



XI Международный технологический форум
"Инновации. Технологии. Производство"



Автоматизация процесса ремонта лопаток ГТД на установках прямого нанесения металла

Докладчик:

Инженер-исследователь дуальной лаборатории «ПромИТ»
РГТУ имени П.А. Соловьева, канд. техн. наук

Котляр Д. И.

Рыбинск – 2025

Дуальная лаборатория «ПромИТ»

- Направления деятельности: научные исследования; разработка и модернизация промышленного оборудования; разработка программного обеспечения.
- Осуществляем деятельность с 2017 года.
- В 2024 г. создана дуальная лаборатория «ПромИТ».



ЛОМАНОВ

Алексей Николаевич

Директор института информационных технологий и систем управления,
канд. техн. наук



КОТЛЯР

Дмитрий Игоревич

Инженер-исследователь,
канд. техн. наук



МЕДВЕДЕВ

Евгений Юрьевич

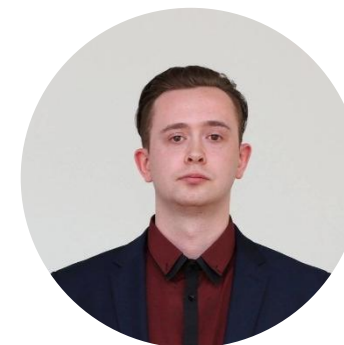
Инженер-исследователь



КАЛЕНОВ

Александр Сергеевич

Инженер АСУП



КЛОЧКОВ

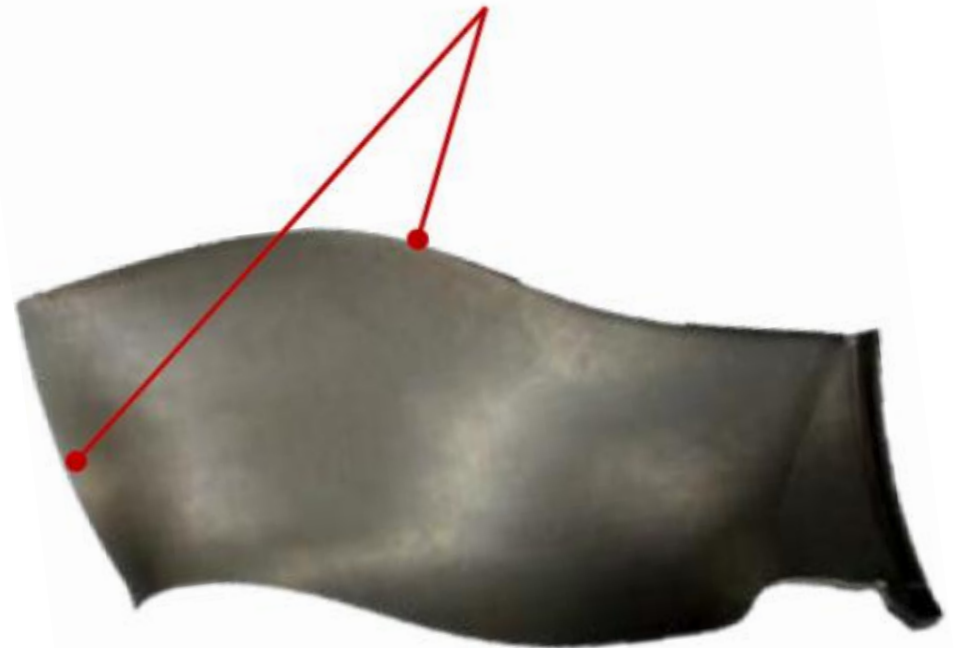
Кирилл Александрович

Инженер АСУП

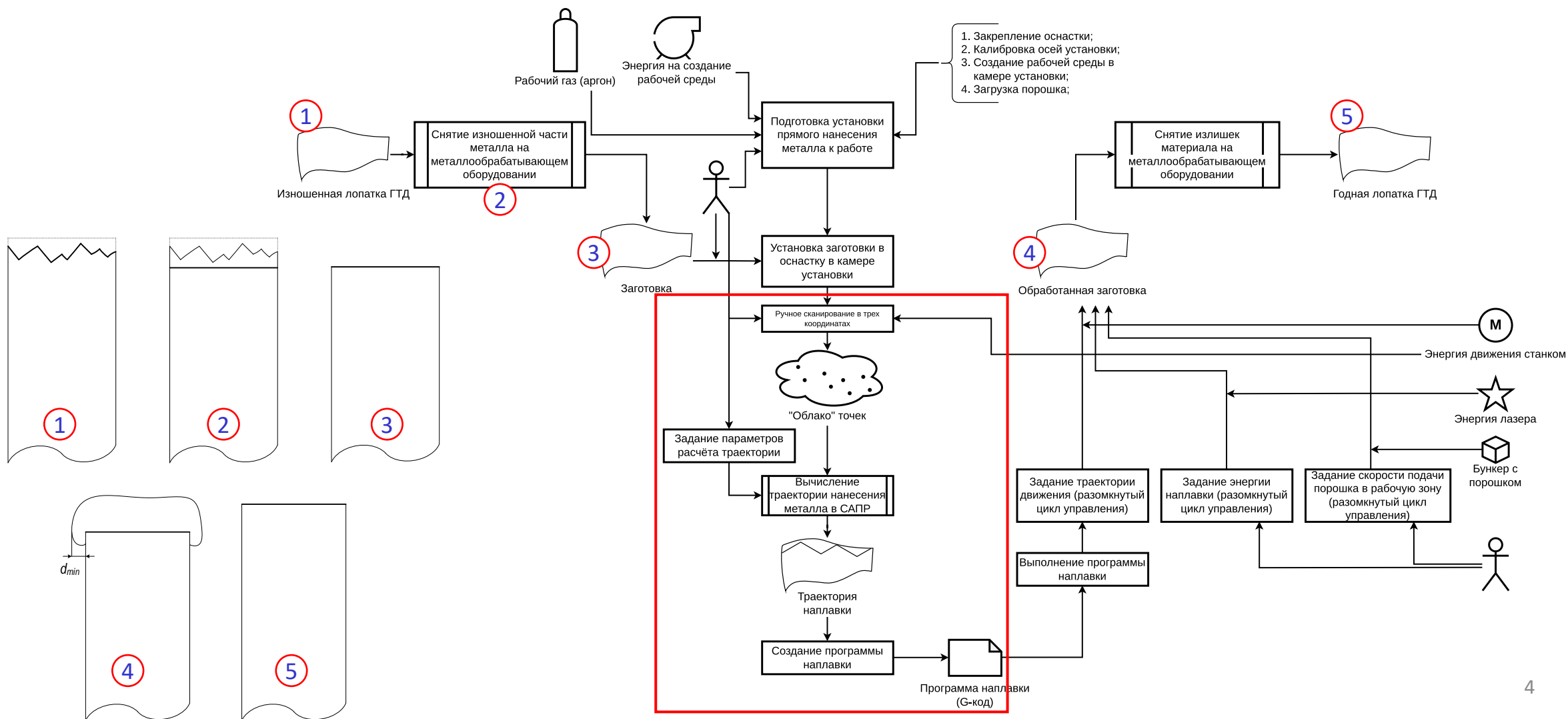
Актуальность темы

- Гражданская авиация
- Энергетические установки
- Военная авиация
- Газоперекачивающие установки
- Судостроение

Наплавка входной
кромки и торца



Технологический процесс ремонта лопаток ГТД до модернизации



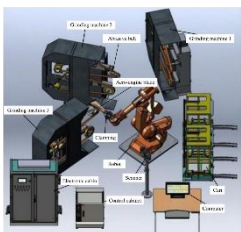
Цель работы:

Повышение эффективности технологического процесса ремонта лопаток газотурбинных двигателей на установке прямого нанесения материала.

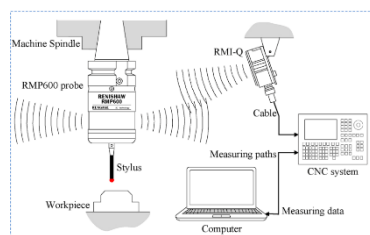
Задачи:

- 1) анализ современного состояния области исследования, постановка задачи исследования;
- 2) разработка математической модели сканирования криволинейных поверхностей и метода формирования непрерывной траектории наплавки;
- 3) синтез архитектуры и алгоритмов системы управления, в том числе алгоритмов подсистемы сканирования и определения границ кромок лопаток ГТД;
- 4) техническая реализация системы управления установкой прямого нанесения материала, экспериментальная проверка.

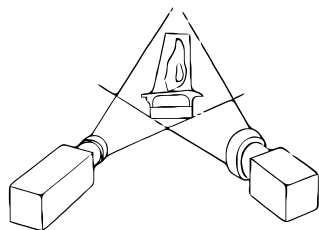
Патентно-информационный поиск



[36] Xiaohu X., Dahu Z., Haiyang Z., Sijie Y., Han D. TCP-based calibration in robot-assisted belt grinding of aero-engine blades using scanner easurements. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, № 90, с. 635–647. doi:10.1007/s00170-016-9331-8.



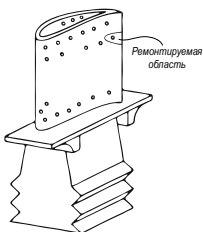
[40] Jinting X., Longkun X., Yifei L., Yuwen S. Shape-adaptive CNC milling for complex contours on deformed thin-walled revolution surface parts. *Journal of Manufa-cturing Processes*, 2020, № 59, с. 760–771. doi:10.1016/j.jmapro.2020.10.001



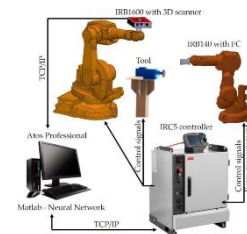
[56] Пат. 2295110 РФ, МПК G01B 11/24. Способ измерения формы поверхности объекта и представления результатов измерения на упомянутой поверхности, А. В. Сивохин (РФ), А. Б. Кузнецов (РФ), Г. С. Бабичев (РФ). № 2005131751/28; заявл. 13.10.2005; опубл. 10.03.2007, Бюл. № 7, 8 с.



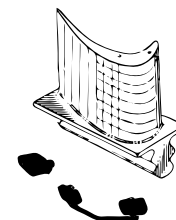
[52] Пат. 152184 РФ, МПК G01B 11/02. Устройство для измерения геометрических параметров концов труб, Д. Д. Медведев (РФ), С. Г. Ершов (РФ), А. В. Кириков (DE), В. А. Щербаков (РФ), В. К. Жуков (РФ). № 2014119523/28; заявл. 15.05.2014; опубл. 10.05.2015, Бюл. № 13, 19 с.



[46] Пат. 2499657 РФ, МПК B23P 6/00. Способ автоматизированного ремонта детали машин, Т. Мельцер-Йокиш (DE), Д. Томаидис (DE), Р. Вилькенхенер (DE). № 2012110399/02; заявл. 16.08.2010; опубл. 27.11.2013, Бюл. № 33, 11 с.



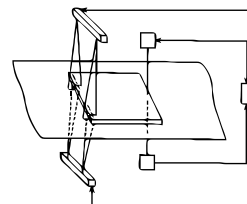
[37] Burghardt A., Szybicki D., Gierlak P., Kurc K., Muszyńska M. Robotic Grinding Process of Turboprop Engine Compressor Blades with Active Selection of Contact Force. *Tehnički vjesnik*, 2022, № 29, с. 15–22. doi:10.17559/TV-20190710141137.



[42] Пат. 2708940 РФ, МПК G01B 11/24. Способ измерения трехмерной геометрии выпуклых и протяженных объектов, С. В. Двойнишников (РФ), В. Г. Меледин (РФ), И. В. Щепихин (РФ), И. К. Кабардин (РФ), Д. В. Куликов (РФ), № 2019101273; заявл. 15.01.2019; опубл. 12.12.2019, Бюл. № 35, 8 с



[57] Ine K. LENS Technology Overview. <https://www.slideserve.com/kishi/lens-technology-overview> (дата обращения: 10.05.2023)

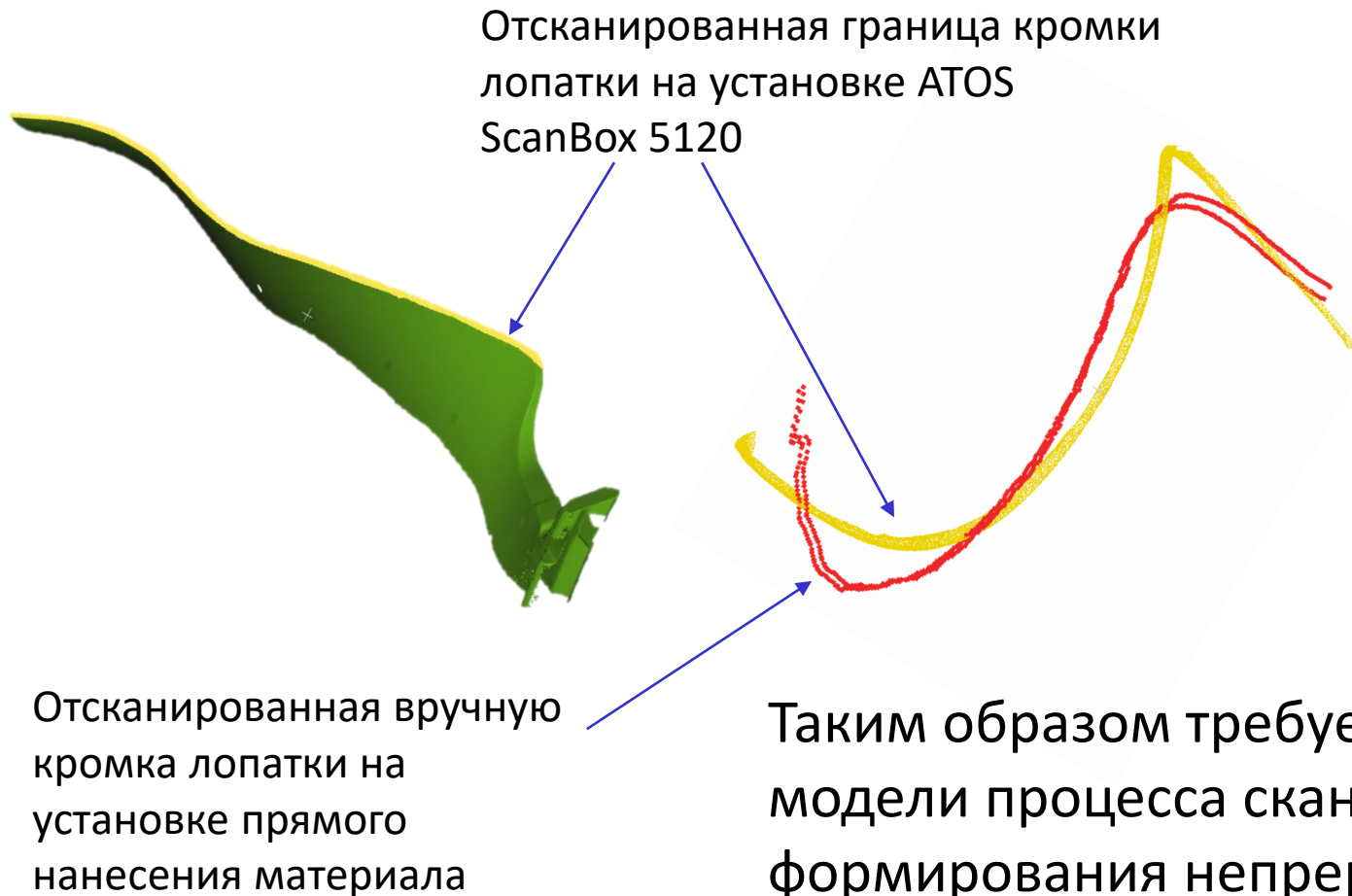


[53] Пат. 96424 РФ, МПК G01B 11/04, G01B 7/04. Устройство для измерения размеров листов на конвейере, В. Н. Дёмкин (РФ), Д. С. Доков (РФ) № 2009130661/22; заявл. 10.08.2009; опубл. 27.07.2010, 14 с..

