

УДК 681.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ФИЛЬТРАЦИИ ВЕКТОРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

С. В. Панин<sup>1,2</sup>, В. В. Титков<sup>1</sup>, П. С. Любутин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634021, г. Томск, просп. Академический, 2/4

<sup>2</sup>Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30

E-mail: svp@ispms.tsc.ru

Проведены сопоставительные исследования методов фильтрации на примере обработки модельных и экспериментальных векторных полей. Предложен критерий оценки эффективности фильтрации. Показано, что комбинированные векторные фильтры обеспечивают более эффективную фильтрацию по сравнению с другими распространёнными методами.

*Ключевые слова:* фильтрация, шум, векторные поля, интенсивность деформации сдвига.

**Введение.** Оптико-телевизионный метод является одним из перспективных для изучения процессов деформации и разрушения структурно-неоднородных материалов. В основе принципа его действия лежит построение векторов перемещений с последующим расчётом компонент деформации, реализуемым с использованием процедуры численного дифференцирования [1–3]. При обработке экспериментальных данных наличие шумов на изображениях, низкое качество подготовки поверхности и т. п. зачастую вызывают ошибки в определении перемещения, что, в свою очередь, обуславливает появление ошибок в оценке деформации. Решение указанной проблемы может быть получено несколькими способами, в частности при использовании сложных алгоритмов построения векторных полей [1, 4] и с привлечением методов их фильтрации. В данном направлении следует отметить [5], в которой проведено количественное сравнение нескольких алгоритмов фильтрации векторных полей; известны работы по фильтрации изображений [6, 7]. Публикаций по фильтрации векторных полей при оценке деформации методом корреляции цифровых изображений известно не много.

В задаче оценки деформации методом корреляции цифровых изображений ошибки при построении векторов перемещений, как правило, связаны с резким изменением отражательной способности участка поверхности либо условий освещённости, наличием трещин на изображении, шумами матрицы фоточувствительного элемента, помехами оптического тракта и др. При этом появление ошибочно определённых векторов перемещений носит случайный характер. Поскольку шумы на векторном поле соответствуют высоким пространственным частотам, проблема может быть решена с использованием НЧ-фильтрации.

В данной работе поставлена задача исследования нескольких методов фильтрации путём обработки модельных векторных полей в целях выявления фильтра, обеспечивающего максимальную эффективность. Численные эксперименты проводились при различных параметрах зашумления векторных полей, а оценка эффективности фильтрации — при анализе как векторных полей, так и полей расстояний и деформаций. Предложенный подход апробирован с помощью фильтрации экспериментально полученных векторных полей

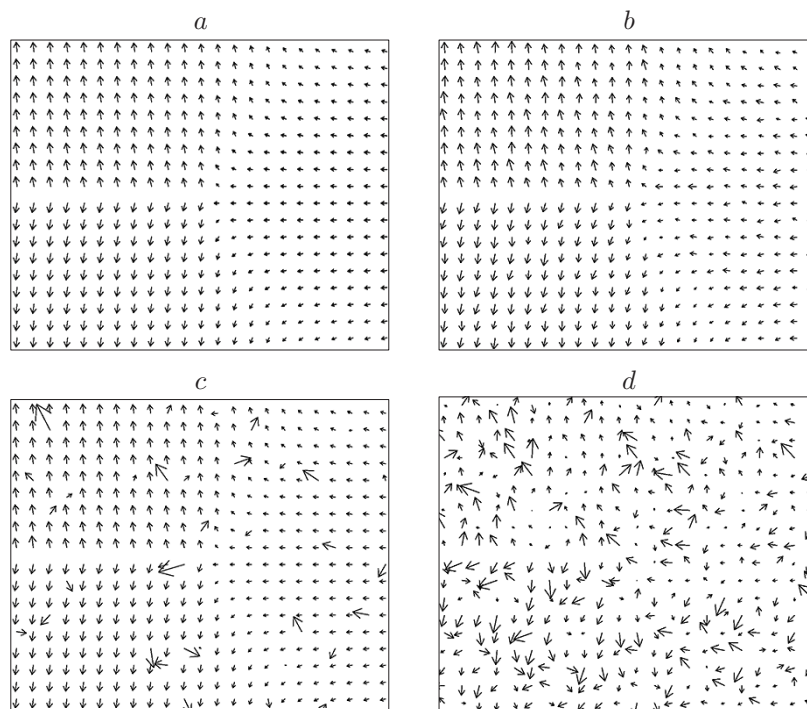


Рис. 1. Примеры модельных векторных полей: *a* — исходное; *b* — зашумлённое при  $p_{\text{ш}} = 90\%$ ,  $A_{\text{ш}} = 0,1$ ; *c* — зашумлённое при  $p_{\text{ш}} = 10\%$ ,  $A_{\text{ш}} = 0,9$ ; *d* — зашумлённое при  $p_{\text{ш}} = 90\%$ ,  $A_{\text{ш}} = 0,9$

с использованием параметров фильтрации, выявленных в процессе обработки модельных данных.

**1. Методика исследований.** 1.1. *Модель векторного поля.* Одной из наиболее распространённых картин распределения деформации и разрушения при усталостных испытаниях является картина распространения трещины. Распределение векторов перемещений в процессе роста трещины является достаточно сложным для обработки, поскольку оно характеризуется резким перепадом направления векторов в области её расходящихся берегов (рис. 1). В то же время векторное поле подобного вида позволяет исследовать реакцию фильтров на разрыв в поле перемещения, а также плавное изменение направлений перемещений в остальных его частях. Используемая модель усталостной трещины описана в [4].

