

АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПО ИХ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

В. В. Киященко

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия
vv.kiyashchenko@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Исследуется задача определения показателей качества двухкомпонентных композиционных покрытий на основе автоматического анализа микрошлифов с применением информационно-измерительной системы методами машинного зрения. *Материалы и методы.* Исследования выполнялись с образцами покрытий, полученных методами порошкового напыления никеля и алюминия. Анализ подвергались изображения микрошлифов, полученные методами электронной микроскопии. В качестве основного критерия качества принимали удельную площадь контакта слоев Ni/Al. При разработке автоматизированной системы используется язык программирования Java и библиотека OpenCV для обработки изображений. Система проводит анализ структуры покрытий, включая выделение границы соприкосновения двух компонентов, подсчет удельной площади соприкосновения, обнаружение дефектов распределения материалов. Кроме того, применяется библиотека Tesseract для определения масштаба изображений. *Результаты.* Разработанная система успешно выделяет дефекты в двухкомпонентных композиционных покрытиях, предоставляя точные измерения и характеристики поверхностных дефектов. *Выводы.* Результаты исследования подтверждают применимость разработанной системы в задаче распознавания дефектов в двухкомпонентных композиционных покрытиях. Внедрение данной системы в промышленные процессы контроля качества материалов обещает улучшить эффективность и точность процесса.

Ключевые слова: двухкомпонентные композиционные покрытия, информационно-измерительная система, обработка изображений, контроль качества материалов, детектирование контуров

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

Для цитирования: Киященко В. В. Алгоритмы распознавания дефектов двухкомпонентных композиционных покрытий по их изображениям // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 1. С. 126–138. doi: 10.21685/2227-8486-2024-1-9

ALGORITHMS FOR DEFECT RECOGNITION IN TWO-COMPONENT COMPOSITE COATINGS BASED ON THEIR IMAGES

V.V. Kiyashchenko

Samara State Technical University, Samara, Russia
vv.kiyashchenko@gmail.com

Abstract. *Background.* This study addresses the issue of automated defect recognition in two-component composite coatings. The research aims to develop an efficient information-measuring system that utilizes modern technologies for detecting and characterizing defects on material surfaces. The research goal is to ensure high-precision and automated quality control of coatings, which is crucial in fields where even minor defects can lead to serious consequences. *Materials and methods.* To achieve the set objectives, the Java programming language and the OpenCV library for image processing are employed. The system analyzes the structure of coatings, including the separation of the boundary of contact between two components, calculation of the specific area of contact, detection of defects in the distribution of materials. Additionally, the Tesseract library is utilized for determining image scale. *Results.* The developed system successfully identifies defects in two-component composite coatings, providing precise measurements and characteristics of surface defects. *Conclusions.* The research results confirm the effectiveness of the developed system in defect recognition in two-component composite coatings. Implementing this system into industrial processes for material quality control promises to enhance efficiency and accuracy.

Keywords: two-component composite coatings, information-measuring system, image processing, material quality control, contour detection

Financing: the research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (topic № ААААА-А 12-2110800012-0).

For citation: Kiyashchenko V.V. Algorithms for defect recognition in two-component composite coatings based on their images. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(1):126–138. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-1-9

Введение

Современная промышленность, поддерживаемая стремительным технологическим развитием, сталкивается с растущей потребностью в эффективных методах контроля качества материалов [1–4], особенно в области двухкомпонентных композиционных покрытий [5–9]. Одним из критических аспектов обеспечения высокого стандарта продукции является выявление и анализ дефектов на поверхности покрытий [5, 6, 10], что подчеркивает актуальность проблемы, рассматриваемой в данной статье.

Цель исследования заключается в разработке информационно-измерительной системы для распознавания дефектов неравномерности покрытия и дефектов границ соприкосновения на изображениях двухкомпонентных композиционных покрытий.

Исследование также направлено на выяснение теоретического обоснования алгоритмов распознавания дефектов, а также предоставление практических результатов, демонстрирующих применимость разработанной системы.

Материалы и методы

В рамках исследования использовались двухкомпонентные композиционные покрытия, состоящие из никеля и алюминия, наносимые методами порошкового напыления [11]. Анализируемые образцы получали резкой тестовых пластин с покрытием, запрессовкой в эпоксидный компаунд и шлифовкой на шлифовальной машине групповой подготовки. Для оценки точности разработанной системы использовались образцы с известными дефектами и эталонный набор бинарных изображений [12]. Изображения покрытий создавались

с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Jeol JSM 6390A, снабженного приставкой рентгеноспектрального микроанализа Jeol JED-2200.

