

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
“ВЛАДИМИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АЛЕКСАНДРА
ГРИГОРЬЕВИЧА И НИКОЛАЯ ГРИГОРЬЕВИЧА СТОЛЕТОВЫХ”
(ВлГУ)

На правах рукописи



РОДИОНОВ Дмитрий Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ
КОМПЛЕКСА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ
ПРИ ЕДИНИЧНОМ И МЕЛКОСЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами (промышленность)

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Люхтер Александр Борисович

Владимир – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| Глава 1. Анализ современного состояния автоматизации технологической подготовки управляющих программ лазерного роботизированного комплекса | 11 |
| 1.1 Анализ современного состояния методов и средств автоматизации технологической подготовки управляющих программ | 11 |
| 1.2 Анализ современных автоматизированных систем технологической подготовки производства на лазерном роботизированном комплексе сварки... | 24 |
| 1.3 Выводы по главе и задачи исследования | 27 |
| Глава 2. Методика автоматизированной технологической подготовки управляющих программ лазерного роботизированного комплекса сварки | 29 |
| 2.1 Основные положения методики..... | 29 |
| 2.2 Кинематические расчетные модели инструмента и позиционера..... | 34 |
| 2.3 Состав средств автоматизации технологической подготовки управляющих программ | 36 |
| 2.4 Алгоритмы подготовки управляющих программ на основе транслированной технологической траектории проектного решения | 47 |
| 2.5 Выводы по главе | 53 |
| Глава 3. Средства автоматизации трансляции технологической траектории в рабочее пространство лазерного роботизированного комплекса и ее корректировки относительно свариваемых кромок | 54 |
| 3.1 Метод автоматизированной трансляции технологической траектории в рабочее пространство лазерного роботизированного комплекса сварки | 54 |

| | |
|--|------------|
| 3.2 Модели и алгоритмы корректировки точек транслированной технологической траектории средствами распознавания свариваемых кромок на видеоизображении..... | 73 |
| 3.3 Выводы по главе | 89 |
| Глава 4. Подсистема АС ТПП по подготовке управляющих программ лазерного роботизированного комплекса сварки и экспериментальное исследование..... | 90 |
| 4.1 Подсистема АС ТПП по подготовке управляющих программ..... | 90 |
| 4.2 Программа и методика экспериментального исследования подсистемы АС ТПП по подготовке управляющих программ | 103 |
| 4.3 Результаты экспериментальных исследований подсистемы АС ТПП по подготовке управляющих программ | 115 |
| 4.4 Выводы по главе | 132 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 133 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ | 135 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 136 |
| Приложение А Акты об использовании результатов диссертационной работ.... | 150 |
| Приложение Б Свидетельства регистрации программы ЭВМ..... | 154 |
| Приложение В Патент полезной модели и заявки патентов на изобретение..... | 160 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования, степень её разработанности.

Применение на производственных предприятиях с лазерной сваркой (ЛС) современных автоматизированных систем проектирования технологического процесса, проводимого на моделях свариваемых деталей, обеспечивает достижение существенных преимуществ, таких как: автономность проектирования ЛС, моделирование движения узлов робототехнического комплекса, автоматизация разработки траекторий движения лазерной головки на поверхности модели. При этом средства автоматизации технологической подготовки управляющих программ (УП) промышленного лазерного роботизированного комплекса сварки (ЛРК-С) позволяют обеспечить трансляцию траектории движения инструмента из пространства моделей в рабочее пространство промышленного комплекса, генерацию УП технологического оборудования и отладку проектируемых положений инструмента ЛРК-С, относительно свариваемых кромок, в соответствии с разработанным технологическим процессом.

Применение средств автоматизации технологической подготовки УП при внедрении процесса ЛС в единичном и мелкосерийном производстве затруднено, в связи с продолжительным выполнением операций, реализуемых на производственном участке. Вследствие этого возрастает себестоимость продукции и внедрение ЛС в производство становится нерентабельным.

Таким образом, развитие методов, моделей и алгоритмов, составляющих средства автоматизации, для снижения трудоемкости технологической подготовки УП промышленного ЛРК-С в условиях единичного и мелкосерийного промышленного производства, является актуальной научно-технической задачей.

