

Научная статья

УДК 620.197.6:004.93

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-137-148

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.Б. Лаптев<sup>1</sup>, Г.Г. Матишов<sup>2</sup>, А.В. Щербакова<sup>3</sup>, И.Г. Лапшин<sup>3</sup>, И.М. Губайдуллин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия; ssc-ras@ssc-ras.ru

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия; info@rusoil.net

**Аннотация.** Вопросы повышения точности визуального контроля коррозии являются актуальными и не решены до настоящего времени. Разработаны основные подходы к количественной оценке коррозионных поражений металла под лакокрасочным покрытием. Подходы, предусматривающие фотосъемку с разрешением более 30 мегапикселей и обучение программы на образцах без проявления и с проявлением очагов коррозии с использованием современных технологий компьютерного зрения, нейросетевых архитектур и методов обработки изображений, позволят автоматизировать и повысить точность количественной оценки повреждений лакокрасочных покрытий.

**Ключевые слова:** лакокрасочное покрытие, компьютерное зрение, коррозия, ржавчина, оценка коррозионных поражений, сталь, нейросеть

**Для цитирования:** Лаптев А.Б., Матишов Г.Г., Щербакова А.В., Лапшин И.Г., Губайдуллин И.М. Разработка метода количественной оценки повреждения лакокрасочных покрытий с использованием компьютерного распознавания изображений // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-137-148.

Scientific article

## DEVELOPMENT OF A METHOD FOR QUANTITATIVE ASSESSMENT OF PAINT COATINGS DAMAGE USING COMPUTER IMAGE RECOGNITION

A.B. Laptev<sup>1</sup>, G.G. Matishov<sup>2</sup>, A.V. Shcherbakova<sup>3</sup>, I.G. Lapshin<sup>3</sup>, I.M. Gubaidullin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia; ssc-ras@ssc-ras.ru

<sup>3</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia; info@rusoil.net

**Abstract.** The issues of improving the accuracy of visual corrosion monitoring are relevant and are not yet fully resolved. The main approaches to the quantitative assessment of corrosion damage to metal under paint coatings have been developed. The methods involving photography with a resolution over 30 megapixels and training the program on samples both without and with visible corrosion foci using modern computer vision technologies, neural network architectures and image processing methods will make it possible to automate and improve the accuracy of quantitative assessment of paint coatings damage.

**Keywords:** paintwork, computer vision, corrosion, rust, assessment of corrosion damage, steel, neural network

*For citation:* Laptev A.B., Matishov G.G., Shcherbakova A.V., Lapshin I.G., Gubaidullin I.M. Development of a method for quantitative assessment of paint coatings damage using computer image recognition. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-137-148.

### Введение

Защитное действие лакокрасочных покрытий (ЛКП) в первую очередь оценивают визуально. На основании полученных данных принимают решение о дальнейшем исследовании покрытия более точными методами. При этом визуальная оценка во многом зависит от личности оценивающего, освещения, цвета ЛКП и материала подложки. Например, на подложке из алюминиевого или титанового сплава не образуются ярко выраженные рыжие пятна, как на углеродистой стали. Поэтому визуальная оценка возможна только при значительном отличии цвета ЛКП от цвета образующихся продуктов коррозии [1].

Одним из распространенных методов оценки коррозии материалов являются металлографические исследования. Стандартные исследования, такие как определение площади корродированной поверхности, глубины питтингов и межкристаллитной коррозии, могут быть значительно расширены с использованием современных методов обработки изображений [2]. С помощью компьютерного зрения можно определить тип коррозионных поражений [3, 4], выявить локальную [5, 6] и общую коррозию металлов и сплавов [7], оценить профиль коррозионных поражений и отложений [8, 9].

Коррозия по-прежнему остается самой серьезной проблемой, с которой сталкиваются исследователи и промышленность, в том числе при эксплуатации судов, трубопроводов сточных вод, нефте- и газопроводов [10, 11].

В работе [12] для тестирования различных условий окружающей среды предлагается использовать множество подходов или параметров для обнаружения, оценки и прогнозирования коррозии. Своевременный мониторинг с использованием компьютерного зрения и методов обработки изображений можно реализовать с помощью нейронных, беспроводных и передовых сенсорных сетей, больших объемов данных, лазерного и ультразвукового сканирования.

Компьютерное зрение предполагает разработку алгоритмов и методов, позволяющих машинам моделировать или воспроизводить зрение человека в результате машинного обучения. Машина или компьютер обладают способностью воспринимать и анализировать входные визуальные данные, наиболее распространенными среди которых являются изображения и видеоролики.

