бинаризации для пикселя с координатами (x, y) рассчитывается следующим образом:

$$T(x, y) = \overline{I}_M + k\sigma_M,$$

где \overline{I}_M — среднеарифметическое значение яркости в окне M , σ_M — стандартное отклонение значений яркости в том же окне M , k — коэффициент чувствительности алгоритма. Размер окна (апертуры) должен выбираться таким образом, чтобы сохранить локальные детали изображения и в то же время снизить влияние шума. Значение искомого параметра находится как отношение суммы яркости всех пикселей бинаризованного изображения к общему количеству пикселей

$$S_q = \frac{\sum_i^n N_i}{n},$$

где N_i — значение пикселя изображения после бинаризации (0,1), n — общее количество пикселей в изображении.

2.9. Интегральный критерий H -MSE

Поскольку в настоящей работе (см. ниже) было выявлено, что параметры MSE и H характеризуются существенным динамическим диапазоном изменения, было предложено ввести комплексный критерий H -MSE, который рассчитывается как среднеарифметическое между нормированными значениями MSE и H .

2.10. Средняя яркость изображения $I_{\text{ср}}$

Так как все используемые в работе информативные признаки являются математическими оценками изображения как цифрового образа поверхности ДДИТ, авторы использовали ещё две характеристики: $I_{\text{ср}}$ — нормированную среднюю яркость изображения и линейную зависимость, увеличивающуюся при росте наработки от 0 до 1, которую условно можно назвать степенью наработки ($N_{\text{нар}}$). Сопоставление с этими характеристиками может дать дополнительную информацию об изменении отражательной способности фольги. Целью введения данного критерия (ниже обозначен как K_r) является необходимость получения оценки изменения каждого из информативных признаков путём расчёта коэффициента корреляции между ними.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

3.1. Серия исходных (не искажённых) экспериментальных изображений ДДИТ

Для сравнения всех предложенных информативных признаков (критериев оценки качества) проведён их расчёт для серии исходных (не зашумленных, не размытых, не сжа-

тых) изображений фольги, полученных при различной величине наработки эпоксиуглеродных образцов. Результирующий график, на котором все рассмотренные характеристики были пронормированы (так, чтобы максимум величины не превышал 1), приведён выше (см. рис. 3). Видно, что изменение всех информативных параметров имеет типичный трехстадийный характер, однако временные границы этих стадий различаются. Кроме того, динамический диапазон их изменения также заметно различен. Сгруппировав различные критерии, проведём их краткое описание.

Почти для всех параметров при величине наработки до $N = 1000$ циклов информативные признаки остаются практически постоянными. Затем наблюдается заметный рост следующих критериев: H (1), F_d (2), PSNR (5), UIQ (6), VSNR (7), H -MSE (9) (см. рис. 3). Для оставшихся параметров начало второй стадии (заметное возрастание параметра) регистрируется при больших величинах наработки. На третьей стадии, которая является наиболее протяжённой и практически не сопровождается изменением деформационного рельефа (см. рис. 2, в, г), большинство параметров (за исключением H (1), MSE (4), PSNR (5), S_q (8) и H -MSE (9)) остаются постоянными. Более того, параметр S_q даже несколько снижает свою величину, что делает его практически не пригодным для использования в целях получения достоверной количественной оценки ДДИТ. Средняя яркость изображения I_{cp} ведёт себя аналогично параметру H , но при этом имеет меньший динамический диапазон изменения. Такое поведение связано с постепенным формированием рельефа на поверхности фольги, отражённый свет от которой попадает на сенсор фотокамеры. По всей видимости, в других условиях получения изображений характер изменения средней яркости может отличаться.

Таким образом, по мере увеличения наработки информативные параметры относительно максимального динамического диапазона изменения следует расположить в ряд UIQ ($\Delta UIQ = 1.0$), PSNR ($\Delta PSNR = 0.8$), F_d ($\Delta F_d = 0.7$), $E_{\Phi C}$ ($\Delta E_{\Phi C} = 0.5$), VSNR ($\Delta VSNR = 0.5$), а относительно изменения значения в течение всего времени испытаний — в ряд H (кривая 1), F_d (2), $E_{\Phi C}$ (3), PSNR (5), VSNR (7) и H -MSE (9) (см. рис. 3).