В работах В.Г. Прокошева, И.Н. Шиганова, Г.А. Туричина, А.Г. Григорьянца проанализировано современное состояние ЛС в условиях единичного и мелкосерийного производства. Рассмотрены, посвященные изучению методов и средств автоматизации технологической подготовки, известные работы М.П. Шалимова, А.М. Фивейского, А.В. Аверченкова, В.Ф. Коростелева, Н.Г. Рассказчикова, J. Polden, C. Kardos, J. Hatwig. Исследованы методы и средства

корректировки траектории инструмента в трудах А.А. Кобзева, В.В. Звездина, О. Egeland, В. Chang, В. Regaard, S. Kaierle, J. Reiner. Проанализированы исследования систем трехмерного распознавания, проведенные В.Ф. Филаретовым, Д.А. Юхимецем, С.У. Lin, А. Popov, D. Xu, K. Gupta, F. Roure Garcia. Рассмотрены методы и средства подготовки управляющих программ робототехнических комплексов, изложенные в работах В.В. Тютикова, И.Н. Егорова, В.П. Умнова, N. Larkin, Z. Pan, H. Zhang, С. Kardos.

В диссертации предлагается методика технологической подготовки управляющих программ ЛРК-С, включающая автоматизированные операции по трансляции траектории движения инструмента ЛРК-С, используя датчик глубины, и ее корректировки относительно свариваемых кромок, распознаваемых на изображении с видеокамеры, встроенной в лазерную головку. Трансляция траектории базируется на методе, включающем детектирование, трехмерное сканирование свариваемой детали и сопоставление результата сканирования с моделью, по которой осуществлялось проектирование процесса ЛС. Корректировка точек, подлежащих ЛС, проводится согласно моделям и алгоритмам наведения на резкость изображения видеокамеры лазерной головки, сегментирования и распознавания свариваемых кромок на видеоизображении и расчета корректного положения относительно результата распознавания. Обладающие научной новизной результаты были реализованы в подсистеме АС ТПП.

Целью диссертационной работы является автоматизация технологической подготовки управляющих программ лазерного роботизированного комплекса сварки, обеспечивающая сокращение времени их подготовки в условиях единичного и мелкосерийного производства.

Объектом исследования являются автоматизированные системы технологической подготовки управляющих программ ЛРК-С.

Предметом исследования являются методы, модели и алгоритмы автоматизации технологической подготовки управляющих программ ЛРК-С.

Научная новизна работы заключается в:

- Разработана методика технологической подготовки УП для ЛРК-С, отличающаяся наличием автоматизированных операции трансляции траектории движения инструмента из пространства моделей в рабочее пространство ЛРК-С датчиком глубины, установленного на инструменте и ее корректировки относительно распознаваемых кромок на видеоизображении.
- Разработан метод трансляции траектории движения инструмента средствами датчика глубины, отличающийся определением области локализации свариваемой детали, расчетом траектории инструмента сканирования по области локализации и построением преобразования координат из пространства моделей в пространство ЛРК-С по сопоставлению положения результата сканирования свариваемой детали с ее моделью.
- Модифицированы модели и алгоритмы корректировки транслированной траектории, отличающиеся расчетом положения фокальной плоскости лазерной головки по результату фокусировки видеокамеры, размещенной в головке, формализацией сегментации области между свариваемыми кромками, распознаванию кромок как непрерывных, локально параллельных отрезков и расчете на их основе корректного положения инструмента.
- Разработана структура подсистемы по технологической подготовке УП для общей схемы АС ТПП, отличающаяся включением модулей автоматизированной трансляции, корректировки траектории движения инструмента и генерации УП робота и лазера.

Теоретическая и практическая значимость работы. Математические и информационно-технологические модели и алгоритмы составили теоретическую основу подсистемы АС ТПП по подготовке УП, разработанные в рамках выполнения госбюджетных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по Государственным контрактам с Минобрнауки РФ «Теоретические и экспериментальные исследования комплексной технологии волоконной лазерной сварки листовых деталей из цветного и черного металлопроката для транспортных

средств нового поколения» (соглашение от 28.11.2014 г. №14.577.21.0158) и «Разработка технологии получения износостойких и коррозионностойких уплотнительных поверхностей высокой твердости для атомных энергетических установок методом лазерной порошковой наплавки» (Договор от 03.12.2019г. № 075-15-2019-1833) в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». Результаты диссертационной работы составили теоретическую первооснову для исследований, проводимых в ВлГУ по государственному заданию Минобрнауки РФ «Новые физические методы лазерного синтеза микро- и наноструктурированных углеродосодержащих материалов: экспериментальное и теоретическое изучение процессов их формирования и распознавания наноструктур» (№3.5531.2017/БЧ).

Научно-практическая значимость проведенного исследования заключается в разработке новых и усовершенствовании существующих методов и средств автоматизации технологической подготовки УП для ЛРК-С. Работа подтверждена рецензируемыми публикациями, докладами на научных конференциях, а также Патентом РФ на полезную модель, заявками Патентов РФ на изобретение и государственными Свидетельствами РФ о регистрации программ для ЭВМ.