Обработка изображений – один из многих методов, используемых в компьютерном зрении. Другие методы, такие как сегментация экземпляров, семантическая сегментация, выделение, обнаружение и идентификация объектов, классификация изображений, также важны и широко используются в компьютерном зрении. Использование компьютерного зрения позволяет идентифицировать и классифицировать области коррозии на изображениях наряду с другими методами машинного обучения, такими как конвективная нейронная сеть (CNN) и генетический алгоритм. Это неразрушающий тест, которым можно управлять на расстоянии.

Обработка изображений включает настройку их различных параметров с целью улучшения и трансформации для повышения четкости и качества. Изображения можно преобразовать с использованием множества методов, таких как растягивание, сглаживание, повышение резкости, устранение размытия, фильтрация, закрашивание, восстановление, сжатие и сегментация. Цифровые изображения содержат определенные значения и местоположения, которые представлены пикселями, визуальными компонентами и другими элементами. Каждое из изображений состоит из строк и столбцов пикселей.

Двумерный сигнал обрабатывается в соответствии с конкретной задачей. Входными данными для обработки являются изображения и видео.

Выходными данными являются преобразованные входные изображения и видео. Обработка изображений, рассматриваемая как часть компьютерного зрения, используется для сегментации, фильтрации, повышения резкости и увеличения объема области, поврежденной коррозией. Другие способы обработки изображений включают коррекцию освещенности, подавление шума, повышение контрастности и изменение масштаба изображения.

Процессы компьютерного зрения и обработки изображений для поиска очагов и идентификации типа и интенсивности коррозии включают пять основных этапов: получение, предварительная обработка, сегментация изображения, выделение признаков и классификация изображения.

Реализация сложных методов, таких как прогнозное моделирование, является одной из наиболее актуальных проблем и частой темой исследований в области компьютерного зрения и обработки изображений.

Компьютерное зрение и обработка изображений позволяют получить представление о состоянии материалов. Эти подходы удобны для использования в промышленных и исследовательских целях, поскольку таким образом коррозию можно обнаружить, оценить, проанализировать и поддерживать изделие в рабочем состоянии с помощью дистанционного мониторинга. При этом компоненты, материалы и оборудование, подверженные коррозии, не выводятся из эксплуатации, соответственно производительность не снижается. Кроме того, с помощью этих методов можно определить степень повреждения облицовки, характеристики деформации и видимые внутренние повреждения.

Использование изображений с высоким разрешением позволяет получить всестороннюю оценку поврежденного коррозией участка. Автоматизированный анализ проводится на узлах или кромках, что позволяет снизить затраты на передачу данных и увеличить скорость обнаружения коррозии. Цифровые измерения поврежденного участка можно осуществить намного быстрее, чем получить данные исследований, проведенных инструментальными методами.

В работе [13] представлен метод автоматического обнаружения и анализа коррозионных пятен на корпусах морских судов. В предлагаемом методе несколько снимков с разных позиций и углов обзора вокруг судна регистрируются одновременно, образуя полное трехмерное облако точек. Значения R, G, B (интенсивность красного, зеленого и синего компонентов цвета соответственно), связанные с каждым сканированием и полученные с помощью встроенной камеры, преобразуются в пространство HSV (Hue, Saturation, Value – оттенок, насыщенность, значение), чтобы отделить цветовую составляющую, зависящую от освещенности и интенсивности. С помощью этого цветового компонента в выбранной зоне автоматически обнаруживаются различные дефекты поверхности, такие как коррозионные пятна различной формы и размера, которые затем анализируются и оцениваются количественно, что помогает лучше планировать и оценивать стоимость ремонта и технического обслуживания.

Выполнены исследования с проведением анализа цвета, но уже с применением классификации, основанной на количестве пикселей, содержащих определенные красные компоненты, и компьютерной программы, написанной на языке Python, библиотеки OpenCV для вычисления и классификации изображений, а также мощной платформы Caffe [14, 15].

Аналогичным образом, но с получением снимков посредством облета объекта квадрокоптером [16] и с помощью смартфона [17] реализована идея компьютерного зрения. В работе [18] с использованием автоматизированной системы распознавания изображений проведен мониторинг коррозионного состояния моста. Показано, что вероятность успешного определения ржавых участков, требующих очистки и восстановления ЛКП, достигла 97,48 %. Продолжительность обработки 200 изображений составила 23 с, средняя продолжительность обработки одного изображения: 0,115 с.

Для изучения поведения питтинговой коррозии на ранней стадии использован анализ изображений, основанный на дискретном вейвлет-пакетном преобразовании и фракталах [19].

Кроме того, сочетание компьютерного зрения, картографирования микротрещин, сканирующей электронной микроскопии и нейтронной томографии можно использовать в качестве нового метода обнаружения микробиологической коррозии. До сих пор не существует стандартного подхода к оценке такого вида коррозии [20, 21].