После оценки изменения значения каждого информативного параметра с возрастанием величины наработки были проведены исследования влияния зашумления, размытия и компрессии изображений. Серию исходных изображений “искажали” с помощью гауссова размытия, наложения гауссова шума и JPEG-сжатия. При этом для численной оценки указанных информативных параметров при наличии указанных возмущающих факторов (искажений) рассчитывали следующие характеристики:

- среднеквадратичную ошибку (СКО) величины информативного параметра как функцию меры зашумления, размытия, компрессии;
- коэффициент корреляции K_r между зависимостями изменения информативного параметра от нормированной величины наработки для серии исходных и искажённых изображений как функцию меры зашумления, размытия, компрессии. Таким образом, при трактовке результатов анализа указанных характеристик предполагается, что среднеквадратичная ошибка должна иметь минимальное значение, в то время как величина K_r должна стремиться к 1.

3.2. Размытие изображений

На рис. 4 приведены графики зависимости СКО и коэффициента корреляции K_r от степени размытия изображений. Из рис. 4, а видно, что для большинства критериев в диапазоне изменения σ_p от 1 до 10 величина СКО не превышает $5 \cdot 10^{-3}$ и лишь для

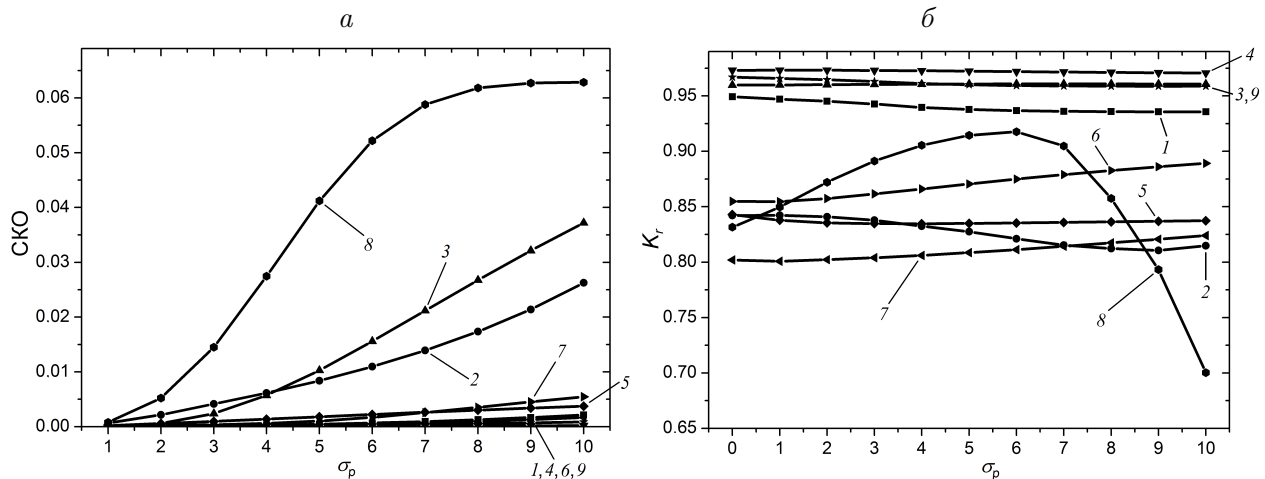


Рис. 4. Графики зависимостей СКО информативных признаков (а) и коэффициента корреляции K_r (б) от степени размытия: 1 — H , 2 — F_d , 3 — $E_{\text{ФС}}$, 4 — MSE, 5 — PSNR, 6 — UIQ, 7 — VSNR, 8 — S_q , 9 — H -MSE

трёх параметров она нелинейно возрастает: F_d (2), $E_{\text{ФС}}$ (3) и S_q (8). С другой стороны, характер изменения параметра K_r (рис. 4, б) показывает, что максимальная корреляция (не ниже 0.9) во всем диапазоне степеней размытия сохраняется для H (1), $E_{\text{ФС}}$ (3), MSE (4) и H -MSE (9). Для F_d (2), PSNR (5), UIQ (6), VSNR (7) K_r изменяется в диапазоне 0.8–0.9. Изменение S_q имеет вид кривой с максимумом.

