

# ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РЕШЕНИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАДАЧ В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

Международный технологический форум  
«Инновации. Технологии. Производство», г. Рыбинск  
19 апреля 2024 года

Котляр Д.И.  
Инженер-исследователь дуальной лаборатории  
«ПромИТ» РГТУ им. П.А. Соловьева

# РАДАР ПРОЕКТОВ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА



GATURN



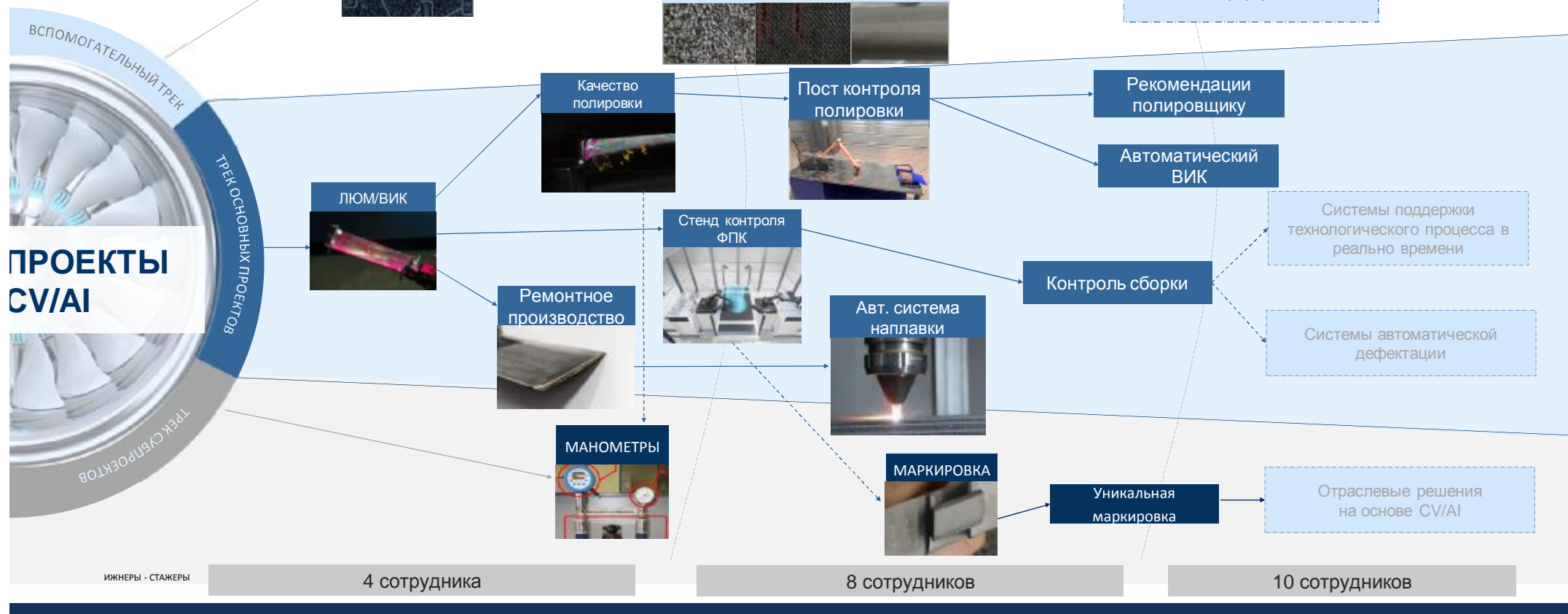
ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
КОМПЕТЕНЦИЙ  
ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЕ

УЧЕБНЫЕ  
ЦИКЛЫ

2021-2023

2024-2026

2027-2030



## ПРОБЛЕМАТИКА РУЧНОГО ЛЮМ (ФП) КОНТРОЛЯ



- Низкая скорость выполнения операции;
- Низкая точность и достоверность контроля;
- Невозможность проведения работ в ночное время;
- Отсутствие зафиксированных визуальных результатов контроля;
- Ручное оформление результатов контроля;
- Отсутствие цифрового следа детали.