Патентно-информационный поиск

Критерий	[36]	[37]	[40]	[42]	[56]	[57]	[52]	[53]	[46]	Предл. способ
Расположение сканирующего устройства	В общей рабочей зоне	В общей рабочей зоне	Непосредственно на станке	Вне оборудования	Вне оборудования	Непосредственно на станке	Непосредственно на станке	Непосредственно на станке	Непосредственно на станке	Непосредственно на станке
Когда осуществляется сканирование	Перед обработкой или в процессе с остановкой процесса обработки	Перед обработкой или в процессе с остановкой процесса обработки	Перед обработкой или в процессе с остановкой процесса обработки	Перед обработкой	Перед обработкой	Перед обработкой	После обработки	После обработки	Перед обработкой	Перед обработкой
Метод сканирования	Активный триангуляционный сканер + пассивный стереоскопический сканер	Активный триангуляционный сканер + пассивный стереоскопический сканер	Контактный метод	Активный триангуляционный сканер + пассивный стереоскопический сканер	Пассивный стереоскопический сканер	Пассивный фотометрический сканер	Триангуляционный сканер (2D-профилومتر)	Пассивный силуэтный сканер	Активный триангуляционный сканер + пассивный стереоскопический сканер	Активный триангуляционный сканер + пассивный фотометрический сканер
Тип получаемых данных за «такт» измерения	Поверхность	Поверхность	Точка в пространстве	Поверхность	Поверхность	Плоскость	Линия в пространстве	Точка в пространстве	Поверхность	Линия в пространстве + плоскость
Тип измеренных данных после сканирования	3D модель поверхности	3D модель поверхности	3D модель поверхности	3D модель поверхности	3D модель поверхности	2D контур поверхности	3D контур поверхности	2D контур поверхности	3D модель поверхности	3D контур поверхности
Требуется базирование детали после сканирования	Да	Да	Нет	Да	Да	Нет	Не применимо	Не применимо	Нет	Нет
Применяется для ремонта лопаток ГТД	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Да, восстановление 2D поверхности	Нет	Нет	Да, восстановление локальных участков	Да, восстановление 3D поверхности

Исследование сканирования изделий вне станка на установке ATOS ScanBox 5120

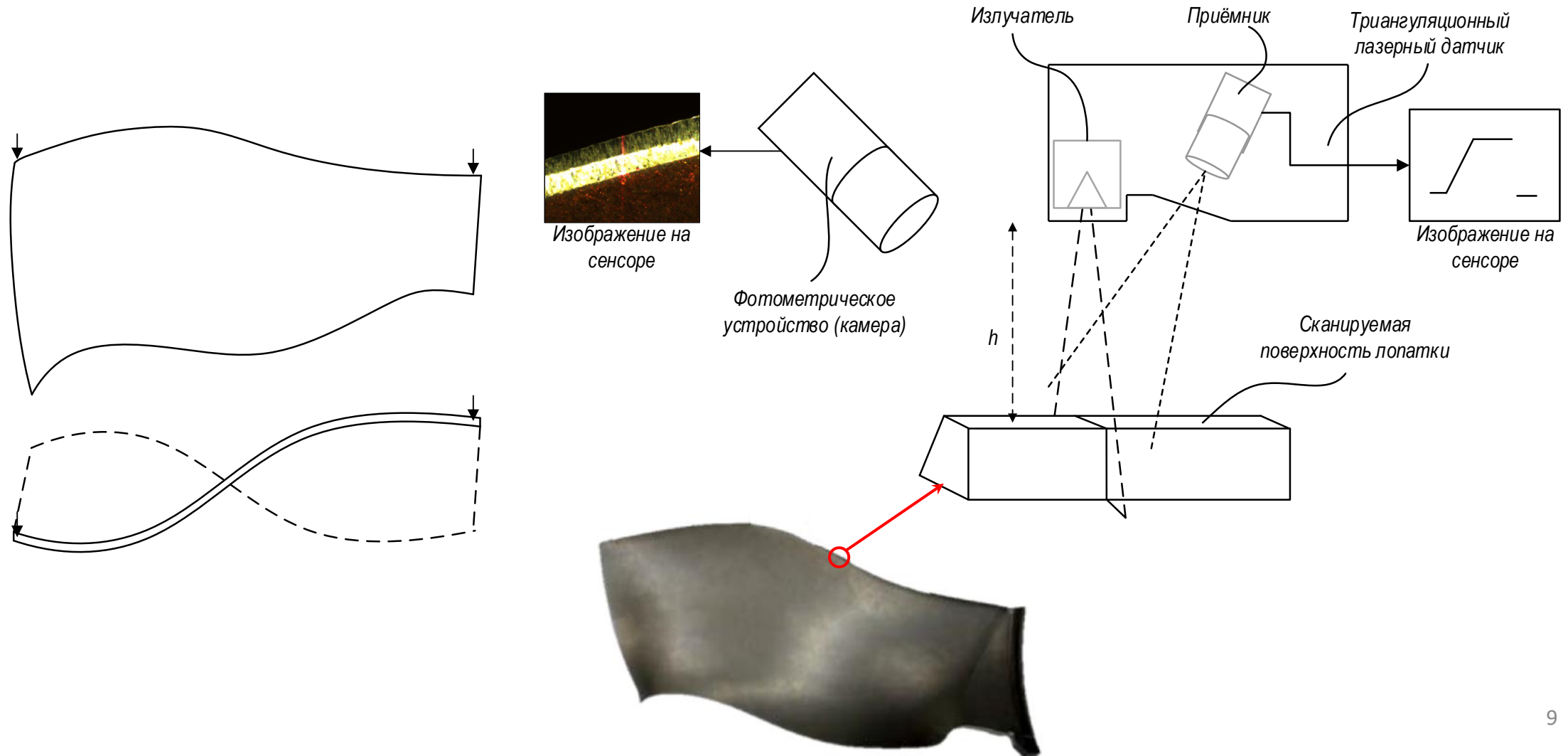


Проблемы:

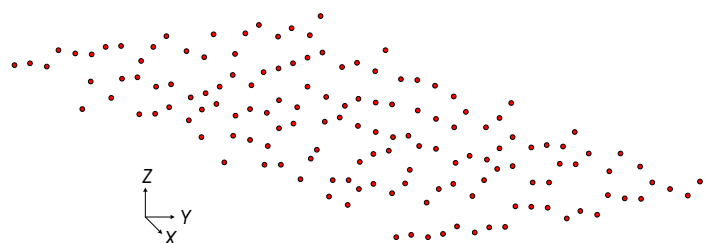
- 1) несоответствие систем координат «ломает» результаты сканирования – требуется точная калибровка установок;
- 2) требуется станция «нулевого» базирования и высокоточная оснастка под каждую номенклатуру;
- 3) формат выходных данных подходит для восстановления локальных участков, требуется адаптация для непрерывного нанесения по сложнопрофильной криволинейной поверхности.

Таким образом требуется разработка математической модели процесса сканирования и метода формирования непрерывной траектории наплавки для оборудования с пятью степенями свободы.

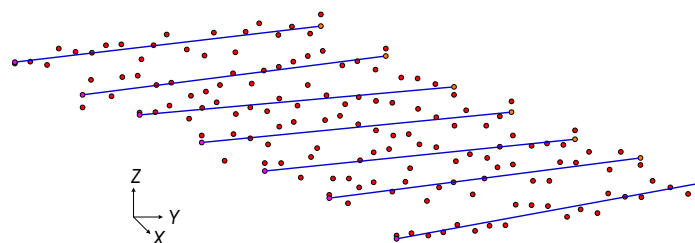
Структурная схема подсистемы сканирования



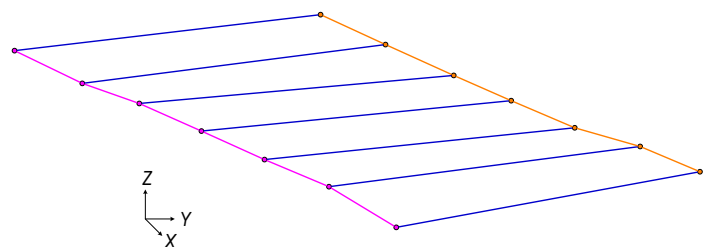
Математическая модель процесса сканирования: в прямом направлении



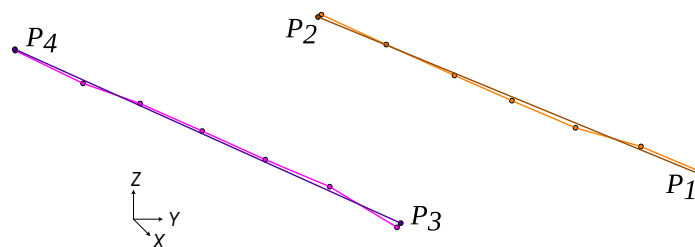
а) облако точек отсканированной кромки



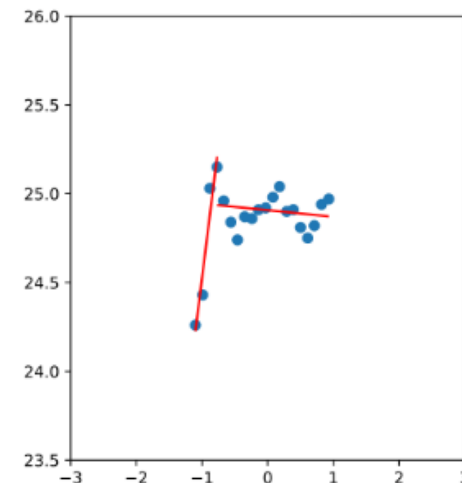
б) выделенные кромки в облаке точек



в) выделенные грани



г) локальные границы P₁, P₂, P₃ и P₄ кромки лопатки



$$\Delta\gamma = -\arctan\left(\frac{\vec{N}_A}{\vec{N}_B}\right)$$

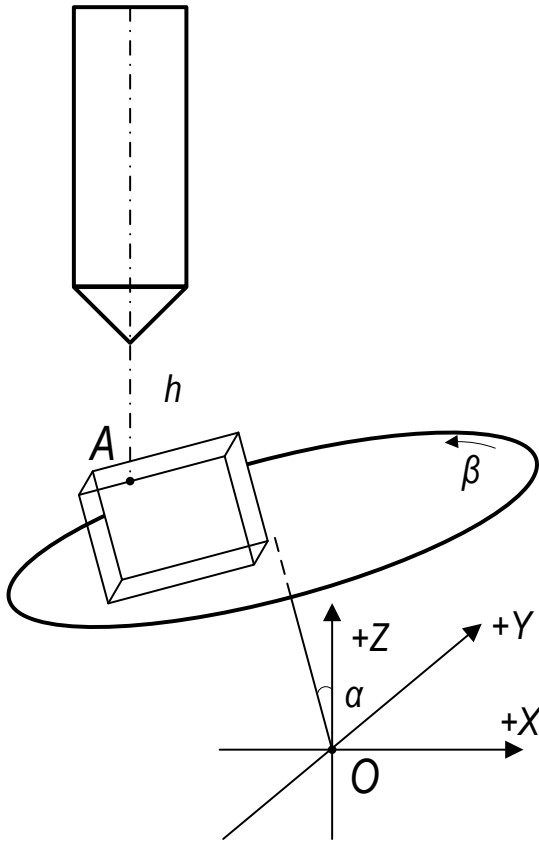
$$\vec{n}(p_0, p_1, p_2) = \begin{bmatrix} y_0 \cdot z_1 - y_0 \cdot z_2 - y_1 \cdot z_0 + y_1 \cdot z_2 + y_2 \cdot z_0 - y_2 \cdot z_1 \\ -x_0 \cdot z_1 + x_0 \cdot z_2 + x_1 \cdot z_0 - x_1 \cdot z_2 - x_2 \cdot z_0 + x_2 \cdot z_1 \\ x_0 \cdot y_1 - x_0 \cdot y_2 - x_1 \cdot y_0 + x_1 \cdot y_2 +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

$$\vec{N}' = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\gamma) & -\sin(\Delta\gamma) & 0 & 0 \\ \sin(\Delta\gamma) & \cos(\Delta\gamma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{N}_A \\ \vec{N}_B \\ \vec{N}_C \\ 1 \end{bmatrix}$$

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

$$\Delta\omega = -\arctan\left(\frac{\vec{N}'_B}{\vec{N}'_C}\right)$$

Математическая модель расчёта смещения координат подсистемы сканирования



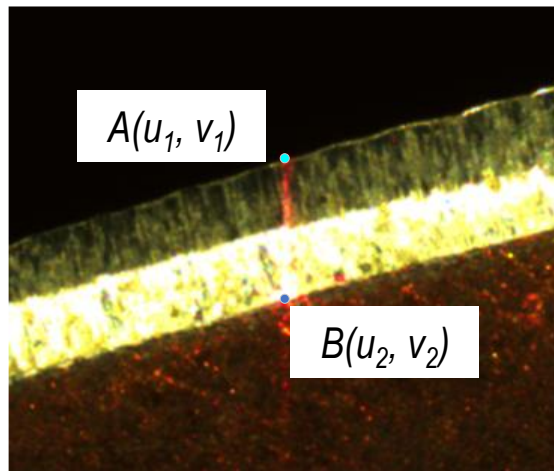
$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -L_T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta_2 & -\sin \beta_2 & 0 & 0 \\ \sin \beta_2 & \cos \beta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta_1 & -\sin \beta_1 & 0 & 0 \\ \sin \beta_1 & \cos \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$L_T = \begin{cases} \frac{Y_{abs} - y_t \cdot \cos(\alpha)}{\sin(\alpha)} & \text{при } \sin(\alpha) \neq 0 \\ (Z_{abs} - h) & \text{при } \sin(\alpha) = 0 \end{cases}$$

$$y_t = Y_{abs} \cdot \cos(\alpha) - (Z_{abs} - h) \cdot \sin(\alpha)$$

$$\begin{bmatrix} X_{abs,2} \\ Y_{abs,2} \\ Z_{abs,2} \\ 1 \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} X_{abs,1} \\ Y_{abs,1} \\ Z_{abs,1} - (h + L_T) \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h + L_T \\ 1 \end{bmatrix}$$

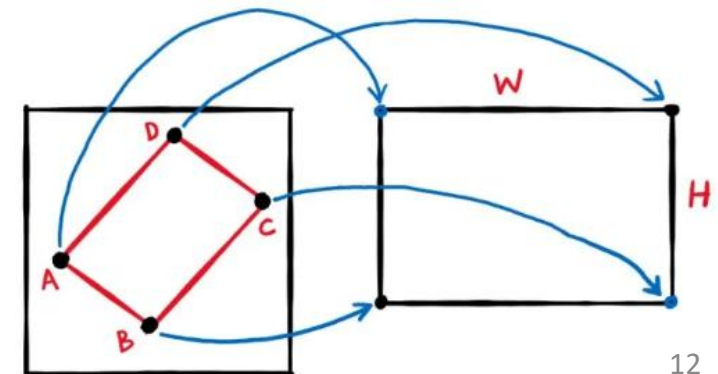
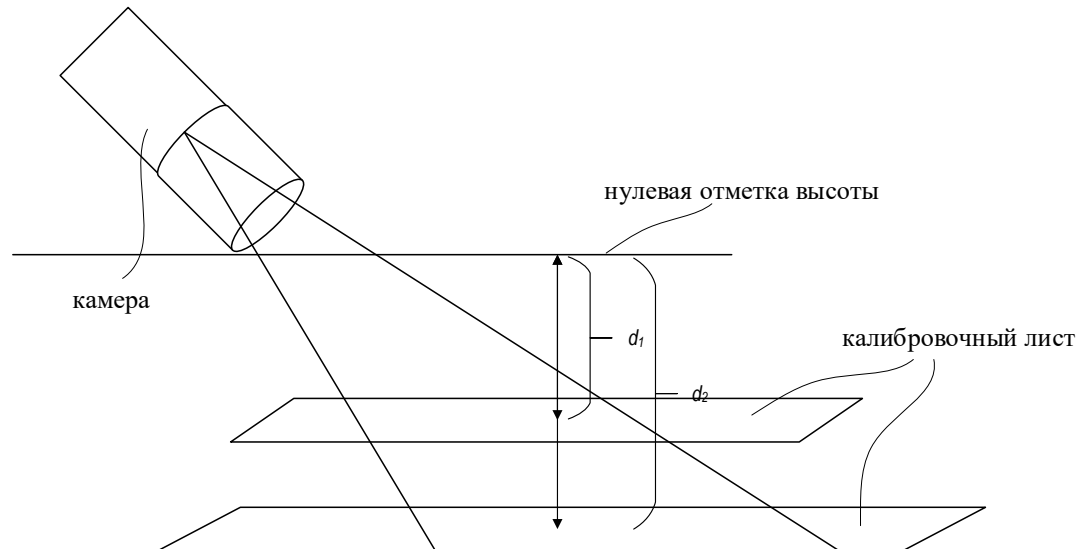
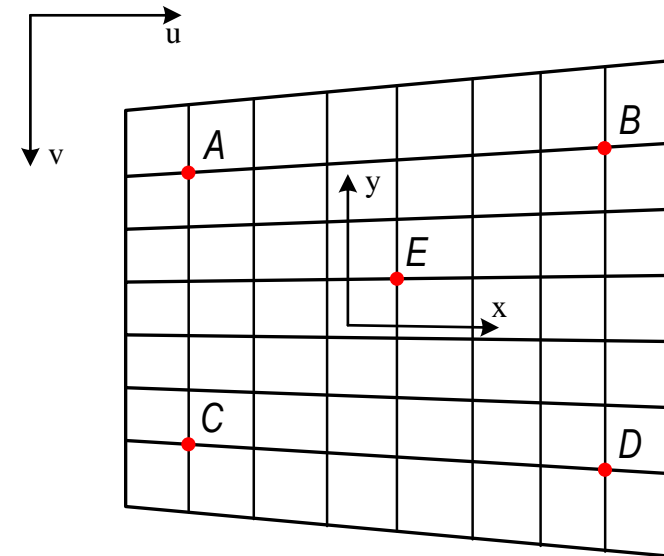
Сканирование в обратном направлении



$$p = \frac{d - d_1}{d_2 - d_1}$$

$$M_{3 \times 3} = M_1 \cdot (1 - p) + M_2 \cdot p$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = M_{3 \times 3} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}$$



