

УДК 629.12, 697.9

В. А. Шабанов,
ст. преп.;

А. К. Наумова,
зав. сектором;

К. А. Васильев,
асп.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАПЛАСИАНА ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВИЗУАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ИЗ КОМПОЗИТОВ

THE USE OF LAPLACIAN FILTERING IMAGES FOR THE VISUAL EVALUATION OF SURFACE ELEMENTS OF SHIPBOARD VENTILATION OF COMPOSITES

В статье рассмотрены проблемы, возникающие при изготовлении и эксплуатации судовой системы вентиляции, элементы которой выполнены из современных композиционных полимерных материалов. Отдельно отмечены эксплуатационные показатели качества поверхностного слоя деталей воздухопроводов в виде показателей шероховатости, которые оказывают влияние на энергетические потери и сопротивление воздушному потоку в системе судовой вентиляции. Предложен новый подход к методу оценки комплексного критерия шероховатости методом визуального мониторинга исследуемой поверхности и последующей математической обработки цифрового видеосигнала. Приведен анализ различных методов математической обработки и фильтрации полученных изображений в зависимости от освещения. Проанализированы пути решения проблем оценки эксплуатационных показателей шероховатости поверхности воздухопроводов методом технического зрения.

The article considers the problems arising in the manufacture and operation of ship's ventilation system, the elements of which are made of modern composite polymer materials. Separately marked operational indicators of the quality of the surface layer of air channels in the form of roughness indicators that have an impact on energy losses and the resistance to air flow in the ventilation system of marine. We propose a new approach to the evaluation of integrated criterion of roughness by visual monitoring of surface and subsequent mathematical processing of the digital video signal. The analysis of the various methods of mathematical processing and filtering of the received images based on lighting. Analyzed the solutions to the problems of evaluation of performance of the roughness of the surface of the duct method technical vision.

Ключевые слова: судостроение, система вентиляции, трубопровод, композиционный полимерный материал, шероховатость поверхности, показатель качества, микрогеометрия поверхности, видео-сигнал, обработка сигнала, математическое преобразование сигнала.

Key words: shipbuilding, ventilation, plumbing, composite polymeric material, the surface roughness, the quality indicator microgeometry of the surface, video signal, signal processing, mathematical conversion signal.

Введение

В современном судостроении (в частности, системах судовой вентиляции) находят широкое применение композиционные полимерные материалы [1], [2], которые, благодаря своим уникальным физико-механическим характеристикам, могут стать достойными конкурентами традиционно используемым для этих целей металлам и их сплавам. Однако, в силу своего особого строения — армирующего каркаса, выполненного из углеродного или стекловолокна и полимерного связующего — матрицы, возникают трудности как на этапах изготовления изделий из полимерных композиционных материалов, так и их эксплуатации. Из теории проектирования судовых вентиляционных и аспирационных систем известно [3] – [5], что существенное влияние на эффек-

тивную работу системы вентиляции оказывают эксплуатационные показатели качества поверхностей деталей, непосредственно соприкасающихся с газовой и транспортируемой средой.

Постановка задачи для исследований

Для оценки технического состояния судовой вентиляционной системы важно оценить потери давления на трение пылевоздушного потока в воздуховоде с учетом концентрации смеси в воздуховоде.

На практике для оценки потерь можно использовать формулу Дарси – Вейсбаха:

$$\Delta p_{\text{тр}} = l \frac{\lambda}{d} p_{\text{дин}} (1 + \mu), \quad (1)$$

где l — длина прямолинейного участка трубопровода, м; λ — коэффициент гидравлического сопротивления (трения); d — внутренний диаметр трубы, м; $p_{\text{дин}}$ — динамическое давление, исчисляемое по средней скорости воздуха и его плотности, Па; K — комплексный коэффициент (для трасс с частыми поворотами $K = 1,4$ (для трасс прямолинейных с небольшим количеством поворотов $K = K_{\text{тм}} \sqrt{\frac{d}{0,3}}$); d — диаметр трубопровода, м; $K_{\text{тм}}$ — коэффициент, учитывающий особенности транспортируемой среды с учетом твердых примесей.

