

## Показатели качества и снижение трудоемкости испытаний лакокрасочных покрытий путем применения цифровых технологий к анализу поверхности покрытий

*Н.М. Антонова, О.С. Овчинников*

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им.  
М.И. Платова, Новочеркасск*

**Аннотация:** Показана возможность оценки качества лакокрасочных покрытий путем анализа состояния поверхности изделий цифровыми методами. В условиях промышленного предприятия проведен сравнительный анализ состояния покрытий АК-1301 и Tikkurila Metallista, подвергнутых воздействию агрессивных сред: воды, бензина. По цифровым изображениям поверхности проведена оценка адгезионной прочности и поверхностной пористости покрытий в состоянии «до-после» воздействия сред. Показано, что наиболее высокой адгезионной прочностью и химической стойкостью к воде и бензину обладает автоэмаль АК-1301.

**Ключевые слова:** лакокрасочное покрытие, адгезия, поверхностная пористость, агрессивная среда, цифровое изображение, пиксель.

**Введение.** Широкое использование лакокрасочных материалов в промышленности диктует необходимость оценки их качества и прогнозирование поведения в различных эксплуатационных условиях с минимальными временными и экономическими затратами. На Каменском станкостроительном заводе ЧПУ станков Twitte для защиты металлических конструкций от коррозии используются лакокрасочные покрытия (далее ЛКП). Оценка качества покрытий производится путем визуального осмотра. Заключение имеют преимущественно описательный характер и касаются видимых дефектов – пузырей, отслоений. Получение результатов такого рода требует временных затрат, отличается трудоемкостью, а результаты нередко субъективны. Однако, именно барьерный фактор покрытия - наличие проколов, трещин, кратеров обуславливает отсутствие или наличие антикоррозионных свойств ЛКП.

Одним из перспективных направлений исследований, направленных на решение проблемы, связанной с анализом и диагностикой дефектов на

---

поверхности покрытий, является цифровая обработка изображений их поверхностей. В настоящее время количество теоретических исследований, связанных с развитием анализа и обработки видеoinформации крайне велико. Значительная часть исследований посвящена совершенствованию и оптимизации метода глубинной сегментации изображений, с использованием модифицированного алгоритма преобразования Фурье [1]. Предпринимаются попытки унифицировать режимы сегментации по источникам изображений – видимых, рентгеновских, тепловых, инфракрасных [2]. Исследований, посвященных практическим задачам, характерным для промышленных предприятий, меньше. Они касаются преимущественно проблем деструкции материалов, достоверной идентификации дефектов и сочетают сегментацию изображений с методом опорных векторов [3, 4]. Большая часть работ касается применения нейронных сетей [5], однако отмечается, что по мере роста и расширения сетей возникает необходимость их оптимизации, а универсальных решений пока нет [6]. Рассматриваются возможности улучшения качества изображений за счет пиксельных подходов [7, 8]. Поэтому разработка и применение программного модуля, позволяющего за сжатые сроки произвести анализ и оценку качества поверхности изделий, представляет собой актуальную задачу. Для получения объективной оценки защитных свойств покрытий нами, с использованием пиксельного подхода, была разработана программа, не требующая специальных навыков исполнителя, позволяющая численно оценить зону локальных дефектов в условиях серийного производства.

В настоящей работе с помощью программного модуля для ЭВМ «ADID», разработанной в «Южно-Российском государственном политехническом университете (НПИ) имени М.И. Платова» [9] произведена оценка качества ЛКП АК-1301, используемой для защиты металлоконструкций на Каменском станкостроительном заводе и краски

---

сравнения Tikkurila Metallista. Для количественной оценки зон морфологических неоднородностей поверхности использован пиксельный подход (отношение зон дефектов к площади изображения). Детально порядок расчета и работы программного модуля «ADID» изложен авторами в работах [5, 7].

**Цель исследования.** С помощью программы «ADID» оценить состояние лакокрасочных покрытий в исходном состоянии и после воздействия агрессивных сред путем анализа цифровых изображений поверхности.

**Задачи исследования.** Определить адгезионную прочность и поверхностную пористость покрытий АК-1301, Tikkurila Metallista в состоянии «до / после» воздействия агрессивных сред.