## ИДЕЯ

ОЦИФРОВАТЬ ПРОЦЕСС КОНТРОЛЯ ЛЮМ (ФП)  
СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

## ЦЕЛЬ

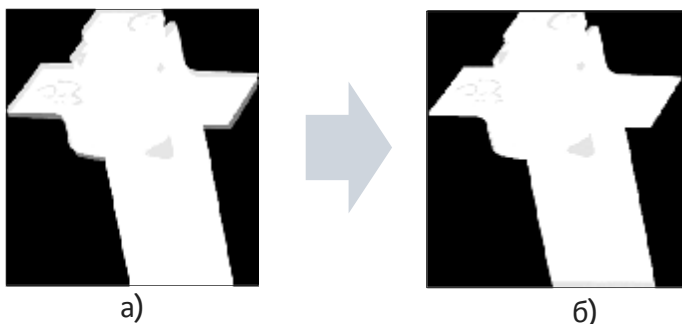
Повысить скорость и точность выполнения операций ЛЮМ/ФП контроля и оформления протоколов контроля в электронном виде не менее чем в 7 раз

## ЗАДАЧИ

- Автоматизировать:
  - получение графического образа;
  - выявление аномалий (дефектов);
  - паспортизацию результатов контроля.
- Механизировать осмотр сложногопрофильных деталей (360°).

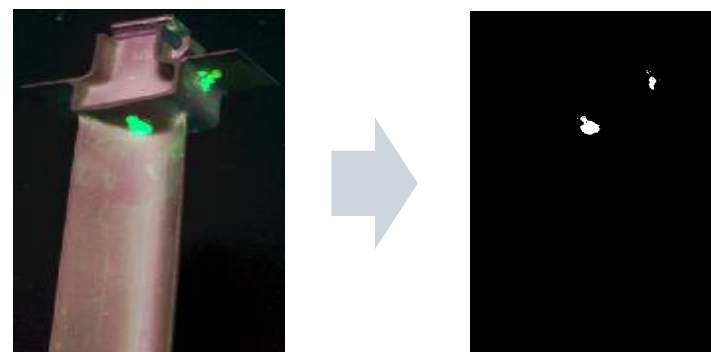
**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СПОСОБ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО КОНТРОЛЯ (ПАТЕНТ РФ №2787314), ВКЛЮЧАЮЩИЙ АЛГОРИТМЫ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ, ОПЕРАЦИЙ ПОИСКА СВЕЧЕНИЯ НА ИЗОБРАЖЕНИИ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ РАЗМЕРА, ХАРАКТЕРИСТИК И АЛГОРИТМЫ КЛАССИФИКАЦИИ.**

1. Съемка объекта, преобразование изображения и уточнение позиции при наличии сдвига (не более 2 мм)



а) силуэт лопатки до сдвига относительно эталона;  
б) силуэт лопатки после сдвига относительно эталона.

2. Фильтрация свечений на изображении



3. Генерация КАРТ СООТВЕТСТВИЯ

Загрузка 3-D  
модели объекта



Отображение  
трехмерной сцены  
с моделью



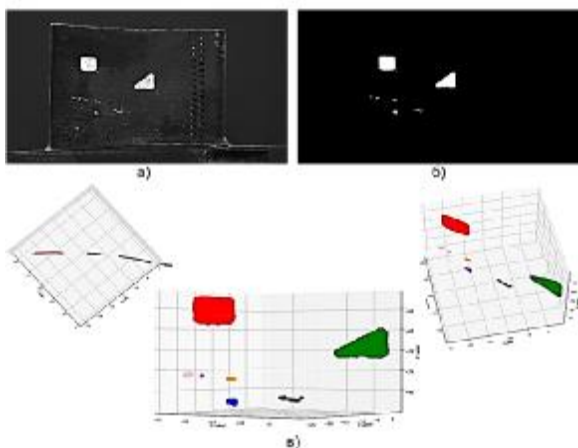
Совмещение  
реального  
изображения  
со сценой



Формирование карты соответствия  
для каждого пикселя изображения  
и модели

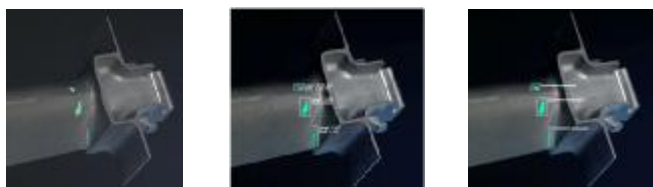


#### 4. Преобразование плоских свечений в трёхмерные



а) исходное изображение; б) результат поиска свечений;  
в) кластеризация дефектов в трёхмерном пространстве.