Практическая значимость работы подтверждена внедрением её результатов на производственном предприятии ООО «ИЦ при ВлГУ» в г. Владимире с подтверждением соответствия произведенных изделий требованиям конструкторской документации при входном контроле на АО «Ковровский электромеханический завод» в г. Коврове, а так же использованием в образовательной деятельности ВлГУ.

Положения, выносимые на защиту:

- Применение разработанной методики при автоматизации технологической подготовки УП позволяет осуществлять взаимодействие рабочего места технолога с ЛРК-С посредством проектного решения ЛС, содержащего необходимые и достаточные информационно-технологические данные для выполнения автоматизированных операций и генерации текста УП робота и лазера.

- Включение автоматизированной операции трансляции траектории движения инструмента на основе разработанного метода в методику технологической подготовки УП обеспечивает сокращение времени выполнения в сравнении с используемой полуавтоматизированной операцией калибровки положения модели более чем в 3 раза.

- Включение автоматизированной операции корректировки точек транслированной траектории движения инструмента в методику технологической подготовки УП с использованием модифицированных моделей и алгоритмов обеспечивает сокращение времени выполнения в сравнении с существующей ручной операцией отладки УП более чем в 2.5 раза.

- Использование созданной подсистемы АС ТПП по подготовке управляющих программ промышленного ЛРК-С на объектах с ЛС при единичном и мелкосерийном производстве обеспечивает общее сокращение времени технологической подготовки УП более чем в 3 раза.

Методология и методы исследования. В работе использовались современные научные достижения отрасли знаний о методах и средствах автоматизации технологических процессов и производств, системного анализа и теории обработки информации, векторной геометрии, машинного зрения и объектно-ориентированного программирования.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждена применением апробированных методов исследования, аттестованного промышленного и испытательного оборудования и сертифицированных информационно-вычислительных средств, а также наличием публикаций в рецензируемых научных изданиях и докладов на конференциях, соответствующих тематике диссертационного исследования. Научно-техническая новизна подтверждена свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ, патентом на полезную модель и заявками патентов на изобретение.

Результаты диссертационного исследования прошли научную экспертизу специалистами оргкомитетов и участниками следующих международных,

российских и региональных научно-теоретических и научно-прикладных конференций: XII международной научной конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2017» (5-7 июля 2017 г., г. Суздаль), IX международной конференции «Лучевые технологии и применение лазеров» (17-19 сентября 2018 г., г. Санкт-Петербург), научно-практической конференции «Дни науки студентов и аспирантов ВлГУ» (18 марта – 5 апреля 2019 г., г. Владимир), международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon 2019» (1-4 октября 2019 г., г. Владивосток), на международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг-2020» (25-29 марта 2020 г., г. Сочи).

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 10 научных работах, из них 3 статьи – в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 статей, в перечне международных научных изданий, индексируемых Scopus. При выполнении диссертационного исследования было получено 6 Свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, 1 Патент на полезную модель и поданы 2 заявки Патента на изобретение.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность):

в части формулы специальности, рассматривается математическое, информационное, алгоритмическое и машинное обеспечение создания автоматизированных технологических процессов и производств и систем управления ими, включающее научные и технические исследования и разработки, модели и структурные решения человекомашинных систем, предназначенных для автоматизации производства и интеллектуальной поддержки процессов управления и необходимой для этого обработки данных;

в части области исследования: – п. 3: «Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) и производствами (АСУП), а также

АС ТПП и т. д.»; – п. 5: «Теоретические основы, средства и методы промышленной технологии создания АСУ ТП, АСУП, АС ТПП и др.».

Личный вклад автора. Диссертация является работой, в которой обобщены результаты исследований, полученных лично автором и в соавторстве. Основные положения и выводы диссертационной работы сформулированы автором. Создание программных комплексов и их экспериментальное исследование осуществлялись при участии автора.

Определение направления исследований, обсуждение и интерпретация результатов работы проводилась совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 120 наименований источников информации и 3-х приложений. Результаты исследования изложены на 163 страницах машинописного текста, включающего 87 иллюстраций и 21 таблицу.

Глава 1. Анализ современного состояния автоматизации технологической подготовки управляющих программ лазерного роботизированного комплекса

1.1 Анализ современного состояния методов и средств автоматизации технологической подготовки управляющих программ

1.1.1 Современные методы технологической подготовки управляющих программ

Несомненные преимущества компактных иттербиевых волоконных лазеров, такие как высокое качество выходного пучка, надежность эксплуатации, высокий КПД, малые габариты и вес обеспечили их широкое применение [1, 2] в различных отраслях машиностроительного производства. Стремительное развитие получил процесс сварки металлоконструкций за счет использования волоконного лазера в качестве источника энергии плавления металла.