Разработанная система, реализованная на языке программирования Java с использованием библиотек OpenCV и Tesseract, проходит несколько этапов обработки изображений. Для выделения дефектов материалов применялись скомбинированные алгоритмы обработки, предоставляемые библиотекой OpenCV, в том числе алгоритм поиска контуров `Imgproc.findContours`.

В экспериментах учитывались различные параметры, включая разрешение изображений, пороги для бинарной обработки и масштаб, полученный из распознавания эталонных изображений. Этот подход, объединяющий несколько математических методов, обеспечивает необходимые преимущества в анализе покрытий.

Оценка точности и эффективности алгоритма включала использование параметров, таких как соотношение площадей компонентов, длина границы контакта, удельная поверхность контакта H и общая площадь материала. Используемая формула для расчета удельной поверхности контакта H может быть выражена следующим образом:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^m L_i}{\sum_{j=1}^n S_j}, \quad (1)$$

где m – количество границ соприкосновения; L_i – длина границы контакта; n – количество областей материала; S_j – площадь области материала.

На этапе проектирования алгоритмов были протестированы различные подходы к обработке изображений микрошлифов. Основные этапы алгоритма обработки изображений в системе анализа двухкомпонентных композиционных покрытий приведены на рис. 1.

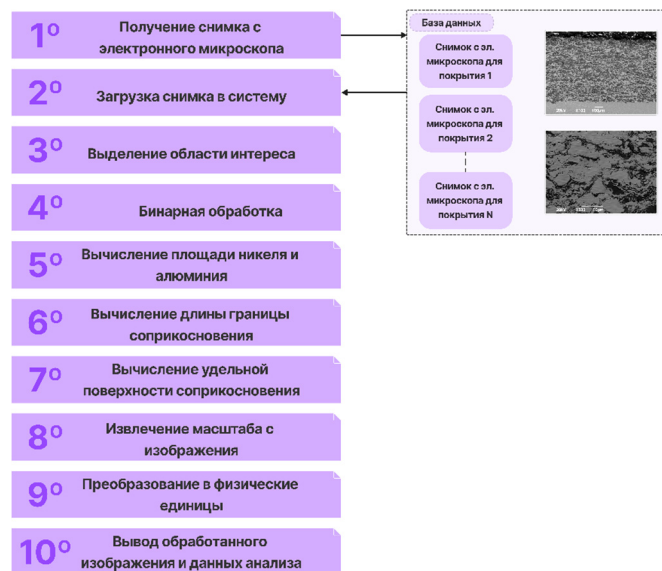


Рис. 1. Основные этапы алгоритма обработки изображений в системе анализа покрытий

*Алгоритмы обработки изображений***1. Загрузка изображения.**

Этот этап включает использование электронного микроскопа для создания изображений, которые затем загружаются в систему. Электронный микроскоп предоставляет высокоразрешенные изображения поверхности материала. На входе алгоритма – изображение, полученное с электронного микроскопа, на выходе – изображение, загруженное в систему. Роль алгоритма загрузки изображений заключается в предоставлении исходных файлов для последующих этапов обработки.

2. Область интереса (ROI).

Выбор ROI вручную обеспечивает больший контроль над процессом и является эффективным при анализе специфических участков. Вместо ручного выделения области интереса в системе предусмотрен вариант автоматического выделения областей интереса, который используется в случае анализа нескольких случайных участков на всей поверхности. На входе алгоритма выделения области интереса – загруженное изображение, на выходе – область интереса. Этот этап предоставляет участки изображения, которые затем проходят более детальную обработку.

3. Бинарная обработка методом Оцу [13].

Метод Оцу адаптируется к изменениям контраста на изображении, используя пороговую бинаризацию. Кроме того, в системе реализована альтернатива методу Оцу – использование алгоритмов глобальной бинаризации. Входные параметры алгоритма бинарной обработки – характеристики области интереса, выходные параметры – характеристики бинарного изображения. Роль алгоритма обработки изображения методом Оцу в системе заключается в преобразовании изображения в бинарную форму с выделением значимых областей.

4. Вычисление площади компонентов.