Коэффициент гидравлического сопротивления λ [6] – [8] в инженерных расчетах определяют по формуле А. Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{K_s}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

где K_s — абсолютная эквивалентная шероховатость поверхности, $K_s = (0,0001 \dots 0,00015)$ м; d — внутренний диаметр трубы, м; Re — число Рейнольдса.

Число Рейнольдса для воздуха [7] можно определить по формуле

$$\text{Re} = \frac{vd\rho}{\mu_1}, \quad (3)$$

где v — средняя скорость воздуха в трубе, м/с; d — диаметр трубы, м; ρ — плотность воздуха, кг/м³; μ_1 — коэффициент динамической вязкости, Н·с/м².

Значение динамического коэффициента вязкости для воздуха находят по формуле Милликена

$$\mu_1 = 17,11845 \cdot 10^{-6} + 49,3443 \cdot 10^{-9} t, \quad (4)$$

где t — температура воздуха, °С (при $t = 16$ °С $\mu_1 = 17,11845 \cdot 10^{-6} + 49,3443 \cdot 10^{-9} \cdot 16 = 17,9 \cdot 10^{-6}$).

Из ранее приведенных зависимостей наиболее весомым для инженерных расчетов является коэффициент K_s , характеризующий эксплуатационные показатели шероховатости поверхности. Так, на основе собственных экспериментальных данных [1] и анализа исследований отдельных авторов [7], [8] данный коэффициент может вносить существенные погрешности в расчеты элементов системы аспирации и вентиляции. Погрешность по затрачиваемой мощности может составлять до 100 %. Физический смысл данного явления заключается в существенном влиянии шероховатости внутренней эксплуатационной поверхности трубопровода из композиционного полимерного материала на пропускную способность и потери в рабочем сечении. Для воздухопроводов, выполненных из металлов, влияние данного коэффициента не является столь критичным.

Из всего ранее изложенного следует, что разработка и использование экспресс методик для оценки коэффициента эквивалентной шероховатости является актуальной задачей для науки и техники. Особенностью судовых воздухопроводов является ограниченное пространство для доступа, и, соответственно, ограниченные возможности для диагностики технического состояния.

Основная часть

Способов измерения микрогеометрии функциональных поверхностей механообрабатываемых деталей судовой вентиляции разработано довольно много, однако наиболее экономически эффективными являются две основные группы: *метод контактно-щупового контроля* и *визуального мониторинга поверхностей — оптический метод*. Оба метода довольно подробно рассмотрены в работе [9]. К первой группе относятся методы, в основе которых лежит детектирование и анализ информации, полученной в результате механического взаимодействия детектирующего инструмента с исследуемой поверхностью. Вторая группа включает бесконтактные методы на основе анализа результатов взаимодействия различного рода волновых фронтов (наиболее распространенными являются световые волны) с исследуемой поверхностью.

Измерение параметров шероховатости оптическими приборами производится бесконтактными методами, среди которых наибольшее распространение получили методы светового сечения, теневого сечения, микроинтерференционные, с применением растров. Практически все известные способы контроля качества поверхности, использующие рефлектометрический метод, ориентированы на локальное применение, т. е. требуют соблюдения определенных условий. С одной стороны, отсутствие определенной универсальности накладывает ограничение на использование рефлектометрического метода, а с другой — данный метод является наименее затратным при его схемотехнической реализации с достаточно высокой чувствительностью, что, в свою очередь, открывает больше возможности для разработки различных локальных изобретательских решений. Рефлектометрический метод контроля микрогеометрии поверхностей опирается на известные физические законы взаимодействия света с контролируемой поверхностью: поглощение, отражение, распределение отраженного света в пространстве.