В сравнении с уже ставшими классическими способами (электронно-дуговая, газоплазменная, электронно-лучевая и т.д.) промышленного получения неразъемных соединений металлоконструкций ЛС имеет ряд значительных преимуществ [3, 4], основными из которых являются:

- высокая скорость выполнения процесса сварки;
- малая область термического воздействия;
- снижение остаточных напряжений и деформаций;
- удаленное позиционирование инструмента от свариваемых кромок;
- эффективный теплообмен в зоне образования шва.

Технологический процесс ЛС позволил значительно расширить состав конструкторско-технологических решений при изготовлении малогабаритных и сложных по структуре и форме деталей. Для обеспечения позиционирования, сфокусированного лазерного излучения, оптимальный диаметр пятна которого находится в диапазоне от 0.5 до 1 мм [5] в трехмерном пространстве используются высокотехнологичные роботизированные манипуляторы [6, 7]. Использование

роботизированных манипуляторов в качестве средств доставки энергии плавления металла для процесса сварки является одним из эффективных способов создания производства [8].

Объединение волоконного лазера, промышленного робота и сопутствующего технологического оборудования в единый промышленный комплекс образует лазерный роботизированный комплекс сварки ЛРК-С [9]. Структурная схема ЛРК-С представлена на рисунке 1.

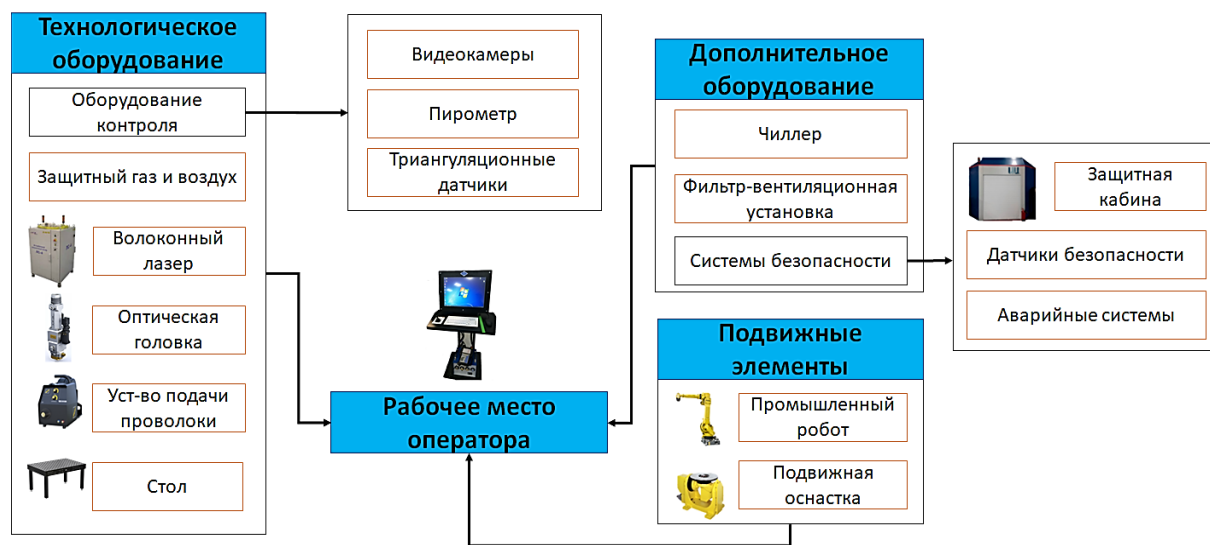


Рисунок 1 - Структурная схема промышленного комплекса ЛРК-С

Промышленные ЛРК-С позволяют достичь гибкости и высокого уровня производительности производства [10]. В то же время, ввиду высоких инвестиционных затрат внедрение лазерных технологий в сварку металлоконструкций машиностроительного производства оправданно лишь при значительном сокращении времени выполнения всех сопутствующих операций [11]. В условиях единичного и мелкосерийного производства, подразумевающих постоянную переоснастку и переналадку производства, временные издержки операций технологической подготовки производства [12, 13] на ЛРК-С становятся критическими для внедрения высокотехнологичного способа получения неразъемного соединения металла.

Технологическая подготовка производства [14] на сегодняшний день является неотъемлемой составляющей [15, 16] и вносит значительный вклад в развитие современного машиностроительного производства [17].