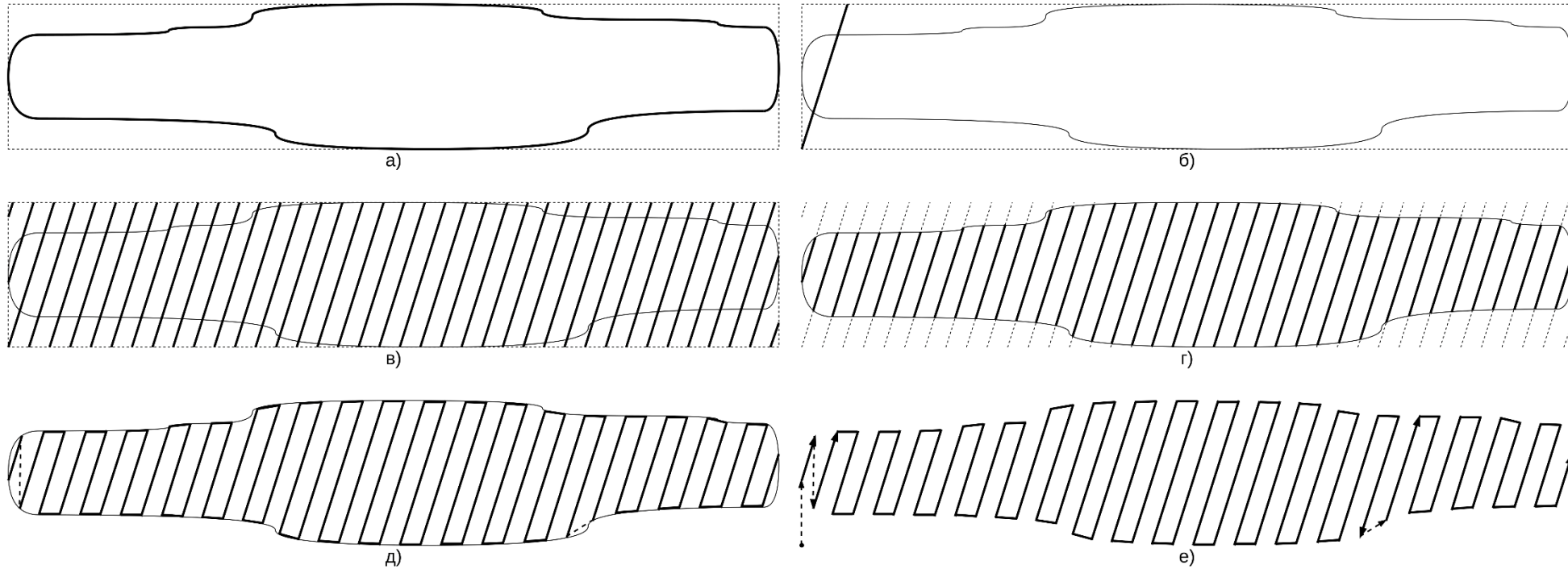
Метод формирования траектории наплавки для установок с пятью степенями свободы

- 1) Подготовка входных данных:
 - 1) выравнивание векторов нормалей отсканированных точек поверхности;
 - 2) выравнивание векторов направления обхода поверхности;
- 2) Формирование траектории наплавки в плоскости:
 - 1) формирование линий штриховки;
 - 2) отсечение линий за пределами контура фигуры;
 - 3) соединение линий штриховки перемычками в замкнутую траекторию;
 - 4) формирование траектории свободного перемещения;
- 3) Постобработка траектории наплавки:
 - 1) вычисление значений Z-координат;
 - 2) вычисление обратных матриц трансформации;
 - 3) вычисление векторов нормалей;
 - 4) преобразование траектории наплавки из 2D представления в 3D.

Подготовка данных к формированию траектории наплавки



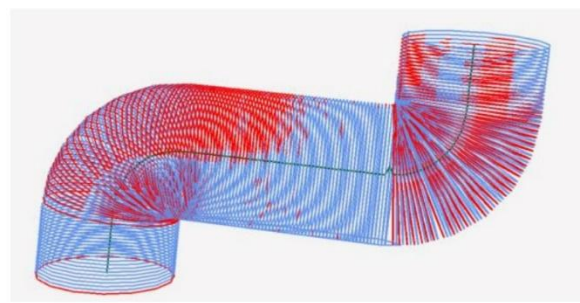
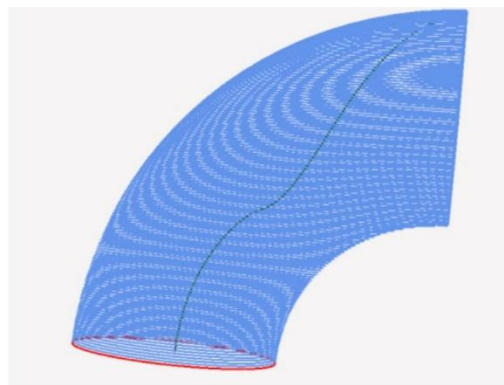
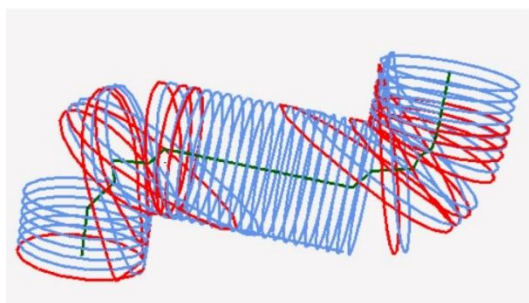
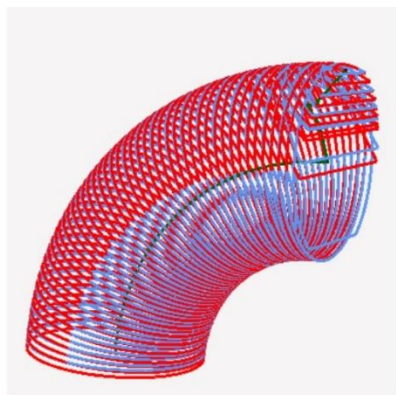
Синтез траектории наплавки для пятикоординатной установки прямого нанесения металла



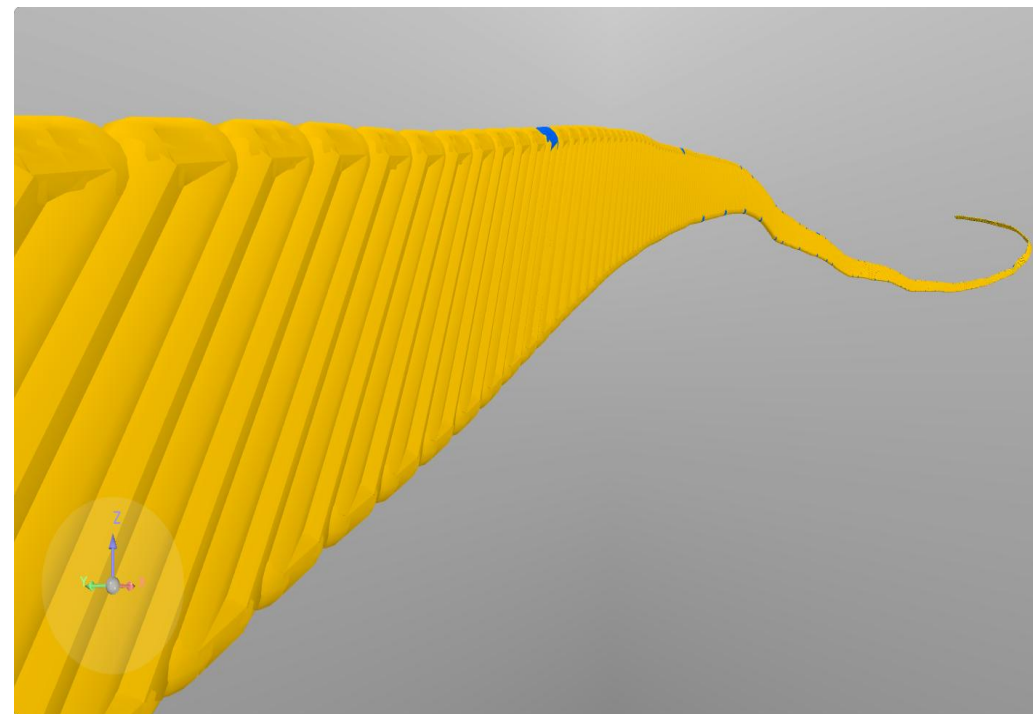
а) контур фигуры; б) формирование базовой линии штриховки;
в) заполнение области штриховки шаблоном; г) отсечение линий за пределами фигуры;
д) соединение штрихов в замкнутую траекторию; е) результат формирования траектории штриховки.

Сравнение результатов формирования траектории наплавки с известными

Известный метод



Предложенный метод

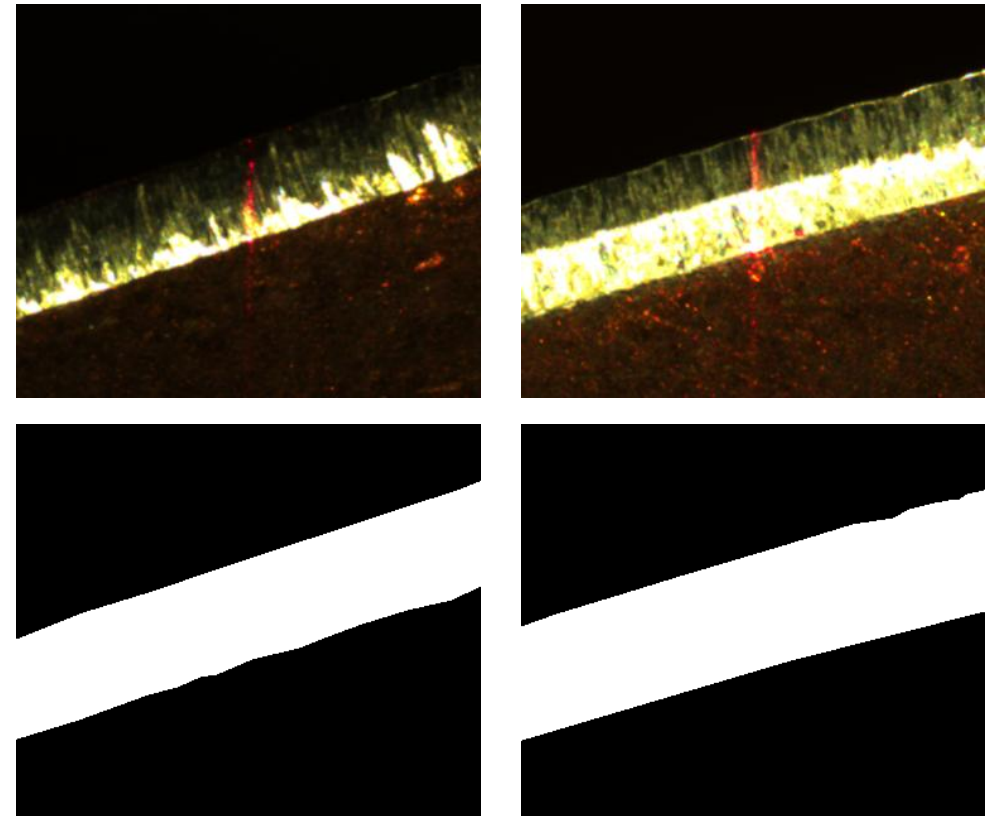


Андреев А. Е., Дроботов А. В., Коптелова И. А., Гушин И. А., Кизилев В. Г.,
Скрипников Н. А. Переработка алгоритма и программной реализации
прототипа дискретного слайсера. *Инженерный вестник Дона*, 2020 № 12 (72),
с. 313-323.

Исследование алгоритмов сегментации кромки лопатки на изображениях

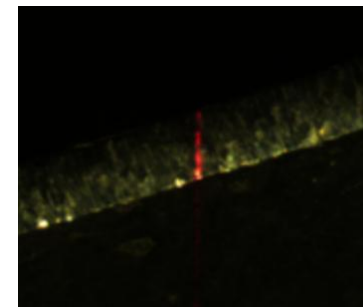
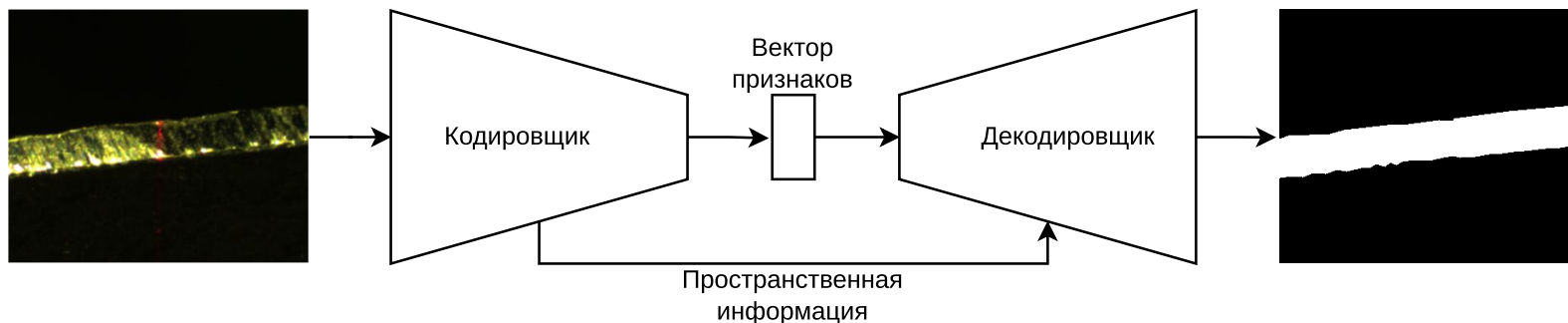
Алгоритм	Intersection over Union, %
Сегментация детерминированным алгоритмом	65,95
Сегментация свёрточной нейронной сетью для обнаружения контуров	77,57
* Семантическая сегментация на основе свёрточной нейронной сети	97,25

* - данный алгоритм выбран для дальнейшего использования в задаче сканирования кромок лопаток ГТД



примеры сегментации кромки лопатки на изображениях

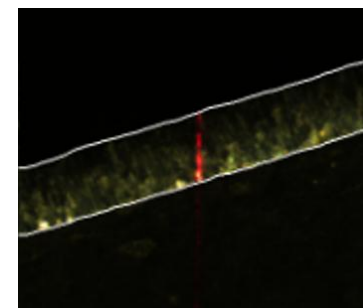
Семантическая сегментация на основе свёрточной нейронной сети