1.2. *Шум, накладываемый на векторное поле.* Построение векторного поля производится путём обработки оптических изображений поверхности материала, на которых неизбежно присутствуют помехи. Эти помехи, в свою очередь, «переносятся» и на векторное поле. Причинами появления помех являются изменения яркости участков поверхности объекта вследствие изменения отражающей способности материала, трещины и сколы на поверхности объекта при частичном его разрушении и другие.

Помимо помех на изображении присутствует шум, вносимый датчиком видеосигнала, который может быть аппроксимирован, в частности, распределением Гаусса. Существует несколько технических приёмов моделирования этого распределения [8], например метод полярных координат, использованный в предлагаемой работе. В основе метода лежат преобразования последовательности случайных чисел с равномерным распределением в последовательность чисел с нормальным распределением (распределением Гаусса):

$$x_i = \sqrt{-2 \ln u_i} \sin(2\pi u_{i-1}),$$

где  $u$  — последовательность случайных равномерно распределённых величин. В [8] также приведено доказательство данного метода.

Для генерации последовательности случайных чисел с равномерным распределением применялись линейный конгруэнтный метод и выражение [8]

$$x_{i+1} = (ax_i + c) \bmod m, \quad i \geq 0,$$

где  $m$  — модуль ( $0 < m$ );  $a$  — множитель ( $0 \leq a < m$ );  $c$  — приращение ( $0 \leq c < m$ );  $x_0$  — начальное значение ( $0 \leq x_0 < m$ ). Шум накладывается напрямую на векторное поле отдельно на каждую составляющую вектора с заданной вероятностью  $p_{\text{ш}}$  появления шума и максимальной амплитудой шума  $A_{\text{ш}}$ :

$$x_{\text{ши}} = \begin{cases} A_{\text{ш}} N_i, & u_i \leq p_{\text{ш}}, \\ 0, & u_i > p_{\text{ш}}, \end{cases}$$

где  $N_i$  — последовательность чисел с нормальным распределением величин.

Единица (дискрет изменения) на шкале изменения шума принимается равной средней длине векторов по всему полю. Примеры зашумлённого векторного поля приведены на рис. 1,  $b-d$ , где наглядно прослеживается влияние параметров  $p_{\text{ш}}$ ,  $A_{\text{ш}}$  на вид поля (см. равномерное зашумление ( $b, d$ ) и единичные выбросы ( $c$ )).

Подтверждением того факта, что накладываемый шум имеет нормальное распределение, являются гистограммы нормированной амплитуды шума  $A_{\text{шн}}$ , рассчитанные для обеих компонент векторов (рис. 2,  $a, b$ ). Величина амплитуды вычислена путём нормирования (приведения  $A_{\text{ш}}$  к диапазону от 0 до 1), что соответствует минимальному и максимальному значениям  $A_{\text{ш}}$  для всех вариантов зашумления. Наблюдаемый выброс на графике при  $p_{\text{ш}} = 0,1$  и  $0,5$  указывает на отсутствие зашумления векторов, вероятность которого составляет  $(1 - p_{\text{ш}})$ .

На рис. 2,  $c$  видно, что с увеличением  $A_{\text{ш}}$  гистограмма становится положе и появление ненулевых значений происходит на больших значениях  $A_{\text{шн}}$ . Из рис. 2,  $d$  следует, что после перехода от векторного поля к полю интенсивности деформаций сдвига (ИДС) характер распределения шума принципиально меняется.

Вид гистограммы шума для полей расстояний (см. рис. 2,  $e$ ) уже меньше напоминает зависимости на рис. 2,  $a, b$ , при этом положение максимума на них хорошо коррелирует с величиной вероятности шума  $p_{\text{ш}}$ . В случае же полей ИДС (полученных, как отмечалось выше, с помощью численного дифференцирования) достаточно трудно выявить связь с формой гистограмм, рассчитанных для векторного поля. Это обстоятельство будет подробнее рассмотрено далее.

1.3. *Методы фильтрации векторных полей.* В работе [5] отмечалось, что составляющие многомерных сигналов обычно коррелированы, а различные линейные и нелинейные алгоритмы [9–12], используемые для фильтрации одномерных сигналов, не учитывают эту корреляцию.

В литературе описаны результаты применения различных методов фильтрации, учитывающие взаимосвязь компонент сигнала. В частности, в [5] для фильтрации двумерных векторных данных проведено сравнение пяти векторных фильтров: медианного (МФ), скользящего среднего (ССФ), комбинированного 1-го типа (КФ1), комбинированного 2-го типа (КФ2), гибридного (ГФ). Показано, что комбинированные фильтры дают наилучшую эффективность фильтрации. Поскольку исходные данные в оптическом методе измерения деформации также имеют векторный формат, авторы воспользовались описанными в работе [5] методами и провели сравнительный анализ их эффективности при обработке векторных полей, а также предложили критерий оценки.