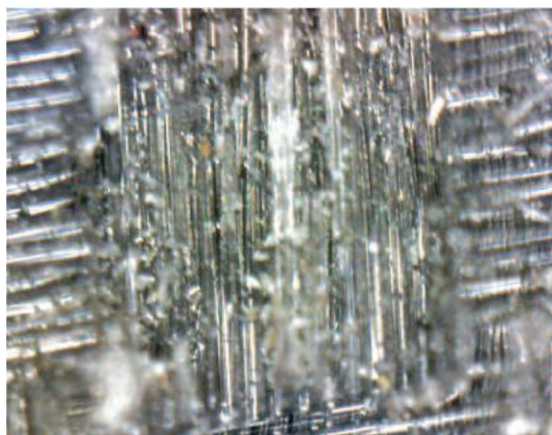
Физические свойства тела, которому принадлежит контролируемая поверхность, определяют количественные и качественные показатели отраженной и поглощенной составляющих светового потока. Микрогеометрия контролируемой поверхности задает распределение отраженного светового потока в пространстве в виде индикатрисы рассеяния. Если установить связь между параметрами микрогеометрии поверхности и характеристиками индикатрисы рассеяния, то можно сформировать измерительную информацию таким образом, что она позволит контролировать параметры шероховатости. Использование систем технического зрения позволяет не просто фиксировать интенсивность отраженного потока в рамках полусферы отражения, но и путем обработки зафиксированных фотографических изображений отфильтровывать избыточную информацию, в особенности, если учесть, что современные системы технического зрения оперируют цифровыми изображениями.

Существует большой набор стандартных фильтров для обработки цифровых изображений, которые позволяют выделить или размыть краевые эффекты, удалить шумы или подавить фон. Однако следует заметить, что используя системы технического зрения в инженерных целях, необходимо правильно комбинировать различные фильтры в зависимости от решаемой задачи. Кроме того, существенным фактом является наличие одного или нескольких изображений объекта исследования, что влияет на возможность или рамки применения различных фильтров.

Обсуждение результатов проведенных исследований

Особенность применения фильтрации для контроля композиционных материалов заключается в разнообразии видов материалов и их поверхностных свойств, что неизбежно ведет к различиям индикатрис рассеяния при идентичных условиях. Однако в пределах одного типа материала можно судить об одинаковой отражательной способности поверхностей изделий при прочих равных условиях. На рис. 1 приведены изображения двух образцов карбона, сделанные в одинаковых условиях. На микрофотографиях видна четкая структура матрицы в виде тканой сетки, заполненной пластичным связующим компонентом.

а)



б)

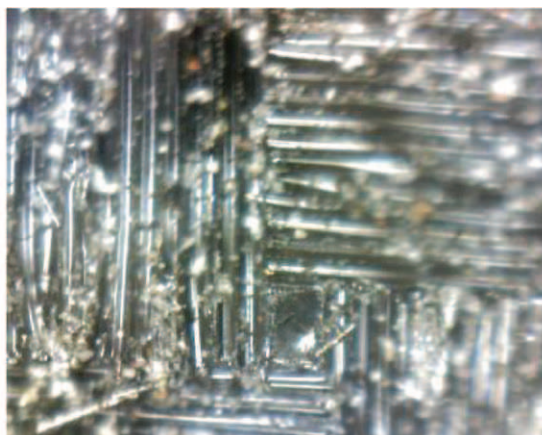


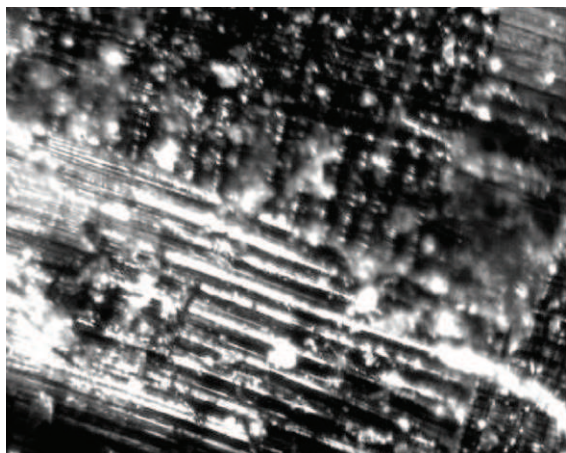
Рис. 1. Изображения задних поверхностей двух образцов воздухопровода из полимерного композиционного материала:

а — плетение «саржа» ткани УТ -900-3к со связующим ВС -2526к;

б — плетение «саржа» ткани УТ -900-3к со связующим ВС -2526к + наномодификатор «Астрален»

Необходимо заметить, что для одного и того же образца приходится учитывать возможность наличия разных типов поверхностей, как видно на рис. 2, где приведены изображения нижней стороны карбоновой пластины и ее торцевого среза. Наличие такой особенности несложно учесть при выполнении контроля и выбрать требуемый алгоритм диагностики. Главным направлением проводимых исследований является разработка алгоритмов контроля на основе одного или нескольких изображений.