Используется для измерения площади областей, выделенных на предыдущем этапе. Это предоставляет информацию о распределении материалов на поверхности. На входе алгоритма вычисления площади – бинарное изображение, на выходе – площадь компонентов материала. Этот этап предоставляет количественную оценку распределения материалов.

5. Вычисление длины границы соприкосновения.

Применяется контурный анализ OpenCV для измерения длины границы между различными компонентами материала. В системе также доступны альтернативные алгоритмы трассировки границы. На входе алгоритма вычисления длины – бинарное изображение, на выходе – длина границы соприкосновения. Роль этого этапа заключается в предоставлении информации о структуре материала и размерах дефектов.

6. Вычисление удельной поверхности соприкосновения.

На этом этапе система проводит оценку удельной поверхности соприкосновения, используя формулу (1).

Таким образом, входными параметрами для алгоритма вычисления удельной поверхности являются площадь компонентов материала и длина границы соприкосновения, а выходным параметром – удельная поверхность соприкосновения. Выбор удельной поверхности соприкосновения в данной

работе обоснован не только простотой ее вычисления, но и информативностью в контексте выявления дефектов материала.

Вычисление длины границы соприкосновения и удельной поверхности позволяет оценить неравномерности покрытия и дефекты границ соприкосновения. Переменные значения удельной поверхности указывают на неравномерности в нанесении материала. Изменения в длине границы соприкосновения указывают на наличие дефектов в структуре материала, таких как трещины или пустоты.

Использование библиотеки Tesseract

1. Распознавание текста на изображении.

Tesseract как промышленный стандарт обеспечивает высокую точность распознавания, особенно при обработке структурированного текста. В библиотеке реализованы разнообразные методы, включая те, которые основаны на принципах машинного обучения, что делает ее мощным инструментом для задач оптического распознавания символов. Входным параметром алгоритма распознавания текста является заданная область интереса, выходным – распознанный текст. Роль этого этапа в системе обработки изображений – обеспечение распознавания текста на изображении для последующего выделения значения масштаба изображения.

2. Определение масштаба.

Автоматическое выделение масштаба изображения из распознанного текста позволяет автоматизировать процесс и снизить вероятность ошибок. Входной параметр этого алгоритма – распознанный текст, выходной параметр – численное значение масштаба изображения. Этот этап обеспечивает определение масштаба и корректную интерпретацию результатов.

Выбор конкретных методов обработки изображений и применения библиотеки Tesseract основан на стремлении обеспечить высокую точность и применимость в условиях промышленного контроля качества. Точность методов была систематически оценена с использованием стандартной метрики качества – F -меры [14]. F -мера – характеристика, которая позволяет дать оценку одновременно по точности и полноте:

$$F\text{-мера} = \frac{1}{\alpha \frac{1}{P} + (1-\alpha) \frac{1}{R}}, \alpha \in [0,1], \quad (2)$$

где α – коэффициент, задает соотношение весов точности и полноты; P – точность, показывает, сколько из предсказанных позитивных объектов оказались действительно позитивными; R – полнота, показывает, сколько от общего числа реальных позитивных объектов было предсказано как позитивный класс.

Допустимые значения F -меры при обработке изображений композиционных материалов: близкое к 1, что означает высокую точность и полноту (отличное качество), или 0,8–0,9 (хорошее качество). Полученные значения F -меры (табл. 1) демонстрируют, что выбранные методы обладают необходимым уровнем качества в условиях производства композиционных материалов.

Таблица 1

F-мера для методов обработки изображений,
применяемых в разработанной системе

Метод обработки изображений	Точность	Полнота	Значение <i>F</i> -меры	Условия освещения (люксы)	Наличие паров и запыленность
Загрузка изображения	0,95	0,95	0,95	>1000	Нет
Область интереса (ROI)	0,91	0,94	0,92	500–1000	Нет
Бинарная обработка методом Оцу	0,9	0,86	0,88	500–1000	Нет
Вычисление площади компонентов	0,92	0,96	0,94	500–1000	Нет
Вычисление длины границы соприкосновения	0,88	0,93	0,90	500–1000	Нет
Вычисление удельной поверхности соприкосновения	0,94	0,92	0,93	500–1000	Нет
Распознавание текста на изображении	0,97	0,99	0,98	500–1000	Нет
Определение масштаба	0,98	0,94	0,96	500–1000	Нет

Результаты

В проведенных исследованиях внимание было уделено ряду ключевых экспериментальных параметров, которые играют важную роль в разработке и оценке эффективности системы по критериям точности, полноты и *F*-мере.