Низкое качество снимков коррозии из-за наличия шумов, помех, искажений, засветки и стабилизации является основной проблемой при использовании компьютерного зрения и методов обработки изображений. Настоятельно рекомендуется применять автоматизированный сбор изображений, когда все методы предварительной обработки встроены в оборудование, что позволяет получить изображение высокого качества. С другой стороны, большинство разработанных методов компьютерного зрения и обработки изображений реализованы на простых кривых и плоских поверхностях. Рекомендуется учитывать и другие сложные конструкции и форму, типичные для тяжелых машин, корпусов судов, мостов и т. д. Кроме того, анализ тенденций можно использовать для прогнозирования прогрессирования коррозии или наростов на материалах [22, 23]. Модель прогнозирования можно применять при проведении технического обслуживания с целью создания автоматизированной системы контроля коррозии.

При защите конструкций с применением ЛКП важным является не только процесс развивающейся коррозии, но и изменение состояния самого покрытия [24, 25]. В конечном итоге изменение покрытия приводит к развитию очагов коррозии, для предотвращения появления которых необходимо анализировать ряд показателей в соответствии с ГОСТ 9.407–2015: изменение блеска (поматовение) и цвета, грязеудержание, меление, растрескивание, выветривание, отслаивание, образование пузырей (вздутие).

Цель исследования – разработка метода автоматизированного анализа изображений для оценки повреждений ЛКП и степени коррозионных поражений поверхности.

### Материалы и методы

В соответствии с научно-исследовательской работой «Изучение эмиссии и токсичности микрочастиц пластика из лакокрасочных покрытий» выполнена экспозиция образцов ЛКП на трех климатических площадках: в Ростовской области, Краснодарском крае и Москве.

Для проведения испытаний использованы ЛКП на основе грунта ГФ-21:

- эмаль акрил-полиуретановая белая;
- эмаль алкидная ПФ-115 голубая;
- эмаль алкидная 3 в 1 по ржавчине коричневая.

Покрытия наносили на специально подготовленные пластины из стали Ст3.

На рис. 1 приведен внешний вид стенда, на рис. 2 – появление первых коррозионных поражений на образцах с ЛКП.



Рис. 1. Стенд с образцами лакокрасочных покрытий на площадке Южного научного центра РАН в с. Кагальник



Рис. 2. Первые проявления коррозии на образцах с акрил-полиуретановой эмалью

Через 2 мес. экспозиции некоторые ЛКП начинают трескаться и отслаиваться. Такие покрытия необходимо вовремя заменять устойчивыми к условиям данного климата ЛКП с применением современных технологий подготовки поверхности и нанесения. Это приведет к снижению эмиссии микрочастиц ЛКП и значительно улучшит экологическую обстановку в РФ.

Для фотосъемки использована зеркальная фотокамера с возможностью смены объективов (например, Canon EOS 5D Mark IV) с макрообъективом с фокусным расстоянием 100 мм для получения высококачественного изображения повреждений ЛКП размером  $<1$  мм. Разрешение матрицы фотокамеры составило 30 мегапикселей (обычно  $6720 \times 4480$  пикселей).

Съемку проводили в стационарных условиях на расстоянии  $50 \pm 5$  см от образца. Для обеспечения однородного освещения использовали два боковых источника мягкого света и переменный центральный свет, что позволило избежать теней и перекрытий.

Поиск и распознавание коррозионных пятен на фотографиях проводили с использованием программного обеспечения для обработки изображений (типа MATLAB или OpenCV) с применением алгоритмов выявления контуров и сегментации изображения. Для обработки данных использовали статистические методы оценки значимости и корреляции между факторами (например, толщина ЛКП, продолжительность воздействия коррозионной среды и т. д.). Эта структура позволяет последовательно проанализировать процесс исследования с фокусом на стали с ЛКП и выявить коррозионные повреждения.

### Результаты и обсуждение

На поверхности стали выделяют три вида коррозии (сплошная коррозия, язвы и пятна), каждый из которых по-разному влияет на степень повреждения поверхности. Для всех типов коррозии есть общие параметры: распределение по площади (измеряется с помощью алгоритмов компьютерного зрения по фотографиям поверхности) и глубине (определяется с помощью изображений, сделанных под микроскопом).

На рис. 3 приведены фотография образца с акрил-полиуретановым покрытием с коррозионным поражением и диаграмма распределения цветов на его поверхности. Посредством разработанной программы выполнено распознавание изображений и определены 12 основных цветов.