а)



б)

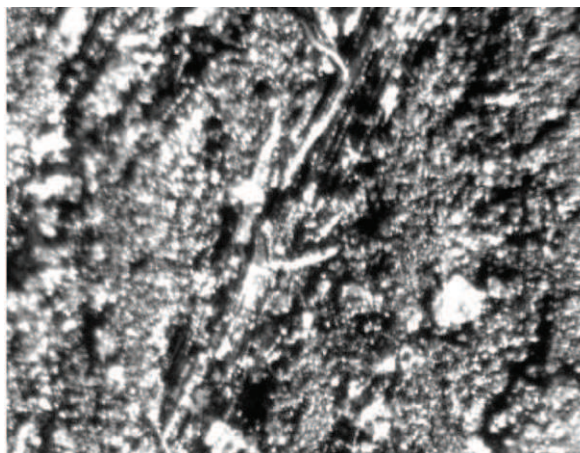


Рис. 2. Изображение необработанной поверхности воздухопровода выполненного из углепластика (плетение «саржа» ткани УТ -900-3к, со связующим ВС -2526к):

а — необработанной; *б* — торцевого среза образца

Основой большинства алгоритмов является выявление краев дефектов (неровностей) путем первичного сглаживания изображения с помощью Гауссова фильтра (гауссиана), который позволяет подавить шумы изображения, размывая мелкие детали, и дальнейшего дифференцирования в пространстве координат (x, y) с целью выявления градиентов яркости при использовании фильтров Лапласа (Laplacian), Собела (Sobel), Превитта (Prewitt), Робертса (Roberts), Кэнни (Canny). Такая обработка позволяет определить наиболее ярко выраженные краевые эффекты, которые обычно сопровождают поверхностные (и не только) дефекты или границы объекта, однако результат ис-

пользования стандартных фильтров не дает достаточного эффекта. На рис. 3 приведены результаты применения указанных фильтров к изображению торцевого среза карбонового образца, откуда видны дефекты (особенно крупные), но недостаточно четко прослеживается структура материала. Отчасти виновником такого результата является стандартный гауссиан с ядром свертки (табл. 1), которое незначительно размывает изображение, как показано на рис. 4.