Сокращение времени решения задач технологической подготовки производства (ТПП) обусловлено экономической целесообразностью и осуществляется за счет совершенствования средств автоматизации [18, 19]. Совершенствование средств автоматизации может быть достигнуто внедрением и использованием современных методов и средств, составляющих математическое и программное обеспечение АС ТПП.

Технологическая подготовка производства [14] подразумевает получение в конечном итоге УП на основании которых осуществляется численно программное управление (ЧПУ) элементами промышленного комплекса [20, 21], включая промышленный робот [22]. Промышленный робот управляется системой, которая динамически рассчитывает положение точки позиционирования в трехмерном пространстве [23]. Как отмечается в работах [24, 25] разработка УП оборудования робототехнического комплекса является одной из времязатратных задач ТПП. В некоторых случаях время подготовки УП превышает время собственно производства детали робототехническим комплексом в 360 раз [26].

Операции по технологической подготовке УП, включающие калибровку положения модели детали, отладку и генерацию УП реализуются непосредственно на промышленном робототехническом комплексе, что приводит к вынужденной приостановке выполнения производственных задач. Длительность процесса подготовки УП промышленных робототехнических комплексов является одним из основных препятствий для внедрения указанных комплексов в единичное и мелкосерийное машиностроительное производство [27, 28].

На сегодняшний день известны несколько методов [29] подготовки УП:

- онлайн-программирование;
- оффлайн-программирование;
- автоматизированное оффлайн-программирование.

Онлайн-программирование подразумевает ручную разработку и создание УП непосредственно на промышленном комплексе с использованием средств программирования, встроенных в оборудование [30]. С одной стороны метод не требует использования дополнительного технического (не входящего в состав

ЛРК-С) и программного обеспечения для генерации УП, но с другой стороны блокирует производственное использование комплекса. Учитывая тот факт, что программирование промышленного робототехнического комплекса значительно превышает время производства одной единицы изделия, использование подхода онлайн-программирования в условиях единичного и мелкосерийного производства не представляется возможным. Помимо этого, программы, разрабатываемые онлайн методами, лишены достаточной гибкости. Небольшие изменения в расположении детали требуют значительной корректировки управляющих команд программы.

Оффлайн-программирование подразумевает осуществление автономной разработки УП промышленного ЛРК-С в АС ТПП на моделях деталей [31]. Для этого создается полная трехмерная модель промышленного комплекса, включающая роботизированный манипулятор, оснастку и оборудование. Подход обеспечивает разработку траектории движения роботизированного манипулятора на поверхности модели детали. Координаты проектируемой траектории представляются относительно системы координат модели робототехнического комплекса. Построенная траектория в совокупности с расставленными относительно нее управляющими командами представляет собой УП робота. Управляющая программа волоконного лазера создается на основе УП робота средствами ручного программирования непосредственно на промышленном ЛРК-С. Схема технологической подготовки УП для ЛРК-С, включающей оффлайн-программирование представлена на рисунке 2.

В сравнении с методом онлайн-программирования оффлайн переносит решение существенной части задач в автономный режим, увеличивая время решения производственных задач на промышленном комплексе [29]. Средства оффлайн-программирования позволяют создавать проект УП робота, повышая гибкость. Но поскольку метод оффлайн-программирования в значительной степени зависит от моделирования робота, деталей и оснасток, возникают дополнительные операции калибровки положения модели детали [26, 27] и отладки

полученной УП робота на реальной детали, требующие постоянного взаимодействия участков рабочего места оператора (РМТ) и ЛРК-С.