Для тестирования системы были использованы двухкомпонентные композиционные покрытия из никеля и алюминия, наносимые методом порошкового напыления. Разнообразие образцов по таким характеристикам, как толщина покрытия, размер частиц компонентов, количество дозаторов для напыления, позволило учесть различные характеристики материалов.

Для проверки системы в обнаружении неравномерности покрытия и дефектов границ соприкосновения использовались образцы, прошедшие экспертную оценку с применением электронной микроскопии высокого разрешения. Такой подход дал возможность убедиться в способности системы характеризовать разнообразные микрошлифы.

Учтено разрешение СЭМ-изображений для более точной и надежной характеристики областей дефектов. Это важно для корректной интерпретации результатов.

Для обеспечения правильного распознавания масштаба использовались эталонные бинарные изображения с заранее известными отношением черных и белых пикселей, масштабом, площадью соприкосновения. Набор бинарных изображений был сформирован для тестирования разработанной системы с помощью графического редактора. Это дополнительный этап, который обеспечивает корректное преобразование результатов в физические единицы.

Для более объективной оценки результатов использовались следующие параметры:

1. Процентные соотношения никеля и алюминия предоставляют информацию о распределении материала на поверхности.
2. Измерение длины границы соприкосновения дает представление о размерах дефектов и их структуре.
3. Удельная поверхность соприкосновения (1) предоставляет количественную характеристику дефектности материала и его структуры.
4. Оценка общей площади материала помогает определить, насколько распределение материала на поверхности соответствует требованиям.

Полученные результаты представлялись визуально с помощью выделения контуров материалов. Выводились количественные параметры, такие как удельная поверхность соприкосновения, длина границы соприкосновения, общая площадь материала и др.

Таким образом, использование алгоритмов обработки изображений и библиотеки Tesseract обеспечило распознавание и характеризацию дефектов в двухкомпонентных композиционных покрытиях. Полученные результаты служат основой для дальнейших исследований и применения в промышленности.

На рис. 2, 3 продемонстрирована эффективность системы до и после обработки. В табл. 2 содержатся входные и выходные данные. Данные сравнили с результатами измерений, полученными методом экспертной оценки с применением электронной спектроскопии высокого разрешения. Сравнение проводилось для нескольких изображений. Среднее значение различий общей площади материала из двух методов составило 2,429 микрон со стандартным отклонением 1,298 микрон.

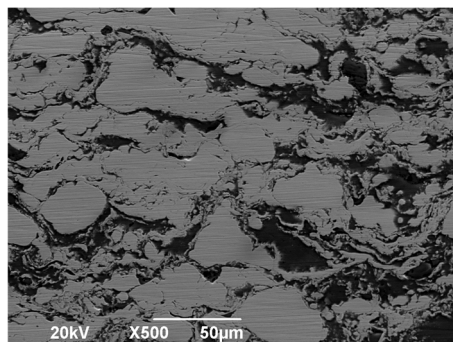


Рис. 2. СЭМ-изображение композиционного двухкомпонентного покрытия до выделения контуров

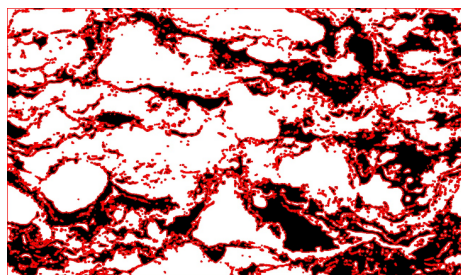


Рис. 3. Изображение композиционного двухкомпонентного покрытия после выделения контуров

Таблица 2

Данные анализа изображения двухкомпонентного композиционного покрытия

Параметр	Значение
Расширение изображения	1280x960
Формат	.tif
Количество пикселей	1228800
Распознанное значение масштаба	501,0
Микрон на пиксель	1,996
Общая площадь материала (пкс ²)	960000
Общая площадь материала (мкм ²)	3824716,433
Общая площадь материала (мм ²)	3,825
Длина вся (пиксели)	81156,355
Длина вся (мкм)	161989,378
Длина вся (мм)	161,989
Удельная площадь (пкс ⁻¹)	0,085
Удельная площадь (мкм ⁻¹)	0,0425

Среднее значение вычислялось по формуле

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n}, \quad (3)$$

где n – количество наблюдений; X_i – значение, полученное в разработанной системе; Y_i – значение из метода экспертной оценки.