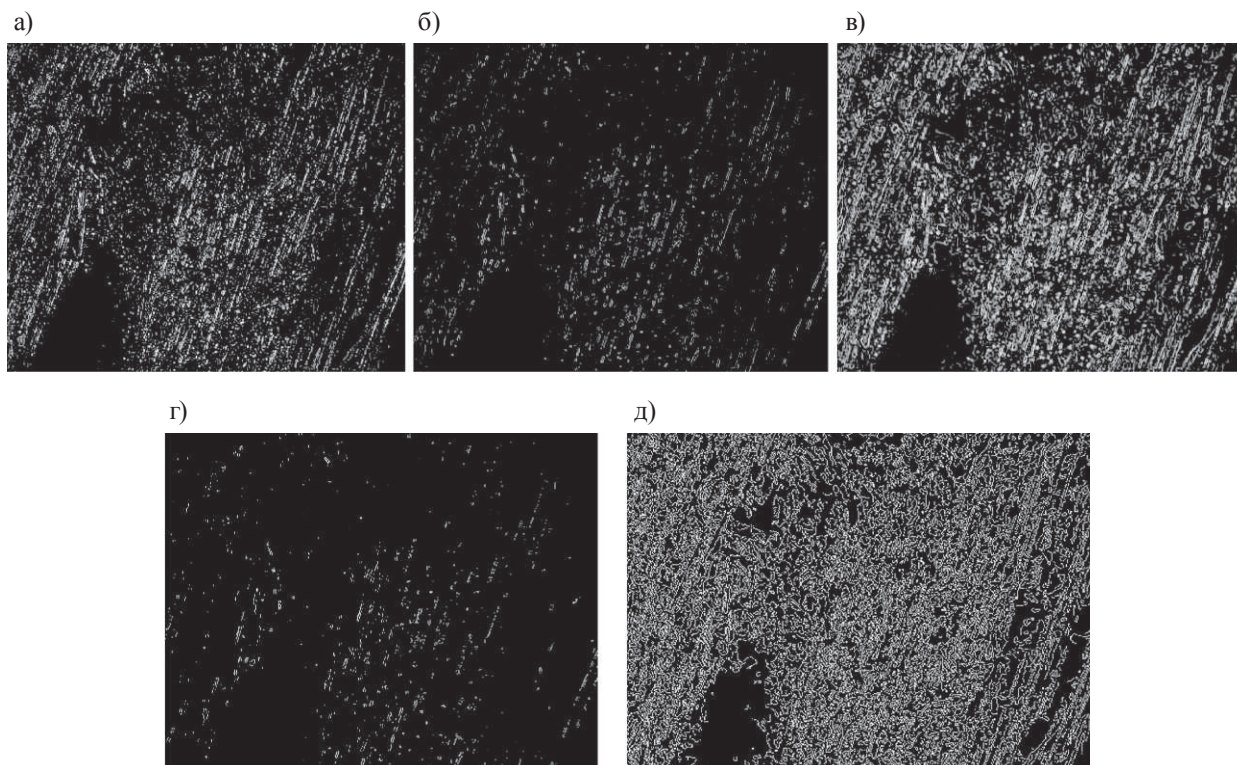


Рис. 3. Результат последовательного воздействия стандартного гауссиана и фильтров:
а — Лапласа; б — Собела; в — Превитта; г — Робертса; д — Кэнни

Таблица 1

Стандартный гауссиан с ядром свертки нахождения особых точек на изображении

1	2	1
2	4	2
1	2	1

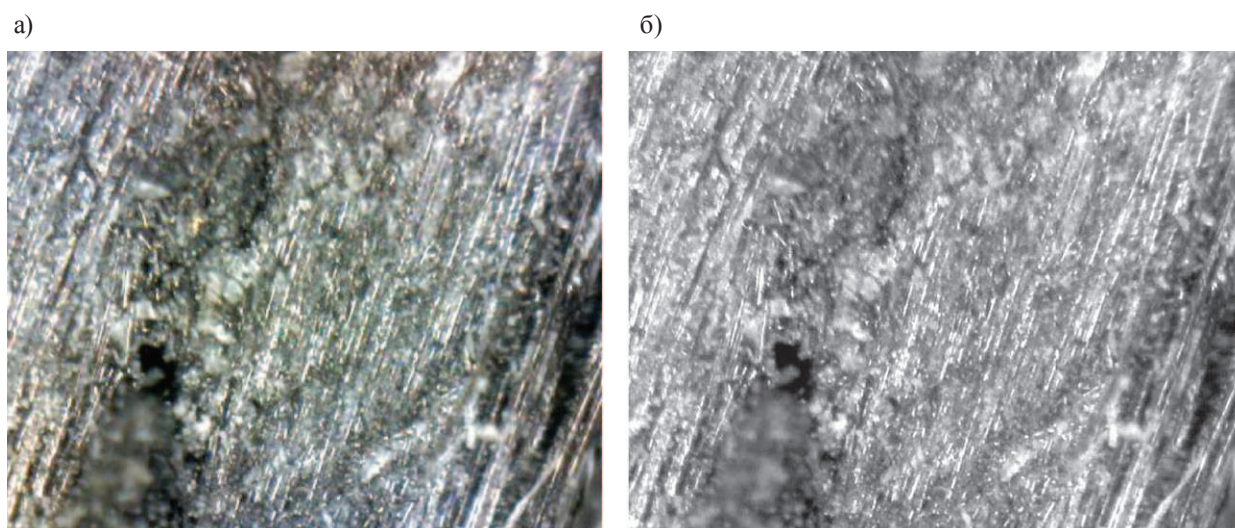


Рис. 4. Исходное изображение (а), вид после применения стандартного гауссиана (б)

Таким образом, применение *гауссиана* слабо влияет на исходное изображение и может быть исключено из процесса обработки. Остальные представленные фильтры призваны выделить границы элементов изображения по градиенту яркости, но, в результате использования, в значительной мере ослабляют общую яркость изображения, скрывая его структуру, кроме того, только Лапласиан и фильтр Кэнни используют градиенты в пределах 360° . Остальные фильтры оперируют только одним вектором направления. Фильтр Кэнни выглядит, на первый взгляд, наиболее эффективным, но при более близком рассмотрении можно увидеть избыток мелких деталей, которые скрывают текстуру изображения.