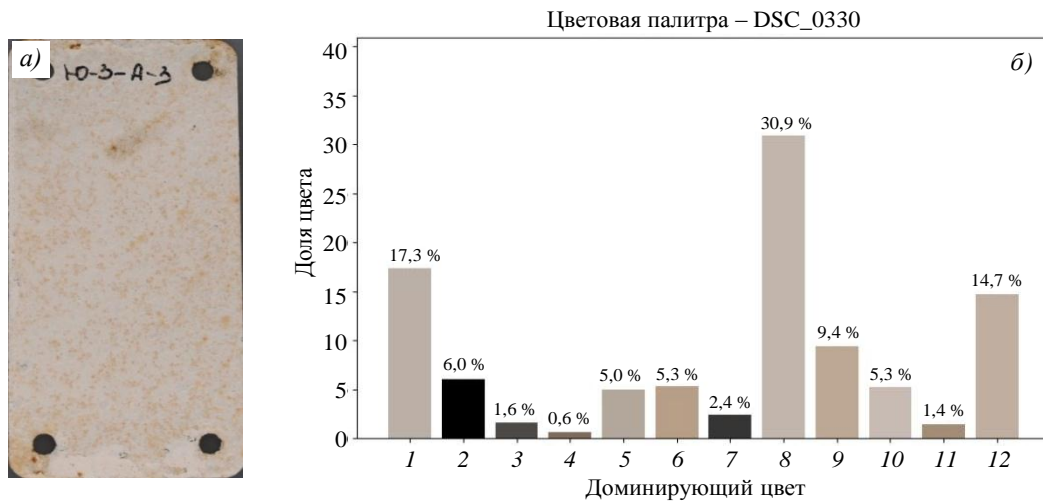


Рис. 3. Образец с акрил-полиуретановым покрытием (а) и диаграмма распределения 12 основных цветов на его поверхности (б)

На рис. 3, б представлено распределение доминирующих цветных оттенков в изображении. Ось X содержит доминирующие цвета. Обозначения на оси X являются номером цвета по направлению сканирования. Ось Y показывает процентное соотношение пикселей (доля от всей площади исследуемой поверхности, относящаяся к каждому доминирующему цвету).

Гистограмма позволяет быстро оценить, какие цвета являются наиболее распространенными в изображении и их относительное преобладание.

Для численного представления данных сформирована табл. 1. Она содержит информацию о доминирующих цветах, найденных в изображении с использованием алгоритма кластеризации KMeans. Каждая строка в таблице представляет один доминирующий цвет. Значения R, G и B изменяются от 0 до 255 и отражают интенсивность красного, зеленого и синего компонентов цвета соответственно. Доля цвета, т. е. процентное отношение пикселей данного доминирующего цвета к общему количеству пикселей в изображении, позволяет понять, насколько каждый доминирующий цвет преобладает.

Таким образом, для цветного анализа получены структурированные данные в табличном виде и наглядное графическое представление, что позволяет детально изучить и понять распределение доминирующих цветовых оттенков в изображении.

Таблица 1

**Распределение цветов и их характеристика для образца с акрил-полиуретановым покрытием**

Условный номер цвета	R	G	B	R – B	Количество пикселей	Доля цвета, %
1	187	176	168	19	755624	17,35
2	0	0	0	0	263396	6,05
3	77	73	71	6	67627	1,55
4	127	108	94	33	25783	0,59
5	179	166	155	24	217375	4,99
6	182	158	135	47	232534	5,34
7	55	52	52	3	104758	2,40
8	193	181	172	21	1347411	30,93
9	189	167	149	40	408446	9,38
10	200	187	179	21	228741	5,25
11	163	141	119	44	62277	1,43
12	192	174	160	32	642348	14,75

Из рис. 3, а следует, что акрил-полиуретановое покрытие имеет низкую защитную способность, на всей поверхности образца видны проявления коррозии стали – ржавчина. По диаграмме на рис. 3, б можно оценить количество ярко выраженных проявлений ржавчины и долю поверхности, загрязненной продуктами коррозии. При анализе полученных данных по разнице интенсивности красного и синего цветов  $R - B$ , которая для базового цвета 8 составляет 21, отклонения в красную область являются проявлениями коррозии – ржавчины. Например,  $R - B = 47$  для цвета 6,  $R - B = 40$  – для цвета 9 (табл. 1). Доля площади поверхности, загрязненной ржавчиной ( $R - B > 21$ ), составляет 36,48 %.

На рис. 4 и 5 приведены фотографии образцов с коричневым и голубым алкидным ЛКП и диаграммы распределения цветов на их поверхности. Значения интенсивности красного, зеленого и синего цветов, количество пикселей, занятых данным цветом, и доля цвета приведены в табл. 2 и 3.