Стандартное отклонение вычислялось по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i - Q)^2}{n - 1}}. \quad (4)$$

Это подтверждает согласованность результатов между двумя методами, укрепляя достоверность представленных данных.

Обсуждение

Разработанная система для распознавания дефектов в двухкомпонентных композиционных покрытиях представляет собой полезный инструмент в области контроля качества материалов. На данном этапе измерительные характеристики системы были оценены с помощью расчета метрик точности, полноты и F -меры. Пользовательский интерфейс системы при определении контуров материалов композиционных покрытий представлен на рис. 4.

Система успешно выделяет области материала, в которых присутствуют дефекты в виде нерасслоенного материала. Этот вывод подкрепляется высокой точностью выделения областей никеля и алюминия на покрытиях. Из 50 проведенных экспериментов верное определение дефектов распределения материалов было зарегистрировано в 49 случаях. Использование цветовой маркировки, красным цветом для нерасслоенных участков никеля, зеленым – для алюминия, обеспечивает ясное представление о распределении материалов. Пример работы системы на изображении материала с дефектами и на изображении материала с небольшим количеством дефектов показан на рис. 5.

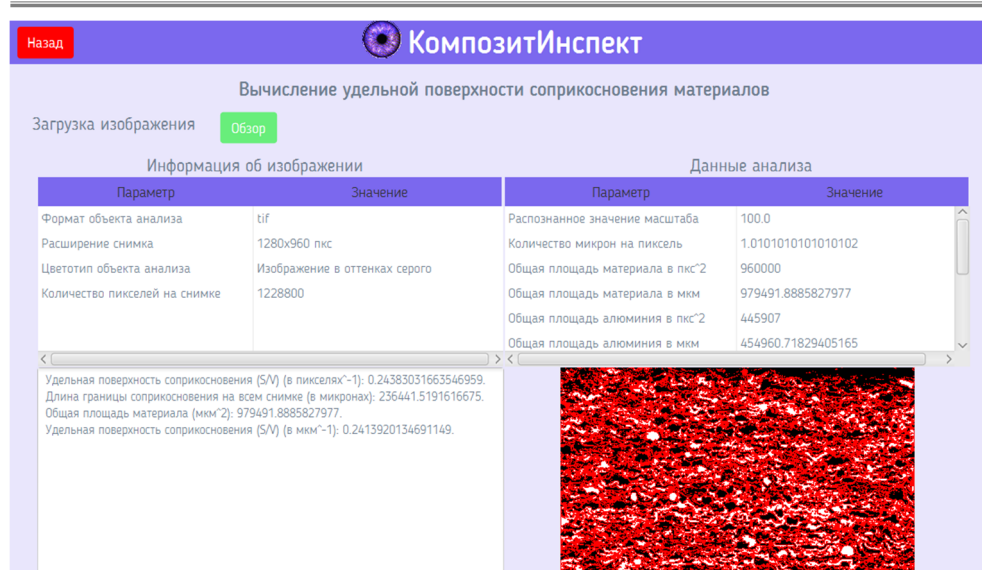


Рис. 4. Пользовательский интерфейс системы

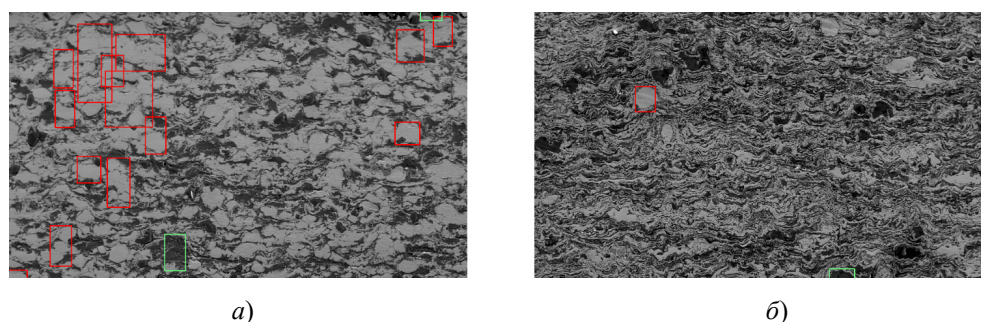


Рис. 5. Пример работы системы по определению дефектов распределения материалов:

а – покрытие с дефектами; б – покрытие с небольшим количеством дефектов

Использование библиотеки Tesseract для определения масштаба позволяет перевести результаты расчета площади удельной поверхности соприкосновения и границы соприкосновения в физические единицы (микрометры). Это обеспечивает возможность проведения количественных измерений, что существенно для понимания размеров и характеристик дефектов.