Экспериментируя с фильтром Лапласа при помощи изменения параметров ядра свертки, установили, что он может быть очень эффективен, если увеличить коэффициенты ядра и использовать дискретный делитель для полученного результата. Так, изменяя в сторону увеличения коэффициенты ядра свертки, появляется возможность усиливать влияние градиента на формирование нового значения каждого пикселя. В свою очередь, для подавления шумов введением коэффициента деления можно ослаблять изолированные мелкие детали и оставлять лишь основные контуры. На рис. 5 приведено применение фильтра Лапласа с ядром свертки (табл. 2) и увеличивающимся делителем.

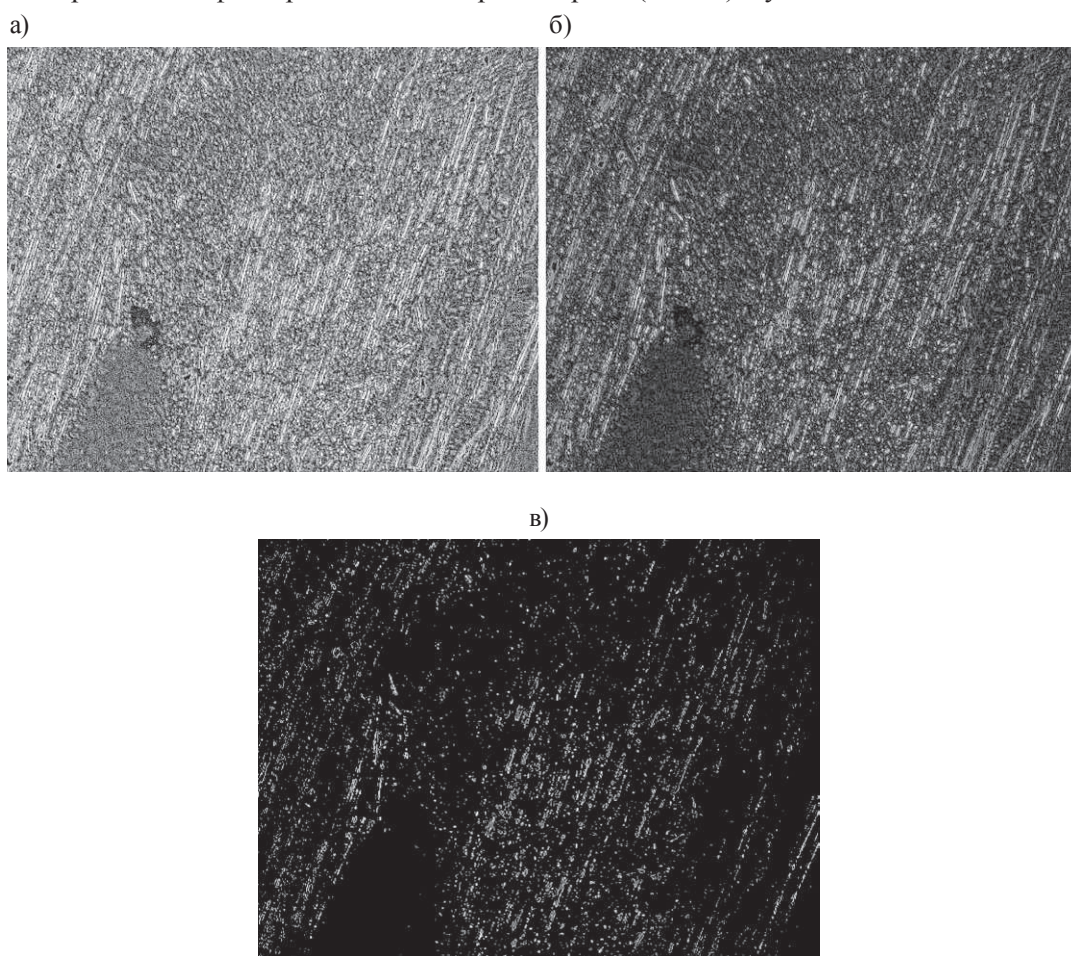


Рис. 5. Использование фильтра Лапласа с разными коэффициентами:
а — коэффициент ядра 25 %; б — коэффициент ядра 50 %; в — коэффициент ядра 75 %

Таблица 2

Применение фильтра Лапласа с ядром свертки для нахождения особых точек на изображении