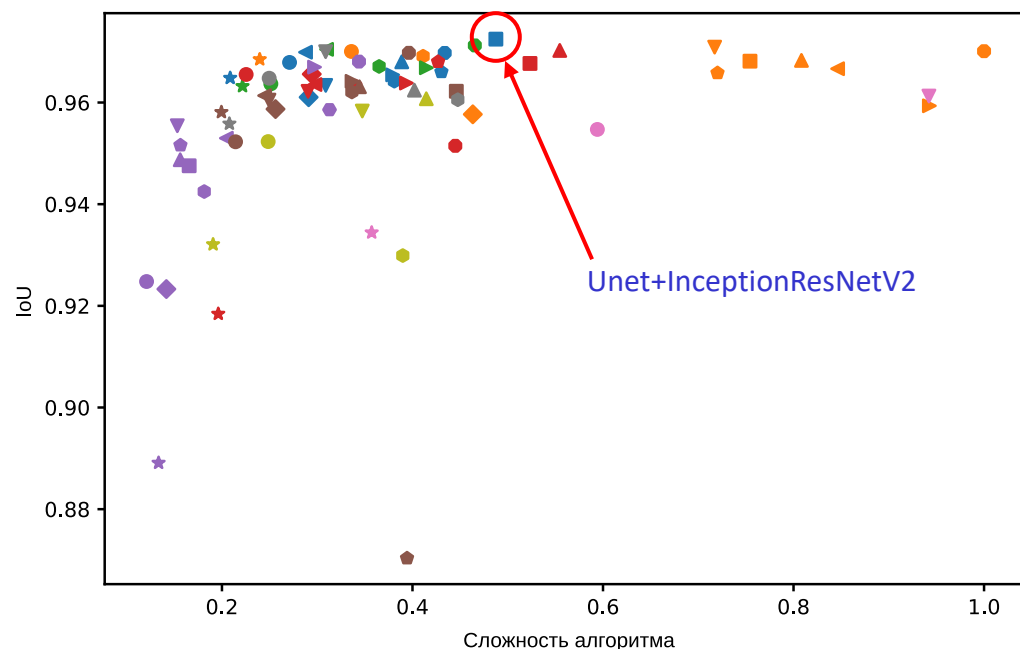
а) оригинальный снимок кромки лопатки



б) результат семантической сегментации

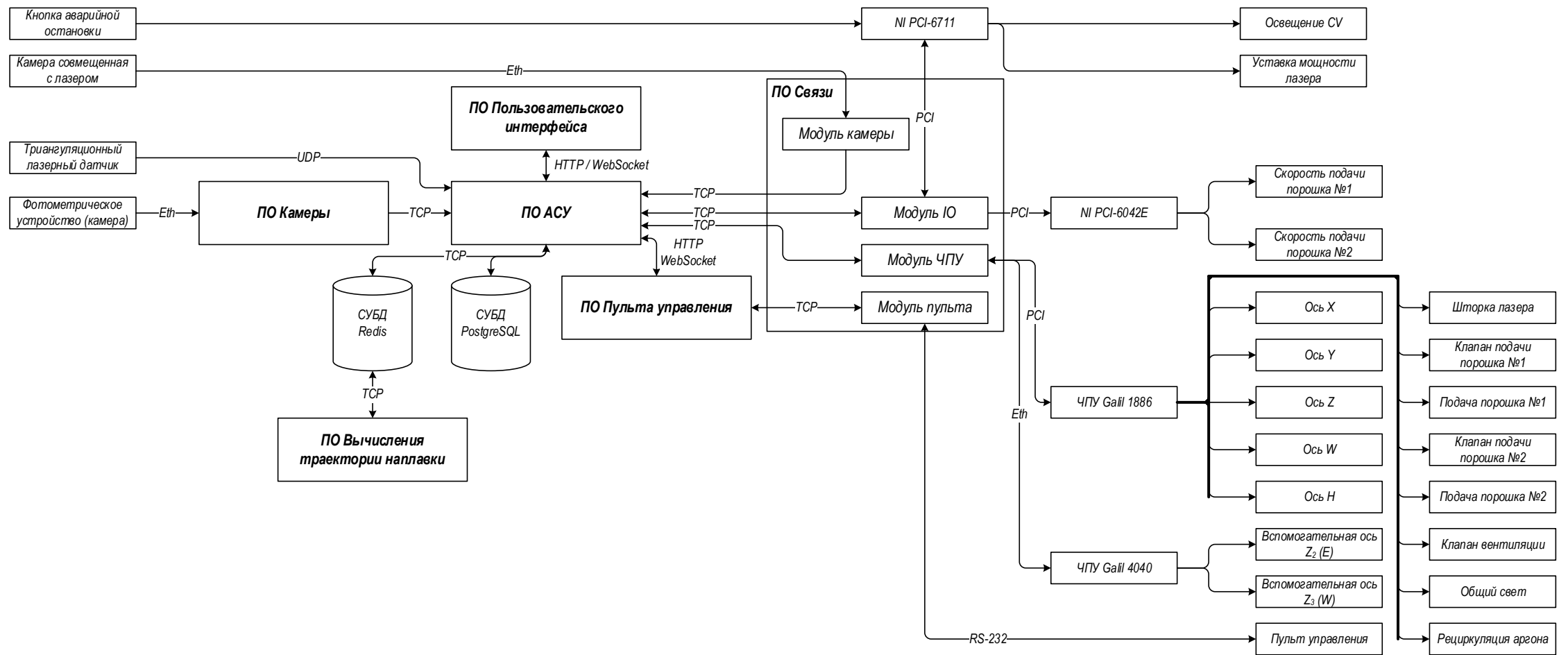


в) снимок с выделенной кромкой

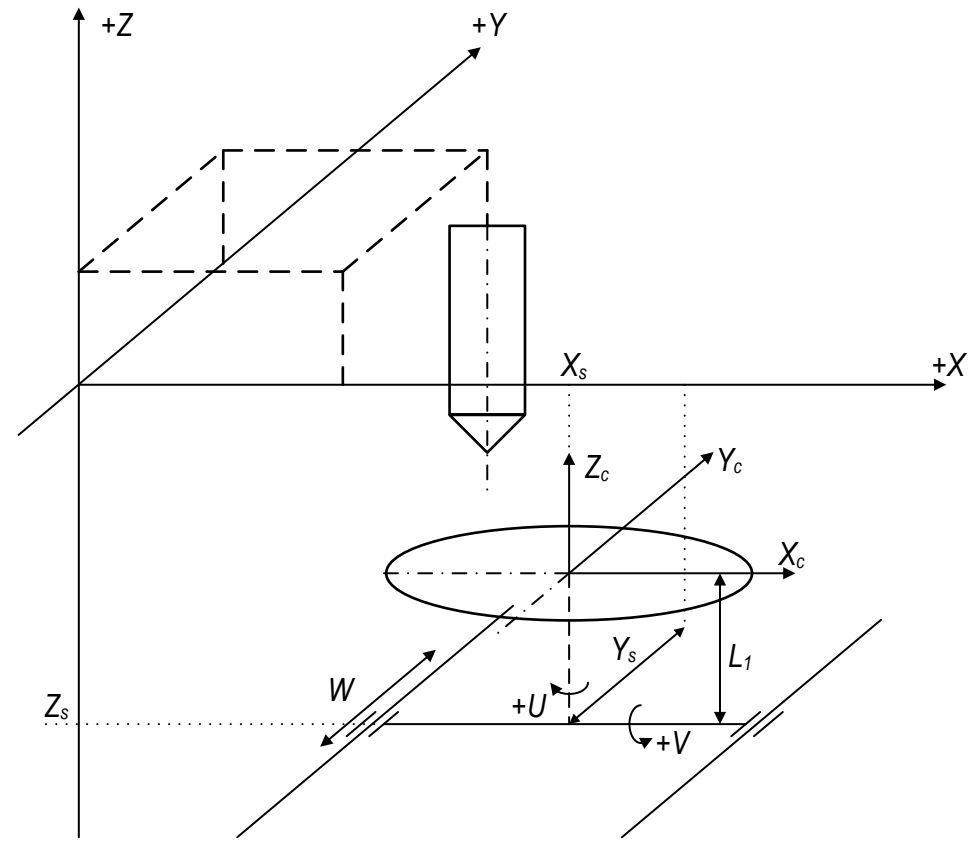
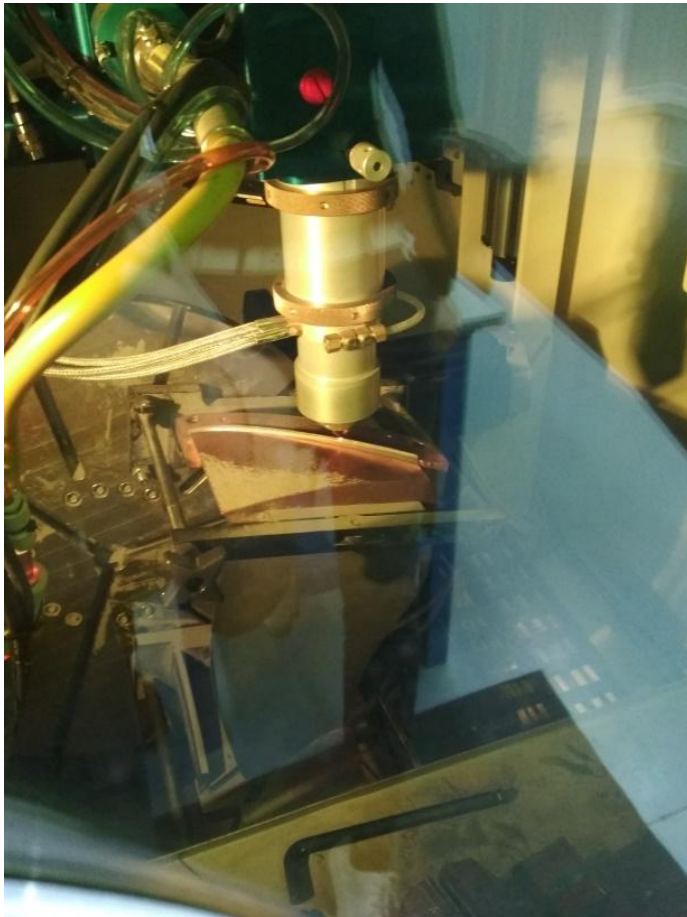


- Unet
- UnetPlusPlus
- MAnet
- Linknet
- PSPNet
- FPN
- DeepLabV3
- DeepLabV3Plus
- PAN
- resnet34
- resnet50
- resnet101
- vgg11
- vgg16
- vgg19
- inceptionresnetv2
- inceptionv4
- efficientnet-b0
- efficientnet-b4
- efficientnet-b7
- xception

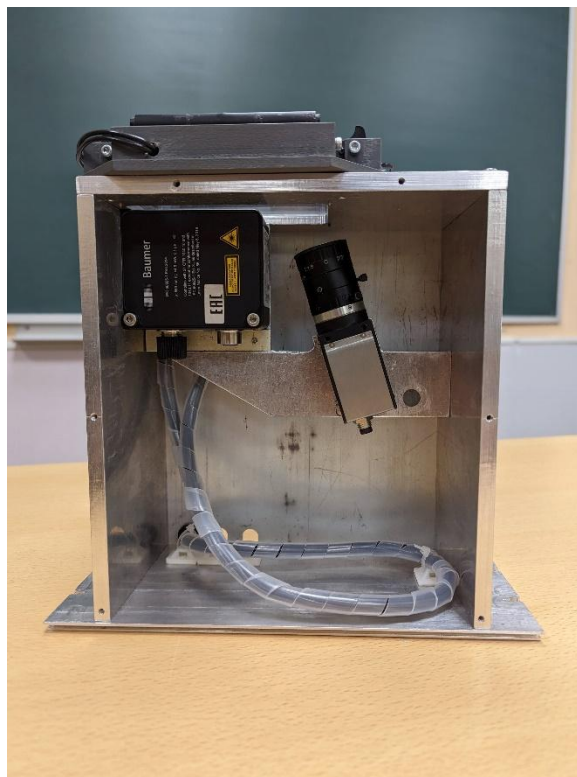
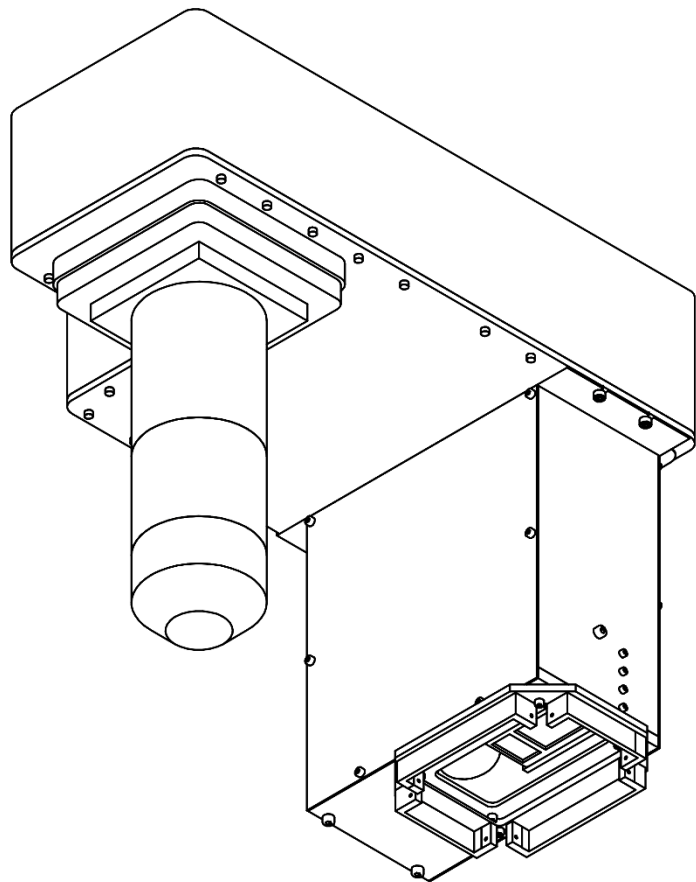
Схема информационных потоков автоматизированной системы управления