**Материалы и методы.** Оценивали адгезию и пористость покрытий автоэмали АК-1301, Tikkurila Metallista, в исходном состоянии и после погружения образцов с ЛКП в агрессивные среды: воду, бензин. Адгезионную прочность образцов определяли методом решетчатых надрезов, в соответствии с ГОСТ 31149-2014 «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза», по шестибальной шкале. Поверхностную пористость определяли согласно работе [10]. Химическая стойкость покрытий к агрессивным средам исследовалась по стандартной методике [10] и согласно ГОСТ 9.403 – 80 «Единая система защиты от коррозии и старения», погружением образцов в агрессивные среды. Использовали стальные образцы с покрытиями (сталь 08кп), с размерами 150x100 мм. Технические характеристики эмали АК-1301 предусматривают устойчивость покрытия к воздействию бензина и воды. Стойкость в указанных средах устанавливали погружением образцов в бензин (в течение 48 часов) и воду (24 часа) ГОСТ 9.403 – 80 и методике [10].

---

Изображения получали с помощью микроскопа для металлографии ADFU300 и USB микроскопа МИКМЕД 2000X 5.0 Каменского технологического института (филиала). Количественная оценка адгезии покрытий в баллах и поверхностной пористости осуществлялась по цифровым изображениям поверхности ЛКП, пиксельным подходом.

С помощью разработанной авторами программы [9] по цифровым изображениям поверхности ЛКП, осуществлялась количественная оценка следующих характеристик покрытий: адгезия в баллах, относительная площадь отслоений и поверхностная пористость в процентах.

**Результаты и обсуждение.** Результаты оценки состояния поверхности ЛКП в исходном состоянии приведены в таблице 1. Примеры расчета с помощью программного модуля «ADID» адгезии, площади отслоения покрытий для автоэмали АК-1301 (красный) и пористости Tikkurila Metallista (белый) в исходном состоянии показаны на рисунках 1 – 2. Время расчета для адгезионной прочности одной пластинки по стандартной методике, согласно ГОСТ 31149-2014 составляет порядка 20-15 минут. Время расчета одного изображения с помощью программы «ADID» не превышает 1 секунду. Результаты расчета свидетельствуют, что показатели покрытий АК-1301 и Tikkurila Metallista в исходном состоянии сопоставимы, покрытия обладают высокой адгезионной прочностью и низкой пористостью.

Таблица № 1

Результаты оценки состояния поверхности ЛКП в исходном состоянии

Характеристика	Покрытие	
	АК-1301	Tikkurila Metallista
Цвет	красный/белый	красный/белый
Адгезия, балл	0/0	0/1
Отслаивание, %	< 4,0 / < 3,0	< 4,0 / < 6,0
Поверхностная пористость, % (с размером пор более $1 \cdot 10^{-2}$ см)	- / -	не значительная / < 6,0

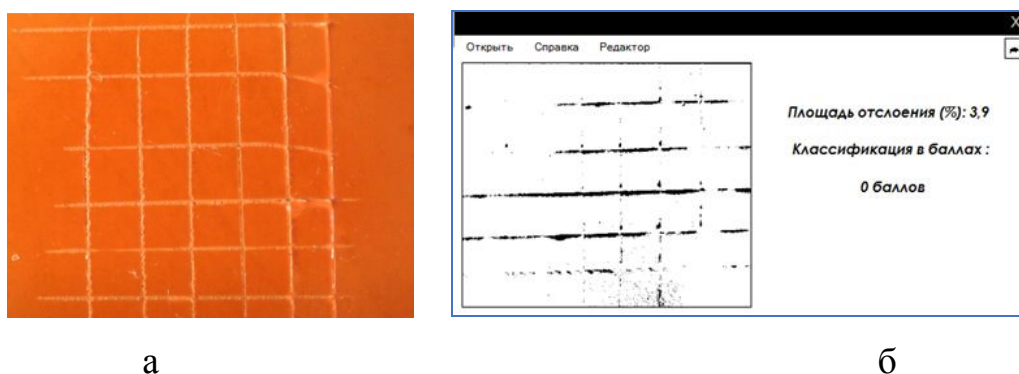


Рис. 1. – Пример оценки адгезионной прочности покрытия АК-1301 (красный): (а) – исходное изображение, (б) – результат расчета