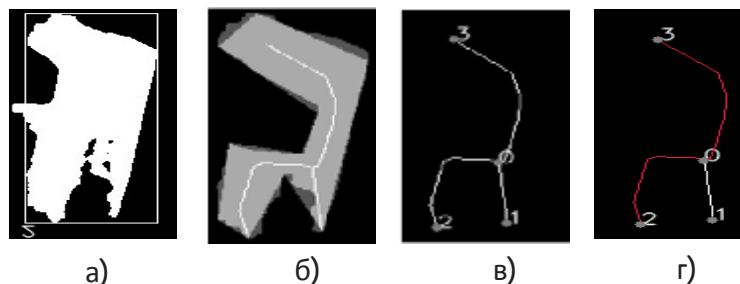
#### 6. Классификация свечений



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

- Расчет расстояний между свечениями и удаление дубликатов;
- Классификация свечений по детерминированным алгоритмам согласно НД:

#### 5. Определение размеров свечений



АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИНЫ:

- а) точки, образующие один кластер (свечение);
- б) результат упрощения контура свечения;
- в) результат скелетирования свечения;
- г) максимальный путь, образующий длину свечения

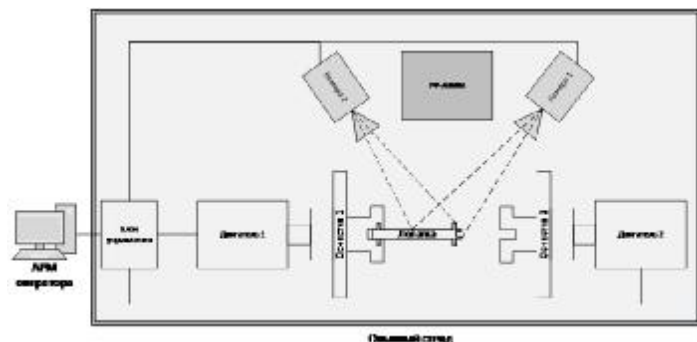
#### РЕЗУЛЬТАТ РАБОТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЕЧЕНИЯ:

- длина свечения, мм;
- ширина свечения, мм;
- средний вектор нормали свечения;
- центр масс свечения;
- номер зоны (или зон) на объекте, в которую попадает свечение;
- расстояние от центра масс до самой дальней от него точки свечения (радиус вписанной окружности);
- угол между нормалью камеры и нормалью поверхности (для вычисления расстояния между свечениями и удаления дубликатов);
- координаты квадрата, вписанного в свечение на исходном изображении (для дальнейшего отображения свечения оператору).

## ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА



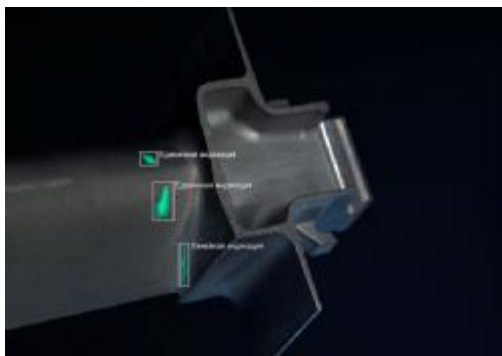
РЕЗУЛЬТАТОМ РЕШЕНИЯ ЯВЛЯЕТСЯ ОПЫТНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ЛЮМ-КОНТРОЛЯ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ



1. - АРМ; Блок управления; крепежная оснастка
- 2 цветные камеры; 2 механизма вращения



2. Встраивается в существующий пост контроля



3. Обеспечивает съемку всей поверхности и применение Способа

Номер лопатки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
100001001	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001002	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001003	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001004	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001005	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001006	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001007	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001008	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001009	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001010	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001011	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001012	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001013	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001014	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001015	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001016	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001017	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001018	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001019	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100001020	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

4. Автоматически формирует результаты: дефектограммы и протоколы контроля

**РАЗРАБОТАНА КОНЦЕПЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ РОБОТИЗАЦИИ**



**СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ СПОСОБА И УСТРОЙСТВА ПОЗВОЛЯЕТ ОБЕСПЕЧИТЬ РОБОТИЗАЦИЮ ЛЮМ-КОНТРОЛЯ И ПЕРЕХОД К СОЗДАНИЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА, КОТОРЫЙ ПОЗВОЛИТ:**