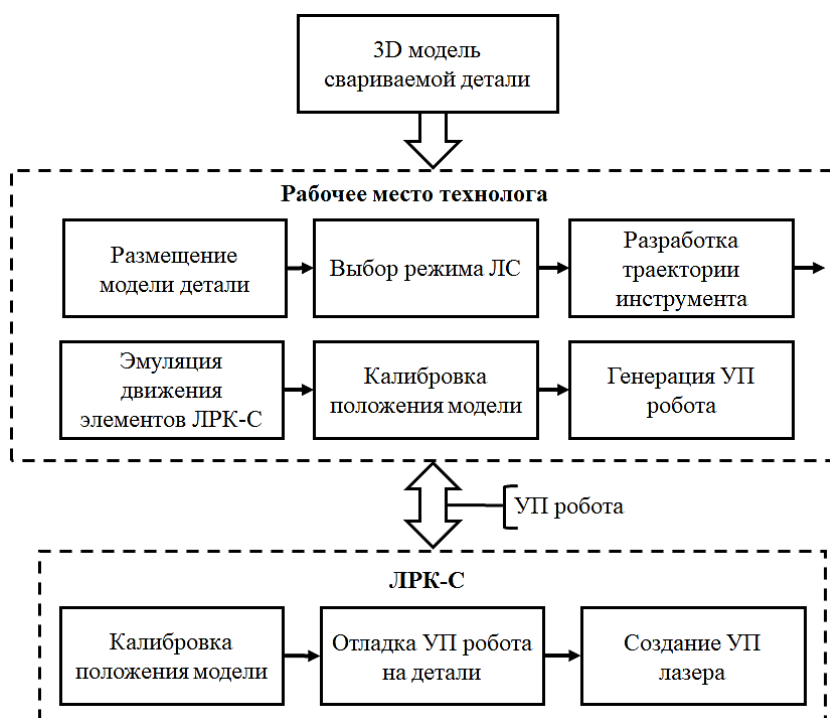


Рисунок 2 - Схема технологической подготовки УП для ЛРК-С, использующего подход оффлайн-программирования

Калибровка положения модели детали подразумевает осуществление уточнения ее положения в пространстве моделей относительно реальной детали, размещенной в рабочем пространстве ЛРК-С. Операция подразумевает построение опорных точек детали и ее модели, на основании которых осуществляется преобразование координат. Уточненное положение модели детали в АС ТПП позволяет сгенерировать УП робота, включающую траекторию движения инструмента ЛРК-С. Отладка УП робота на детали, размещенной в рабочем пространстве ЛРК-С, подразумевает проверку и корректировку положения точек траектории движения инструмента относительно свариваемых кромок. По завершению корректировки УП робота осуществляется создание УП лазера.

В соответствии со схемой изображенной на рисунке 2 методика технологической подготовки УП для ЛРК-С на сегодняшний день представляется следующей последовательностью операций:

- 1) Размещение модели детали в пространстве моделей.
- 2) Выбор технологического режима ЛС.

- 3) Разработка траектории движения инструмента ЛРК-С.
- 4) Эмуляция движения подвижных элементов ЛРК-С (звеньев робота, инструмента, позиционера).
- 5) Калибровка положения модели на ЛРК-С (построение опорных точек преобразования детали).
- 6) Калибровка положения модели на РМТ (построение опорных точек преобразования модели).
- 7) Генерация УП робота.
- 8) Отладка УП робота на детали.
- 9) Создание УП лазера.

Исходя из анализа работ [25, 27] становится возможным определить, что на сегодняшний день в машиностроительном производстве широко применяется подход оффлайн-программирования робототехнических комплексов. Однако применение оффлайн-программирования в единичном и мелкосерийном производстве ограничено из-за большого количества времени затрачиваемого на калибровку модели детали и отладку УП робота [32]. Использование такого подхода к подготовке УП может быть экономически целесообразно в крупносерийных производствах, где время производства партии деталей значительно превышает время программирования.

Для применения подхода оффлайн-программирования в условиях единичного и мелкосерийного производства осуществляют автоматизацию операций оффлайн-программирования [33]. Рассмотрим далее методы автоматизации калибровки положения модели детали и отладки УП робота, обеспечивающие сокращение времени технологической подготовки УП.

1.1.2 Современные методы и средства автоматизации калибровки положения модели детали в АС ТПП

Для калибровки положения модели детали применяются методы, уточняющие ее положение относительно реального образца, расположенного в рабочем пространстве промышленного комплекса.

Процесс калибровки, реализуемый ручным методом, осуществляется за счет построения связанных ортонормированных базисов пространств модели и детали [34]. Но ручная калибровка положения модели с деталью подразумевает времязатратное взаимодействие рабочего места технолога и ЛРК-С. При этом небольшие смещения положения детали требуют осуществления повторной калибровки, увеличивая время отладки УП робота. Операция калибровки положения модели относительно реальной детали применяется, как правило, в отсутствие оснастки, выравнивающей деталь относительно построенных опорных точек, разработка которой в условиях единичного и мелкосерийного производства значительно увеличивает стоимость продукции.

Наиболее перспективным методом сокращения время выполнения калибровки модели детали является автоматизация сопоставления положения детали и ее модели средствами датчика глубины [35, 36] (бинокулярные видеокамеры [37], лидары [38], Time-of-Flight (ToF) камеры [39] и т.д.). Выходными данными датчика глубины является облако пространственных точек зафиксированных сенсором устройства и представленных относительно собственной системы координат. Таким образом датчик глубины позволяет получать множество пространственных точек, принадлежащих поверхности свариваемой детали, обеспечивая получение данных для сопоставления ее расположения с моделью.