Совместный анализ представленных графиков позволил сделать следующие заключения. Наиболее устойчивым к влиянию размытия информативным признаком является MSE, имеющий максимальную величину K_r (примерно 0.975) во всем диапазоне σ_p от 1 до 10, в то время как параметр СКО для него имеет минимальное значение. Далее, несмотря на то что энергия фурье-спектра мощности по параметру СКО оказывается чувствительна к размытию изображений, следует отметить информационную энтропию H ($K_r = 0.96$) и $E_{\text{ФС}}$ ($K_r = 0.95$ –0.94). Весьма высокие значения K_r характерны для VSNR ($K_r = 0.85$ –0.89), PSNR ($K_r = 0.84$) и UIQ ($K_r = 0.8$ –0.83), что сопровождается минимальными значениями СКО. Достаточно высокий уровень коэффициента корреляции имеет также параметр F_d ($K_r = 0.85$ –0.81), однако для него характерен заметный рост СКО по мере увеличения степени размытия. Наименее адекватно изменяющимся является параметр S_q , для которого K_r меняется “экстремальным” образом (0.7–0.91), а также по сравнению с другими критериями характерна максимальная (по мере возрастания степени размытия) величина СКО. Наконец, параметр H -MSE в силу того что учитывает два критерия — MSE и H — также характеризуется малой величиной СКО и высоким значением коэффициента корреляции ($K_r = 0.96$).

3.3. Зашумление изображений

На рис. 5 приведены графики зависимости СКО и K_r от степени зашумления изображений гауссовым шумом. Из рис. 5, а видно, что только для четырёх информативных параметров величина СКО в анализированном диапазоне зашумления остается постоянной — H (1), $E_{\text{ФС}}$ (3), MSE (4), H -MSE (9), в то время как для F_d (2), PSNR (5), VSNR (7), S_q (8) и UIQ (6) она возрастает. Аналогичная тенденция, но с обратным

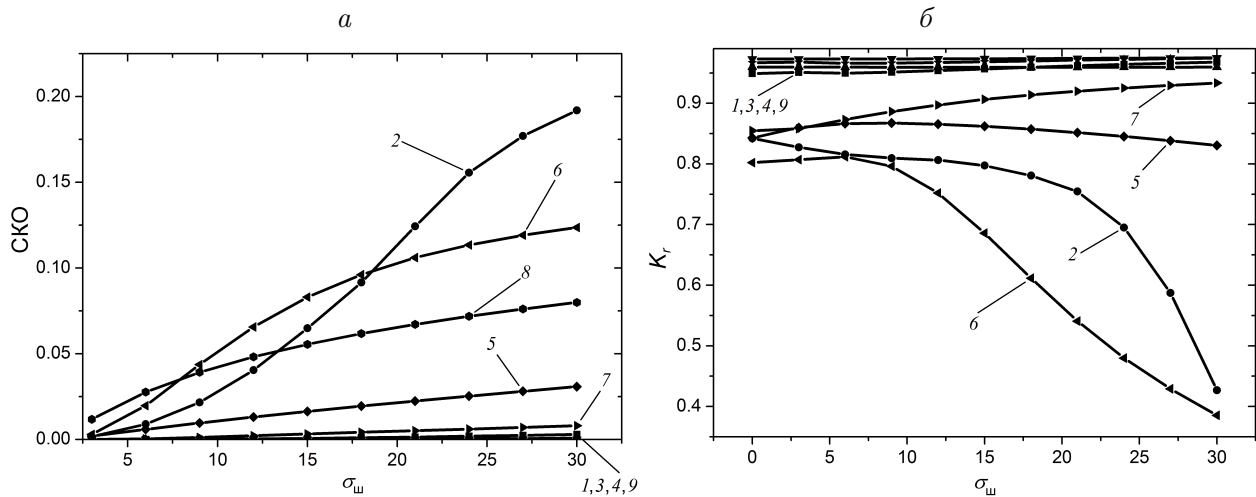


Рис. 5. Графики зависимостей СКО информативных признаков (а) и коэффициента корреляции K_r (б) от степени размытия: 1 — H , 2 F_d , 3 — $E_{\text{ФС}}$, 4 — MSE, 5 — PSNR, 6 — UIQ, 7 — VSNR, 8 — S_q , 9 — H -MSE

характером изменения на графике $K_r = f(\sigma_w)$ свойственна для UIQ (6) и F_d (2). Параметр VSNR (7) при этом даже возрастает, а PSNR (5) остается примерно постоянным (0.85). Максимальным уровнем K_r характеризуются следующие параметры: H (1), $E_{\text{ФС}}$ (3), MSE (4) и H -MSE (9).