- сократить время проведения контрольной операции в 5-7 раз;
- повысить качество проводимых работ;
- обеспечить круглосуточный режим работы

**ПРОВЕДЕНА АДАПТАЦИЯ СТЕНДА ПОД ОБСЛЕДОВАНИЕ ЛОПАТОК РАБОЧИХ ДВИГАТЕЛЯ ПД-8**

**§ УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ И ПРИМЕНЯЕМЫЙ В НЁМ СПОСОБ ВНЕДРЕН В ОПЫТНУЮ ЭКСПЛУАТАЦИЮ. РЯД ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПОДТВЕРЖДАЮТ ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ ОТ ПРОМЫШЛЕННОГО ВНЕДРЕНИЯ:**

- повышение скорости осмотра 1 детали не менее чем в 5-7 раз;
- повышение точности и достоверности контроля;
- сокращение времени оформления документации не менее чем в 10 раз.
- выполнение операции менее квалифицированным персоналом;
- возможность организации работ в ночное время.
- возможность проведения ретроспективного анализа качества на основании данных полученного средствами объективного контроля.

**§ ПОЛУЧЕНЫ ПАТЕНТЫ РФ (№2787314, № 214639) В СОАВТОРСТВЕ КОЛЛЕКТИВА:**

Алексеев Евгений Александрович, Сорокин Александр Георгиевич, Ломанов Алексей Николаевич, Корнейчук Валерий Сергеевич, Котляр Дмитрий Игоревич, Медведев Евгений Юрьевич, Каленов Александр Сергеевич, Кривденко Иван Владимирович.



При заключении приобретателем лицензионного договора с ПАО «ОДК-Сатурн» внедрение изобретения потребует с его стороны заключения договора по адаптации устройства с учетом геометрических характеристик контролируемых объектов, требований НД к проведению контроля и глубины механизации подачи объектов в зону контроля.

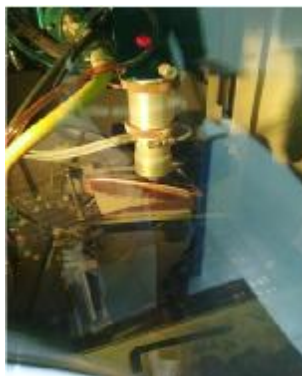


## ШИРОКИЙ СПЕКТР ИЗДЕЛИЙ

- Гражданская авиация
- Судостроение
- Энергетические установки
- Газоперекачивающие установки



## УСТАНОВКА НАПЛАВКИ



## РЕМОНТНЫЕ ДЕТАЛИ



Наплавка  
входной  
кромки и  
торца

Наплавка гребешков



Наплавка зигов

## ИДЕЯ

**СОЗДАТЬ ОТЕЧЕСТВЕННУЮ АВТОМАТИЗИРОВАННУЮ СИСТЕМУ РЕМОНТА ЛОПАТОК ГТД МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ**

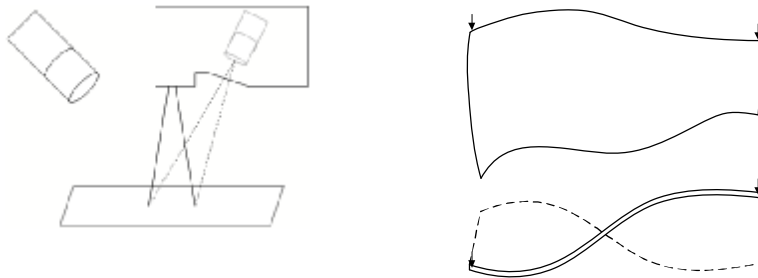
## ЦЕЛЬ

Повысить эффективность использования потенциальных возможностей установки прямого нанесения металла, включающее в себя обеспечение формирования сложнопрофильных криволинейных поверхностей на установке лазерной порошковой наплавки и снижение времени на подготовку программы наплавки кромки лопатки ГТД за счёт автоматизации технологического процесса.