В работе [40] автоматизация калибровки модели детали делится на следующие этапы:

- 1) Детектирование детали.
- 2) Фильтрация детектируемой детали и ее регистрация с моделью (в теории обработки облаков точек операция регистрации подразумевает выравнивание одного облака точек в другом).
- 3) Проектирование траектории по результату регистрации.
- 4) Генерация УП.

Для детектирования детали используется система, состоящая из двух компактных бинокулярных видеокамер, размещенных в стороне от сварочного стола на штативах (см. рисунок 3).



Рисунок 3 - Схема детектирования свариваемой детали на столе с помощью двух бинокулярных видеокамер размещенных на штативе

Система детектирует расположенный объект на сварочном столе. После детектирования зафиксированные с двух сторон бинокулярными видеокамерами данные сопоставляются с трехмерной моделью детали. Полученная информация о локализации детали на столе позволяет осуществлять проектирование траектории движения инструмента робототехнического комплекса в пространстве моделей со скорректированным положением детали в нем. Таким образом, данные, полученные с системы бинокулярных видеокамер, позволяют осуществлять автономное создание траектории движения в автоматизированной системе с уточненным положением модели.

В работе [41] для детектирования детали на рабочем столе используют бинокулярную видеокамеру, размещенную на стойке с наклоном оптической оси поля зрения камеры вертикально вниз (см. рисунок 4). На основании данных с видеокамеры и модели осуществляют распознавание детали. Результат распознавания сопоставляется с трехмерной моделью, позволяя уточнить ее положение в пространстве моделей.

В исследовании [35] осуществлялось трехмерное картографирование области возможного расположения детали средствами ToF-камеры установленной на инструменте робототехнического комплекса. Полученная трехмерная карта предполагает отказ от использования конструкторских моделей и осуществление создания траектории на карте. Однако, как отмечается в [36], предложенная

система не предоставляет точной информации для использования в операциях проектирования технологического процесса.

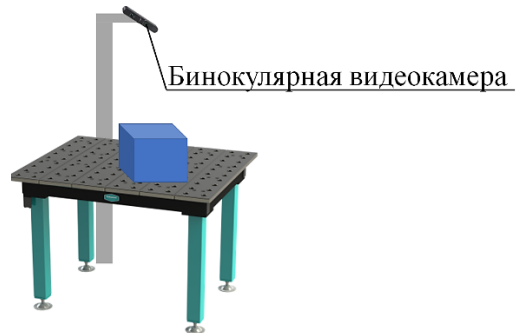


Рисунок 4 - Схема детектирования свариваемой детали на столе с помощью бинокулярной видеокамеры размещенной над рабочим столом

Использование датчиков глубины в составе промышленного ЛРК-С может позволить сократить время калибровки положения модели за счет осуществления операции сопоставления положения детали с моделью. Но фиксированное расположение датчика глубины в рабочей зоне промышленного комплекса затрудняет доступ поля зрения к поверхности свариваемой детали, снижая качество реконструкции детали. Помимо этого, фиксированное расположение камеры требует размещения детали в ограниченной области стола.

Установка датчика глубины на инструменте ЛРК-С лишено недостатков фиксированного расположения. Датчик глубины, расположенный на инструменте ЛРК-С, может позволить повысить качество реконструкции детали за счет осуществления многосторонних и многопроходных движений относительно детали, то есть осуществить трехмерное сканирование детали [42].

Но на сегодняшний день не представляется возможным выделить решения, позволяющие в совокупности осуществлять калибровку положения модели в пространстве моделей, используя средства датчика глубины, расположенного на инструменте ЛРК-С. В качестве причин этого стоит отметить наличие открытых вопросов: создания траектории движения инструмента, формализации алгоритма сканирования, определении средств сопоставления результата сканирования детали с моделью, генерация УП по результату сопоставления.

Сопоставление положения детали и ее модели средствами датчика глубины может позволить эффективно осуществить автоматизацию трансляции координат

траектории движения инструмента из пространства моделей в рабочее пространство промышленного комплекса [28, 43]. В свою очередь это позволит заменить операцию калибровки модели детали, сократив время выполнения технологической подготовки УП.

1.1.3 Современные методы автоматизации отладки управляющих программ робота относительно свариваемой детали

Реальные детали в сравнении с идеализированными конструкторскими моделями, криволинейные поверхности которых аппроксимируются плоскими геометрическими примитивами (как правило треугольниками), могут иметь неприемлемые отклонения геометрии [35, 44, 45] для роботизированной сварки. Траектория лазерного луча, построенная по трехмерной модели может оказаться вне свариваемого стыка детали, даже в случае идеального сопряжения координатных систем модели и детали. Для устранения отклонения в процессе предшествующем ЛС осуществляется отладка УП, подразумевающая проверку и корректировку положения инструмента относительно свариваемых кромок.