-2	-7	-12	-7	-2
-7	-31	-52	-31	-7
-12	-52	444	-52	-12
-7	-31	-52	-31	-7
-2	-7	-12	-7	-2

Используя дополнительные инструменты обработки изображения и конечную последовательность итераций с фильтром Лапласа, получаем возможность выявить и с учетом калибровки камеры рассчитать параметры крупных дефектов. В зависимости от решаемой задачи, количество изображений одного и того же участка может быть различным. Если требуется детектировать только наличие дефекта (дефектов), то обычно достаточно одного изображения и задача сводится к правильному формированию оптической оси *источатель — объект — приемник*. Если задача состоит в определении некоторых метрологических характеристик дефектов или составлении диагностической карты поверхности, то потребуется уже несколько изображений, выполненных при различных условиях съемки для реализации стандартного метода фотограмметрии с целью определения пространственных параметров дефекта.

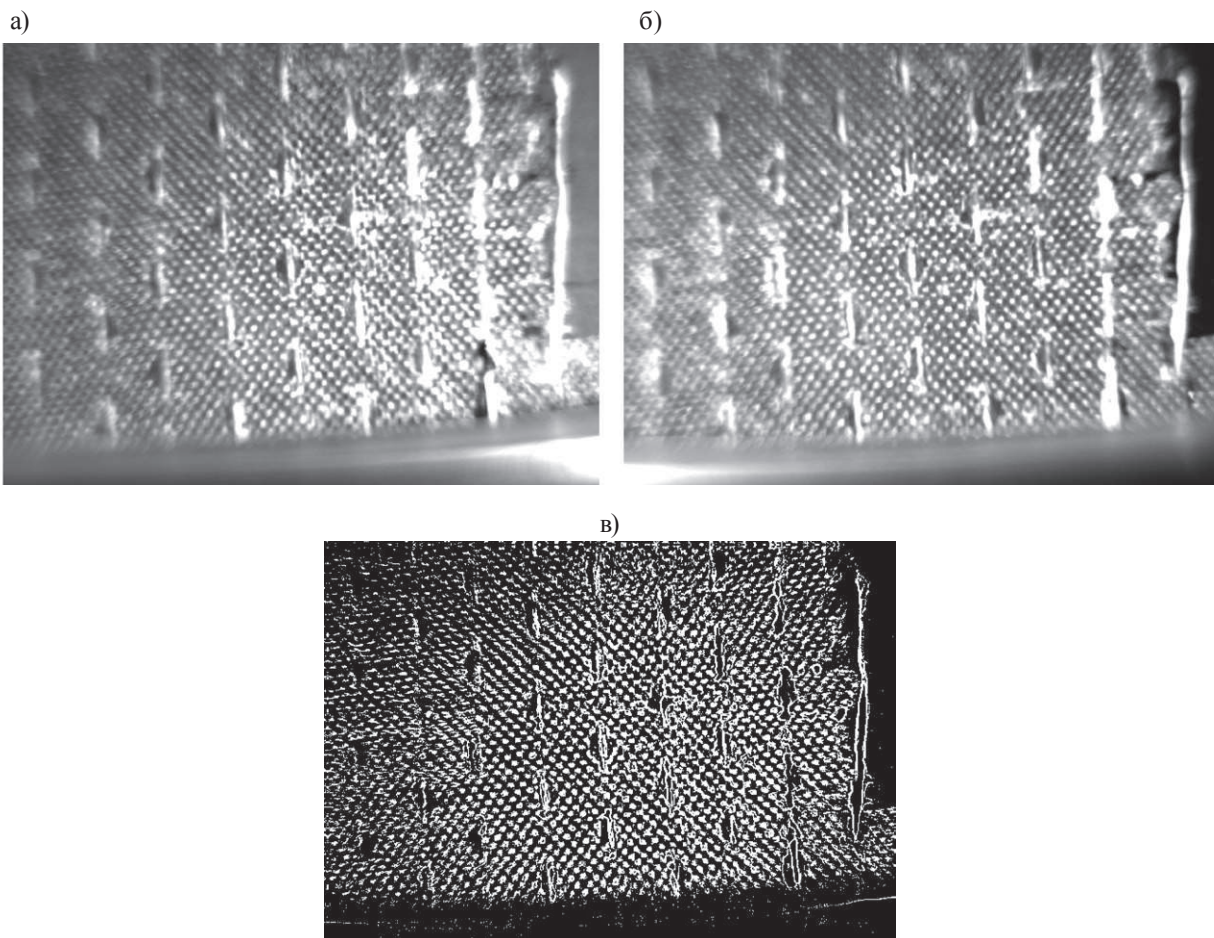


Рис. 6. Результат обработки двух освещенных под разными углами изображений задника одного образца судового воздухопровода, выполненного полимерного композиционного материала (плетение «саржа» ткани УТ -900-3к со связующим ВС -2526), для выявления структуры и ее целостности:
а — 20 % мощности кольцевого осветителя; б — 50 % мощности кольцевого осветителя;
в — 100 % мощности кольцевого осветителя

На текущем этапе были использованы изображения одного и того же участка поверхности воздухопровода из полимерного композиционного материала, который освещался под разными углами относительно неподвижной камеры. Как видно из рис. 6, освещение оказывает существенное влияние на формирование изображения. Однако, применив фильтры Лапласа с предложенными значениями в табл. 2 ядра свертки и выполнив наложение изображений с усреднением результата, получили четкую картину структуры матрицы. Если взять за основу эталонный образец, то полученное изображение можно сохранить в качестве эталонной текстуры, которую следует накладывать на изображения тестируемых образцов и определять их соответствие установленным требованиям.

Выводы

1. Выполненные исследования показывают, что в настоящее время использование систем технического зрения для контроля судовых воздухопроводов, выполненных из композиционных материалов как на этапе производства, так и в процессе эксплуатации, является наиболее перспективным методом, обеспечивающим достаточную степень достоверности результатов.