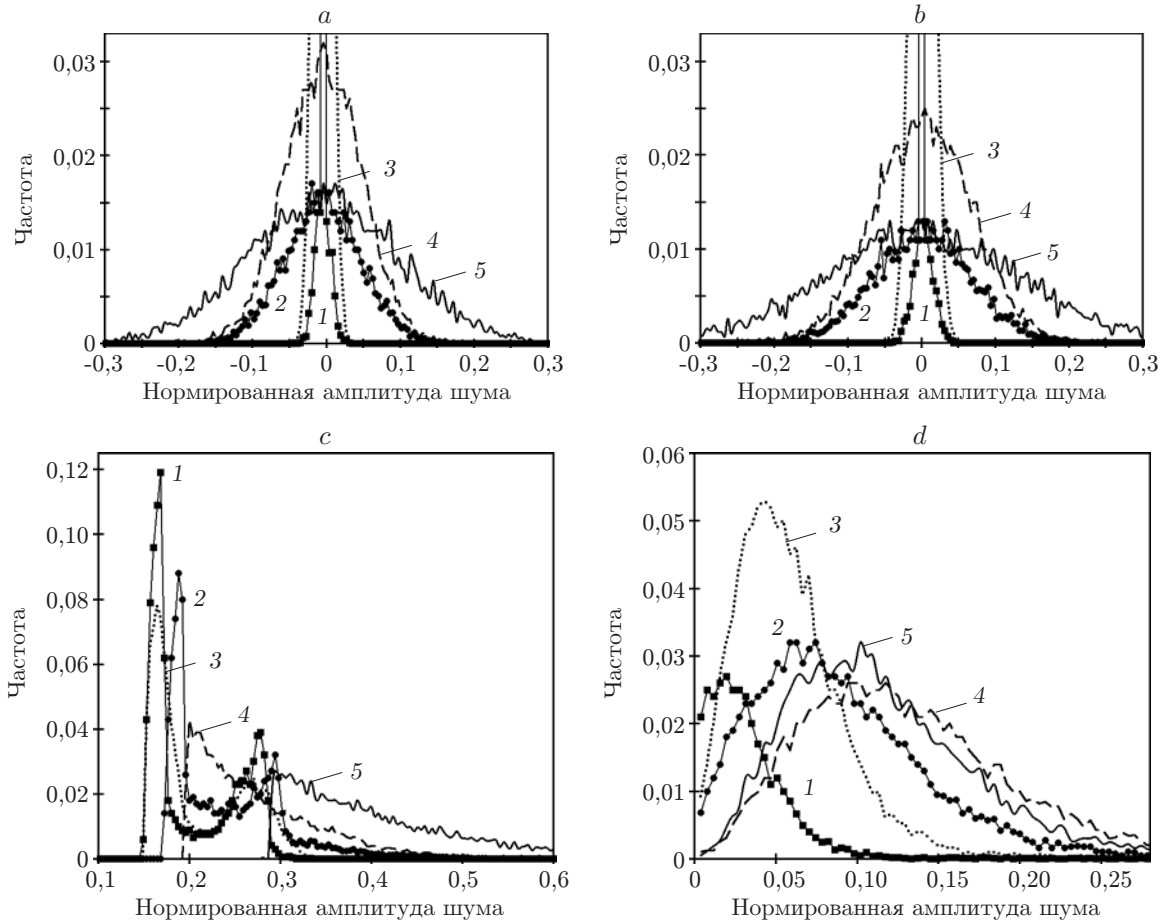


Рис. 2. Гистограммы  $A_{\text{шн}}$ : X-компонента (a) и Y-компонента (b) векторного поля, поля расстояний (c), интенсивности деформации сдвига (d). Параметры шума: кривая 1 —  $p_{\text{шн}} = 0,1$ ,  $A_{\text{шн}} = 0,1$ ; 2 —  $p_{\text{шн}} = 0,1$ ,  $A_{\text{шн}} = 1,0$ ; 3 —  $p_{\text{шн}} = 0,5$ ,  $A_{\text{шн}} = 0,5$ ; 4 —  $p_{\text{шн}} = 1,0$ ,  $A_{\text{шн}} = 0,1$ ; 5 —  $p_{\text{шн}} = 1,0$ ,  $A_{\text{шн}} = 1,0$

1.4. *Критерий оценки качества фильтрации векторных полей.* В литературе предложены различные способы оценки качества фильтрации. Так, в [5] введён коэффициент ослабления шума. Также для оценки одномерных сигналов может использоваться пиковое отношение сигнал/шум (Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)), характеризующее соотношение между максимумом возможного значения сигнала и мощностью шума, искажающего форму и амплитуду сигнала. По причине двухкомпонентности векторного поля параметр PSNR не может быть напрямую применён для его характеристики, поэтому требуется привести поле к однокомпонентному двумерному виду. В данной работе предлагается использовать параметр «поле расстояний», представляющий собой матрицу значений  $d(F(i), F(j))$  [5] для всего многомерного векторного поля:

$$d(F(i), F(j)) = \sum_{k=1}^m |f_k(i) - f_k(j)|,$$

где  $F(i)$ ,  $F(j)$  — векторные сигналы, состоящие из  $m$  компонент  $f_1(i), f_2(i), \dots, f_m(i)$ ,  $f_1(j), f_2(j), \dots, f_m(j)$ . Также для нашей работы интерес представляет другой метод перехода — от поля перемещений к полю интенсивности деформаций [3].

В упомянутых выше методах оценки качества фильтрации последняя может быть проведена по величине среднеквадратического отклонения (СКО):

$$\text{СКО} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2,$$

где  $I, K$  — двумерный массив данных (например, поле ИДС). Эта оценка была использована для компонент векторных полей, полей расстояний и интенсивности деформации сдвига.