Разработанная система может быть успешно внедрена в промышленные процессы контроля качества материалов. Автоматизация этого процесса сокращает время и ресурсы, требуемые для оценки качества покрытий.

Ограничения и возможные улучшения

Система может быть чувствительной к условиям освещения при съемке изображений. В будущем можно рассмотреть варианты улучшения алгоритмов, чтобы сделать их менее зависимыми от освещения.

Дополнительные функции, такие как автоматическое определение типа покрытия и классификация дефектов, могут сделать программу еще более полезной в различных отраслях промышленности. Следует также учесть

возможность адаптации системы для работы с различными типами оборудования и устройств для создания изображений.

Перспективы дальнейших исследований

Внедрение методов искусственного интеллекта, таких как машинное обучение, для улучшения процесса распознавания и классификации дефектов является перспективой совершенствования системы. Планируются расширение системы для работы с различными типами композиционных покрытий, разработка методов для количественной оценки степени повреждения материала и глубины дефектов, применение методов статистической обработки изображений.

Выводы

Разработанная система успешно распознает и характеризует дефекты на изображениях двухкомпонентных композиционных покрытий. Высокая точность в выделении областей никеля и алюминия, а также измерение длины границы соприкосновения подтверждают ее эффективность.

Обсуждены ограничения текущей системы и предложены возможные направления для улучшения, такие как учет условий освещения и расширение функциональности. Намечены перспективы для дальнейших исследований, включая использование искусственного интеллекта, расширение типов покрытий и количественную оценку дефектов.

В целом разработанная система представляет собой ценный инструмент для промышленности, предоставляющий возможность быстрого и точного контроля качества двухкомпонентных композиционных покрытий. Дальнейшие исследования и улучшения могут дополнительно расширить область ее применения и повысить уровень автоматизации в процессах контроля качества.

Список литературы

1. Бурмистров А. Г., Кочеров А. В. Контроль качества материалов по их релаксационным спектрам // Инновационный менеджмент и технологии в эпоху глобализации : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Региональная Академия Менеджмента, 2014. Т. I. С. 42–47.
2. Стихановский Б. Н., Чернова Е. С. Метод упругого отскока для контроля качества материалов и конструкций // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч.-практ. конф. (Омск, 7 февраля 2014 г.). Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2014. С. 350–355.
3. Патент на полезную модель № 4478. Продавливающий элемент, преимущественно для контроля качества материалов и соединений верха обуви / Буркин А. Н., Дмитриев А. П., Комлева Н. В., Семашко М. В. ; заявитель Витебский государственный технологический университет ; № u20070787 ; заявл. 12.11.2007.
4. Патент № 2595018 С2 Российская Федерация, МПК E02F 7/04, E21C 39/00. Способ контроля качества железорудного материала в ковше горного погрузочного средства и устройство для его осуществления / Ретуков В. Н. ; № 2014151201/03 ; заявл. 17.12.2014 ; опубл. 20.08.2016.
5. Лисицына А. И. Неразрушающий контроль качества композиционных материалов // Авиакосмические технологии (АКТ-2012) : тез. I тура XIII Всерос. науч.-техн. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов (Воронеж ;