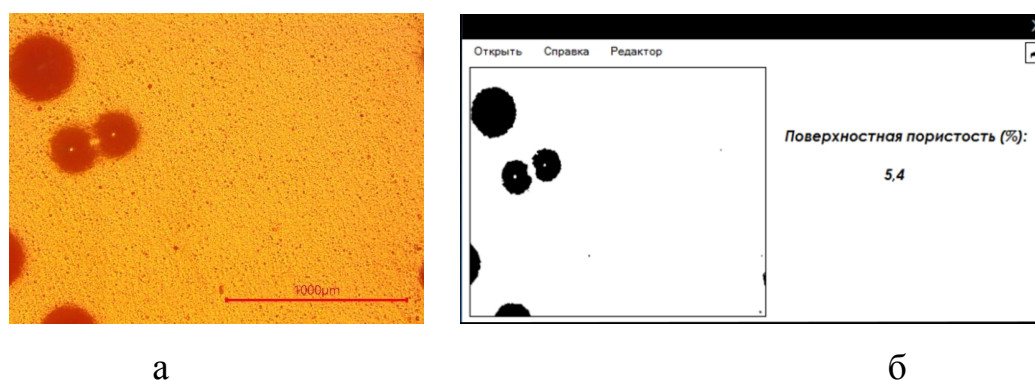


Рис. 2. – Пример оценки поверхностной пористости покрытия Tikkurila Metallista (белый): (а) – исходное изображение, (б) – результат расчета

Результаты оценки антикоррозионных свойств покрытий после испытаний в агрессивных средах представлены в таблице 2 и на гистограмме (рисунок 3).

*Адгезионная прочность покрытий.* Результаты испытаний покрытий после воздействия агрессивных сред приведены в таблице 2.

После испытаний в воде внешний вид покрытий АК-1301 и Tikkurila Metallista для поверхностей, не имеющих надрезов, практически не изменился. Форма, размер первоначальных пор сохранились: не сквозные, открытые (АК – 1301), тупиковые и открытые микропоры (Tikkurila Metallista). В целом, оба покрытия достаточно устойчивы к воде.

Таблица № 2

Адгезионная прочности покрытий АК-1301 и Tikkurila Metallista после испытаний в агрессивных средах

Характеристика	Покрытие		Среда	Т, °
	АК-1301	Tikkurila Metallista		
Цвет	красный/белый	красный/белый		
Адгезия, балл	1 / 1	2 / 1	вода	20
	1/0	6/6	бензин	20
Отслаивание, %	< 6,0 / < 6,0	< 10,0 / < 5,0	вода	20
	< 5,2 / < 3,0	< 82,0 / < 67,0	бензин	20

При наличии решетки надрезов на образцах с ЛКП различия визуально более заметны: на поверхности автоэмали АК – 1301 края надрезов гладкие, однако имеются мелкие чешуйки отслоений, локальные зоны побеления покрытия, снижение блеска. Покрытие АК-1301 устойчиво к воде (адгезия 1 балл), обладает достаточной прочностью сцепления с металлической поверхностью. Относительная площадь отслоений изменилась незначительно: от 4 % до 6 %. Защитные свойства Tikkurila Metallista в среде – вода, при наличии решетки надрезов ниже. В местах пересечений надрезов наблюдается коррозия металла, изменение оттенка покрытий. Адгезионная прочность покрытий Tikkurila Metallista составляет 1-2 баллов, поверхность отслоений возрастает от 6 % до 10 %. Рассматриваемые покрытия сформированы на гидрофильных подложках. Энергия взаимодействия таких шероховатых подложек (сталь 08кп) с водой достаточно высока. Прочность соединения покрытий с недеформирующимися подложками после контакта с водой меняется незначительно. Следовательно, проникновение жидкости через зону надреза, а также диффузия ее через покрытие также незначительны. Микроскопический анализ показал, что при отсутствии искусственно

нанесенных повреждений (надрезы, сколы) ЛКП сохраняет хорошую барьерную роль, защищая поверхность металла от коррозии.

К воздействию агрессивной среды – бензина (таблица 2), АК – 1301 устойчива, адгезионная прочность составляет 0-1 баллов (отслаивание менее 6 %). На поверхности покрытий Tikkurila Metallista наблюдаются множественные пузыри, сморщивание поверхности, анизодиаметрические трещины (рисунок 3). Покрытие практически полностью отслоилось, адгезионная прочность упала до 6 баллов.