Из совместного анализа обоих графиков можно сделать следующие выводы. Подобно данным по размытию изображений наиболее наименее чувствительным к зашумлению гауссовым шумом является параметр MSE, $K_r = 0.97$ выше, чем у других информативных признаков, в то время как СКО по мере увеличения степени размытия остается наименьшим. Также достаточно устойчивыми к воздействию шума являются энтропия H ($K_r = 0.95$ – 0.965) и $E_{\text{ФС}}$ ($K_r = 0.96$ – 0.955). Следующими в этом условном “рейтинге” выступают VSNR ($K_r = 0.85$ – 0.94) и PSNR ($K_r = 0.84$ – 0.86), для которых также свойственны невысокие значения СКО. Параметры F_d и UIQ характеризуются существенным снижением K_r по мере зашумления: 0.83 – 0.44 и 0.83 – 0.4 соответственно, а также весьма большой величиной СКО. Параметр H -MSE достаточно устойчив к влиянию зашумления: среднеквадратичная ошибка мала, в то время как коэффициент корреляции относительно высок (0.97).

3.4. JPEG-сжатие изображений

На рис. 6 приведены графики зависимости СКО и K_r от степени сжатия изображений. Из рис. 6, а видно, что для $E_{\text{ФС}}$ (3) и MSE (4) СКО находится в наименьшем диапазоне 10^{-10} – 10^{-7} . Остальные информативные параметры до $K_{\text{сжат}} = 50$ меняются в диапазоне 10^{-7} – 10^{-5} . Дальнейшее увеличение степени сжатия приводит к тому, что величина СКО информативных параметров H (1) и H -MSE (9) существенно возрастает до уровня 0.01 – 0.1 . Анализ изменения K_r показал, что можно выделить две группы параметров: с высоким $K_r > 0.94$ и $0.8 < K_r < 0.87$. В первую группу входят H (1), $E_{\text{ФС}}$ (3), MSE (4) и H -MSE (9). Ко второй группе можно отнести F_d (2), PSNR (5), VSNR (7) и S_q (8). Параметр UIQ характеризуется минимальным значением $K_r \sim 0.77$ и его затруднительно отнести к какой-либо из групп.

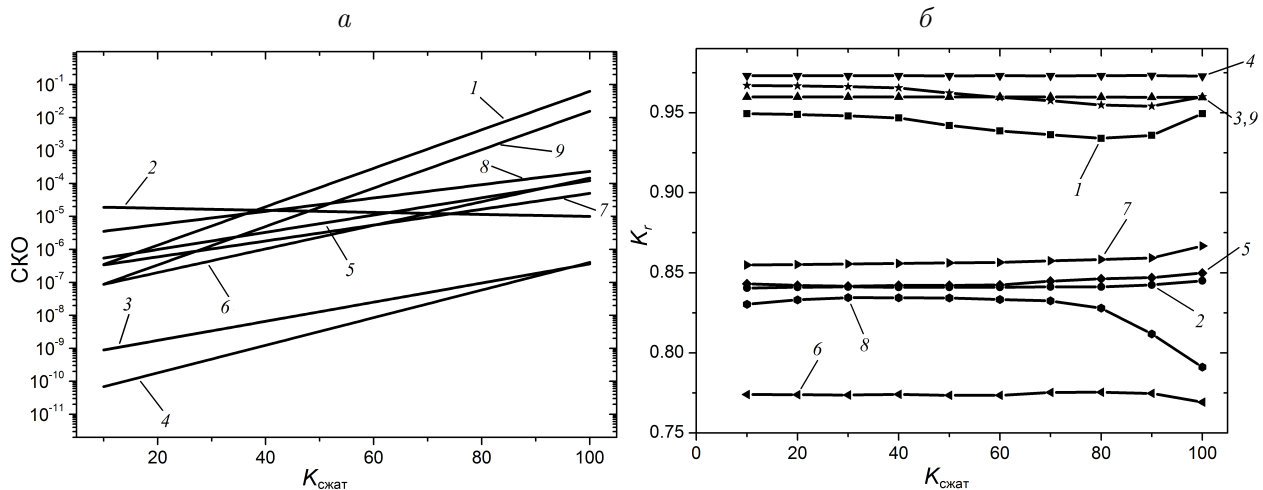


Рис. 6. Графики зависимостей SKO информативных признаков (а) и коэффициента корреляции K_r (б) от степени размытия: 1 — H , 2 — F_d , 3 — $E_{\text{ФС}}$, 4 — MSE, 5 — PSNR, 6 — UIQ, 7 — VSNR, 8 — S_q , 9 — H -MSE