**2. Исследование методов фильтрации с использованием модельных векторных полей** осуществляется в несколько этапов:

- моделирование векторного поля (модельное векторное поле показано на рис. 3, *a*);
- моделирование и наложение шума на векторное поле (пример зашумлённого векторного поля приведён на рис. 3, *b*);
- фильтрация векторного поля (рис. 3, *c*);
- измерение СКО, минимальной дисперсии векторного поля, поля расстояний, поля интенсивности деформации сдвига.

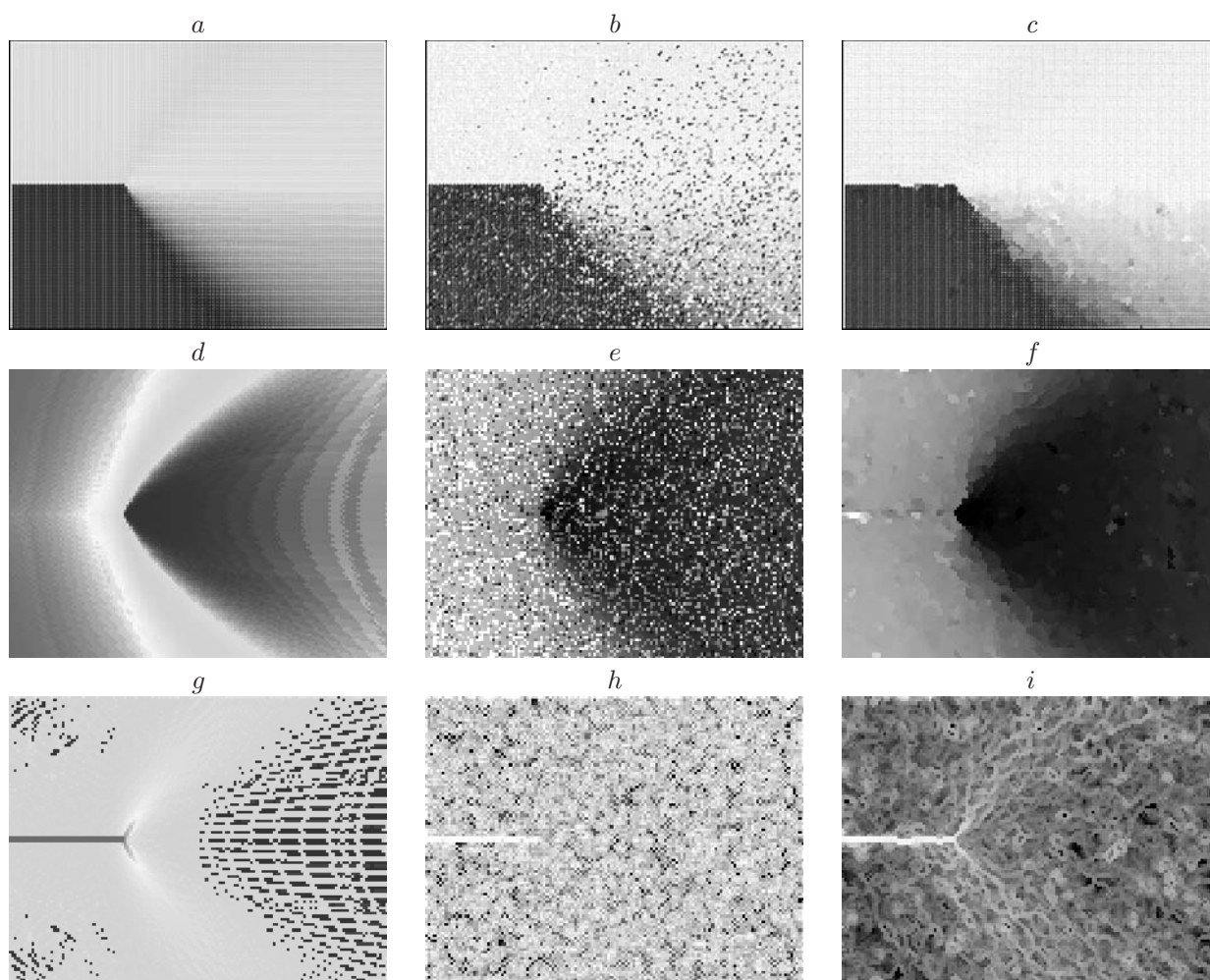


Рис. 3. Примеры полей: векторные (*a—c*), расстояний (*d—f*) и ИДС (*g—i*); исходные (*a, d, g*), зашумлённые (*b, e, h*) и фильтрованные (*c, f, i*);  $p_{\text{ш}} = 50\%$ ,  $A_{\text{ш}} = 0,5$ , фильтр КФ2

На модельных полях определены типы фильтров и их параметры, обеспечивающие наилучшую эффективность фильтрации. В работе [13] рассмотрено влияние размера апертуры на качество фильтрации. Показано, что размер апертуры равный трём является оптимальным. Приведённые на рис. 3, *a—c* векторные поля свидетельствуют о том, что наложение шума с использованными параметрами заметно искажает характер поля, однако в целом тенденция картины распределения векторов сохраняется (см. рис. 3, *b*). После фильтрации распределение векторов сверху и снизу от берегов трещины больше напоминает исходное поле, в то время как у вершины трещины распределение векторов становится несколько размытым (см. рис. 3, *c*). На поле расстояний характер распределения в результате зашумления (рис. 3, *e*) в большей степени искажает картину по сравнению с векторным полем (см. рис. 3, *b*), но в случае поля ИДС зашумление (рис. 3, *h*) практически не позволяет выявить характер деформации, очевидный на исходном поле распределения ИДС (рис. 3, *g*). В результате фильтрации поля расстояний картина несколько улучшается, хотя становится довольно размытой (рис. 3, *f*); для поля ИДС использование фильтрации оказывается недостаточно эффективным для восстановления исходной информации (рис. 3, *i*).

