

Научная статья

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 116–125.

УДК 681.5.08: 621.452.3

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 116–125.

*Е.А. Алексеев¹✉, А.Н. Ломанов²*¹ ПАО «ОДК-Сатурн»; ² ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»

✉ Автор для корреспонденции

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ СВЕЧЕНИЯМИ И КЛАССИФИКАЦИЯ СВЕЧЕНИЙ ПРИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОМ КОНТРОЛЕ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация

В основе контрольных операций при осмотре поверхностей лопатки на наличие дефектов под УФ-светом лежит использование машинного зрения. При реализации технологии автоматизированного контроля необходимо решить несколько ключевых задач: получение пакета инспекционных изображений сложно профильного объекта контроля (авиационной лопатки), определение реальных параметров (размеров) свечений для единичных и групповых дефектов, формирование экспертных рекомендаций (цифрового следа) по определению наличия дефектов на inspectируемых поверхностях для оператора или автоматизированных систем.

Представлена методика определения расстояния между свечениями, устранения их дублирования и классификация свечений при люминесцентном контроле лопаток газотурбинных двигателей (ГТД). В основе классификации лежит сравнение полученных индикаций с эталонными фотошаблонами. Приведены этапы анализа классификационных признаков и алгоритмы их реализации.

Ключевые слова: машинное зрение, люминесцентный контроль, классификация свечений, методика анализа, алгоритмы классификации.

Для цитирования: Алексеев Е.А., Ломанов А.Н. Разработка методики определения расстояния между свечениями и классификация свечений при люминесцентном контроле лопаток газотурбинных двигателей // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 116–125.

*Е.А. Alekseev¹✉, A.N. Lomanov²*¹ PJSC “UEC-Saturn”; ² Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov

✉ Corresponding author

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE DISTANCE BETWEEN GLOWS AND CLASSIFICATION OF GLOWS DURING LUMINESCENT TESTING OF GAS TURBINE ENGINE BLADES

Abstract

Machine vision is the basis of control operations during inspection of blade surfaces for defects under UV light. When implementing automated control technology, it is necessary to solve several key problems: obtaining a package of inspection images of a complex profile control object (aircraft blade), determining

the real parameters (sizes) of glows for single and group defects, forming expert recommendations (digital trace) for determining the presence of defects on inspected surfaces for the operator or automated systems. A method is presented for determining the distance between glows, eliminating their duplication, and classifying glows during luminescent testing of gas turbine engine blades. The classification is based on a comparison of the obtained indications with reference photomasks. The stages of analysis of classification characteristics and algorithms for their implementation are given.

Keywords: computer vision, luminescent control, classification of luminescence, analysis technique, classification algorithms.

For citation: E.A. Alekseev, A.N. Lomanov. Development of a method for determining the distance between glows and classification of glows during luminescent testing of gas turbine engine blades. *Vestnik MSUT "Stankin"*. 2025. No 1 (72). P. 116–125. (In Russian)

Введение

Автоматизация оптического неразрушающего контроля за счет применения машинного зрения связана с необходимостью быстрого анализа информации [1]. При выполнении анализа полученных изображений необходимо классифицировать свечения, при этом не потерять значимую информацию. Вопросам анализа изображений и классификации свечений посвящены работы [2, 3, 4 и др.]. Так в работах [4, 5, 6] представлены разработанные методы и алгоритмы цифровой обработки и распознавания дефектоскопической информации. Использование интеллектуальных методов анализа и классификации, в том числе на основе нейронных сетей, представлено в работах [7, 8, 9, 10]. Однако сложности анализа дефектоскопической информации на поверхностях лопаток турбины в приведенных работах не отражены.

Основная часть

Для того, чтобы на изображениях захватить всю поверхность лопатки, необходимо снимать её под разными ракурсами, а так как лопатка имеет поверхность сложной формы, то на некоторых снимках одни и те же свечения могут дублироваться. Одним из вопросов анализа является исключение дубликатов из списка свечений. При этом используется разработанный алгоритм, который позволяет вычислять минимальное расстояние между всеми парами свечений.

Сначала определяется минимальное расстояние между точками отдельных свечений, в результате чего вычисляется кросс-таблица расстояний. На основе кросс-таблицы определяются кандидаты на дублирование. Если расстояние между двумя свечениями меньше заданного порога (используется значение 0,3 мм), то одно из двух свечений удаля-

ется. Выбор свечения для удаления выполняется исходя из формулы

$$(1 - k) \cdot S + k \cdot A \leq 0,3, \quad (1)$$

где k – коэффициент значимости угла или площади при сравнении (коэффициент принимает значение от 0 до 1, если значение больше 0,5, то предпочтение отдаётся отношению площадей, если меньше 0,5 – отношению углов); S – отношение площадей сравниваемых свечений; A – отношение углов (угол относительно камеры) сравниваемых свечений.