2. Выбор фильтра для полученных цифровых изображений может осуществляться визуаль-но на основе выполненного конкретного исследования образца поверхности полимерного компо-зиционного материала и сравнительного анализа фотографий.

3. Все разработанные методики для оценки эксплуатационных показателей качества (ми-крогеометрии, шероховатости, волнистости) поверхностей деталей судовой вентиляции могут ис-пользоваться для крупноразмерных изделий, где уровень контроля сводится к определению соот-ветствия или несоответствия исследуемого образца эталону.

Список литературы

1. *Васильев К. А.* Повышения эффективности работы системы местной вентиляции при механической обработке композиционных полимерных материалов применяемых в современном судостроении / К. А. Ва-сильев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макаро-ва. — 2014. — № 5 (27). — С. 64–74.
2. *Безпальчук С. Н.* Использование полимерных композиционных материалов в технологии изго-товления трубопроводов системы судовой вентиляции / С. Н. Безпальчук, К. А. Васильев, А. К. Наумова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 60–65.
3. ГОСТ 24389-89. Системы кондиционирования воздуха, вентиляции и отопления судов. Расчетные параметры воздуха и расчетная температура забортной воды. — Введ. 01.07.1990.
4. Суда внутреннего и смешанного (река–море) плавания. Санитарные правила и нормы Сан. Пин.2.5.2-703-98. — Минздрав России, 1998. — 144 с.
5. *Ветошкин А. Г.* Процессы и аппараты пылеочистки / А. Г. Ветошкин. — Пенза: Пензенский гос. ун-т, 2005. — 210 с.
6. ГОСТ 12.1.016–79. ССБТ. Воздух рабочей зоны. Требования к методикам измерений концентраций вредных веществ. — Введ. 01.01.1982.
7. *Воскресенский В. Е.* Системы пневмотранспорта, пылеулавливания и вентиляции на деревообраба-тывающих предприятиях. Теория и практика: В 2 т. — Т. 1. Аспирационные и транспортные пневмосисте-мы / В. Е. Воскресенский. — СПб.: Политехника, 2008. — 480 с.
8. *Глебов И. Т.* Аспирационные и транспортные пневмосистемы деревообрабатывающих предпри-ятий / И. Т. Глебов, В. Е. Рысев. — Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2004. — 180 с.
9. *Петров В. М.* Оценка шероховатости точеной поверхности деталей выполненных из композици-онных углепластиков / В. М. Петров // Международная науч.-практ. конф. «Качество поверхностного слоя деталей машин», 24 – 26 июня, 2003. — СПб., 2003. — С. 138–143.