Из рис. 4 и 5 видно, что характер изменения как СКО, так и минимальной дисперсии практически идентичен. При этом три из использованных типов фильтров обеспечивают лучшую эффективность фильтрации, о чём свидетельствует минимальное значение параметра СКО для них (рис. 4, *b—e*). В случае малых значений  $p_{\text{ш}}$  более эффективен КФ1; для высоких амплитуд независимо от  $p_{\text{ш}}$  — ФСС; во всех остальных случаях — КФ2. Также видно, что в отличие от параметра СКО (см. рис. 4, *b—e*) для расчёта диспер-

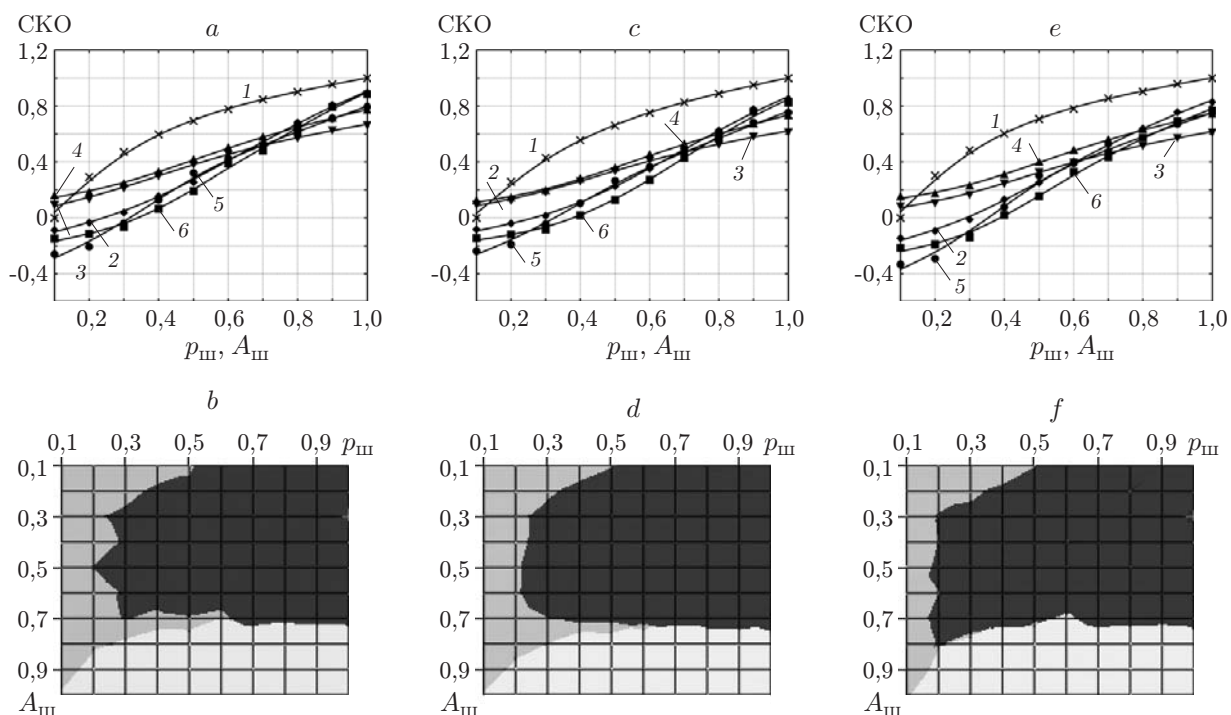


Рис. 4. Графики и поля минимальных значений СКО: для полей векторов перемещений (*a, b*), расстояний (*c, d*) и ИДС (*e, f*) при изменении параметров зашумления  $p_{\text{ш}}$  от 0,1 до 1 и  $A_{\text{ш}}$  от 0,1 до 1 с шагом 0,1 (кривая 1 — зашумлённое, 2 — МФ, 3 — ФСС, 4 — ГФ, 5 — КФ1, 6 — КФ2); тёмное поле — КФ2, серое — КФ1, светлое — ФСС