Данная формула представляет сравнение свечений по площади и по углу нормали относительно камеры. В зависимости от значения в результате выбирается то или иное свечение.

Полученная кросс-таблица, а также все оригинальные свечения, в дальнейшем используются для их классификации.

В основе классификации лежит процедура сравнения полученного свечения с эталонными. Не все свечения, которые детектируются на поверхности лопатки, являются дефектами, поэтому следует выполнять классификацию каждого из них. Свечение признаётся дефектом в зависимости от его формы, размеров, положения в определённой зоне лопатки, а также положения относительно остальных свечений.

Все дефекты можно разделить на 3 основные группы:

- единичная индикация;
- объединение единичных индикаций;
- групповая индикация.

Для анализа лопатка визуально разбивается на 3 зоны, в каждой из которых действуют свои критерии годности для тех или иных типов свечений. Пример разделения лопатки на зоны представлен на рис. 1.

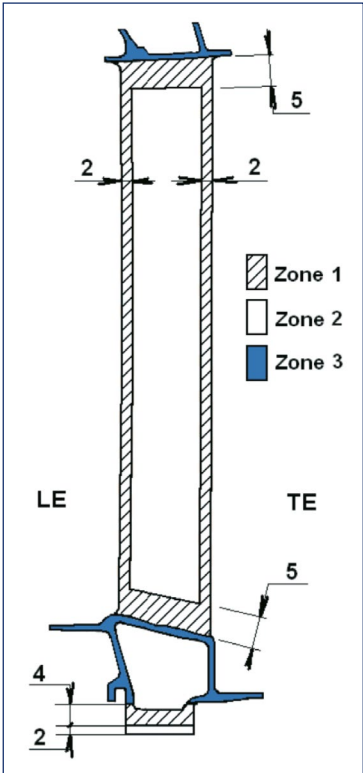


Рис. 1. Пример разделения лопатки на зоны

Определение единичных индикаций

Единичная индикация представляет собой обособленное свечение недопустимого размера и/или формы. Описание типов единичных индикаций представлено в табл. 1.

Определение объединений единичных индикаций

Объединение единичных индикаций представляет собой небольшое скопление единичных индикаций, расположенных на одной поверхности на очень маленьком расстоянии относительно друг друга. Описание допустимых параметров объединений единичных индикаций представлено в табл. 2.

Если свечения образуют объединение, то оно в дальнейшем классифицируется по критериям единичных индикаций, а в качестве размеров принимается общий размер всего объединения.

Определение групповых индикаций

Групповая индикация представляет собой скопление индикаций, расположенных на одной поверхности на маленьком расстоянии друг от друга в определённой области, а также соответствующих фотошаблону. Групповые индикации делятся на 6 классов. В данной работе проводится анализ 2, 3 и 4 ступеней ГТД LEAP-1B, поэтому рассматриваться будут только первые 3 класса, а именно: класс 10 (фотошаблоны, представлен на рис. 2), класс 20 (фотошаблоны, представлен на рис. 3), класс 30 (фотошаблоны, представлен на рис. 4). Внутри класса групповая индикация делится по форме на круглую и овальную.

Критерии годности лопатки с точки зрения групповых индикаций представлены в табл. 3.

Таблица 1

Описание допустимых параметров единичных индикаций

Наименование	Параметры	Примечание
Единичная индикация недопустимого размера	Зона 1: максимальный размер свечения не должен превышать 0,5 мм	Если свечение превышает допустимый порог по размеру, то оно признаётся дефектом.
	Зона 2: максимальный размер свечения не должен превышать 1 мм	
	Зона 3: максимальный размер свечения не должен превышать 1,5 мм	
Линейная индикация	Длина дефекта превышает его ширину в 4 раза и более	Независимо от зоны данное свечение признаётся дефектом