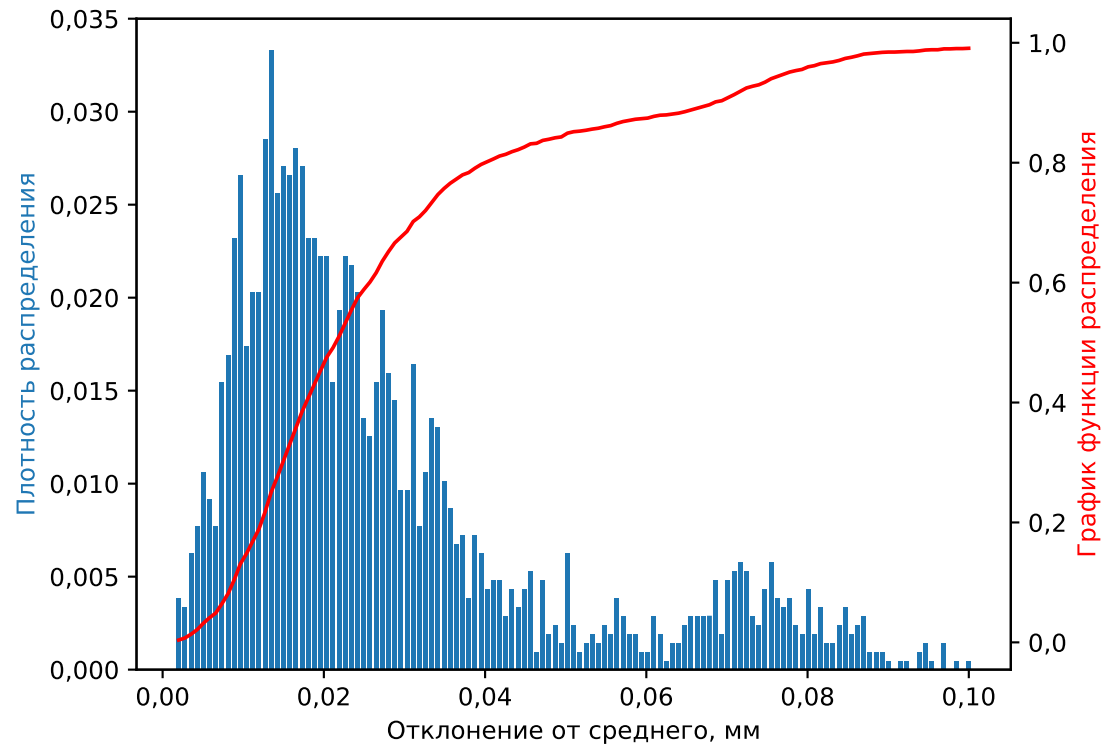
Установка OPTOMECS LENS 850-R



Подсистема сканирования



Результаты сканирования

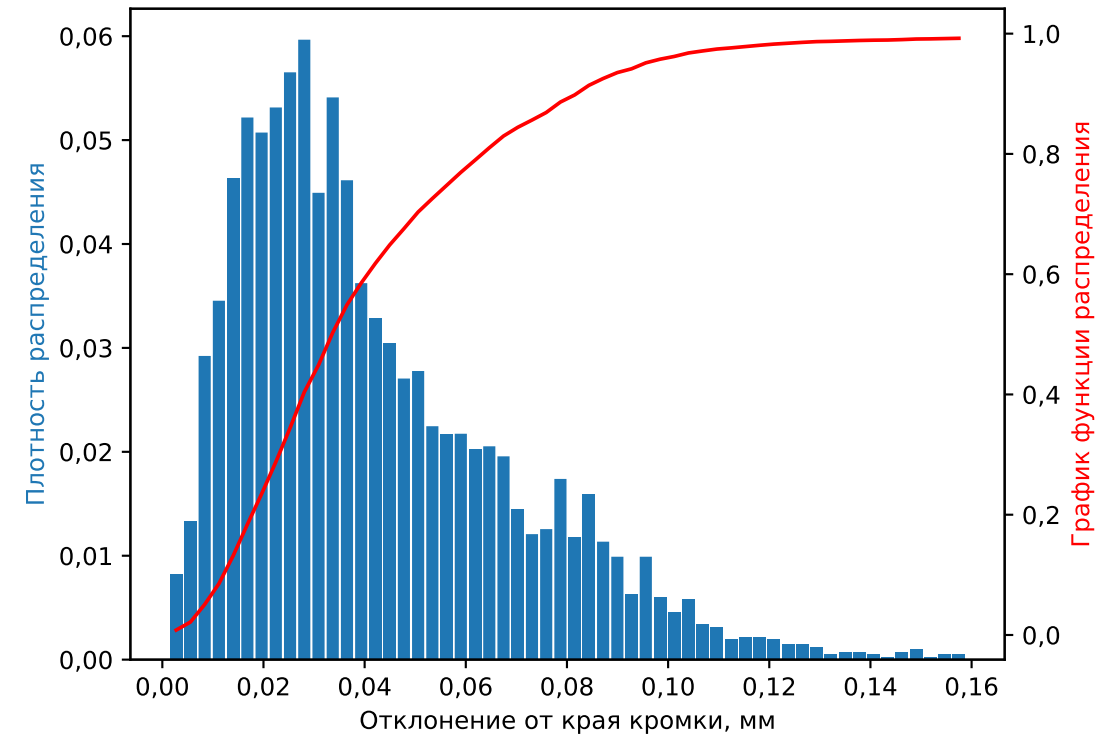


Повторяемость:

< 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

Технологический процесс ремонта лопаток ГТД после модернизации

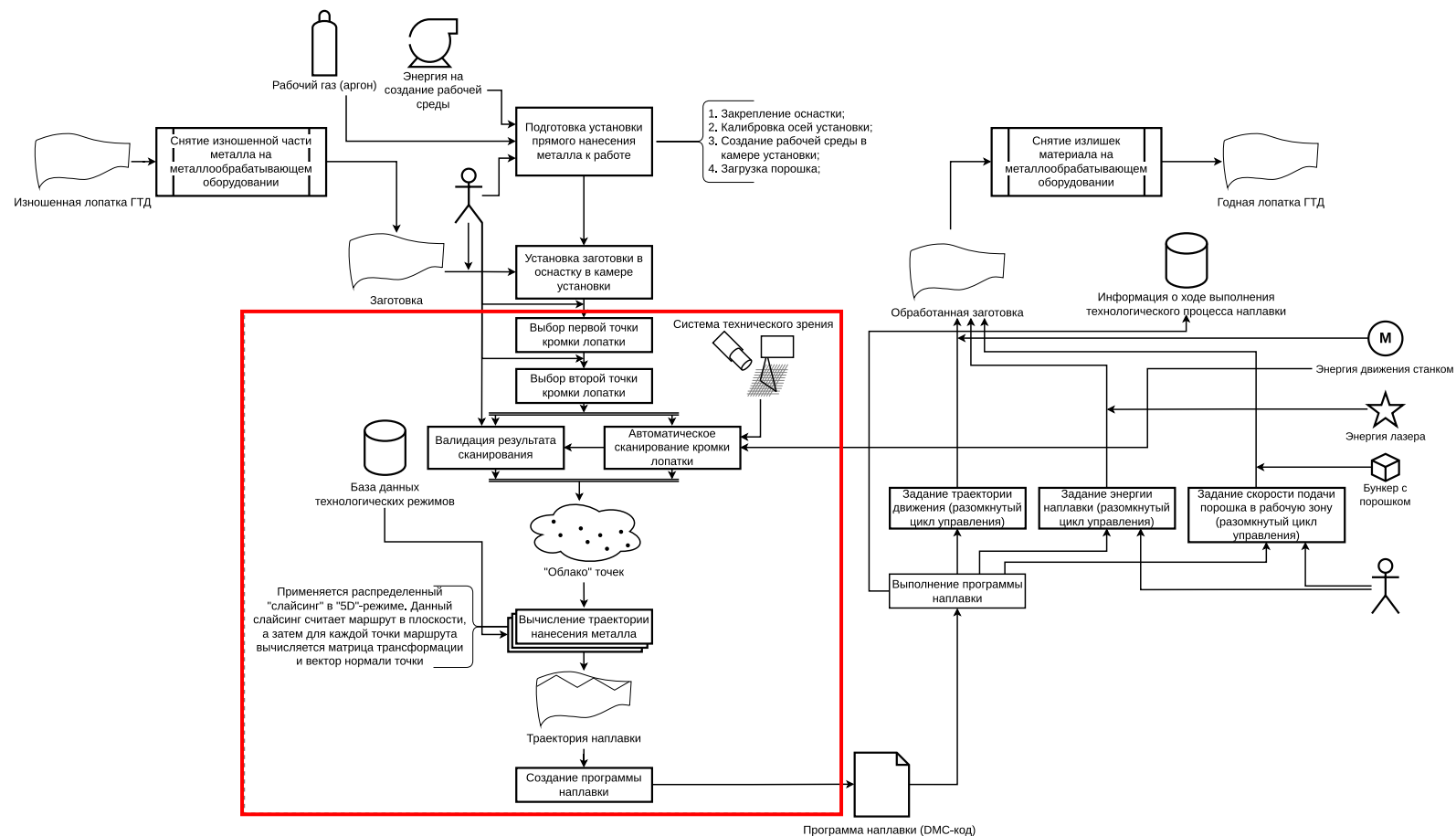
$t = \text{около } 40 \text{ минут}$
(сокращение на 56,5 %);

сокращение времени всего
технологического процесса на
37,1 %;

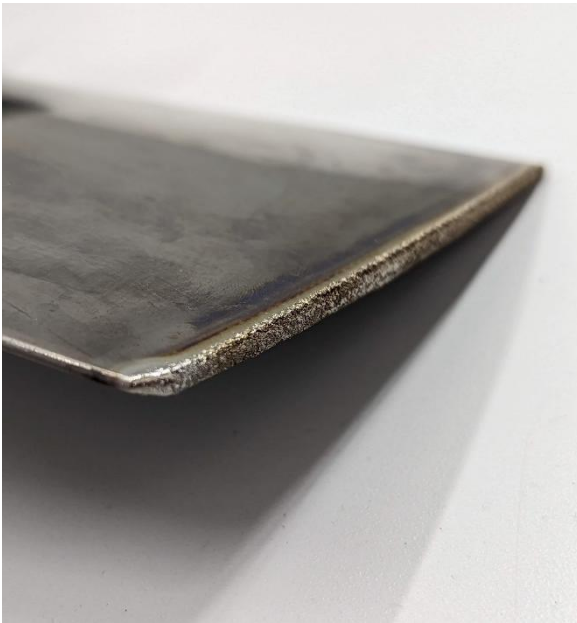
подготовка программ для
ремонта лопаток сложной формы
(работа в 5D координатах);

минимизация ручного труда в
процессе сканирования и
наплавки;

точность сканирования свыше
0,1 мм (при пятне лазера от 0,5
до 1,0 мм).



Опытная наплавка



а) торец



б) входная кромка

1. Выполнена проверка на рентгеновской системе компьютерной томографии;
2. по результатам проверки пористость, трещины в наплавленном материале выявлены не были;
3. припуск на механическую обработку в допустимых пределах;
4. выявленные в опытной наплавке несплавления между слоями являлись следствием неточного задания параметров техпроцесса и были устранены.

Экономический эффект

$$C = M_0 + Э + З + P_0$$

Параметр	Неавтом. установка, руб./шт.	Автоматиз. установка, руб./шт.
Материальные затраты, M_0	528,00	528,00
Затраты энергии, Э	249,08	156,57
Заработная плата, З	1 354,17	851,19
Амортизация оборудования, P_0	7 777,78	4 888,89
Итого, С	9 909,03	6 424,65

Экономический эффект: 13 937 520 руб./год

	Новое решение (НИОКР)	Аналогичное решение (ОКР)
Срок окупаемости, мес.	12	3

Результаты проекта

- 1) разработан метод сканирования криволинейных поверхностей таких как кромки лопаток ГТД на основе комбинации триангуляционного и фотометрического методов;
- 2) предложен и разработан метод формирования непрерывной траектории наплавки для оборудования с пятью степенями свободы;
- 3) разработана автоматизированная система управления для сканирования и подготовки управляющих программ на основе предложенных методов;
- 4) выполнена интеграция автоматизированной системы управления с установкой прямого нанесения металла;
- 5) достигнуто сокращение трудоемкости технологического процесса на 37,1 %, ожидаемый экономический эффект от внедрения АСУ – 14 миллионов рублей в год.

Перспективы развития проекта

ПАО «ОДК-Сатурн» сформировано ТЗ на создание отечественной установки по ремонту лопаток ГТД методом лазерной наплавки



Спасибо за внимание



КОТЛЯР
Дмитрий Игоревич

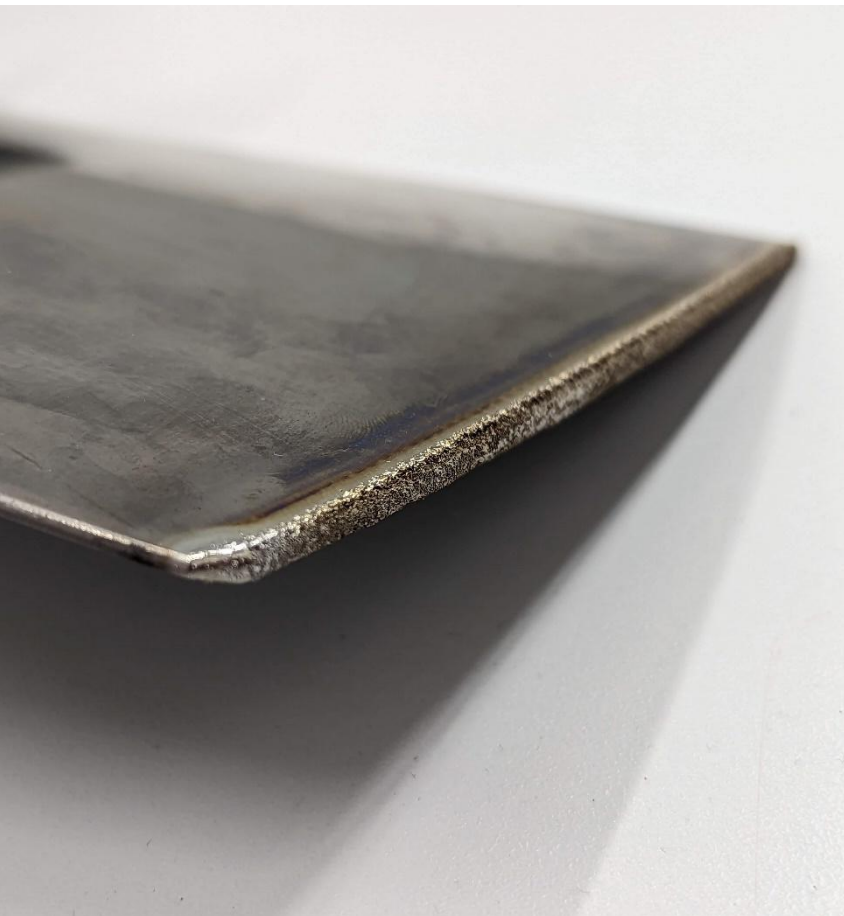
Инженер-исследователь
дуальной лаборатории «ПромИТ»,
канд. техн. наук