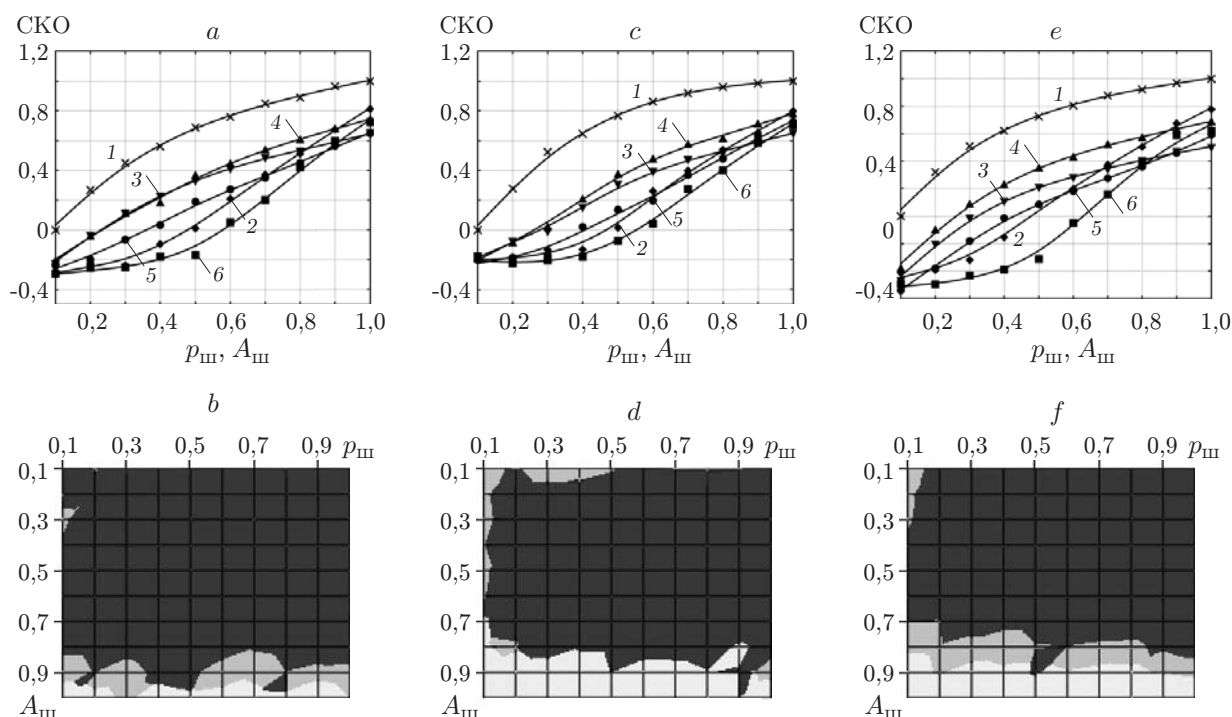


Рис. 5. Графики и поля минимальной дисперсии: для полей векторов перемещений (*a, b*), расстояний (*c, d*) и ИДС (*e, f*) при изменении параметров зашумления  $p_{ш}$  от 0,1 до 1 и  $A_{ш}$  от 0,1 до 1 с шагом 0,1. (Обозначения кривых и полей, как на рис. 4)

сии при малых значениях  $p_{ш}$  во всём диапазоне  $A_{ш}$  использование КФ2 более эффективно (рис. 5, *b—e*).

На основании анализа полученных результатов для обработки экспериментальных данных в качестве более универсального предлагается КФ2, имеющий минимальный размер апертуры. Такое заключение согласуется с результатами исследований, описанными в работе [5].

**3. Исследование эффективности фильтрации при обработке экспериментально полученных векторных полей.** Для эксперимента был взят образец из алюминиевого сплава Д16, содержащий боковой I-образный надрез толщиной 0,5 мм и глубиной 3 мм. В процессе статического растяжения фотографировали поверхность образца на цифровую фотокамеру "Canon EOS 450D". На полученной серии изображений наблюдали за ростом трещины (см. описание процедуры в [14]). Характер распределения векторов перемещений, отражающих рост трещины от вершины надреза и построенных при различных параметрах расчёта, представлен на рис. 6, *a, b*. Очевидно, что для этих векторных полей характерны две основные проблемы: заметное количество шумов (особенно на рис. 6, *b*), а также, что тесно связано с первой, различие перемещений в соседних областях. Всё это не только вызывает ошибку при оценке деформации, но и не позволяет достоверно рассчитать её величину в областях локализации. Сделана попытка применить процедуру фильтрации для корректировки исходного векторного поля (см. рис. 6, *b*). В качестве эталонного векторного поля, в сравнении с которым оценивали эффективность фильтрации, принято построенное при размере элементарной площадки  $96 \times 96$  пикселей [3].

Фильтрованное векторное поле (рис. 6, *c*) свидетельствует о том, что применение КФ2 позволяет повысить чёткость на картине распределения векторов, в то же время поле становится более размытым по сравнению с эталоном (см. рис. 6, *a*). Следует отметить, что