Рис. 2. Фотошаблон представлен групповой индикации класса 10

Таблица 2

Описание допустимых параметров объединений единичных индикаций

Наименование	Параметры	Примечание
Объединение по области	Зона 1: минимальный размер свечения в объединении должен превышать или быть равен 0,3 мм	Если свечение меньше допустимого порога по размеру, то оно игнорируется при объединении
	Зона 2: минимальный размер свечения в объединении должен превышать или быть равен 0,5 мм	
	Зона 3: минимальный размер свечения в объединении должен превышать или быть равен 1 мм	
	Независимо от зоны: два свечения объединяются, если расстояние между ними меньше, чем двойной размер наибольшего из свечений	
Противолежащие индикации	Два свечения находятся на противоположных сторонах одной поверхности	Данный тип индикации является недопустим для лопатки
Объединение в линию	Независимо от зоны: два свечения объединяются если расстояние между ними больше двойного размера наибольшего из свечений, но меньше четверного размера наибольшего из свечений	Независимо от зоны данное свечение признаётся дефектом
	Независимо от зоны: объединение происходит если дефекты визуально образуют линию, без резкий переломов или загибов	
	Независимо от зоны: минимальное количество свечений, которое учитывается при объединении равняется 3	
	Независимо от зоны: при формировании данного типа объединения размеры не учитываются	



Рис. 3. Фотошаблон представлен групповой индикации класса 20

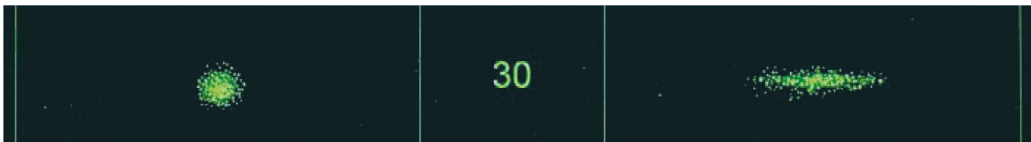


Рис. 4. Фотошаблон представлен групповой индикации класса 30

Таблица 3

Критерии годности лопатки с точки зрения групповых индикаций

Зоны	1 на пере лопатки	1 на замке	2 на пере лопатки	2 вне пера лопатки	3
Критерии	Отсутствие	Класс 10	Класс 10	Класс 20	Класс 30 или 20/10
Количество	Нет	≤2	1	≤2	≤2
Расстояние	Не применяется	≥10 мм	–	≥10 мм	≥10 мм

Примечание.

На пере лопатки допускается:

- 1 индикация класса 20 или класса 10/20 в радиусе перехода от пера лопатки к гребешку.
- 1 индикация класса 20 или класса 10/20 в радиусе перехода от пера лопатки к бандажной полке.

На бандажной полке допускается 1 индикация класса 30/20 на выходных крылышках.

После того, как сделаны все снимки поверхности лопатки, а также обнаружены и обсчитаны все свечения и удалены дубликаты, они объединяются в один массив, и выполняется классификация свечений. Для этого массив свечений поочерёдно пропускается через функции поиска дефектов в следующей последовательности:

- поиск групповых индикаций;
- поиск единичных индикаций;
- поиск противоположащих индикаций;
- поиск индикаций, объединённых по области;
- поиск индикаций, объединённых в линию.

Этап 1. Поиск групповых индикаций

Для поиска групповых индикаций используется алгоритм кластеризации данных *DBSCAN*. Все дефекты объединяются в кластер, если имеют хотя бы двух соседей на расстоянии до 1.5 миллиметров. Коэффициенты определены эмпирически.

Перед кластеризацией выполняется подготовка данных. Свечения, находящиеся на разных поверхностях (например, противоположащие) могут иметь маленькое расстояние между друг другом, поэтому расстояние между ними намеренно увеличивается, чтобы они не попали в одну группу. Для того, чтобы определить находятся они на разных поверхностях или нет, сравниваются их вектора нормали. Если угол между векторами больше 135 градусов, то считается, что свечения противоположащие.

Если был найден хотя бы один кластер, определяется, принадлежит ли он хотя бы одному классу и, если принадлежит, то какому. Для этого рассчитываются характеристики кластеров, такие как: длина, ширина, зона, форма, средний вектор

нормали. Затем каждый кластер проходит проверку на принадлежность классу по критериям, представленным в *табл. 4*.

Если хотя бы один кластер был определён как групповая индикация, то все свечения, входящие в него, не анализируются на следующих этапах классификации. Если было найдено более одной групповой индикации, и они находятся в одной зоне, то рассчитывается расстояние между ними, а также подсчитывается количество индикаций в каждой из зон.

После определения всех этих параметров выполняется проверка, являются ли обнаруженные групповые индикации недопустимыми для лопатки в соответствии с *табл. 3*.