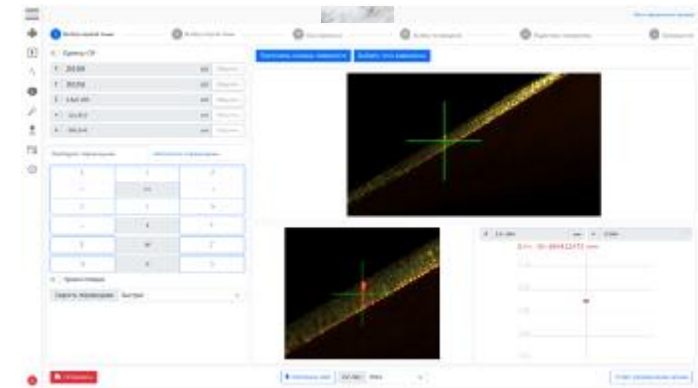
## ЗАДАЧИ

- § Разработать математическую модель сканирования сложнопрофильных криволинейных поверхностей лопаток ГТД;
- § Разработать систему технического зрения для сканирования ремонтной детали в камере установки;
- § Разработать алгоритмы и программное обеспечение синтеза технологических программы наплавки;
- § Сформировать требования и разработать концепцию автоматизированной системы наплавки.

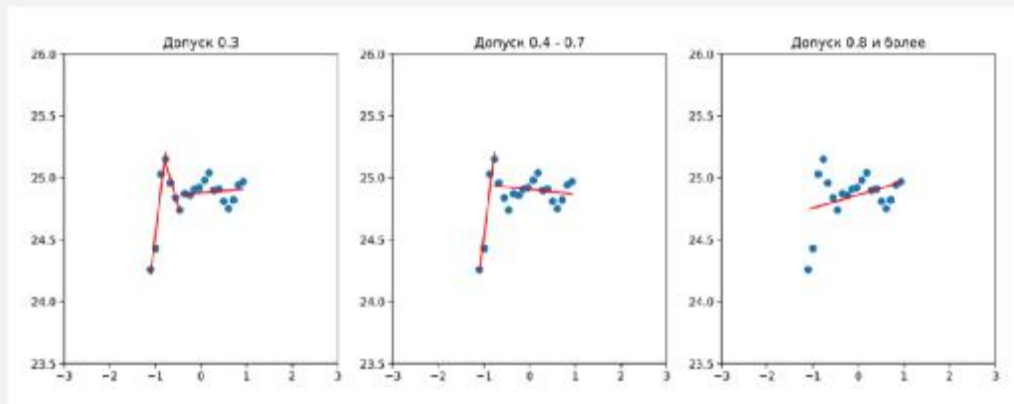
## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ОБРАБОТКА СИГНАЛА