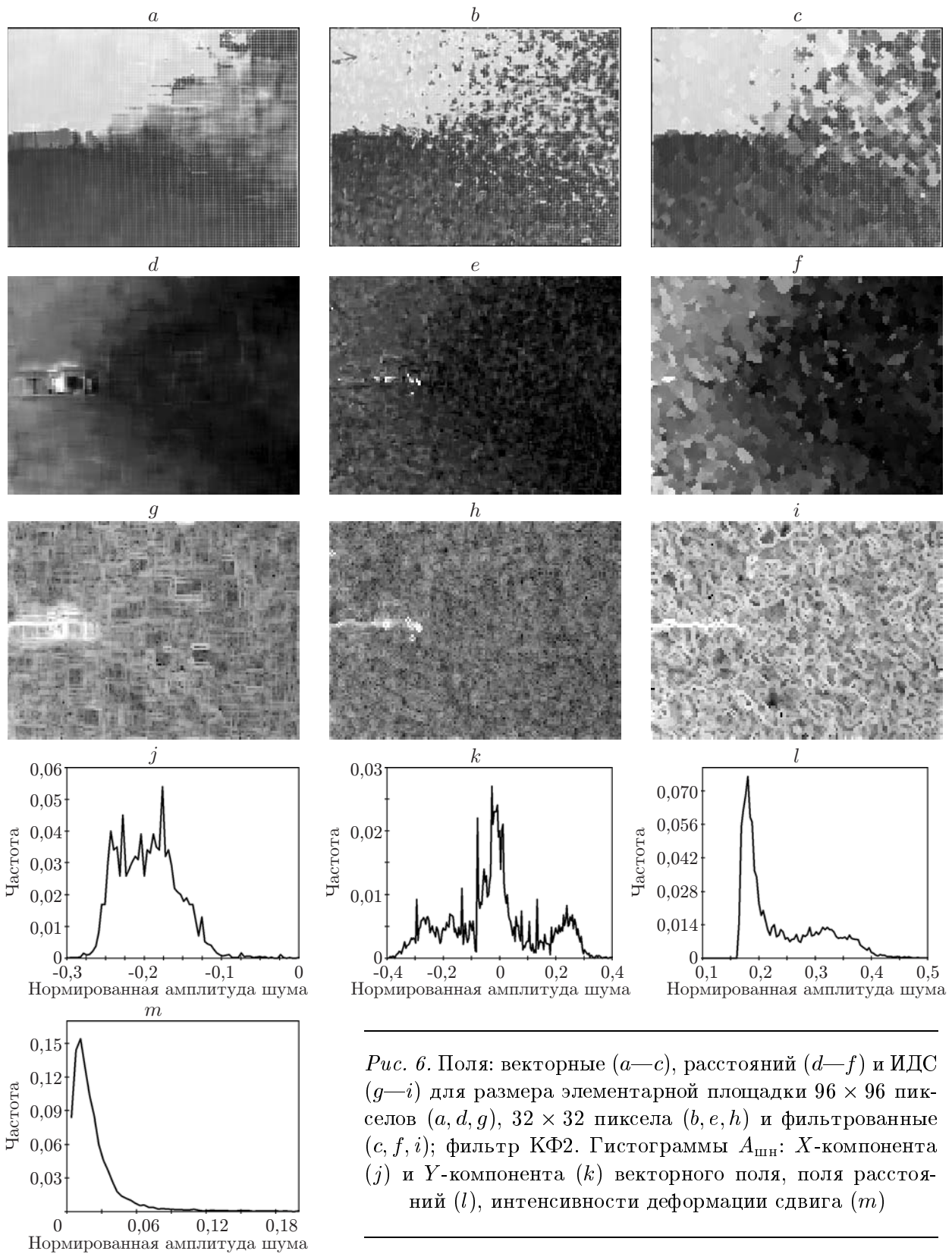


Рис. 6. Поля: векторные (*a—c*), расстояний (*d—f*) и ИДС (*g—i*) для размера элементарной площадки  $96 \times 96$  пикселей (*a, d, g*),  $32 \times 32$  пиксела (*b, e, h*) и фильтрованные (*c, f, i*); фильтр КФ2. Гистограммы  $A_{\text{шн}}$ : X-компонента (*j*) и Y-компонента (*k*) векторного поля, поля расстояний (*l*), интенсивности деформации сдвига (*m*)



Тип векторного поля до и после применения различных фильтров	СКО			Минимальная дисперсия		
	Векторное поле	Поле расстояний	Поле интенсивности деформации	Векторное поле	Поле расстояний	Поле интенсивности деформации
эталонное	—	—	—	0,000132	0,456	$4,9 \cdot 10^{-6}$
зашумлённое	0,427	$6,4 \cdot 10^7$	0,003459	0,000590	2,279	$3,5 \cdot 10^{-5}$
МФ	0,124	$9,3 \cdot 10^6$	0,000367	0,000387	1,108	$2,2 \cdot 10^{-5}$
ФСС	0,117	$9,2 \cdot 10^6$	0,000258	0,000306	0,968	$9,8 \cdot 10^{-6}$
ГФ	0,113	$9,4 \cdot 10^6$	0,000382	0,000363	1,196	$1,8 \cdot 10^{-5}$
КФ1	0,110	$7,5 \cdot 10^6$	0,000275	0,000322	0,998	$1,7 \cdot 10^{-5}$
КФ2	0,104	$8,3 \cdot 10^6$	0,000305	0,000279	0,848	$1,5 \cdot 10^{-5}$

подобная тенденция сохраняется и на полях расстояний (рис. 6,  $d—f$ ), где на зашумлённом поле выявить полезную информацию достаточно сложно, но после фильтрации картина значительно улучшается (см. рис. 6,  $f$ ).

В случае анализа полей интенсивности деформации (см. рис. 6,  $g—i$ ) уже само исходное поле является малоинформативным (см. рис. 6,  $g$ ). При расчёте векторного поля для малого размера элементарной площадки либо его последующей фильтрации поля ИДС заметно проигрывают эталонному по информативности.

Сравнение графиков, приведённых на рис. 2 и рис. 6,  $j—m$ , даёт возможность предположить, что шум на векторном поле характеризуется как максимальной вероятностью  $p_{ш}$ , так и максимальной амплитудой  $A_{ш}$ . На основании проведённых расчётов с использованием различных типов фильтров была построена таблица, содержащая сопоставительные данные о величинах СКО и минимальной дисперсии при анализе векторных полей, а также полей расстояний и ИДС, позволившие выявить два типа фильтров, которые обеспечивают максимальную эффективность фильтрации: ФСС и КФ2, что также хорошо согласуется с результатами анализа модельных данных (см. рис. 3 и 4). Поскольку шум имеет сложную структуру, данные по обработке векторных полей и полей ИДС не совпадают. Согласно расчётам СКО и минимальной дисперсии при обработке векторных полей минимальное значение обоих параметров получено с помощью КФ2, а для полей ИДС более высокие результаты показал ФСС.