Известно, что пузыри являются довольно распространенным явлением при испытании покрытий в жидких средах. Причинами возникновения пузырей является неодинаковая активность паров по обе стороны полупроницаемой пленки, ослабление адгезионного взаимодействия покрытия с подложкой, наличие осмотически активных веществ. Дополнительным фактором является наличие на поверхности Tikkurila Metallista кратеров, сквозных пор. Образование оспин, кратеров является, как правило, результатом агломерации пигментов в порошковых красках и их полидисперсности. Сморщивание, волнистость возникают при плохом растекании состава и для исправления дефекта, как правило, требуют корректировки вязкости состава. Диффузия бензина сквозь такие поры приводит к набуханию покрытия, уменьшению его твердости, росту гетерогенности системы по толщине покрытия. Возникающие в результате пузыри и складки-неровности приводят к практически полному отслаиванию покрытия Tikkurila Metallista в среде бензин от металлической подложки. Визуальный осмотр металлической подложки после надрезания пузыря показал, что коррозия металла под пузырями не наблюдается.





Рис. 3. – Дефекты на поверхности Tikkurila Metallista, белый (500X):  
сморщивание– (а); вздутие – (б), трещина – (в)

Для устранения подобных дефектов - пузырей, проколов, складок необходимо получение бездефектного покрытия, формирование его свойств в процессе отверждения. Настоящая работа направлена на получение количественных ускоренных оценок неоднородностей поверхности ЛКП и механизма образования пузырей, раковин не затрагивает. Используемые методы оценки повреждений поверхности (как правило, визуального сравнения с трафаретами) не позволяют оценить объективно степень повреждений покрытий. Особенной трудоемкостью отличается анализ растрескивания покрытий. Это явление обусловлено ростом внутренних напряжений в пленке, возникающих за счет набухания покрытия или структурных превращений, приводящих к ее охрупчиванию. Складчатость ЛКП (сморщивание), наблюдается только при воздействии на покрытие химических агрессивных сред. Анализ анизодиаметрических образований включает оценку размеров по длине, ширине. Рекомендуемые методики [9] базируются на субъективных визуальных наблюдениях при помощи лупы, и объективной информации не обеспечивают. В частности, оценка с помощью программного модуля относительной площади вздутия покрытия и трещины (рисунок 3 б, в) дает соответственно, результаты 33,0 % и 4,7 %. Такой подход позволяет в производственных условиях, не исследуя



структурных особенностей лакокрасочных материалов, оценить характеристики покрытий в зависимости от назначения изделий. Таким образом, получение количественной информации по зонам отслоений в сочетании со стандартными приемами классификации типов дефектов позволяют дать сравнительно полную характеристику состояния ЛКП.

*Поверхностная пористость покрытий.* Результаты исследования поверхностной пористости (с размером пор более  $1 \cdot 10^{-2}$  см) ЛКП в агрессивных средах представлены на рисунке 4.

Результаты испытаний свидетельствуют, что пористость покрытия АК-1301 и Tikkurila Metallista в воде и бензине практически не изменяется: ~ 0,2 % и 6,0 % соответственно. Однако при сравнительно невысокой поверхностной пористости Tikkurila Metallista агрессивная среда легко диффундирует на металлическую подложку. Как и при наличии механических повреждений в виде надрезов, наблюдаются множественные отслоения ЛКП, вздутия и трещины, как результат возникающих концентраторов напряжений в структуре покрытия. Как следствие, прочность сцепления Tikkurila Metallista с металлической подложкой резко ухудшается. Микроскопический анализ поверхностей покрытий показал, что на поверхности АК - 1301 формируются преимущественно тупиковые субмикropоры (от  $10^{-4}$  см до  $10^{-2}$  см). Для поверхности Tikkurila Metallista характерно наличие различимых невооруженным глазом крупных и мелких тупиковых и открытых пор, размерами до  $10^{-1}$  см, отдельных кратеров. Образованию кратеров способствуют крупные частицы и агрегаты, возникающие за счет слипания частиц порошка пигмента различных размеров (рисунок 5 б). Кардинальные различия в устойчивости к химической среде ЛКП связаны, вероятно, с формированием разного типа пор в покрытиях: тупиковых - АК-1301, сквозных туннельных пор - Tikkurila Metallista. Примеры таких пор приведены на рисунке 5.