Совместный анализ графиков на рис. 6 позволяет сделать вывод о том, что с позиции влияния JPEG-сжатия на изображения наиболее предпочтительным критерием оценки является MSE, так как степень корреляции у него выше, чем у других критериев ($K_r \sim 0.975$), в то время как величина SKO — наименьшая. То же можно сказать о параметре $E_{\text{ФС}}$ ($K_r \sim 0.96$), которому соответствует наименьшая величина среднеквадратичной ошибки отклонения. Критерии H и H -MSE при данном виде искажения (компрессия) показали высокую степень корреляции с прямой для нормированной величины наработки ($K_r \sim 0.95$ – 0.94), но одновременно — самую большую из всех критериев SKO.

Примерно одинаковые показатели корреляции K_r характерны для группы критериев VSNR (~ 0.85 – 0.87), PSNR (~ 0.84 – 0.85) и F_d (~ 0.84); одновременно наблюдается небольшая величина среднеквадратичной ошибки MSE. Параметр S_q наименее восприимчив к действию искажающих факторов — он имеет невысокий коэффициент корреляции $K_r \sim 0.79$ – 0.84 и среднюю по сравнению с другими критериями величину SKO при разных степенях JPEG-сжатия.

Из всех параметров характер изменения UIQ следует считать наименее близким к линейному, отражающему количество циклов наработки ($K_r \sim 0.77$ – 0.78), при этом в сравнении с другими критериями он имеет среднюю величину SKO отклонения при разных степенях JPEG-сжатия.

3.5. Сопоставительное сравнение ряда критериев и обсуждение результатов

На основании анализа полученных результатов можно сделать вывод, что наименее чувствительными к влиянию искажающих воздействий являются следующие характеристики: H , MSE, $E_{\text{ФС}}$ и H -MSE. Эти параметры могут быть рекомендованы в качестве критериев оценки изображений, полученных методом ДДИТ. На рис. 7 приведены перечисленные параметры при разных типах искажающих воздействий.

Из рис. 7, а видно, что характер изменения информационной энтропии для всех видов искажения (зашумление, размытие, сжатие) не меняется, следовательно, они на

данный критерий влияют незначительно. Параметр H адекватно отражает визуально наблюдаемые изменения деформационного рельефа на поверхности для анализируемой серии изображений. Недостатком данной характеристики следует считать то, что начиная с $N \sim 10\,000$ он теряет свою чувствительность к изменениям рельефа фольги.

Параметр MSE (рис. 7, б) наиболее чувствителен к размытию изображений. Необходимо отметить, что в отличие от H параметр MSE начиная примерно с $N \sim 5\,000$ начинает заметно изменяться. Параметр энергии фурье-спектра $E_{\text{ФС}}$ также чувствителен к размытию изображений (рис. 7, в). Кроме того, $E_{\text{ФС}}$ в сравнении с остальными четырьмя характеристиками наименее чувствителен к изменениям, происходящим на поверхности датчика, — его график в диапазоне N от 5000 до 15000 имеет нелинейный характер.

Параметр H -MSE (рис. 7, г) сочетает в себе преимущества двух предыдущих параметров, поэтому его “помехоустойчивость” остается на уровне таковой критерия H (информационная энтропия), при этом он меняется во всём рассматриваемом диапазоне циклов нагружения. На основании проведённых исследований можно сделать вывод о целесообразности применения параметра H -MSE и рекомендовать его для практического использования с целью экспресс-оценки количества циклов наработки ДДИТ.