Этап 2. Поиск единичных индикаций

Исходя из того, что размеры всех свечений заранее посчитаны, поиск единичных индикаций сводится к проверке их допустимости для лопатки по критериям, которые описаны в *табл. 1*. Свечения, определённые как недопустимые, не анализируются на дальнейших этапах классификации

Этап 3. Поиск противоположащих индикаций

Поиск данного типа дефектов выполняется в 2 этапа:

- сортировка свечений в порядке уменьшения размера;
- поиск противоположащих индикаций.

Сортировка выполняется по заранее посчитаным размерам свечений и производится для упрощения дальнейших вычислений.

Таблица 4

Критерии принадлежности кластера свечений к групповой индикации

Класс	Максимальный размер круглой индикации	Максимальный размер овальной индикации	Минимальное количество свечений
Не группа	3 мм	Длина: 4 мм Ширина: 3 мм	0 шт.
Класс 10	5 мм	Длина: 10 мм Ширина: 7 мм	7 шт.
Класс	Максимальный размер круглой индикации	Максимальный размер овальной индикации	Минимальное количество свечений
Класс 20	7 мм	Длина: 17 мм Ширина: 9 мм	9 шт.
Класс 30	9 мм	Длина: 24 мм Ширина: 13 мм	11 шт.

Для поиска противолежащих индикаций все свечения попарно сравниваются друг с другом. Для определения того, являются ли свечения противолежащими, сначала выполняется сравнение их векторов нормали, как упоминалось ранее. Если они находятся на разных поверхностях, сначала проверяется расстояние между ними, которое не должно превышать 3 мм, а затем проверяется, находятся ли они напротив друг друга. Для этого выполняются следующие действия:

- определяется уравнение плоскости каждого свечения;
- центральная точка каждого свечения проецируется на плоскость другого свечения;
- если спроецированная точка одного свечения попала в область другого свечения, то дефекты считаются противоположными.

Если дефекты определены как противоположные, то они не анализируются на дальнейших этапах классификации.

Этап 4. Поиск индикаций, объединённых по области

Поиск данного типа дефектов выполняется в 3 этапа:

- поиск соседних индикаций;
- объединение соседних индикаций в группы;
- проверка допустимости объединений для лопатки.

Блок-схема алгоритм работы поиска представлена на рис. 5.

Для анализа используется отсортированный массив свечений, из которого исключаются свечения малого размера в соответствии с табл. 2.

Для определения соседства свечения попарно сравниваются. Сначала определяется принадлежность свечений одной поверхности. Для этого определяется угол между векторами нормали свечений. Свечения определяются на одной поверхности, если угол между векторами нормали меньше либо равен 45° . Если свечения лежат на одной поверхности, определяется соседство по расстоянию между ними в соответствии с табл. 2. Для каждого свечения записывается его сосед.

После анализа всех пар выполняется объединение соседствующих свечений с расчётом параметров этих объединений. Каждое объединение проверяется на допустимость для лопатки в соответствии с табл. 2.

Все дефекты, попавшие в объединения, не анализируются на дальнейших этапах классификации.

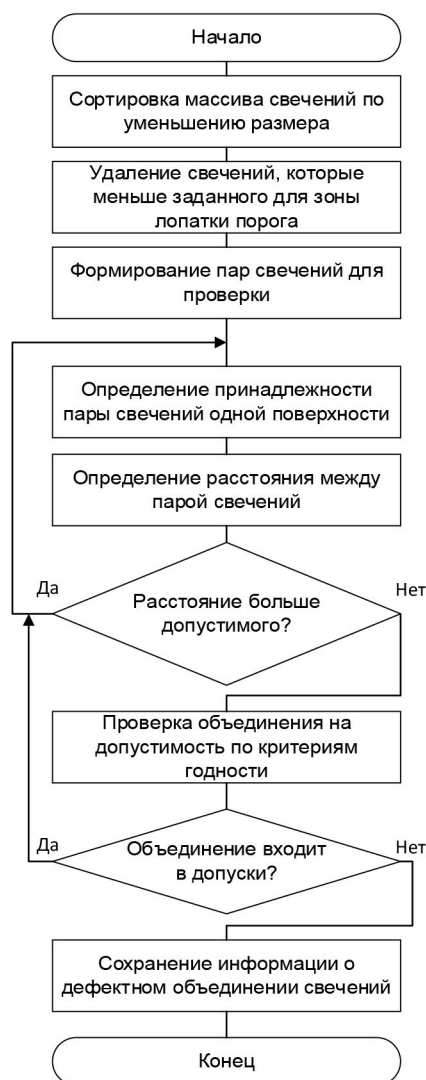


Рис. 5. Блок-схема алгоритма работы поиска объединений

Этап 5. Поиск индикаций, объединённых в линию

На вход данного алгоритма подаётся отсортированный (по уменьшению размера) массив с оставшимися свечениями.