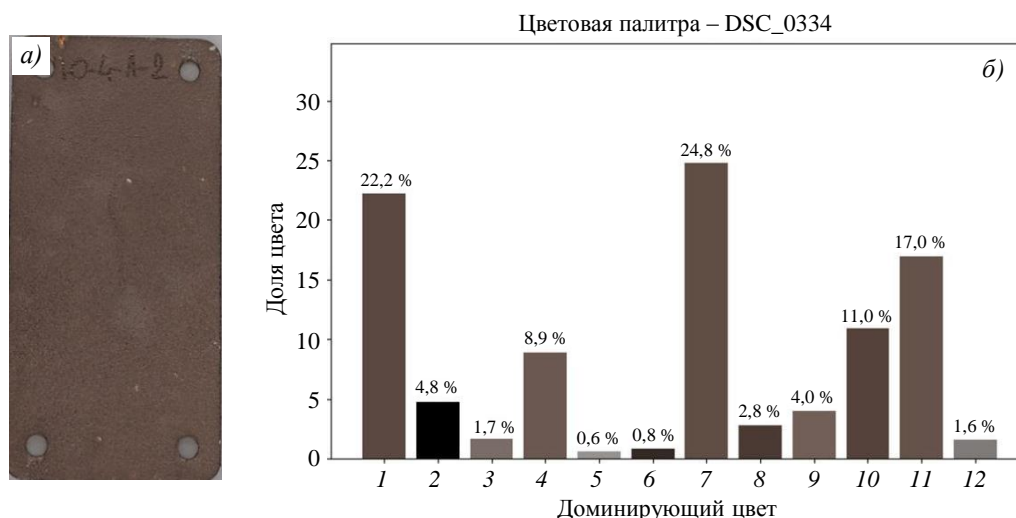


Рис. 4. Образец с коричневым алкидным покрытием (а) и диаграмма распределения 12 основных цветов на его поверхности (б)

Таблица 2

**Распределение цветов и их характеристика для образца с алкидным покрытием коричневого цвета**

Условный номер цвета	R	G	B	$R - B$	Количество пикселей	Доля цвета, %
1	91	72	64	27	953734	22,23
2	0	0	0	0	203908	4,75
3	122	108	102	20	70947	1,65
4	107	88	80	27	379940	8,85
5	151	145	144	7	25719	0,60
6	52	41	37	15	34196	0,80
7	96	77	68	28	1064210	24,80
8	74	58	51	23	120972	2,82
9	114	96	88	26	172796	4,03
10	85	67	59	26	470085	10,95
11	101	82	74	27	728023	16,97
12	128	122	121	7	66684	1,55

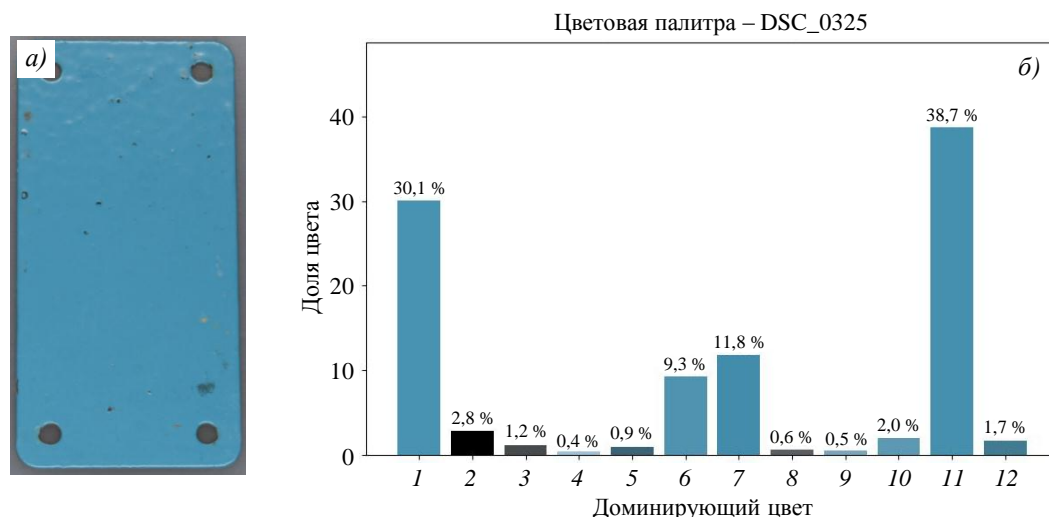


Рис. 5. Образец с голубым алкидным покрытием и диаграмма распределения 12 основных цветов на его поверхности

Таблица 3

**Распределение цветов и их характеристика  
для образца с алкидным покрытием голубого цвета**

Условный номер цвета	R	G	B	R – B	Количество пикселей	Доля цвета, %
1	72	146	178	-106	1245378	30,05
2	0	0	0	0	116272	2,80
3	70	76	78	-8	48692	1,17
4	157	194	213	-56	16342	0,39
5	59	100	118	-59	38390	0,93
6	80	147	176	-96	384416	9,28
7	67	140	171	-104	487969	11,78
8	91	95	97	-6	24303	0,59
9	121	168	189	-68	21931	0,53
10	94	153	179	-85	84687	2,04
11	69	143	175	-106	1605513	38,75
12	66	124	148	-82	69656	1,68

Из рис. 4 и данных табл. 2 видно, что для образца с коричневым алкидным покрытием цвету ржавчины в наибольшей степени соответствует цвет б, площадь поверхности, пораженной коррозией, составляет 0,6 %.