**Заключение.** Проведены сопоставительные исследования методов фильтрации на примере обработки модельных и экспериментально полученных векторных полей. Одной из задач исследований был поиск критерия оценки эффективности фильтрации в условиях значительной неоднозначности визуального восприятия и характеристики качества как исходных, так и фильтрованных векторных полей. На основании анализа полученных данных установлено следующее.

1. Использование параметра СКО эффективно для характеристики уровня шума на векторных полях. Вид и распределение гистограммы  $A_{ш}$ , полученной по полю расстояний, могут быть применены для получения оценки параметров шума (амплитуды и вероятности) в целях последующего выбора типа и параметров фильтрации.

2. Наложение шума на модельные векторные поля заметно изменяет характер их распределения, однако в целом векторная картина сохраняется. Результат фильтрации существенно зависит от вида распределения векторов перемещений. Поле расстояний при зашумлении в большей степени искажается по сравнению с векторным полем. Наложение шумов на поле деформаций практически не позволяет выявить характер их распределения,

в то время как он вполне очевиден на исходном поле ИДС. В результате фильтрации картина распределения поля расстояний несколько улучшается, хотя становится размытой; в случае же поля ИДС использование фильтрации оказывается практически неэффективным.

3. Графики и поля минимальной дисперсии подобны друг другу как для различных фильтров, так и для СКО. На основании полученных результатов распределений СКО и минимальной дисперсии для обработки экспериментальных векторных полей рекомендовано использовать КФ2 и ФСС. Данное заключение согласуется с результатами исследований, описанными в работе [5].

4. Предложен способ оценки эффективности фильтрации, основанный на получении эталонного векторного поля и количественной оценки степени его отличия от экспериментального векторного поля по параметру СКО.

5. Результаты обработки экспериментальных векторных полей на основании анализа параметров СКО (по сравнению с эталонным векторным полем) и минимальной дисперсии позволяют в случае применения в качестве критерия эффективности данных характеристик более эффективным считать КФ2 (при получении оценки по векторному полю) либо ФСС (при оценивании по полю интенсивности деформации сдвига); при этом оценки обоих параметров совпадают.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sutton M. A., Cheng M. Q., Peters W. H. et al.** Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis // *Image and Vision Computing*. 1986. **4**, N 3. P. 143–151.
2. **Токарев М. П., Маркович Д. М., Бильский А.В.** Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // *Вычислительные технологии*. 2007. **12**, № 3. С. 109–131.
3. **Панин С. В., Сырякин В. И., Любутин П. С.** Оценка деформации твердых тел по изображениям поверхности // *Автометрия*. 2005. **41**, № 2. С. 44–58.
4. **Панин С. В., Любутин П. С.** Верификация метода оценки деформации на мезоуровне, основанного на построении полей векторов перемещений участков поверхности // *Физ. мезомех.* 2005. **8**, № 2. С. 69–80.
5. **Воскобойников Ю. Е., Белявцев В. Г.** Нелинейные алгоритмы фильтрации векторных сигналов // *Автометрия*. 1999. № 5. С. 97–105.
6. **Воскобойников Ю. Е., Гочаков А. В.** Сравнительный анализ двух классов алгоритмов фильтрации изображений // *Автометрия*. 2011. **47**, № 1. С. 17–29.
7. **Воскобойников Ю. Е., Гочаков А. В.** Построение алгоритмов вейвлет-фильтрации с двухпараметрическими пороговыми функциями // *Автометрия*. 2012. **48**, № 1. С. 12–22.
8. **Кнут Д. Э.** Искусство программирования: Учеб. пособие. М.: Вильямс, 2000. Т. 2. 832 с.
9. **Хуанг Т. С.** Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. М.: Радио и связь, 1984. 224 с.
10. **Bovik A., Huang T., Munson D.** A generalization median filtering using linear combinations of order statistics // *IEEE Trans. Acoust., Speech., and Signal Process.* 1983. **ASSP-31**, N 6. P. 1342–1350.
11. **Lee Y. H., Kassam S.** Generalized median filtering and related nonlinear filtering techniques // *IEEE Trans. Acoust., Speech., and Signal Process.* 1985. **ASSP-33**, N 3. P. 672–683.
12. **Бронников А. В., Воскобойников Ю. Е.** Комбинированные алгоритмы нелинейной фильтрации зашумленных сигналов и изображений // *Автометрия*. 1990. № 1. С. 21–26.

- 
13. **Титков В. В., Панин С. В., Любутин П. С.** Фильтрация векторных полей в задаче оценки деформации материалов методом корреляции цифровых изображений // Матер. XXIII Междунар. инновационно-ориентированной конф. молодых учёных и студентов (МИКМУС–2011). М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2011. С. 194.
  14. **Панин С. В., Бяков А. В., Любутин П. С., Башков О. В.** Стадийность локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ по данным акустоэмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии. Ч. 2. Образцы с надпилами различной глубины // Дефектоскопия. 2011. № 12. С. 43–54.

*Поступила в редакцию 12 марта 2012 г.*

---