Блок-схема алгоритм работы поиска представлена на рис. 6.

Все свечения поочерёдно попарно сравниваются. Выбирается пара свечений и определяется, находятся ли они на одной поверхности, а затем находятся ли они на расстоянии друг от друга в соответствии с табл. 2. Если условия выполняются, то это инициирует поиск следующего свечения, которое может попасть в линию. Для этого сначала определяется направление линии, которое является вектором между центральными точками свечений. Следующее свечение должно также соответствовать критериям по расстоянию

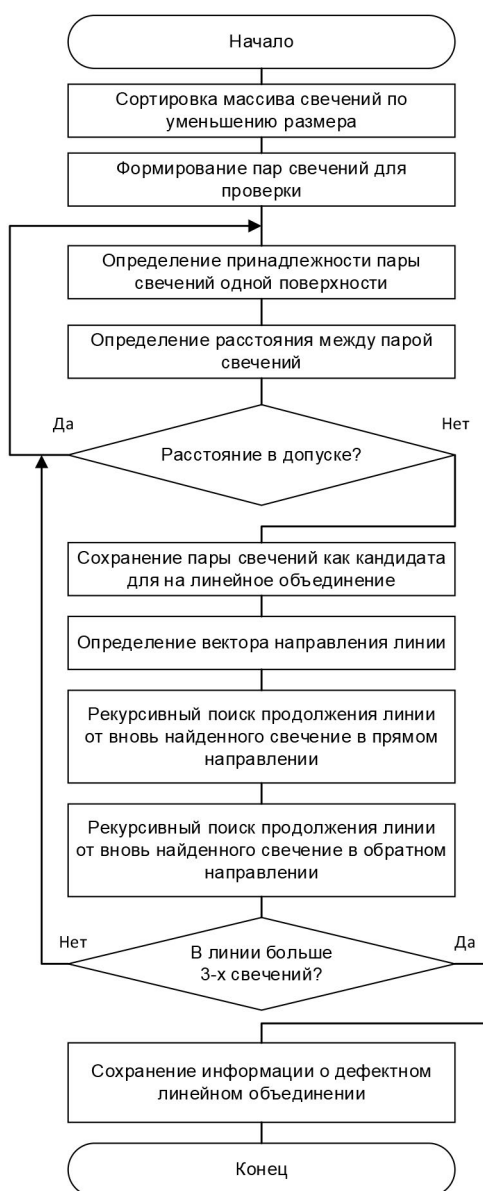


Рис. 6. Блок-схема алгоритма работы поиска свечений, объединённых в линию

и поверхности, но в дополнение к этому не отклоняться от полученного направления более чем на 30° . Поиск последующих свечений выполняется рекурсивно. После завершения поиска свечений в заданном направлении выполняется поиск свечений в обратном направлении по точно такому же принципу.

Если найденные свечения определяются как объединённые в линию, то они проверяются по критериям допустимости в соответствии с табл. 2. Если объединение признаётся недопустимым, то все входящие в него свечения исключаются из дальнейшего поиска.

На данном этапе завершается классификация найденных свечений.

Формирование результатов анализа

После того, как все свечения классифицированы и определена их допустимость по заданным критериям годности, выполняется запись полученных результатов.

Для каждого свечения (группы свечений), которое признано дефектом, сохраняется изображение, на котором выделяется место расположения данного дефекта. Помимо изображения сохраняется и информация о дефекте, а именно:

- класс дефекта;
- зона расположения дефекта;
- размеры дефекта.

После определения степени годности лопатки выполняется определения дальнейших действий, которые необходимо выполнить с ней. Может быть получено одно из 4 действий:

- «Дефектов не обнаружено, лопатка годная» – означает, что лопатка успешно прошла ЛЮМ-контроль;
- «Обнаружены свечения, выполните протирку» – на поверхности лопатки обнаружены дефекты, необходимо протереть их ацетоном и выполнить повторную проверку;
- «Обнаружены свечения, выполните зачистку» – на поверхности лопатки обнаружены дефекты, которые требуется зачистить и выполнить повторную проверку;
- «Обнаружены дефекты» – на поверхности лопатки обнаружены дефекты, лопатку необходимо отправить в брак.