Согласно данным табл. 3, для образца с голубым алкидным покрытием  $R - B \leq 0$ , т. е. проявления ржавчины на поверхности отсутствуют. Образец выдержал испытания и ЛКП устойчиво к воздействию окружающей среды.

### Заключения

Вопросы повышения точности визуального контроля коррозии являются актуальными и не решены до настоящего времени. Разработаны подходы к количественной оценке распространения коррозии на стальных деталях, покрытых ЛКП.

При оценке стойкости ЛКП к воздействию окружающей среды должны быть сделаны фотографии деталей или образцов с разрешением не менее 30 мегапикселей

(обычно 6720×4480 пикселей), что обеспечивает высокую детализацию для последующей обработки изображений с помощью методов компьютерного зрения и машинного обучения.

Необходимо проводить обучение системы компьютерного зрения на обучающем датасете, включающем образцы без проявлений коррозии и с очагами коррозии. Поскольку ЛКП может иметь различную цветовую гамму, рекомендуется выделять цветовые признаки, в частности определять значение разности R – B, что позволяет автоматизировать обнаружение ржавчины с использованием методов цветовой сегментации, кластеризации и обучения моделей на основе алгоритмов машинного обучения, например Support Vector Machine (метод опорных векторов), Random Forest («случайный лес»), CNN.

При исследовании повреждений ЛКП, нанесенных на подложки из алюминия, титана, нержавеющей стали и других материалов, продукты коррозии которых не изменяют цвет ЛКП, подход необходимо скорректировать. Например, для оценки трещин рекомендуется учитывать их цвет и текстуру, а для выявления вздутий необходимо использовать одностороннее освещение с тенью для выявления изменений рельефа поверхности с применением методов структурированного света, 3D-моделирования и анализа глубинных карт.

Данные подходы с использованием современных технологий компьютерного зрения, нейросетевых архитектур и методов обработки изображений позволят автоматизировать и повысить точность количественной оценки повреждений ЛКП. В перспективе планируется внедрение систем реального времени (real-time processing) с использованием глубоких нейронных сетей, таких как YOLO, EfficientDet или Mask R-CNN, для распознавания дефектов на изображениях с автоматической выдачей информации о степени повреждения, наличии коррозии и др.

Для обучения и тестирования таких моделей предполагается создание базы данных из 100–200 аннотированных образцов, что позволит получить статистическую репрезентативность и высокую точность автоматического анализа. Это обеспечит получение исчерпывающей количественной информации о состоянии ЛКП, повысит эффективность систем мониторинга и автоматизированного технического обслуживания, а также снизит риск возникновения аварийных ситуаций за счет своевременного выявления и оценки повреждений.

*Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2024-528 от 24.04.2024 на реализацию крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития).*

#### Список источников

1. Кривушина А.А., Коган А.М., Старцев В.О. Сохраняемость свойств лакокрасочных покрытий после воздействия климатических факторов и микромицетов-деструкторов // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-66-76.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // Коррозия: материалы, защита. 2013. № 12. С. 6–18.
3. Choi K.Y., Kim S.S. Morphological analysis and classification of types of surface corrosion damage by digital image processing // Corrosion Science. 2005. Vol. 47. No. 1. P. 1–15.
4. Pidaparti R.M., Aghazadeh B.S., Whitfield A. et al. Classification of corrosion defects in NiAl bronze through image analysis // Corrosion Science. 2010. Vol. 52. No. 11. P. 3661–3666.