- Москва, 04–05 июня 2012 г.). Воронеж ; М. : Воронежский государственный технический университет, 2012. Т. I. С. 28.
6. Kryvanos A. K., Pyushchanka A. Ph., Piatsiushyk Ya. Ya. Quality control of mixing components of energy-saturated heterogeneous composite material // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series*. 2020. Vol. 65, № 3. P. 263–271. doi: 10.29235/1561-8358-2020-65-3-263-271
7. Лапшинов А. Е. Обследование и контроль качества конструкций армированных и усиленных композитными полимерными материалами // *Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 13 октября 2017 г.)*. СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017. С. 129–135.
8. Фараизов И. И., Яппарова Э. Н., Махмутов А. Р. Нормативно-правовое регулирование и обеспечение контроля качества композитных материалов на основе ненасыщенных полиэфирных смол // *Вестник науки*. 2023. Т. 2, № 11. С. 798–803.
9. Разина А. С. Контроль качества углерод-керамического композиционного материала применительно к камерам сгорания ЖРД МТ методами неразрушающего контроля // *Инновационные аспекты социально-экономического развития региона : сб. ст. по материалам участников VIII Ежегодной науч. конф. аспирантов «МГОТУ» (Наукоград Королев, Московская обл., 17 мая 2018 г.)*. Наукоград Королев : Научный консультант, 2018. С. 387–394.
10. Патент № 2478947 С1 Российская Федерация, МПК G01N 29/14. Способ контроля качества материалов методом акустической эмиссии / Шкуратник В. Л., Новиков Е. А. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный горный университет» (МГГУ) ; № 2011145604/28 ; заявл. 10.11.2011 ; опубл. 10.04.2013.
11. Галимов Э. Р., Федяев В. Л., Сираев А. Р. [и др.]. Закономерности изменения эксплуатационных характеристик полимерных порошковых покрытий в зависимости от режимов напыления // *Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли : сб. докладов Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием : в 2 т. (г. Казань, 10–12 августа 2016 г.)*. Казань : Академия наук Республики Татарстан, 2016. Т. 1. С. 670–675.
12. Афонасенко А. В., Елизаров А. И. Обзор методов распознавания структурированных символов // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2008. № 2-1. С. 83–88.
13. Ключев В. В. Обнаружение объектов на изображении с помощью метода Оцу // *Научное сообщество студентов. Междисциплинарные исследования : сб. ст. по материалам LXXI студенческой Междунар. науч.-практ. конф. (г. Новосибирск, 17 июня 2019 г.)*. Новосибирск : Ассоциация научных сотрудников «Сибирская академическая книга», 2019. Т. 12 (71). С. 115–117.
14. Левчук С. А., Якименко А. А. Исследование характеристик алгоритмов распознавания лиц // *Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета*. 2018. № 3-4. С. 40–58. doi: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-40-58

References

1. Burmistrov A.G., Kocherov A.V. Quality control of materials according to their relaxation spectra. *Innovatsionnyy menedzhment i tekhnologii v epokhu globalizatsii : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Innovative management and technologies in the era of globalization : materials of the International scientific and practical conference*. Regional'naya Akademiya Menedzhmenta, 2014;I:42–47. (In Russ.)
2. Stikhanovskiy B.N., Chernova E.S. Method of elastic rebound for quality control of materials and structures. *Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii*,