Статус «Обнаружены свечения, выполните протирку» может появиться только в двух случаях:

- после первого осмотра лопатки были обнаружены дефекты;
- после зачистки на первом осмотре были обнаружены дефекты.

Статус «Обнаружены свечения, выполните зачистку» появляется, если выполняются следующие условия:

- лопатка ещё не была на зачистке;
- уже была выполнена протирка;
- среди обнаруженных дефектов отсутствуют линейные индикации, а также дефекты на пере лопатки.

Статус «Обнаружены дефекты» появляется, если выполняются следующие условия:

- лопатка была на зачистке, после чего была на протирке, но снова обнаружены дефекты;
- после протирки были обнаружены линейные индикации или дефекты на пере лопатки.

На этом этапе анализ поверхности лопатки на предмет дефектов под УФ-светом завершается.

Заключение

Представленная методика классификации свечений при выполнении процесса люминесцентного контроля лопаток газотурбинных двигателей позволяет реализовать алгоритм цифровой обработки полученных изображений и применить полученный результат в качестве промежуточного экспертного заключения (индикаторного типа) в работе установок автоматизированного контроля.

Библиографический список

1. Полетаев В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей / В.А. Полетаев. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
2. Глазков Ю.А. Капиллярный контроль / под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: ИД «Спектр», 2011. – 144 с.
3. Контроль качества проникающими веществами. Капиллярный контроль / Н.П. Калинин, В.К. Кулешов, А.Н. Калинин. 2-е изд., перераб. и дополн. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 203 с.
4. Литература по капиллярному неразрушающему контролю – [Электронный ресурс] – Режим доступа URL: <https://ndt-testing.ru/> (дата обращения: 01.08.2021).
5. Попко Е. А. Опыт применения машинного зрения в системах оптического неразрушающего контроля / Е. А. Попко, А. П. Воробьев, И. А. Вайнштейн // Сварка и диагностика: сборник докладов международного форума (Екатеринбург, 24–25 ноября 2015 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 401–406.
6. Ермаков А.А. Методы и алгоритмы обработки и анализа снимков в капиллярной дефектоскопии. Автореф. канд. техн. наук. – Владимир: ВлГУ, 2009. – 19 с.
7. Shipway N.J., Barden T.J., Huthwaite P., Lowe M.J.S. Automated defect detection for Fluorescent Penetrant Inspection using Random Forest // NDT & E International. – Volume 101. – 2019. – P. 113–123.
8. Shipway N.J., Huthwaite P., Lowe M.J.S., Barden T.J. Using ResNets to perform automated defect detection for Fluorescent Penetrant Inspection // NDT & E International. – Volume 119. – 2021.
9. Karim Tout. Automatic Vision System for Surface Inspection and Monitoring: Application to Wheel Inspection. Signal and Image processing. Université de Technologie de Troyes – UTT, 2018.
10. Бобков А.В. Выделение отрезков на изображении в задаче ориентации по визуальной информации. // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2002. – № 3 (48).
11. Aust J., Shankland S., Pons D., Mukundan R., Mitrovic A. Automated Defect Detection and Decision-Support in Gas Turbine Blade Inspection. Aerospace 2021, 8, 30. <https://doi.org/10.3390/aerospace8020030>.
12. Пат. 2771442 Российская Федерация. Способ обработки изображений сверточными нейронными сетями / Заявл. 12.11.2020, Оpubл. 04.05.2020, бюл. № 13.
13. Пат. 104697 Российская Федерация. Устройство бесконтактного измерения шероховатости поверхностей деталей сложной формы / Заявл. 16.11.2010, Оpubл. 20.05.2011.
14. Пат. 126490 Российская Федерация. Программно-аппаратный комплекс машинного зрения для определения и контроля ширины межвиткового зазора / Заявл. 03.07.2012, Оpubл. 27.03.2013, бюл. № 9.
15. Пат. 2604168 Российская Федерация. Система машинного зрения, позволяющая определять неоднородности глубины объектов изображения / Заявл. 27.01.2012, Оpubл. 10.12.2016, бюл. № 34.
16. Пат. 2764644 Российская Федерация. Способ обнаружения дефектов поверхности, устройство обнаружения дефектов поверхности, способ производства стальных материалов, способ управления качеством стального материала, установка по производству стальных материалов, способ генерации моделей определения дефектов поверхности и модель определения дефектов поверхности / Заявл. 08.11.2019, Оpubл. 19.01.2022, бюл. № 2.
17. Пат. 2777718 Российская Федерация. Способ неразрушающего оптико-визуального контроля изделий методом машинного зрения / Заявл. 17.08.2021, Оpubл. 08.08.2022, бюл. №22.
18. Li C. et al. YOLOv6: A single-stage object detection framework for industrial applications //arXiv preprint arXiv:2209.02976. – 2022.
19. C.-Y. Wang, A. Bochkovskiy H.-Y. M. Liao. “Yolov7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors,” arXiv preprint arXiv:2207.02696, 2022.
20. G. Jocher, A. Chaurasia, J. Qiu. “YOLO by Ultralytics.” URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics>, 2023 (Accessed: February 30, 2023).
21. Сычев И.Е., Литвиненко А.М. Автоматическая система распознавания дефектов на базе технического зрения // Альтернативная и интеллектуальная энергетика. Материалы II Международной научно-практической конференции. 2020. – Изд-во Воронежского государственного технического