5. Codaro E.N., Nakazato R.Z., Horovistiz A.L. et al. An image processing method for morphology characterization and pitting corrosion evaluation // *Materials Science and Engineering: A*. 2002. Vol. 334. P. 298–306.
6. Codaro E.N., Nakazato R.Z., Ribeiro R.B. An image analysis study of pit formation on Ti–6Al–4V // *Materials Science and Engineering: A*. 2003. Vol. 341. P. 202–210.
7. Tao L., Song S., Zhang X. et al. Image analysis of atmospheric corrosion of field exposure high strength aluminium alloys // *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 254. No. 21. P. 6870–6874.
8. Wang S., Song S. Image analysis of atmospheric corrosion exposure of zinc // *Materials Science and Engineering: A*. 2004. Vol. 385. No. 1-2. P. 377–381.
9. Виноградов С.С., Теркулова Ю.А., Курдюкова Е.А., Никифоров А.А. Износостойкие, антифрикционное и фреттингостойкое покрытие на основе Ni–B // *Труды ВИАМ*. 2015. № 1. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-2-2.
10. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник РАН*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
11. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
12. Jamaludin A.A., Imran S., Mahadi Md.A. et al. Computer Vision and Image Processing Approaches for Corrosion Detection // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11. Art. 1954. DOI: 10.3390/jmse11101954.
13. Aijazi A.K., Malaterre L., Tazir M.L. et al. Detecting and analysing corrosion spots on the hull of large marine vessels using colored 3D lidar point clouds // *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016. Vol. 1. P. 153–160.
14. Petricca L., Moss T., Figueroa G., Broen S. Corrosion Detection Using A.I: A Comparison of Standard Computer Vision Techniques and Deep Learning Model // *Computer Science & Information Technology*. 2016. Vol. 6. P. 91–99. DOI: 10.5121/csit.2016.60608.
15. Idris S.A., Jafar F.A., Jamaludin Z., Blar N. Improvement of corrosion detection using vision system for pipeline inspection // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 761. Art. 1.
16. Ortiz A., Bonnin-Pascual F., Garcia-Fidalgo E. Visual inspection of vessels by means of a micro-aerial vehicle: an artificial neural network approach for corrosion detection // *Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference*. Heidelberg: Springer, 2016. 320 p.
17. Igoe D., Parisi A.V. Characterization of the corrosion of iron using a smartphone camera // *Instruments Science Technology*. 2016. Vol. 44 (2). P. 139–147. DOI: 10.1080/10739149.2015.1082484.
18. Son H., Hwang N., Kim C. Rapid and automated determination of rusted surface areas of a steel bridge for robotic maintenance systems // *Automation in Construction*. 2014. Vol. 42. P. 13–24. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.02.016.
19. Alkanhal T.A. Image processing techniques applied for pitting corrosion analysis // *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2014. Vol. 3 (1). P. 315–336.
20. Grengg C., Müller B., Staudinger C. et al. High-resolution optical pH imaging of concrete exposed to chemically corrosive environments // *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 116. P. 231–237.
21. Лаптев А.Б., Коган А.М., Николаев Е.В. и др. Математическое моделирование процессов получения и старения полимерных композиционных материалов // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2024. Т. 69. № 1. С. 65–75. DOI: 10.29235/1561-8358-2024-69-1-65-75.
22. Старцев В.О., Куцевич К.Е., Хрулев К.А., Молоков М.В. Прогнозирование температуры поверхности образцов композиционных материалов на основе клеевых препрегов при экспонировании в климатических условиях // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2017. № 9. С. 24–31.
23. Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Загорских О.А., Павлов М.Р., Горбовец М.А. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор). Часть 2. Образование пассивных пленок и сероводородное растрескивание сталей // *Труды ВИАМ*. 2022. № 5 (111). Ст. 12. URL: <https://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-138-146.

24. Горбовец М.А., Николаев Е.В., Старцев В.О. Климатические испытания материалов для Арктики. Часть 1. Требования к материалам // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). Ст. 12. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-180-188.
25. Горбовец М.А. Николаев Е.В., Старцев В.О. Климатические испытания материалов для Арктики. Часть 2. Требования к испытаниям // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 1 (78). Ст. 12. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-138-147.

### References

1. Krivushina A.A., Kogan A.M., Startsev V.O. Preservation of the properties of paint coatings after exposure to climatic factors and micro-mycetes-destructors. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-66-76.
2. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M., Panin S.V. Corrosive aggressiveness of the coastal atmosphere. Part 1. Influencing factors (review). *Korroziya: materialy, zashchita*, 2013, no. 12, pp. 6–18.
3. Choi K.Y., Kim S.S. Morphological analysis and classification of types of surface corrosion damage by digital image processing. *Corrosion Science*, 2005, vol. 47, no. 1, pp. 1–15.
4. Pidaparti R.M., Aghazadeh B.S., Whitfield A. et al. Classification of corrosion defects in NiAl bronze through image analysis. *Corrosion Science*, 2010, vol. 52, no. 11, pp. 3661–3666.
5. Codaro E.N., Nakazato R.Z., Horovistiz A.L. et al. An image processing method for morphology characterization and pitting corrosion evaluation. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, vol. 334, pp. 298–306.
6. Codaro E.N., Nakazato R.Z., Ribeiro R.B. An image analysis study of pit formation on Ti–6Al–4V. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, vol. 341, pp. 202–210.
7. Tao L., Song S., Zhang X. et al. Image analysis of atmospheric corrosion of field exposure high strength aluminium alloys. *Applied Surface Science*, 2008, vol. 254, no. 21, pp. 6870–6874.
8. Wang S., Song S. Image analysis of atmospheric corrosion exposure of zinc. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 385, no. 1–2, pp. 377–381.
9. Vinogradov S.S., Terkulova Yu.A., Kurdyukova E.A., Nikiforov A.A. Wear-proof, antifriction and fretting-resistant coating based on Ni–B. *Trudy VIAM*, 2015, no. 1, paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 01, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-2-2.
10. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik RAN*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
11. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
12. Jamaludin A.A., Imran S., Mahadi Md.A. et al. Computer Vision and Image Processing Approaches for Corrosion Detection. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, vol. 11, art. 1954. DOI: 10.3390/jmse11101954.
13. Aijazi A.K., Malaterre L., Tazir M.L. et al. Detecting and analysing corrosion spots on the hull of large marine vessels using colored 3D lidar point clouds. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, vol. 1, pp. 153–160.
14. Petricca L., Moss T., Figueroa G., Broen S. Corrosion Detection Using A.I: A Comparison of Standard Computer Vision Techniques and Deep Learning Model. *Computer Science & Information Technology*, 2016, vol. 6, pp. 91–99. DOI: 10.5121/csit.2016.60608.
15. Idris S.A., Jafar F.A., Jamaludin Z., Blar N. Improvement of corrosion detection using vision system for pipeline inspection. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 761, art. 1.
16. Ortiz A., Bonnin-Pascual F., Garcia-Fidalgo E. Visual inspection of vessels by means of a micro-aerial vehicle: an artificial neural network approach for corrosion detection. *Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference*. Heidelberg: Springer, 2016, 320 p.