---

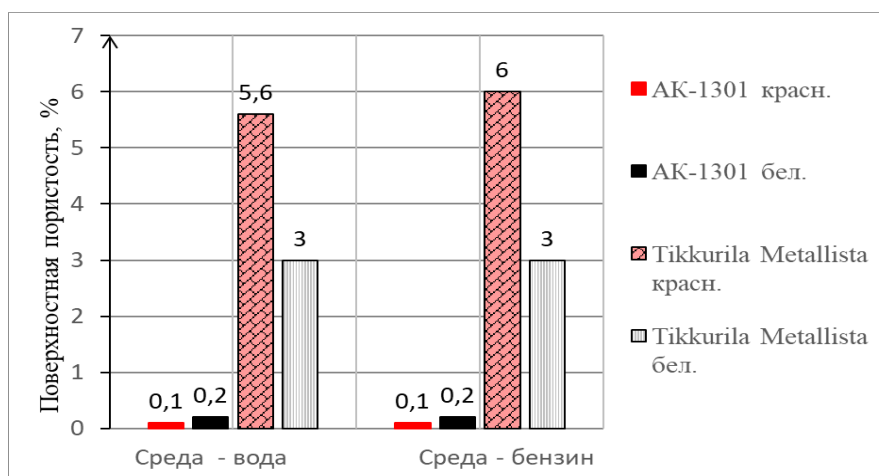


Рис. 4. – Поверхностная пористость покрытий АК-1301 и Tikkurila Metallista после испытаний в агрессивных средах

На поверхности АК – 1301 поры открытые (рисунок 5 а), несквозные, количество их незначительно. На поверхности Tikkurila Metallista – наряду с тупиковыми имеются сквозные поры, до подложки (рисунок 5 б, в). Нанесение покрытий на металлические подложки и испытания проводились в идентичных условиях, поэтому наличие и особенности формирования пор обусловлены строением и структурой пленкообразователей, пигментов, наполнителей, модификаторов, используемых в конкретных лакокрасочных материалах. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о высоких показателях качества автоэмали АК-1301. Для выполнения защитной функции Tikkurila Metallista пригодна ограничено. Следовательно, рецептура, физико-химические свойства и структура ЛКП АК-1301 определяют ее высокую адгезию и барьерные свойства. Более эффективное использование покрытия Tikkurila Metallista требует, вероятно, дополнительного диспергирования порошковых частиц и корректировки вязкости жидкой краски.

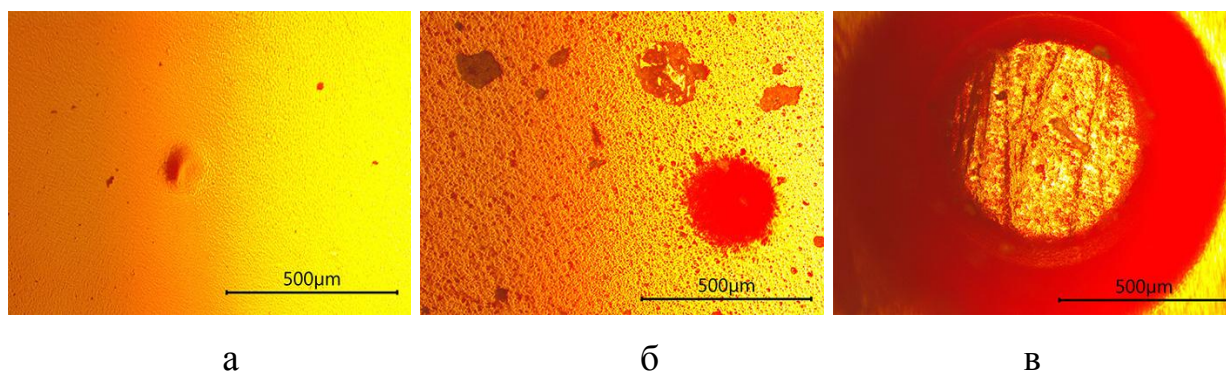


Рис. 5. – Поры на поверхности ЛКП: тупиковые - (а) – АК-1301, красный;  
тупиковые и сквозная - Tikkurila Metallista, красный - (б -в)

**Заключение.** Показана возможность ускоренной оценки качества лакокрасочных покрытий, нанесенных на металлические изделия в условиях Каменского станкостроительного завода ЧПУ станков Twitte. Применение разработанного программного модуля позволяет численно по цифровому изображению поверхности оценить локальные зоны дефектов анализируемой поверхности и сократить время расчета показателей качества лакокрасочных покрытий с 15-20 минут до 1 секунды на одном образце.