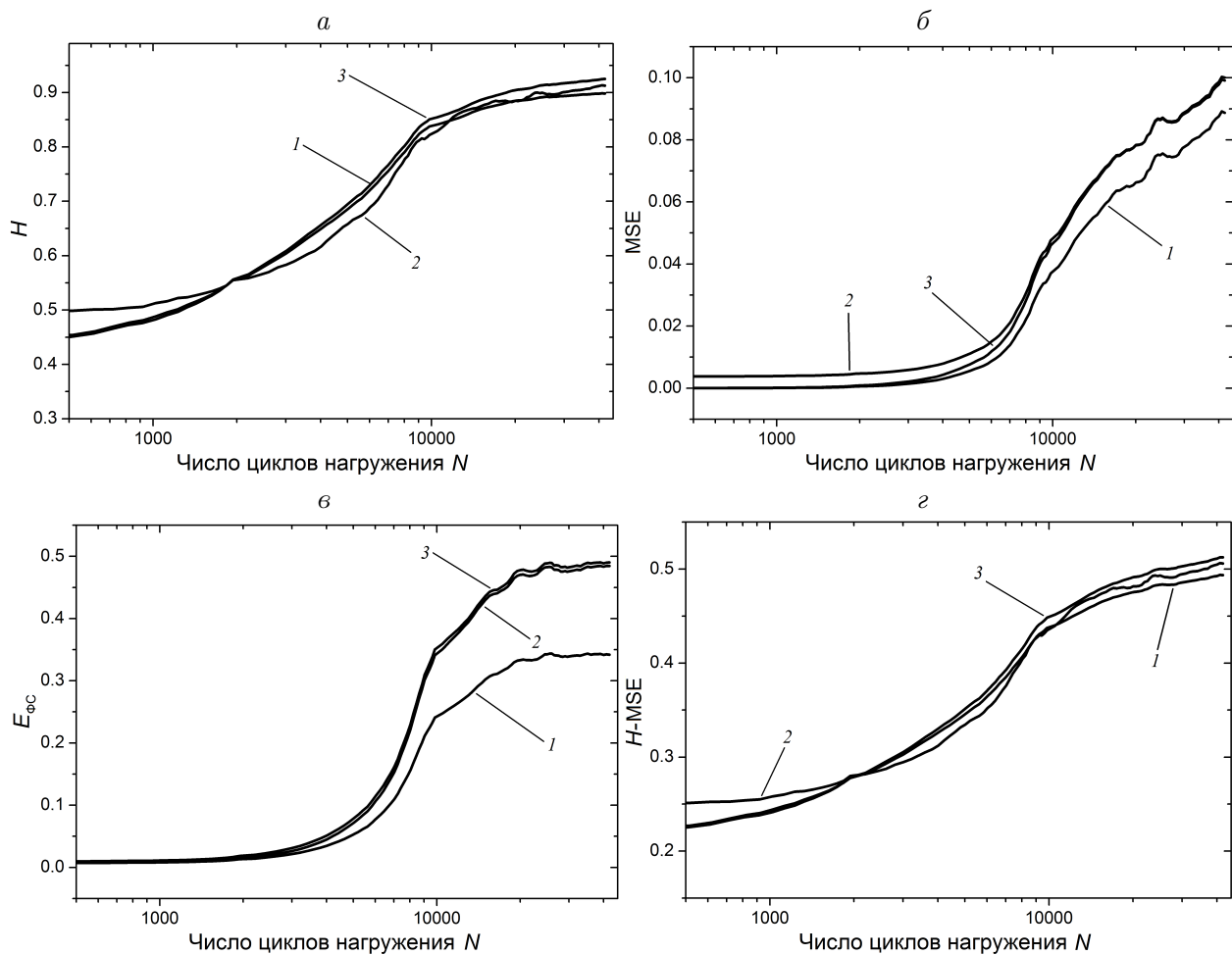


Рис. 7. Графики зависимости параметров H (а), MSE (б), $E_{\text{ФС}}$ (в), H -MSE (г) от числа циклов нагружения при гауссовом размытии с $\sigma_p = 5$ (1), наложении гауссова шума с $\sigma_{\text{ш}} = 15$ (2) и JPEG-сжатии $K_{\text{сжат}} = 60$ (3) изображений

Авторы считают логичным провести сравнение результатов, полученных в данной работе, где объектом исследования были углепластики, с результатами работ [1, 3, 14], объектами исследования в которых были металлы (стали [1], алюминиевые сплавы [3, 14]), а циклическое нагружение проводили при нагрузках ниже предела упругости (удлинения $\sim 0.2\%$). При этом рельеф на фольге формировался значительно медленнее, чем в случае углепластиков в рамках настоящей работы (удлинения $\sim 1.2\%$ при растяжении от нижнего уровня нагрузки в цикле до верхнего). В качестве критериев оценки в этих работах использовались фрактальная размерность [3, 14] и относительная площадь чёрных и белых пикселей [1], что позволяло достоверно описывать изменения рельефа в широком диапазоне наработки (от начала нагружения до 80 тыс. циклов [1]). Однако при исследовании углепластиков в силу более быстрого образования рельефа данные критерии не позволяют оценивать наработку после ~ 10 тыс. циклов, что вместе с изменённой схемой освещения (предполагающей получение информации в значительной степени путём увеличения суммарной освещённости изображения фольги) обусловило необходимость поиска новых критериев. По мнению авторов, критерии, предложенные в настоящей работе, при условии применения аналогичной схемы освещения также могут быть использованы для оценки состояния фольги при исследовании металлов.