17. Igoe D., Parisi A.V. Characterization of the corrosion of iron using a smartphone camera. *Instruments Science Technology*, 2016, vol. 44 (2), pp. 139–147. DOI: 10.1080/10739149.2015.1082484.
18. Son H., Hwang N., Kim C. Rapid and automated determination of rusted surface areas of a steel bridge for robotic maintenance systems. *Automation in Construction*, 2014, vol. 42, pp. 13–24. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.02.016.
19. Alkanhal T.A. Image processing techniques applied for pitting corrosion analysis. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2014, vol. 3 (1), pp. 315–336.
20. Grengg C., Müller B., Staudinger C. et al. High-resolution optical pH imaging of concrete exposed to chemically corrosive environments. *Cement and Concrete Research*, 2019, vol. 116, pp. 231–237.
21. Laptev A.B., Kogan A.M., Nikolaev E.V. et al. Mathematical modeling of the processes of production and aging of polymer composite materials. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 65–75. DOI: 10.29235/1561-8358-2024-69-1-65-75.
22. Startsev V.O., Kutsevich K.E., Khrulev K.A., Molokov M.V. Prediction of the surface temperature of samples of composite materials based on adhesive prepregs when exposed to climatic conditions. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2017, no. 9, pp. 24–31.
23. Laptev A.B., Zakirova L.I., Zagorskikh O.A., Pavlov M.R., Gorbovets M.A. Methods of investigation of the processes of corrosion-mechanical destruction and hydrogenation of metals (review). Part 2. Formation of passive films and hydrogen sulfide cracking of steels. *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-138-146.
24. Gorbovets M.A., Nikolaev E.V., Startsev V.O. Climate testing of Arctic materials. Part 1. Requirements for materials. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-180-188.
25. Gorbovets M.A., Nikolaev E.V., Startsev V.O. Climate testing of Arctic materials. Part 2. Test requirements. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 1 (78), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-138-147.

### Информация об авторах

**Лаптев Анатолий Борисович**, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Матишов Геннадий Григорьевич**, научный руководитель, академик РАН, ЮИЦ РАН, [ssc-ras@ssc-ras.ru](mailto:ssc-ras@ssc-ras.ru)

**Щербаква Алина Вячеславовна**, аспирант, УГНТУ, [info@rusoil.net](mailto:info@rusoil.net)

**Лапшин Игорь Геннадиевич**, инженер-лаборант, УГНТУ, [info@rusoil.net](mailto:info@rusoil.net)

**Губайдуллин Ирек Марсович**, профессор кафедры, д.ф.-м.н., УГНТУ, [info@rusoil.net](mailto:info@rusoil.net)

### Information about the authors

**Anatoly B. Laptev**, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Gennady G. Matishov**, Scientific Adviser, Academician of the RAS, SSC of the RAS, [ssc-ras@ssc-ras.ru](mailto:ssc-ras@ssc-ras.ru)

**Alina V. Shcherbakova**, Graduate Student, USPTU, [info@rusoil.net](mailto:info@rusoil.net)

**Igor G. Lapshin**, Laboratory Engineer, USPTU, [info@rusoil.net](mailto:info@rusoil.net)

**Irek M. Gubaidullin**, Professor of Chair, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), USPTU, [info@rusoil.net](mailto:info@rusoil.net)

Статья поступила в редакцию 30.06.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 09.07.2025.  
The article was submitted 30.06.2025; approved and accepted for publication after reviewing 09.07.2025.