dm.kotlyar@yandex.ru

 dkotlyar

Опытная наплавка

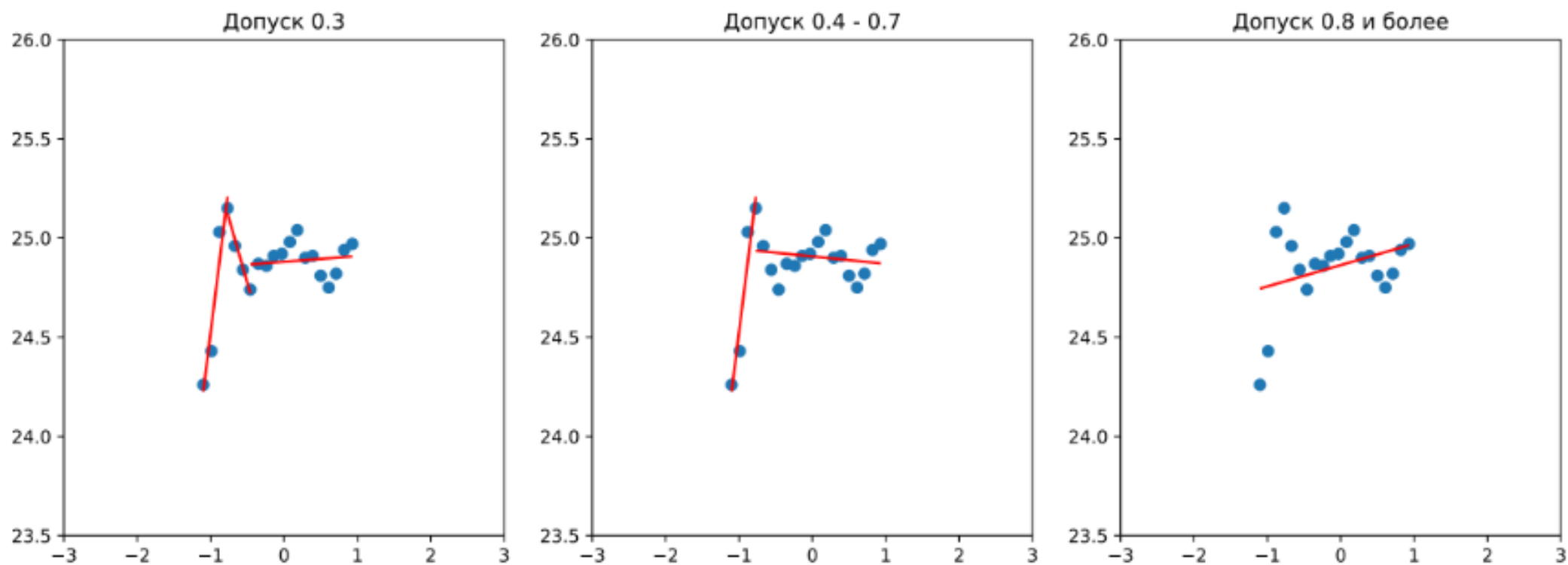


а) торец

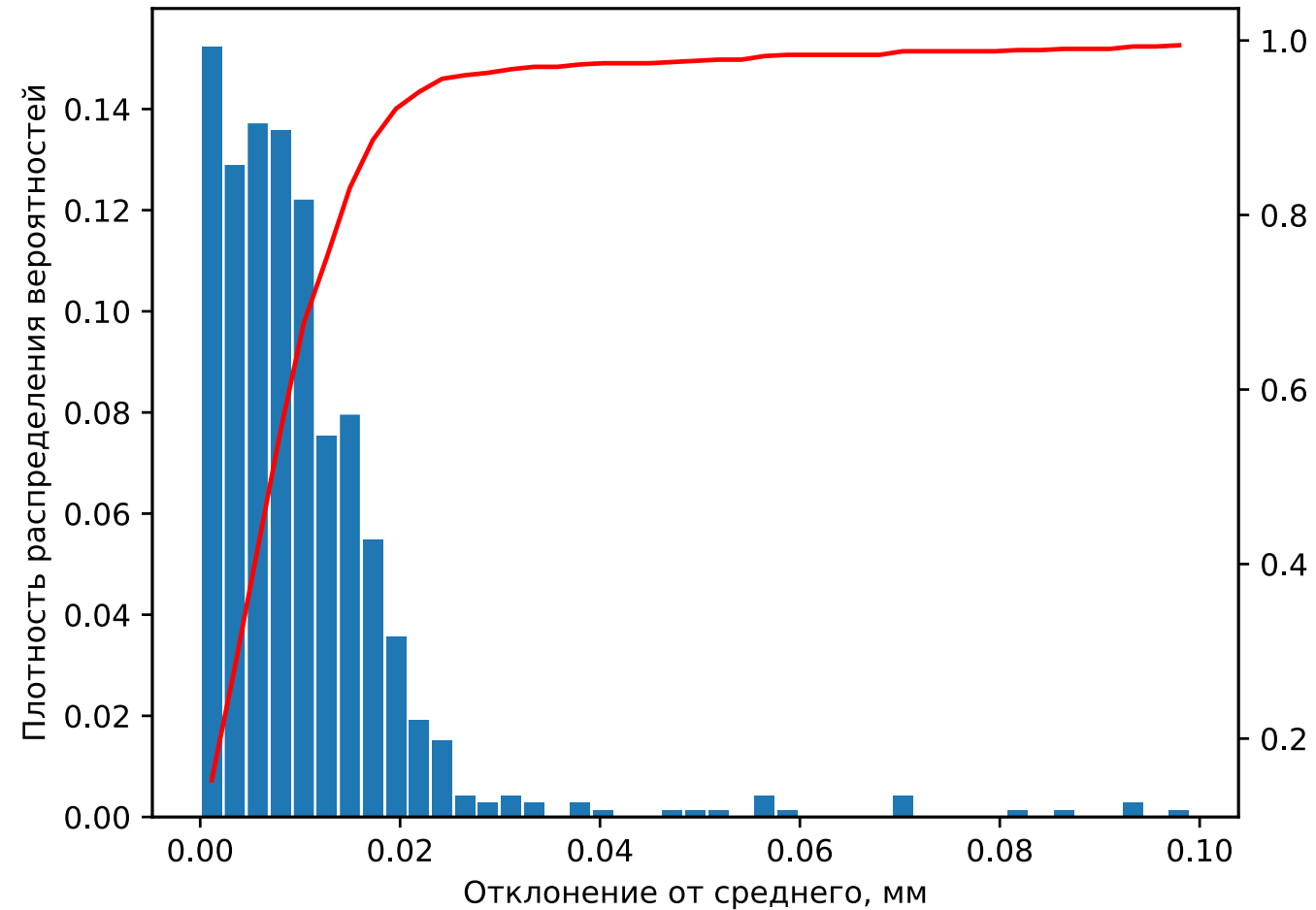


б) входная кромка

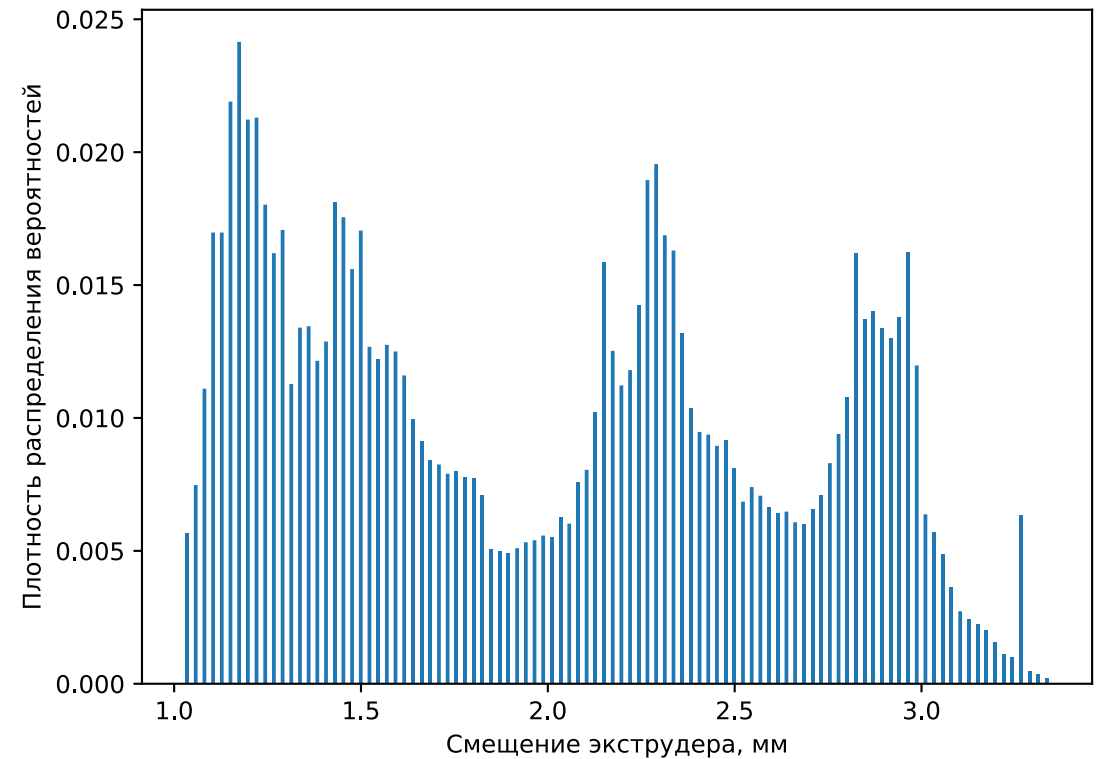
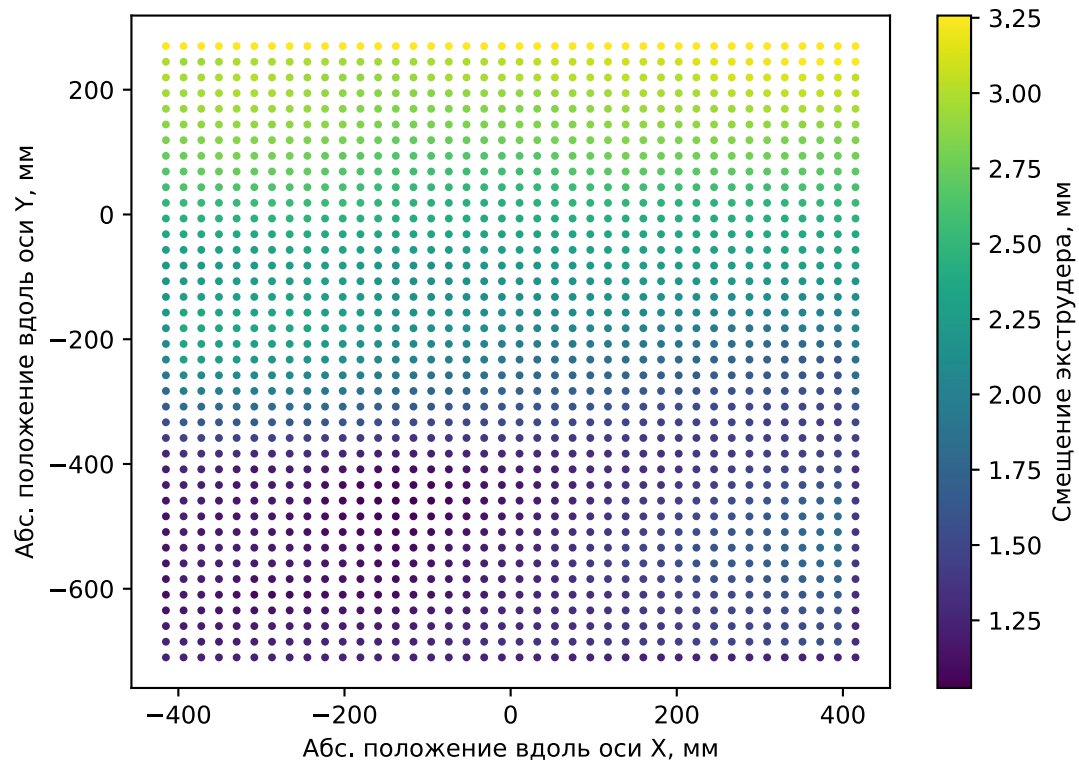
Обработка сигнала с триангуляционного лазерного датчика



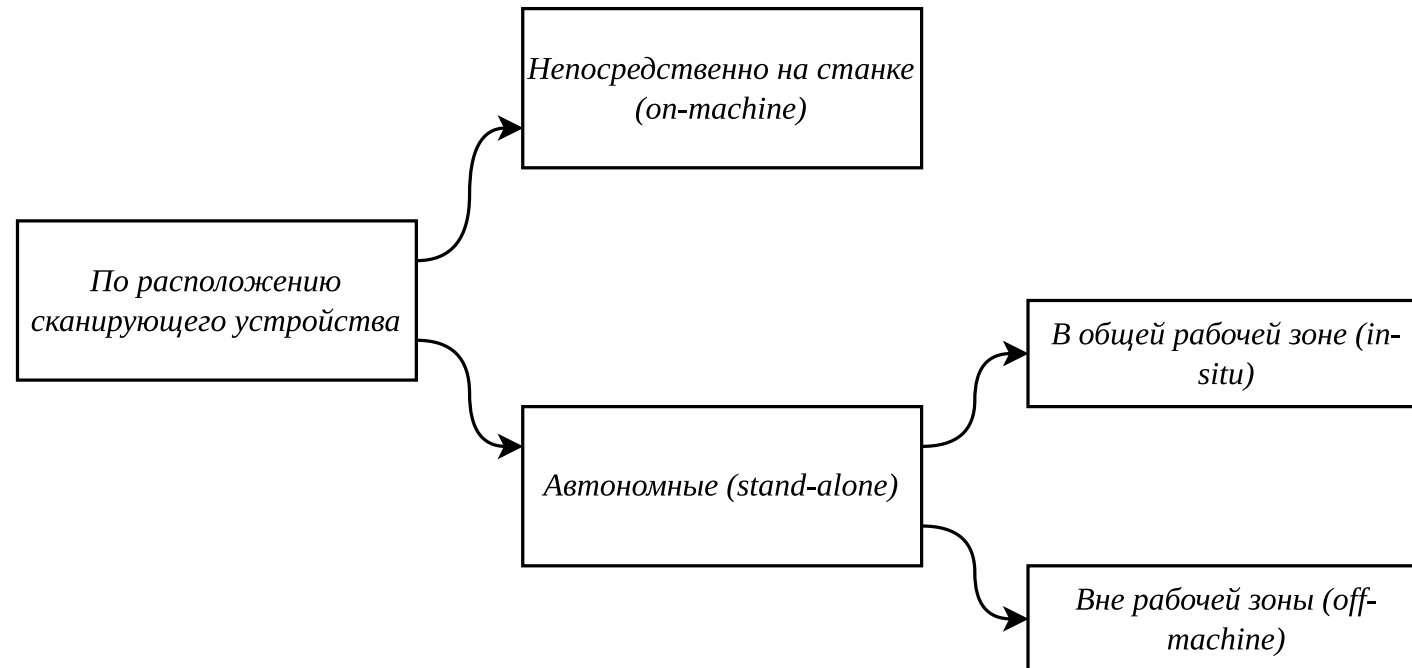
Повторяемость ручного сканирования



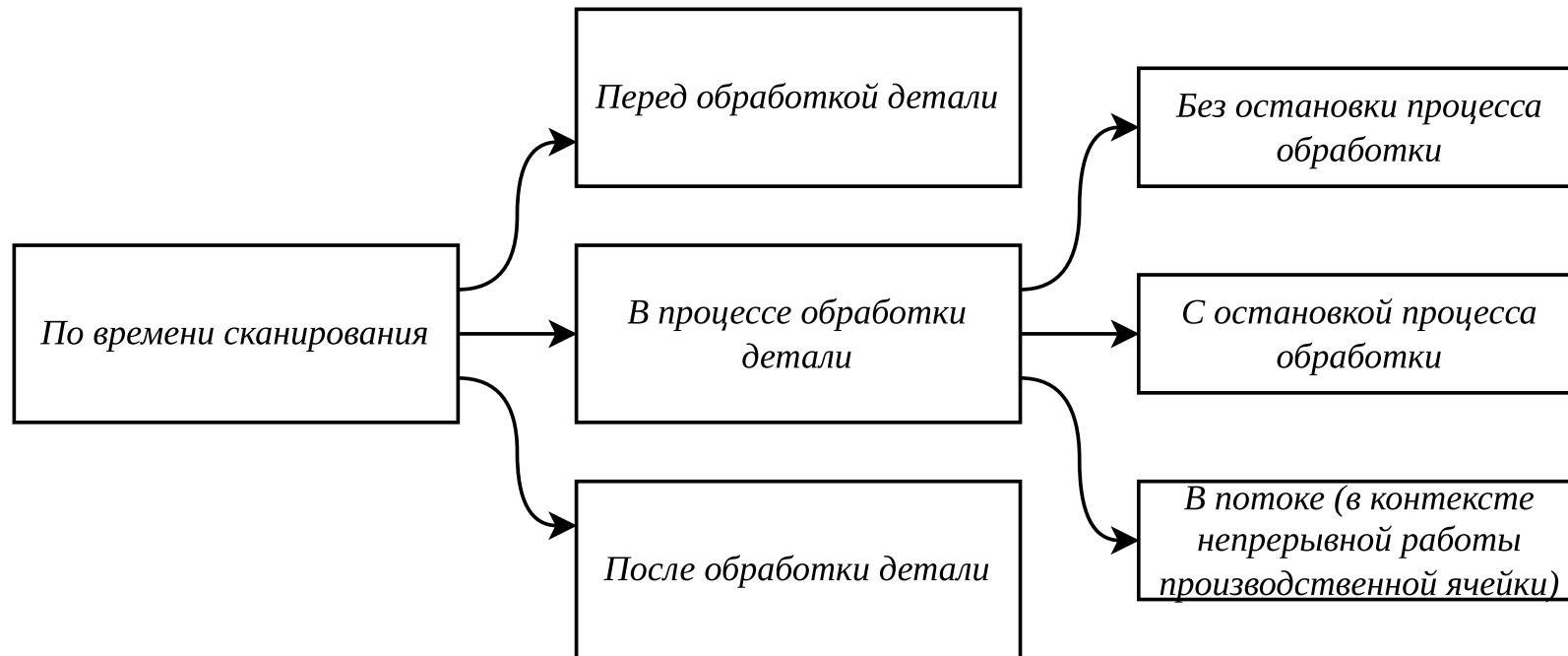
Смещение экструдера при движении в плоскости OXY