Заключение

Проведено исследование изменения информативных параметров применительно к задаче оценки величины наработки с помощью датчика деформации интегрального типа по изображениям поверхности алюминиевой фольги. Определены наиболее чувствительные к деформации и искажениям критерии оценки оптических изображений, полученных при использовании методики ДДИТ, к которым следует отнести H , MSE, $E_{\text{ФС}}$ и H -MSE. Выбор осуществлялся на основании установления близости характера изменения указанных параметров к линейному. Показано, что для этих параметров характер изменения по мере возрастания величины наработки для всех видов искажений изменяется незначительно. Поскольку параметры H и MSE чувствительны каждый в своём диапазоне, предлагается использовать комбинированный критерий H -MSE. Данный комплексный критерий чувствителен к изменениям деформационного рельефа, происходящим на поверхности датчика, и сохраняет помехоустойчивость в исследованном диапазоне искажений (за шумления, размытия, компрессии).

Список литературы

- [1] Змызгова Т.Р. Экспериментальная методика регистрирования и оценки накопленного усталостного повреждения в материале нефтегазового трубопроводного оборудования с помощью датчиков деформации интегрального типа // Экспозиция. Нефть. Газ. 2012. Т. 25, № 7. С. 14–19.
- [2] Панин С.В., Алтухов Ю.А., Любутин П.С. и др. Влияние билатеральной фильтрации при фрактальной оценке оптических изображений поверхности нагруженных материалов // Автометрия. 2013. Т. 49, № 3. С. 25–35.
- [3] Бяков А.В. Разработка и исследование функционирования испытательно-диагностического комплекса для изучения деформации и разрушения материалов: Дис. ... канд. техн. наук. Томск: ИФПМ СО РАН 2011. 181 с.

- [4] ПАНИН С.В., БУРКОВ М.В., ЛЮБУТИН П.С., АЛТУХОВ Ю.А. Применение датчиков деформации интегрального типа для оценки усталостной повреждённости углеродных композитов // Дефектоскопия. 2014. № 5. С. 47–59.
- [5] SHAPIRO L.G., STOCKMAN G.C. Computer Vision. Prentice Hall, 2001. 609 p.
- [6] ПРЭТТ У. Цифровая обработка изображений. Кн. 2. М.: Мир, 1982. 480 с.
- [7] WANG Z., BOVIC A.C. Modern Image Quality Assessment. Morgan & Claypool Publ., 2006. 108 p.
- [8] SHANNON C.E. A mathematical theory of communication // Bell System Technical J. 1948. Vol. 27. P. 379–423 and 623–656, July and Oct.
- [9] НУССБАУМЕР Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985. 248 с.
- [10] JAGGI S., QUATTROCHI D.A., LAM N.S.-N. Implementation and operation of three fractal measurement algorithms for analysis of remote-sensing data // Comput. and Geosciences. 1983. Vol. 19, No. 6. P. 745–767.
- [11] WANG Z., BOVIC A.C. A universal image quality index // IEEE Signal Proc. Lett. 2002. Vol. 9, No. 3. P. 81–84.
- [12] CHANDLER D.M., НЕМАМИ S.S. VSNR: A wavelet-based visual signal-to-noise ratio for natural images // IEEE Trans. on Image Proc. 2007. Vol. 16, No. 9. P. 2284–2298.
- [13] NIBLACK W. An Introduction to Image Processing. New York: Prentice-Hall, 1986.
- [14] СИКАЛОВА У., КРОЕНИНГ М., ШКРЕЙБЕР Ж., ВЕРТЫАГИНА YE. Evaluation of Al-specimen fatigue using a “smart sensor” // Phys. Mesomechan. 2011. No. 5-6. P. 308–315.

*Поступила в редакцию 3 марта 2014 г.,
с доработки — 20 марта 2014 г.*