На примере используемой на заводе для защиты станков от коррозии автоэмали АК-1301 и использованной в качестве краски сравнения Tikkurila Metallista произведен расчет адгезионной прочности, относительной площади отслоений и поверхностной пористости покрытий. Показано, что автоэмаль АК-1301 обладает высокой адгезионной прочностью к металлу и химической стойкостью к воде и бензину. На поверхности Tikkurila Metallista формируются сквозные поры, снижающие барьерные функции покрытия.

*Исследование выполнено в рамках НИР по договору № 09 от 15.09.2022 г.*

### Литература

1. Xiao Y., Han W., Zhang X., Deng J., Li J., Kang H., Zeng Z. Fast computational depth segmentation using orthogonal fringe patterns without pattern

sequence changing // Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision. 2021. V. 38(4). pp. 564-572.

2. Pemasiri A., Nguyen K., Sridharan S., Fookes C.. Multi-modal semantic image segmentation. // Computer Vision and Image Understanding. 2021. V. 202. P. 03085.

3. Xia D.H., Song, S., Tao, L., Qin, Z., Wu, Z., Gao, Z. et al. Review-material degradation assessed by digital image processing: Fundamentals, progresses, and challenges. // Journal of Materials Science Technology. 2020. V. 53. pp. 146-162.

4. Malarvel, M., Singh, H. An autonomous technique for weld defects detection and classification using multi-class support vector machine in X-radiography image. // Optic. 2021. V. 231. P. 166342.

5. Макаров П.А. Распознавание цифр маркировки грузового контейнера с использованием алгоритм Faster-RCNN// Инженерный вестник Дона. 2023 №3. №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8276/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8276/).

6. Wu H., Y. Tang Y., Zhang X. A pruning method based on the measurement of feature extraction ability // Machine Vision and Applications. 2021. V. 32(1). P. 20.

7. Антонова Н.М., Хаустова Е. Ю. Оценка дефектов поверхности изделий с помощью цифровых технологий // Вестник Брянского государственного технического университета. 2021. №11(108). С. 24-32.

8. Антонова Н.М., Зиновьев И.А., Хаустова Е.Ю., Болдырев Ф.М., Лисниченко И.А. Определение адгезии путем цифровой обработки изображений поверхности покрытий // Инженерный вестник Дона. 2019. №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5549/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5549/).

9. Антонов Н. М, Хаустов Е. Ю, Небрат А.А, Пузанов А.С. Анализ цифрового изображения поврежденного лакокрасочного покрытия (ADID). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021660153 Российская Федерация. Бюл. №7, 2021. URL: [1.fips.ru/register-](http://1.fips.ru/register-)

---



doc-

view/fips\_servlet?DB=EVM&rn=617&DocNumber=2021660153&TypeFile=html

10. Карякина М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий. М.: Химия, 1988. 272 с.

### References

1. Xiao Y., Han W., Zhang X., Deng J., Li J., Kang H., Zeng Z. Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision. 2021. V. 38(4). pp. 564-572.
2. Pemasiri A., Nguyen K., Sridharan S., Fookes C Computer Vision and Image Understanding. 2021. №202. P. 03085.
3. Xia D. H., Song, S., Tao, L., Qin, Z., Wu, Z., Gao, Z. et al. Journal of Materials Science Technology. 2020. V. 53. pp. 146-162.
4. Malarvel, M., Singh, H. Optic. 2021. V. 231. P. 166342.
5. Makarov P.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023 №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8276/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8276/).
6. Wu H., Y. Tang Y., Zhang X. Machine Vision and Applications. 2021. V. 32(1). P. 20.
7. Antonova N.M., Haustova E. YU. Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2021. №11 (108). pp. 24-32.
8. Antonova N.M., Zinov'ev I.A., Haustova E.YU., Boldyrev F.M., Lisnichenko I.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5549/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5549/).
9. Antonova N. M, Haustova E. Ju, Nebrat A.A, Puzanova A.S. Analiz cifrovogo izobrazhenija povrezhdenного lakokrasochnого pokrytija (ADID). Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM №2021660153 Rossijskaja Federacija. Bjul. [Certificate of state registration of the computer program №2021660153. Bulletin] №7, 2021. URL: [1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=EVM&rn=617&DocNumber=2021660153&TypeFile=html](http://1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&rn=617&DocNumber=2021660153&TypeFile=html)



10. Кaryakina М. I. Ispytanie lakokrasochnyh materialov i pokrytij [Testing of paints and coatings]. М.: Himiya, 1988. 272 p.