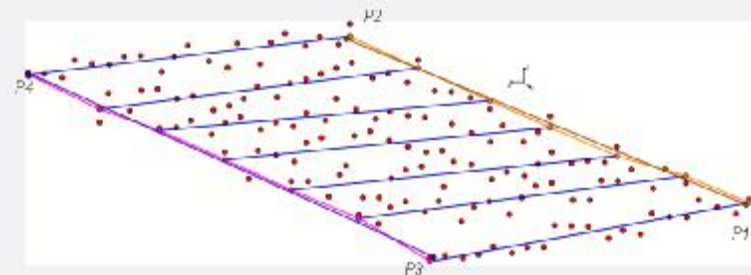
1. Схема работы



2. Интерфейс системы



3. Обработка сигнала с датчика

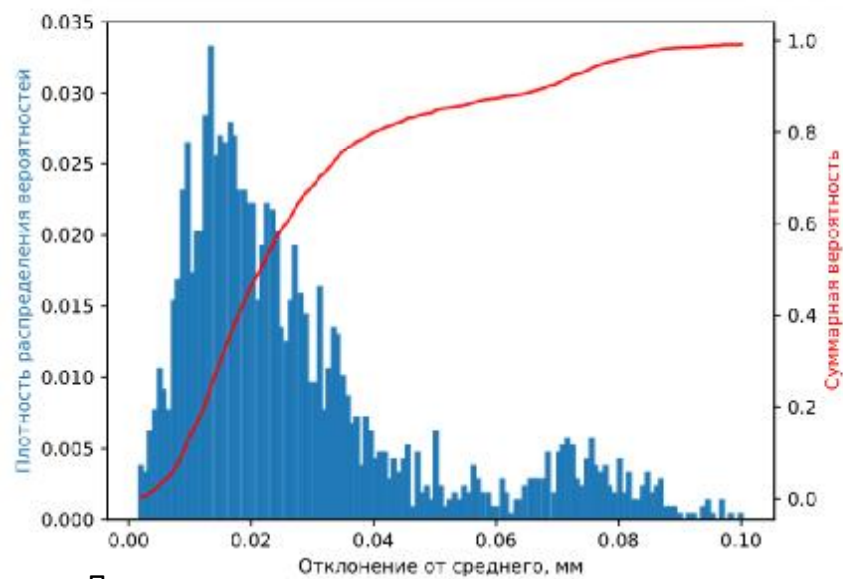
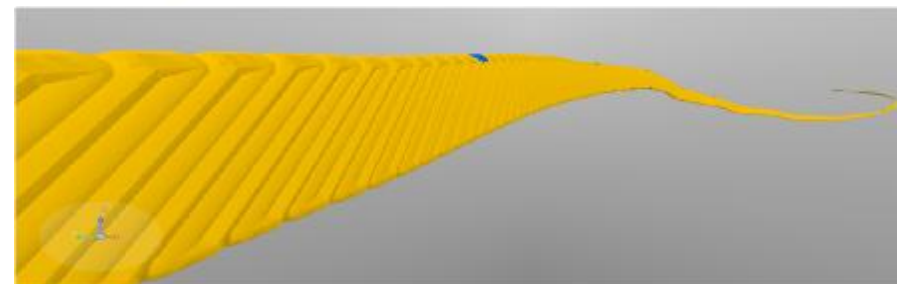
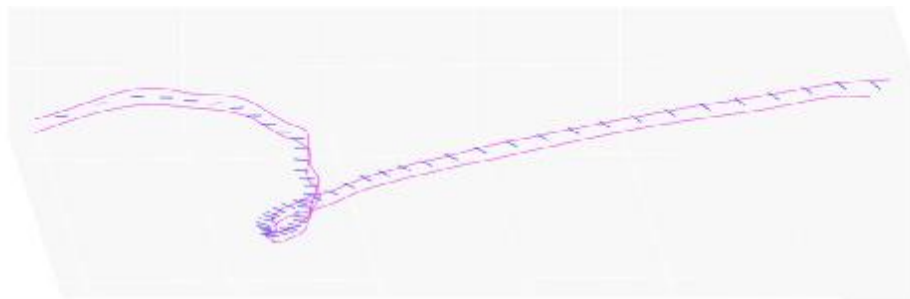


$$\vec{n}(p_0, p_1, p_2) = \begin{bmatrix} y_0 * z_1 - y_0 * z_2 - y_1 * z_0 + y_1 * z_2 + y_2 * z_0 - y_2 * z_1 \\ -x_0 * z_1 + x_0 * z_2 + x_1 * z_0 - x_1 * z_2 - x_2 * z_0 + x_2 * z_1 \\ x_0 * y_1 - x_0 * y_2 - x_1 * y_0 + x_1 * y_2 + x_2 * y_0 - x_2 * y_1 \end{bmatrix}$$

$$\vec{N} = \frac{\vec{n}(P_1, P_3, P_2) + \vec{n}(P_1, P_3, P_4) + \vec{n}(P_3, P_4, P_2) + \vec{n}(P_4, P_2, P_1)}{4}$$

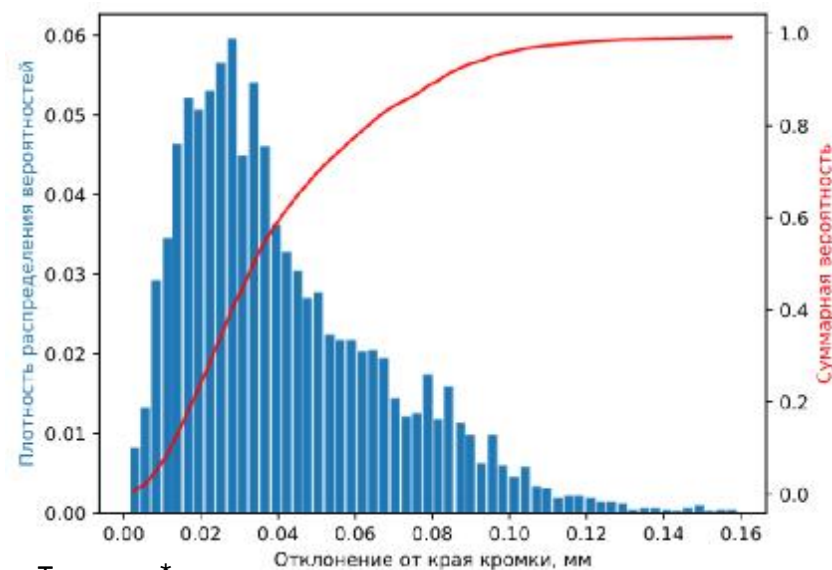
4. Обработка профиля: вычисление вектора нормали поверхности