- promyshlennosti i na transporte: materialy nauch.-prakt. konf. (Omsk, 7 fevralya 2014 g.) = Innovative projects and technologies in education, industry and transport : materials of scientific and practical conference (Omsk, February 7, 2014). Omsk: Omskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya, 2014:350–355. (In Russ.)*
3. Utility model patent № 4478. *Prodavlivayushchiy element, preimushchestvenno dlya kontrolya kachestva materialov i soedineniy verkha obuvi = Utility model Patent No. 4478. A pressure element, mainly for quality control of materials and joints of the upper of shoes.* Burkin A.N., Dmitriev A.P., Komleva N.V., Semashko M.V.; applicant Vitebskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet; № u20070787; appl. 12.11.2007. (In Russ.)
 4. Patent № 2595018 C2 Russian Federation, MPK E02F 7/04, E21C 39/00. *Sposob kontrolya kachestva zhelezorudnogo materiala v kovshe gornogo pogruzochnogo sredstva i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya = A method for quality control of iron ore material in a bucket of a mining loading facility and a device for its implementation.* Retukov V.N.; № 2014151201/03; appl. 17.12.2014; publ. 20.08.2016. (In Russ.)
 5. Lisitsyna A.I. Non-destructive quality control of composite materials. *Aviakosmicheskie tekhnologii (AKT-2012): tez. I tura XIII Vseros. nauch.-tekhn. konf. i shkoly molodykh uchenykh, aspirantov i studentov (Voronezh; Moskva, 04–05 iyunya 2012 g.) = abstracts of the first round of the XIII All-Russian Scientific and Technical conf. and schools of young scientists, postgraduates and students (Voronezh; Moscow, June 04-05, 2012).* Voronezh; Moscow: Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2012;I:28. (In Russ.)
 6. Kryvanos A.K., Ilyushchanka A.Ph., Piatsiushyk Ya.Ya. Quality control of mixing components of energy-saturated heterogeneous composite material. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series.* 2020;65(3):263–271. doi: 10.29235/1561-8358-2020-65-3-263-271
 7. Lapshinov A.E. Inspection and quality control of structures reinforced and reinforced with composite polymer materials. *Obsledovanie zdaniy i sooruzheniy: problemy i puti ikh resheniya: materialy VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Sankt-Peterburg, 13 oktyabrya 2017 g.) = Inspection of buildings and structures: problems and ways to solve them : materials of the VIII International Scientific and Practical Conference. (St. Petersburg, October 13, 2017).* Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2017:129–135. (In Russ.)
 8. Faraizov I.I., Yapparova E.N., Makhmutov A.R. Regulatory and legal regulation and quality control of composite materials based on unsaturated polyester resins. *Vestnik nauki = Bulletin of Science.* 2023;2(11):798–803. (In Russ.)
 9. Razina A.S. Quality control of carbon-ceramic composite material in relation to combustion chambers of LRE MT by non-destructive testing methods. *Innovatsionnye aspekty sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya regiona: sb. st. po materialam uchastnikov VIII Ezhegodnoy nauch. konf. aspirantov «MGOTU» (Naukograd Korolev, Moskovskaya obl., 17 maya 2018 g.) = Innovative aspects of the socio-economic development of the region : collection of articles based on the materials of the participants of the VIII Annual Scientific Conference. graduate students of MGOTU (Korolev Science City, Moscow region, May 17, 2018).* Naukograd Korolev: Nauchnyy konsul'tant, 2018:387–394. (In Russ.)
 10. Patent № 2478947 C1 Russian Federation, MPK G01N 29/14. *Sposob kontrolya kachestva materialov metodom akusticheskoy emissii = Method of quality control of materials by acoustic emission method.* Shkuratnik V.L., Novikov E.A.; applicant Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosudarstvennyy gornyy universitet» (MGGU); № 2011145604/28; appl. 10.11.2011; publ. 10.04.2013. (In Russ.)
 11. Galimov E.R., Fedyaev V.L., Siraev A.R. et al. Patterns of changes in the operational characteristics of polymer powder coatings depending on the spraying modes. *Novye*

- tekhnologii, materialy i oborudovanie rossiyskoy aviakosmicheskoy otrasli: sb. докладов Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem: v 2 t. (g. Kazan', 10–12 avgusta 2016 g.) = New technologies, materials and equipment of the Russian aerospace industry : collection of reports of the All-Russian Scientific and practical conference with international participation : in 2 volumes (Kazan, August 10–12, 2016). Kazan': Akademiya nauk Respubliki Tatarstan, 2016;1:670–675. (In Russ.)*
12. Afonasenkov A.V., Elizarov A.I. Review of methods for recognizing structured symbols. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*. 2008;(2-1):83–88. (In Russ.)
13. Klyuev V.V. Detection of objects in an image using the Ocu method. *Nauchnoe soobshchestvo studentov. Mezhdistsiplinarnye issledovaniya: sb. st. po materialam LXXI studencheskoy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Novosibirsk, 17 iyunya 2019 g.) = Scientific community of students. Interdisciplinary research : collection of articles based on the materials of the LXXI Student International Scientific and Practical Conference (Novosibirsk, June 17, 2019)*. Novosibirsk: Assotsiatsiya nauchnykh sotrudnikov «Sibirskaya akademicheskaya kniga», 2019;12(71):115–117. (In Russ.)
14. Levchuk S.A., Yakimenko A.A. Investigation of the characteristics of facial recognition algorithms. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Collection of scientific papers of Novosibirsk State Technical University*. 2018;(3-4):40–58. (In Russ.). doi: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-40-58

Информация об авторах / Information about the authors

Виктория Витальевна Кнященко

аспирант,
младший научный сотрудник
лаборатории цифровых двойников
материалов и технологических
процессов их обработки,
Самарский государственный
технический университет
(Россия, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: vv.kiyashchenko@gmail.com

Victoria V. Kiyashchenko

Postgraduate student,
junior researcher of the laboratory of digital
doubles of materials and technological
processes of their processing,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street,
Samara, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 20.11.2023

Поступила после рецензирования/Revised 29.02.2024

Принята к публикации/Accepted 04.03.2024