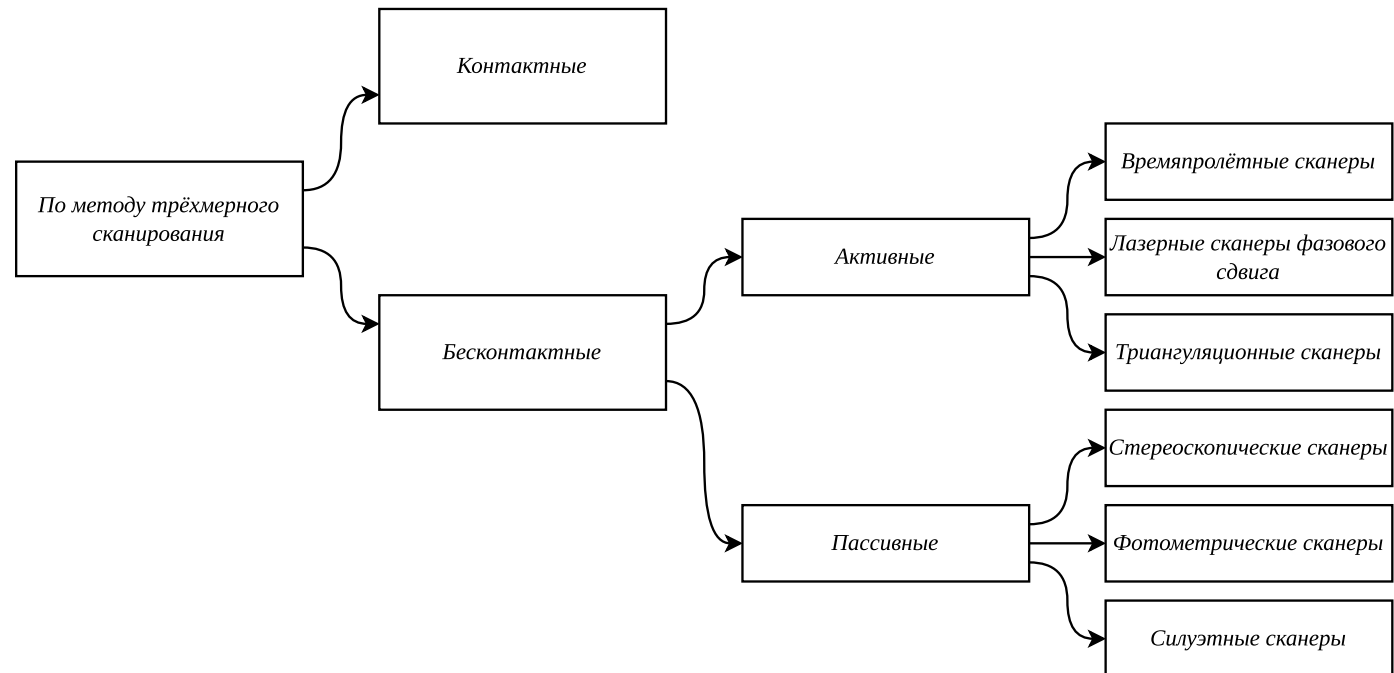
Классификация методов сканирования



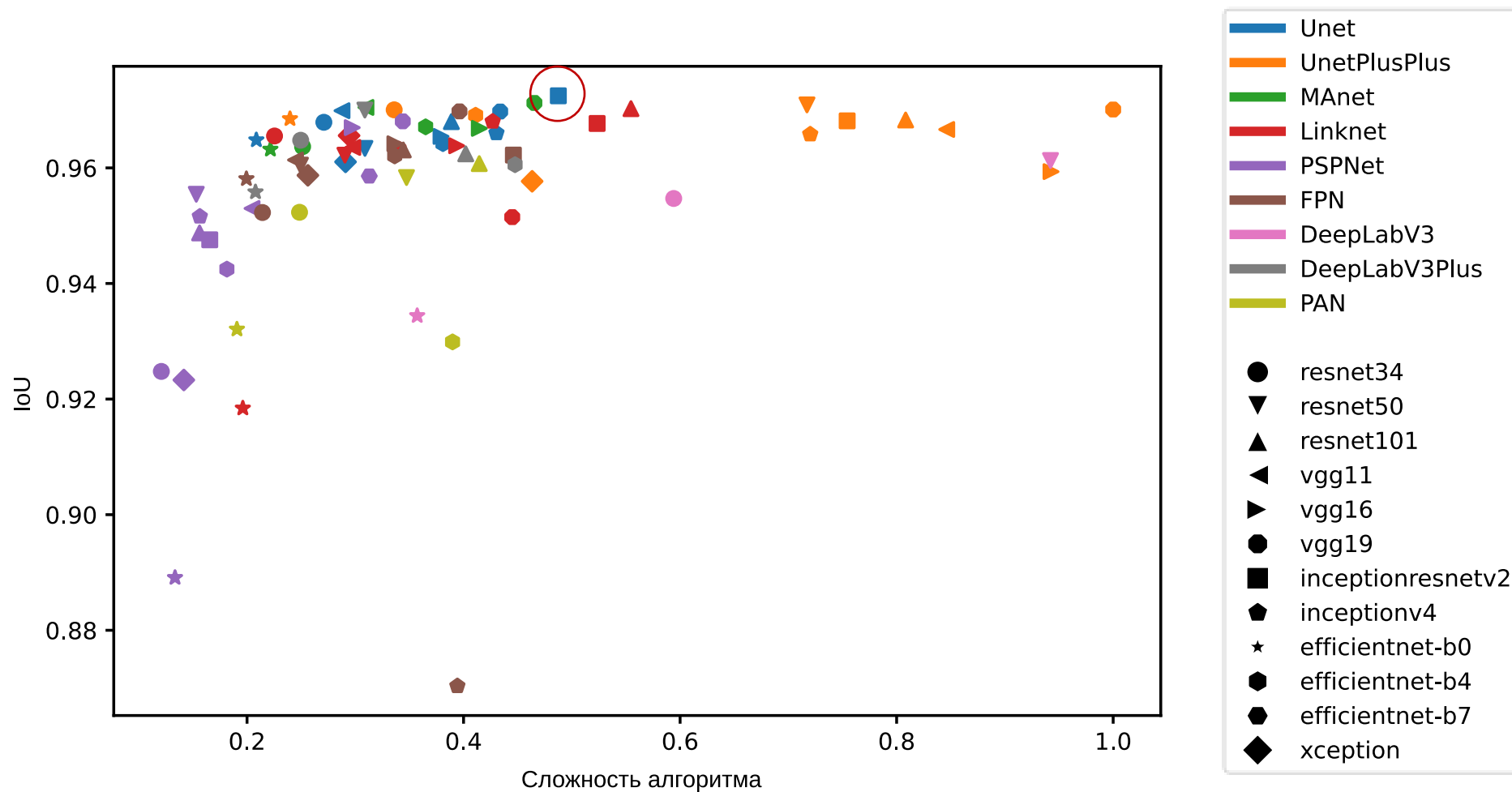
Классификация методов сканирования



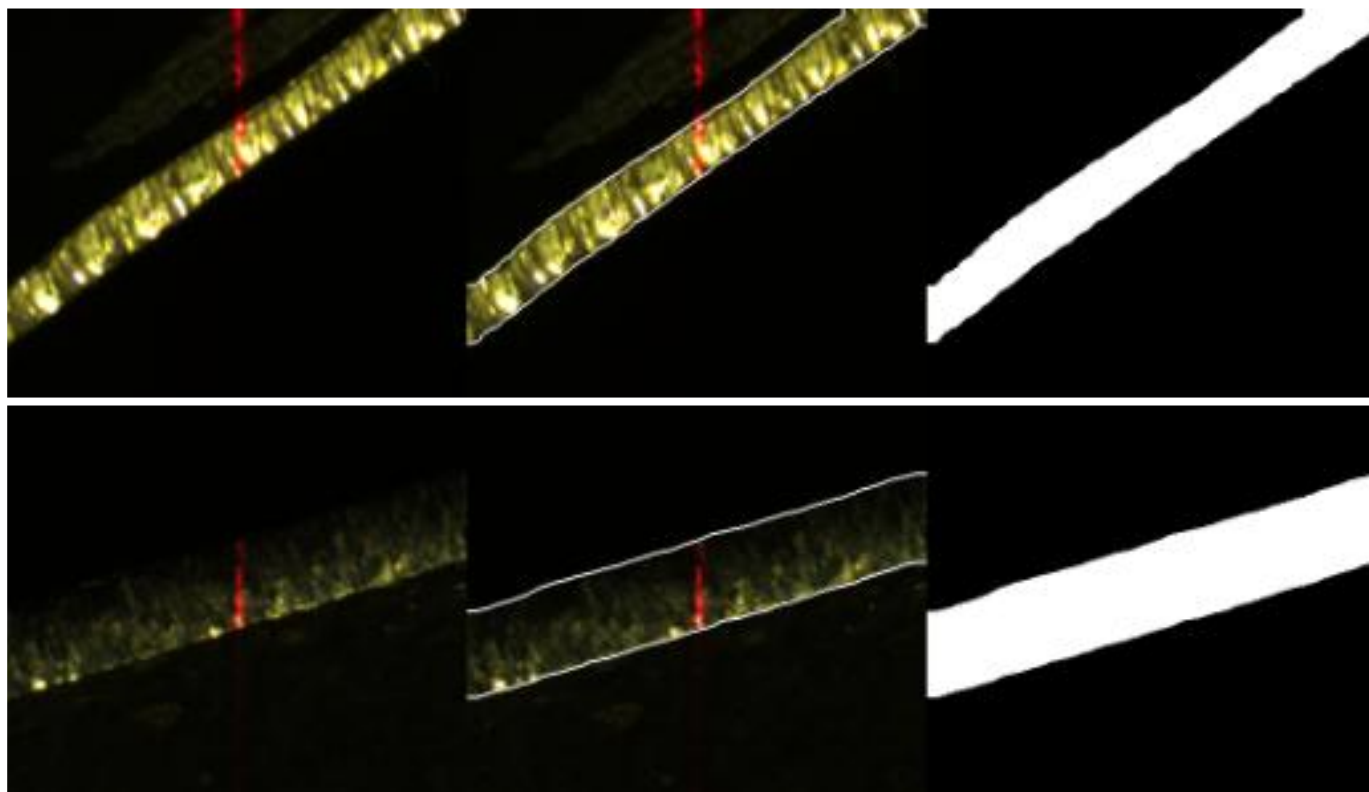
Классификация методов сканирования



Семантическая сегментация на основе сверточной нейронной сети



Результат работы обученной сети Unet-InceptionResNetV2



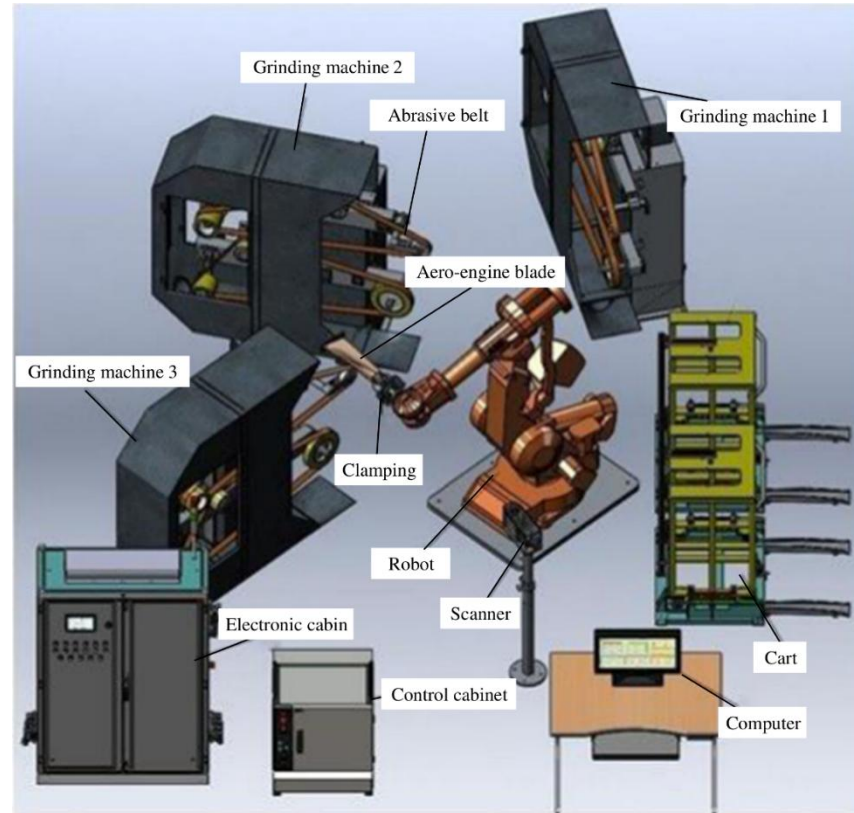
а)

б)

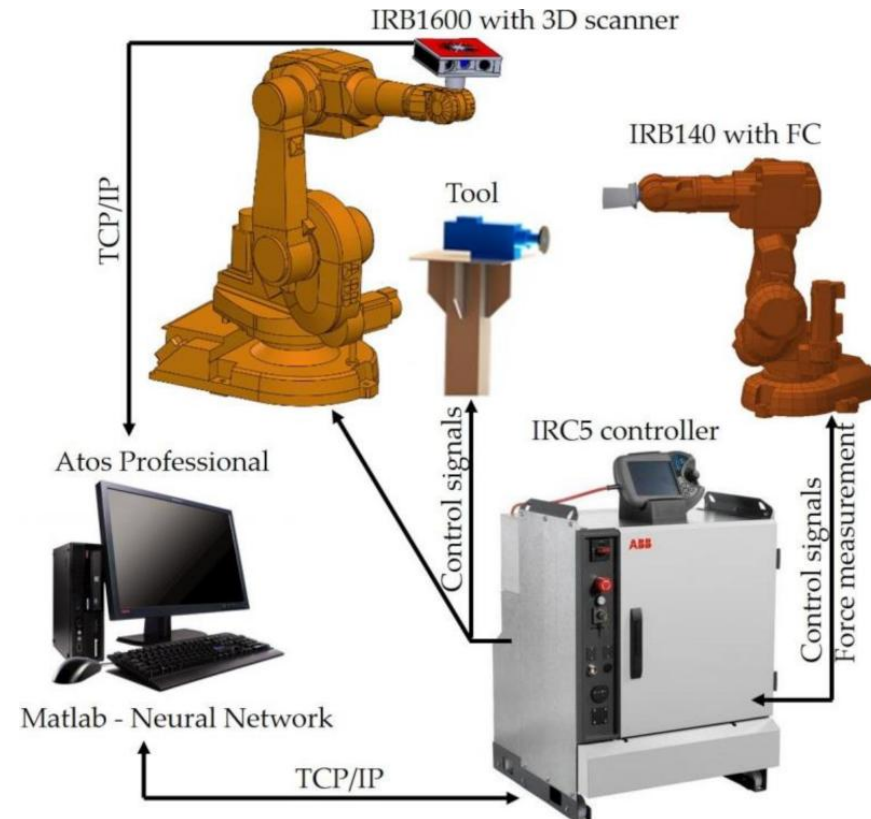
в)

- а) оригинальный снимок кромки лопатки;
- б) снимок с выделенной кромкой;
- в) результат семантической сегментации.