университета (Воронеж). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43939127>

22. Казаков О.Д., Ромашиов Н.Е. Обнаружение и распознавание объектов в реальном времени с помощью модели машинного обучения // Вызовы цифровой экономики: развитие комфортной городской среды. Труды III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Брянск, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», 2020. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44171509>

23. Ямщиков С. А. Компьютерное зрение в неразрушающем контроле // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности. Материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых. – Могилев: МГО ВО «Белорусско-Российский университет», 2021. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47155489>

24. Чикмарев Д.Д., Хабаров А.Р., Карельская К.А. Система компьютерного зрения для дефектоскопии объектов // Информационные ресурсы и системы в экономике, науке и образовании. Сборник статей XI Международной научно-практической конференции. Пенза: АНО «Приволжский Дом знаний», 2021. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46459923>

25. Форсайт Д.А., Понс Д. Компьютерное зрение. Современный подход. – М.: Вильямс, 2004. – 928 с.

26. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 621 с.

27. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2001. – 784 с.

28. Приоров А.Л., Хрящев В.В., Топников А.И. Обработка и передача мультимедийной информации: учебное пособие. – Ярославль: ЯрГУ 2022.

29. Коротаев В.В., Краснящих А.В. Телевизионные измерительные системы / Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 108 с.

References

1. Poletaev V.A. Technology for the production of gas turbine engine blades / V.A. Poletaev. Moscow, Mechanical Engineering, 2006, p. 256.

2. Glazkov Yu.A. Capillary control / under general. ed. V.V. Klyueva. Moscow, Spektr Publishing House, 2011, p. 144.

3. Quality control using penetrants. Capillary control / N.P. Kalinichenko, V.K. Kuleshov, A.N. Kalinichenko. 2nd ed., revised. and additional. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2007, p. 203.

4. Literature on capillary non-destructive testing [Electronic resource], Access mode URL: <https://ndt-testing.ru/> (access date: 08.01.2021).

5. Popko E. A. Experience in the use of machine vision in optical non-destructive testing systems / E. A. Popko, A. P. Vorobyov, I. A. Vainshtein // Welding and diagnostics: collection of reports of the international forum (Ekaterinburg, November 24–25, 2015 g.). Ekaterinburg: UrFU, 2015, pp. 401-406.

6. Ermakov Alexander Andreevich. Methods and algorithms for processing and analyzing images in capillary flaw detection. Author's abstract. Ph.D. tech. Sciences. Vladimir: VIGU, 2009, p. 19.

7. Shipway N.J., Barden T.J., Huthwaite P., Lowe M.J.S. Automated defect detection for Fluorescent Penetrant Inspection using Random Forest, *NDT & E International*, vol.101, 2019, pp. 113-123.

8. Shipway N.J., Huthwaite P., Lowe M.J.S., Barden T.J. Using ResNets to perform automated defect detection for Fluorescent Penetrant Inspection, *NDT & E International*, vol. 119, 2021.

9. Karim Tout. Automatic Vision System for Surface Inspection and Monitoring: Application to Wheel Inspection. Signal and Image processing. Université de Technologie de Troyes – UTT, 2018.

10. Bobkov A.B. Selection of segments in an image in the task of orientation based on visual information. *Bulletin of MSTU. Instrumentation*, 2002, No. 3 (48).

11. Aust, J.; Shankland, S.; Pons, D.; Mukundan, R.; Mitrovic, A. Automated Defect Detection and Decision-Support in Gas Turbine Blade Inspection. *Aerospace* 2021, 8, 30. <https://doi.org/10.3390/aerospace8020030>.