## РЕЗУЛЬТАТЫ СКАНИРОВАНИЯ



Повторяемость:

< 0.025 мм, P=58.84%  
< 0.05 мм, P=84.30%  
< 0.1 мм, P=99.08%



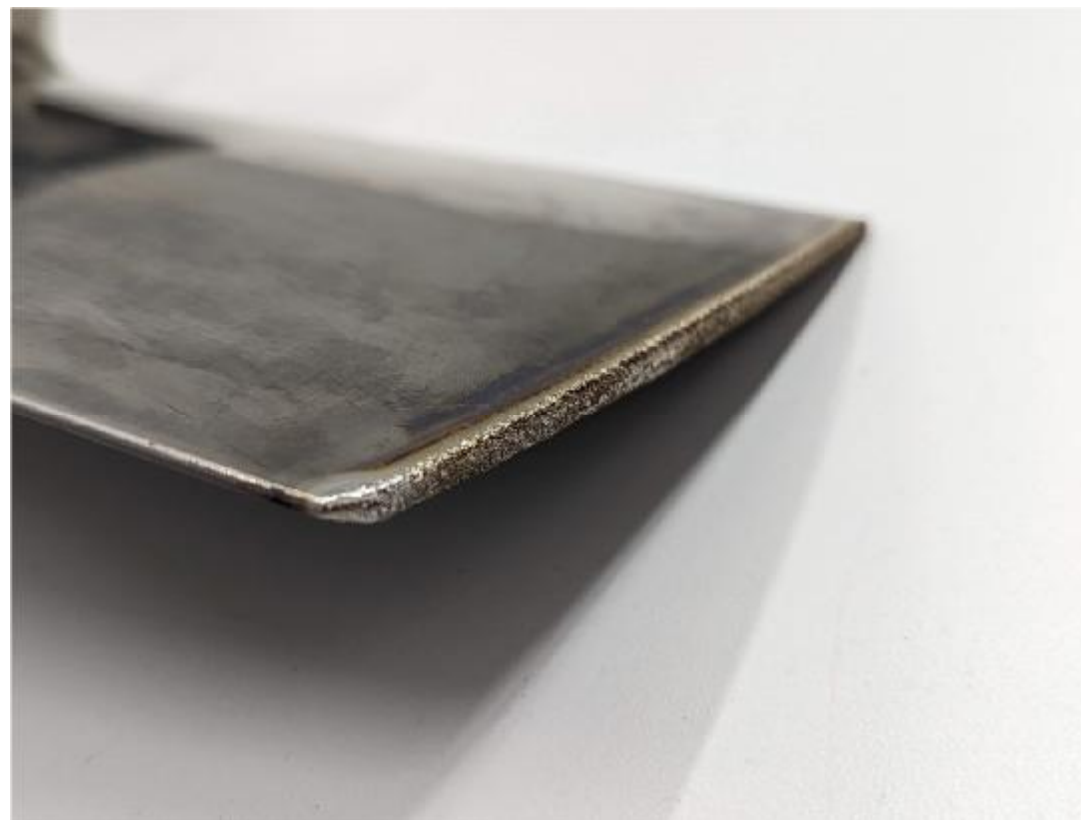
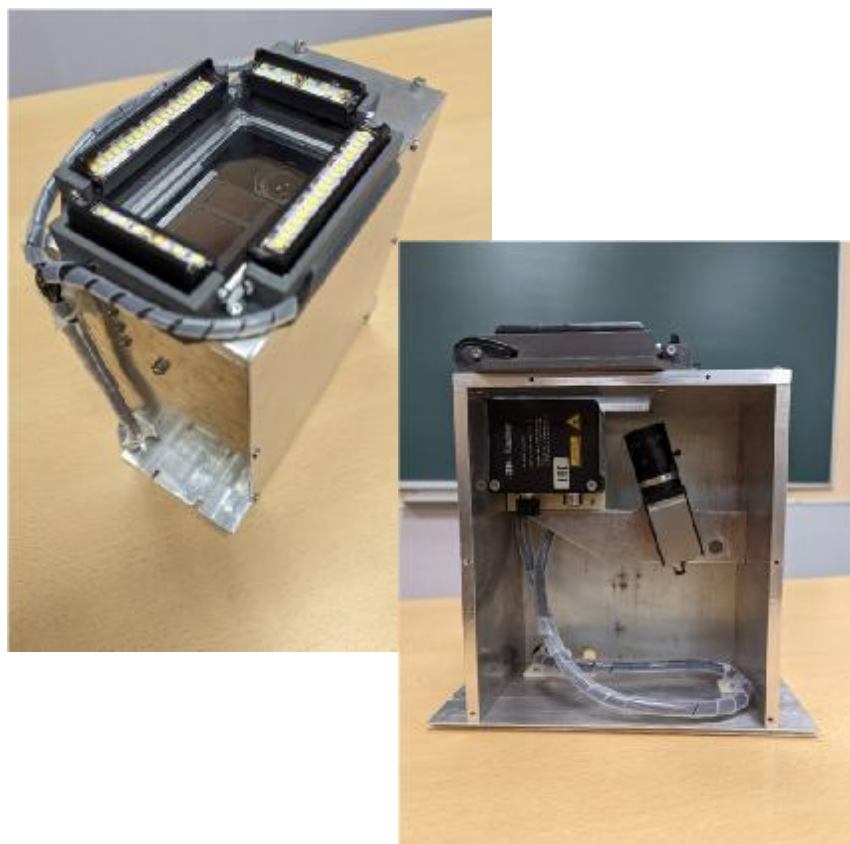
Точность\*:

< 0.05 мм, P=67.56%  
< 0.1 мм, P=95.75%

\* По сравнению с результатами ручного сканирования

## ОПЫТНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ

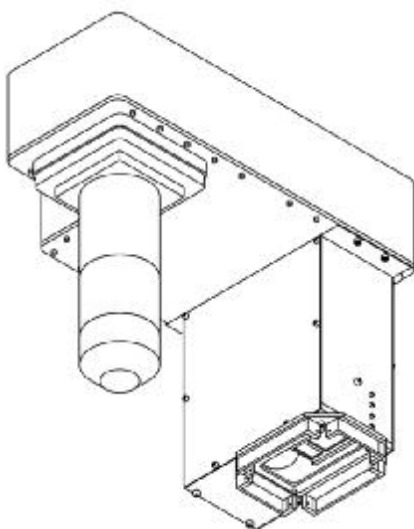
### 1. Система машинного зрения



### 2. Результаты опытной наплавки



## ИТОГИ РАБОТЫ



## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТА

- Разработаны новые методы на базе системы технического зрения по определению границ кромок лопаток ГТД и формированию траектории наплавки для оборудования с пятью степенями свободы
- Разработана автоматизированная система управления для сканирования и подготовки управляющих программ на основе предложенных методов
- Выполнена интеграция автоматизированной системы управления с установкой прямого нанесения металла
- Выполнена наплавка кромок опытной партии лопаток ГТД.

## ПОЛУЧЕННЫЙ ЭФФЕКТ

- Сокращение времени подготовки технологических программ ремонта в 8 раз.
- минимизация ручного труда в процессе сканирования и наплавки

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОЕКТА

- ПАО «ОДК Сатурн» сформировано ТЗ на создание отечественной установки по ремонту лопаток ГТД методом лазерной наплавки;
- Достигнуты предварительные договоренности с Институтом лазерных и сварочных технологий СПбМГТУ об интеграции разработанной технологии в серию отечественных установок прямого лазерного выращивания «Илист» с учетом требований сформированного ТЗ .



# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Дуальная лаборатория «ПромИТ»  
РГТУ имени П. А. Соловьева  
г. Рыбинск, 152934  
ул. Пушкина, д. 53  
тел.: +7 (4855) 22-28-37  
[frei@rsatu.ru](mailto:frei@rsatu.ru)

[www.rsatu.ru](http://www.rsatu.ru)