Патентно-информационный поиск: Технологии сканирования с методом сканирования в общей рабочей зоне

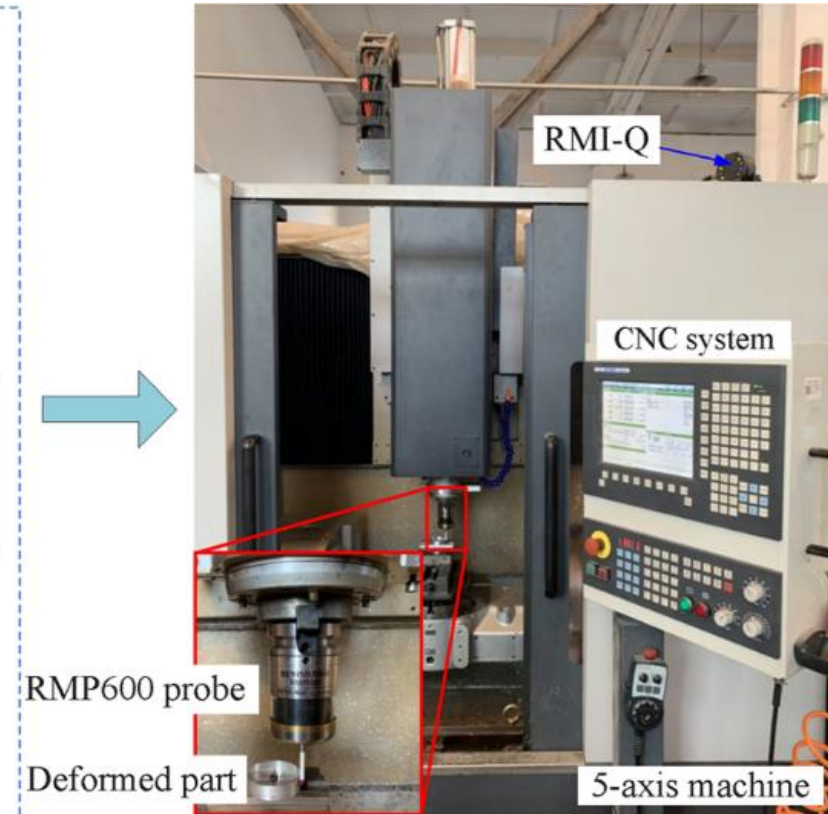
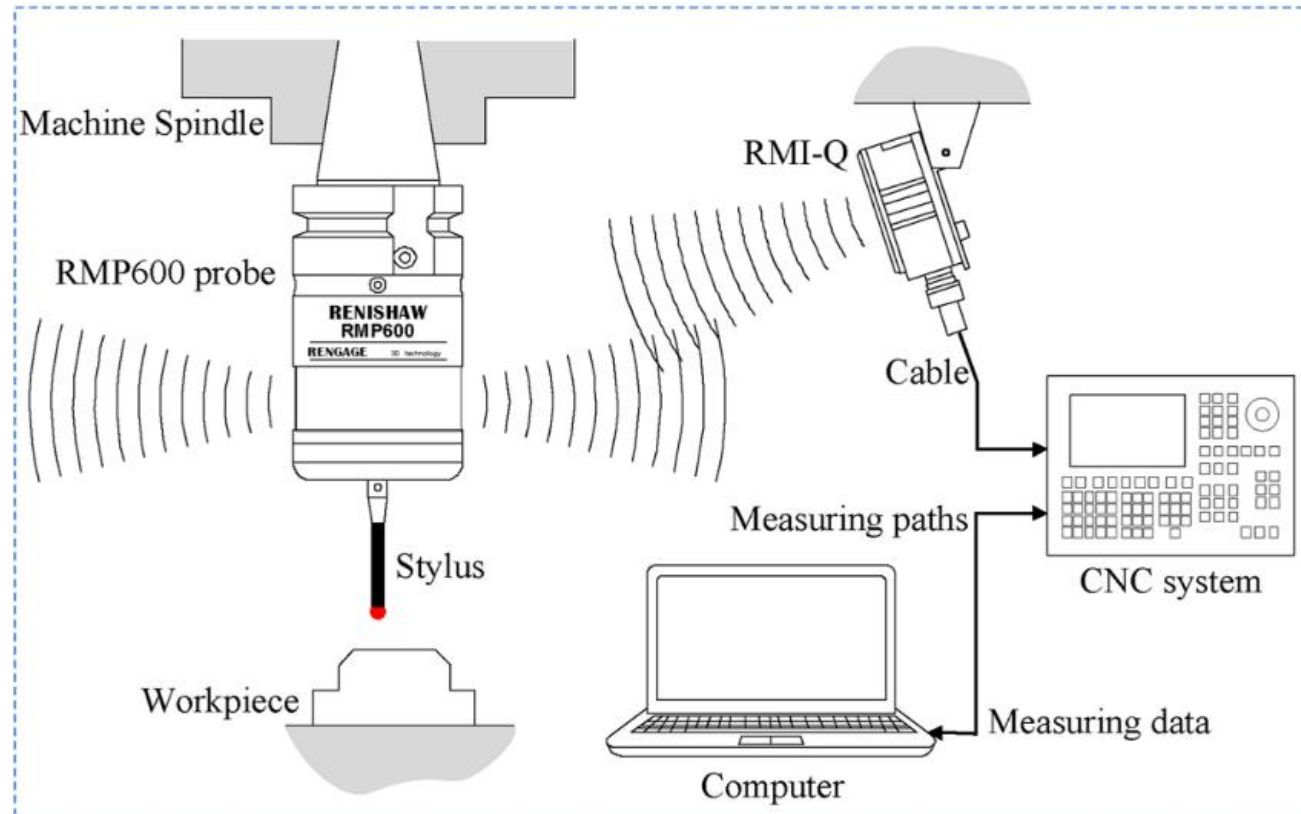


Xiaohu X., Dahu Z., Haiyang Z., Sijie Y., Han D. TCP-based calibration in robot-assisted belt grinding of aero-engine blades using scanner measurements. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, № 90, c. 635–647. doi:10.1007/s00170-016-9331-8.



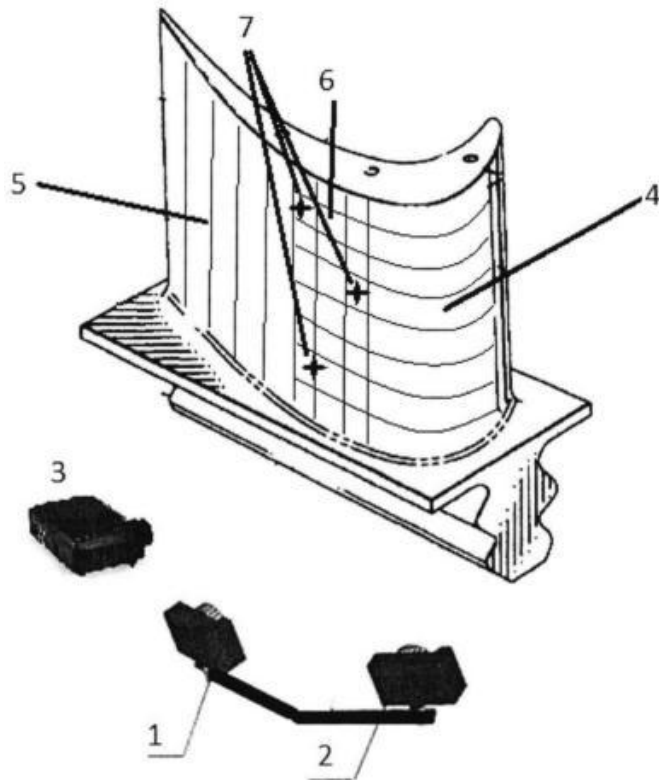
Burghardt A., Szybicki D., Gierlak P., Kurc K., Muszyńska M. Robotic Grinding Process of Turboprop Engine Compressor Blades with Active Selection of Contact Force. *Tehnički vjesnik*, 2022, № 29, c. 15–22. doi:10.17559/TV-20190710141137.

Патентно-информационный поиск: Технологии сканирования с методом сканирования непосредственно на оборудовании

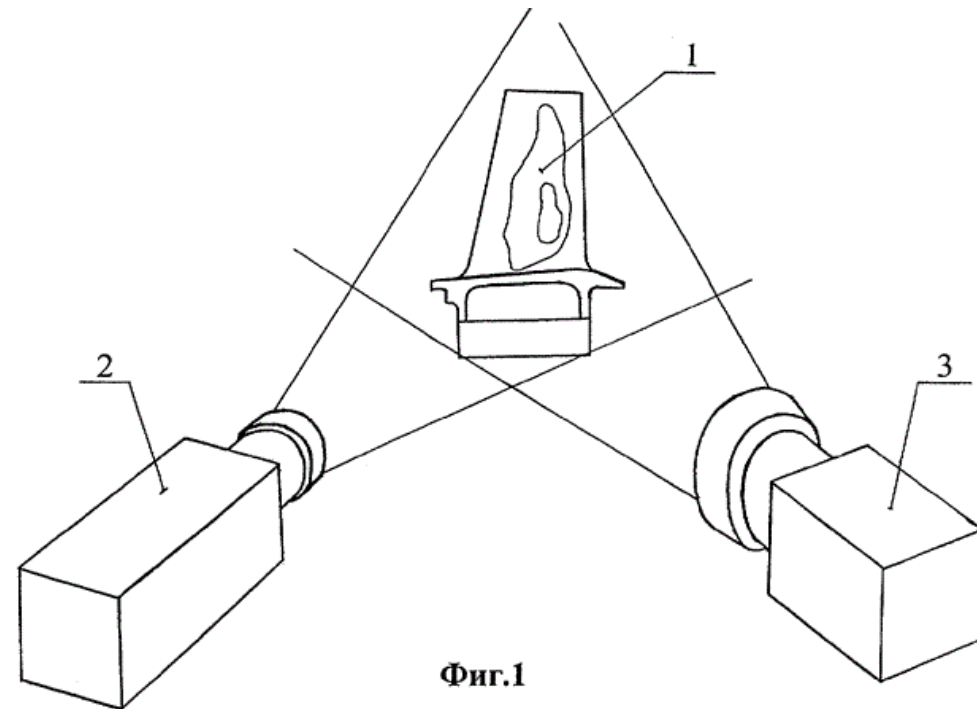


Jinting X., Longkun X., Yifei L., Yuwen S. Shape-adaptive CNC milling for complex contours on deformed thin-walled revolution surface parts. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, № 59, c. 760–771. doi:10.1016/j.jmapro.2020.10.001

Патентно-информационный поиск: Технологии сканирования с методом сканирования **бесконтактным способом вне оборудования**



Пат. 2708940 РФ, МПК G01B 11/24. *Способ измерения трехмерной геометрии выпуклых и протяженных объектов*, С. В. Двойнишников (РФ), В. Г. Меледин (РФ), И. В. Щепихин (РФ), И. К. Кабардин (РФ), Д. В. Куликов (РФ), № 2019101273; заявл. 15.01.2019; опубл. 12.12.2019, Бюл. № 35, 8 с



Пат. 2295110 РФ, МПК G01B 11/24. *Способ измерения формы поверхности объекта и представления результатов измерения на упомянутой поверхности*, А. В. Сивохин (РФ), А. Б. Кузнецов (РФ), Г. С. Бабичев (РФ). № 2005131751/28; заявл. 13.10.2005; опубл. 10.03.2007, Бюл. № 7, 8 с.

Патентно-информационный поиск: Технологии сканирования с методом сканирования **бесконтактным способом на оборудовании**

LaserPath Option

- ▶ 2-D adaptive system to generate and adjust toolpaths
- ▶ Automatically adapts pre-defined toolpath to fit the exact component to be repaired
- ▶ In pilot release, first units installed Q4 2011

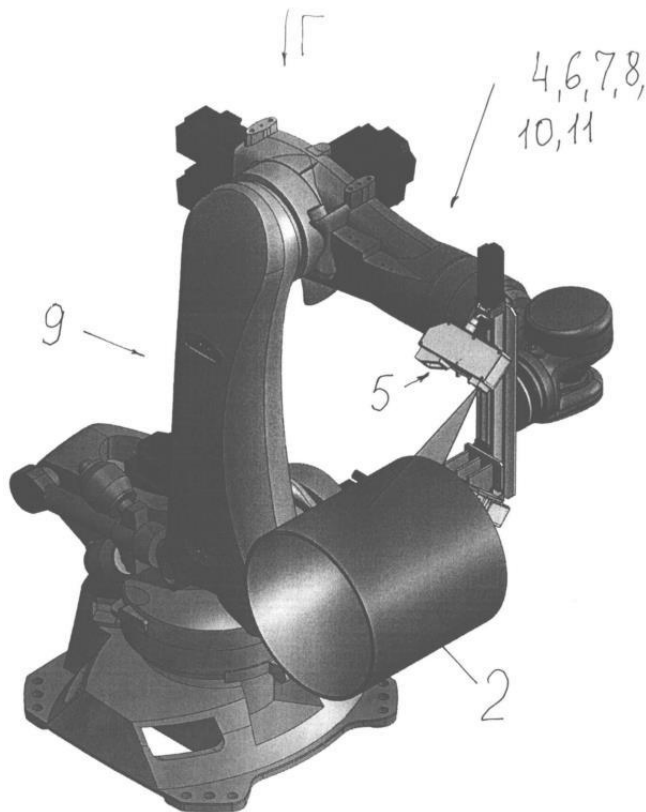


23

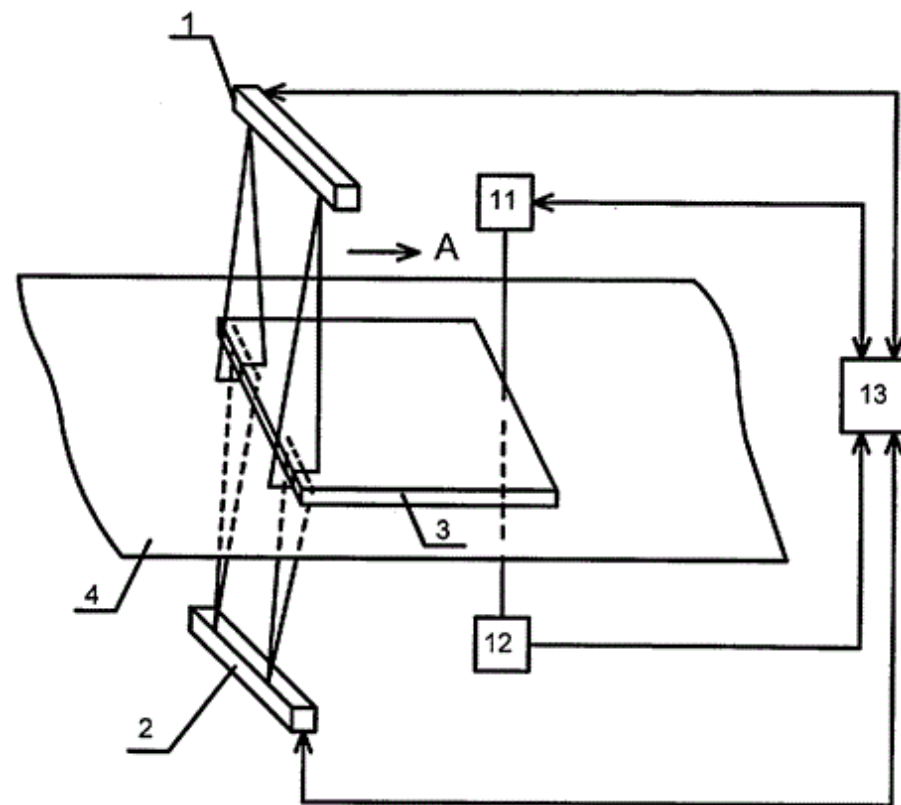
OPTOMECH
Additive Manufacturing Systems—from NANO to MACRO™

Ine K. LENS Technology Overview. <https://www.slideserve.com/kishi/lens-technology-overview> (дата обращения: 10.05.2023)

Патентно-информационный поиск: Технологии сканирования с методом сканирования **бесконтактными лазерными датчиками**

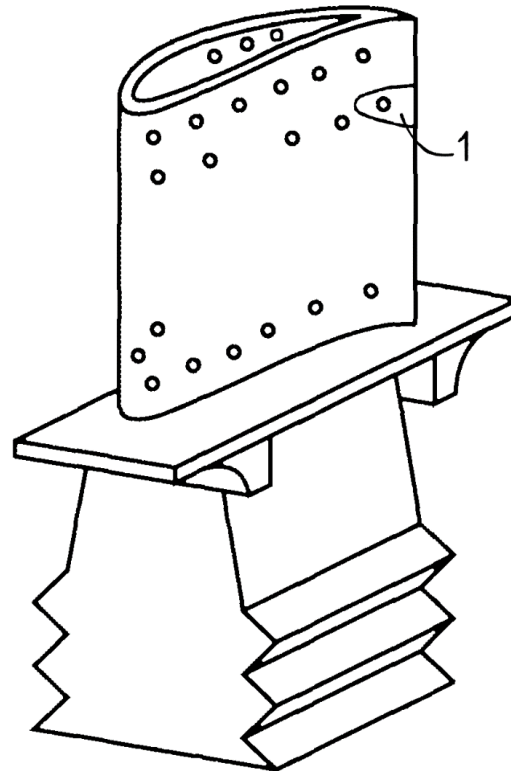


Пат. 152184 РФ, МПК G01B 11/02. *Устройство для измерения геометрических параметров концов труб*, Д. Д. Медведев (РФ), С. Г. Ершов (РФ), А. В. Кириков (DE), В. А. Щербаков (РФ), В. К. Жуков (РФ). № 2014119523/28; заявл. 15.05.2014; опубл. 10.05.2015, Бюл. № 13, 19 с.



Пат. 96424 РФ, МПК G01B 11/04, G01B 7/04. *Устройство для измерения размеров листов на конвейере*, В. Н. Дёмкин (РФ), Д. С. Доков (РФ) № 2009130661/22; заявл. 10.08.2009; опубл. 27.07.2010, 14 с..

Патентно-информационный поиск: Технология сканирования и ремонта с методом сканирования бесконтактным способом на оборудовании



Пат. 2499657 РФ, МПК В23Р 6/00. *Способ автоматизированного ремонта детали машин*, Т. Мельцер-Йокиш (DE), Д. Томаидис (DE), Р. Вилькенхенер (DE).
№ 2012110399/02; заявл. 16.08.2010; опубл. 27.11.2013, Бюл. № 33, 11 с.