12. Method of image processing using convolutional neural networks / RF Patent No. 2771442, Appl. 11.12.2020, Publ. 05.04.2020, bul. no. 13.

13. Device for non-contact measurement of surface roughness of parts with complex shapes / RF Patent No. 104697, Appl. 11.16.2010, Publ. 05.20.2011.

14. Computer vision software and hardware complex for determining and controlling the width of the interturn gap / RF Patent No. 126490, Appl. 07.03.2012, Publ. 03.27.2013 bul. no. 9.

15. Computer vision system that allows you to determine inhomogeneities in the depth of image objects / RF Patent No. 2604168, Appl. 01.27.2012, Publ. 12.10.2016, bul. no. 34.

16. A method for detecting surface defects, a device for detecting surface defects, a method for producing steel materials, a method for managing the quality of steel materials, an installation for the production of steel materials, a method for generating models for determining surface defects and a model for determining surface defects / RF Patent No. 2764644, Appl. 08.11.2019, Publ. 01.19.2022, bul. no. 2.

17. Method of non-destructive optical-visual inspection of products using machine vision / RF Patent

No. 2777718, Appl. 08.17.2021, Publ. 08.08.2022, bul. no. 22.

18. Li C. et al. YOLOv6: A single-stage object detection framework for industrial applications //arXiv preprint arXiv:2209.02976. – 2022.

19. C.-Y. Wang, A. Bochkovskiy, and H.-Y. M. Liao, “Yolov7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors,” arXiv preprint arXiv:2207.02696, 2022.

20. G. Jocher, A. Chaurasia, and J. Qiu, “YOLO by Ultralytics.” <https://github.com/ultralytics/ultralytics>, 2023. Accessed: February 30, 2023.

21. Sychev I.E., Litvinenko A.M. Automatic defect recognition system based on technical vision, Alternative and intelligent energy. Materials of the II International Scientific and Practical Conference. 2020. Publisher: Voronezh State Technical University (Voronezh). <https://elibrary.ru/item.asp?id=43939127>.

22. Kazakov O.D., Romashov N.E. Detection and recognition of objects in real time using a machine learning model // Challenges of the digital economy: development of a comfortable urban environment. Proceedings of the III All-Russian scientific and practical conference with international participation. 2020. Publisher: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Bryansk State Engineering and Technology University” (Bryansk). <https://elibrary.ru/item.asp?id=44171509>.

23. Yamshchikov S.A. Computer vision in non-destructive testing // New materials, equipment and

technologies in industry. Materials of the International Scientific and Technical Conference of Young Scientists. Editorial Board: M.E. Lustenkov (chief editor) [and others]. Mogilev, 2021. Publisher: Interstate educational institution of higher education “Belarusian-Russian University” (Mogilev). <https://elibrary.ru/item.asp?id=47155489>.

24. Chikmarev D.D., Khabarov A.R., Karel'skaya K.A. Computer vision system for flaw detection of objects // Information resources and systems in economics, science and education. Collection of articles of the XI International Scientific and Practical Conference. Edited by A.P. Remontova. Penza, 2021. Publisher: Autonomous non-profit scientific and 59 educational organization “Volga House of Knowledge” (Penza). <https://elibrary.ru/item.asp?id=46459923>.

25. Forsyth D.A., Pons D. Computer vision. Modern approach. Moscow, Williams, 2004, p. 928

26. Gonzalez R., Woods R. Digital image processing. Moscow, Tekhnosphere, 2005, p. 621.

27. Methods of computer image processing / Ed. V.A. Soifera. Moscow, Fizmatlit, 2001, p. 784.

28. Priorov A.L., Khryashchev V.V., Topnikov A.I. Processing and transmission of multimedia information: a tutorial. Yaroslavl, YarSU, 2022.

29. Korotaev V.V., Krasnyashchikh A.V. Television measuring systems / Textbook. St. Petersburg, St. Petersburg State University ITMO, 2008, p.108.

Информация об авторах

Алексеев Евгений Александрович – директор по цифровой трансформации, ПАО «ОДК-Сатурн»
evgeny.alekseev@uec-saturn.ru

Ломанов Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, директор института информационных технологий и систем управления, ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»
frei@rsatu.ru

Information about the authors

Alekseev Evgeniy Alexandrovich – director of digital transformation, PJSC “UEC-Saturn”
evgeny.alekseev@uec-saturn.ru

Lomanov Alexey Nikolayevich – cand. Sc. of Engineering, docent, director of the “Institute of Information Technologies and Management Systems”, Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov
frei@rsatu.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.