Результат автоматизированной трансляции проектируемой траектории из пространства моделей в рабочее пространство ЛРК-С средствами датчика глубины может не обеспечить достижения высокой точности трансляции точек траектории движения инструмента. Это связано с тем, что реконструкция детали на основании объединения данных полученных с датчика глубины не является высококачественной цифровой моделью. Ограниченность поворота инструмента не позволяет обеспечить доступ поля зрения камеры ко всем элементам поверхности детали. Помимо этого на результате сканирования могут присутствовать шумы [46, 47], размывающие малые элементы свариваемой детали.

Так как процесс ЛС создает агрессивные условия для контролирующего и измерительного оборудования, корректировка точек траектории “на лету” [48, 49], во время выполнения ЛС менее предпочтительна. Поэтому операция отладки УП, относительно свариваемых кромок детали, является необходимой частью технологической подготовки УП промышленного ЛРК-С.

В качестве наиболее перспективного решения по устранению проблем несоответствия положения транслированных точек проектируемой траектории является использование методов и средств корректировки, функционирующих на этапе подготовки производства и автоматизировано адаптирующих транслированную траекторию движения под установленную деталь.

На сегодняшний день программно-аппаратные системы корректировки точек траектории движения инструмента ЛРК-С основываются на детектировании свариваемых кромок [50]. В большинстве случаев детектирование и распознавание осуществляется за счет использования следующих средств:

1) Системы слежения за структурированным светом, проецирующие лазерные полосы на исследуемую область, детектируя и обрабатывая искаженные поверхностью данные [51, 52] (пример: Meta Vision, Servo Robot, Scout и Scansonic).

2) Программно-аппаратные комплексы обработки изображений, получаемых с видеокамеры различных конфигураций и спектра работы.

В работах [53, 54] для осуществления корректировки инструмента дуговой сварки предлагается использовать лазерный профилометр. Система слежения за структурированным светом позволяют хорошо детектировать линии примыкания заготовок, имеющих значительный зазор, но плохо применимы в случаях его малых размеров [50]. Требования фиксированного расположения датчика дополнительно накладывают ограничения на позиционирование и ориентацию инструмента в точке траектории при проектировании корректирующего объезда. Помимо этого устройства слежения имеют большую стоимость в сравнении с решениями, основанными на технологиях обработки изображений с видеокамеры. Поэтому корректировка траектории движения инструмента ЛРК-С относительно свариваемых кромок средствами машинного зрения является более предпочтительной [55].

Рассмотрим далее решения по корректировке точек траектории относительно свариваемых кромок использующие средства машинного зрения.

В работах [56, 57] осуществляется сегментация свариваемых кромок путем применения медианного фильтра с размером ядра преобразования 3×3 . Но в исследовании не указываются ограничения и границы применимости предложенного метода сегментации кромок. Аналогичный вывод можно сделать при изучении работы [58], в которой проводится пороговое преобразование для выделения области между свариваемыми кромками с неявным указанием значения порога.

В исследованиях [59, 60] область между свариваемыми кромками рассматривается как область пикселей с более низким уровнем серого. Но в них не представлена формализация определения порога выделения, позволяющая однозначно сегментировать область между свариваемыми кромками. Аналогичным образом предлагают детектировать область между кромками в исследовании [61]. В работе выделение искомой области осуществляется путем осветления всего изображения до тех пор пока основной фон не достигнет белого цвета. В результате выполнения этой процедуры на изображении будет сегментирована только область между свариваемыми кромками. Вопрос определения значения коэффициента осветления достаточного для контрастного выделения в работе остается открытым.

В исследовании [62] осуществляется распознавание свариваемых кромок в процессе выполнения сварки. Наблюдаемость искомого объекта достигается использованием двусторонней подсветки, позволяющей создавать затемнение области между кромками в процессе движения инструмента. Предлагаемый алгоритм в работе представляется несложной схемой, состоящей из нескольких последовательных операций. В качестве входных данных используется ограниченная область интересов, содержащая фронтальную линию, образующую область между кромками относительно точки сварки. Изображение области интересов сегментируется за счет использования оператора Кэнни. К бинаризованному изображению применяется детектор границ Хафа, получающий линии-кандидаты, после чего ложные кромки фильтруются оператором Калмана. Но учитывая специфику работы оператора Кэнни [63], предлагаемый алгоритм не

позволит достичь адаптивного использования, поскольку для различных поверхностей, производимой детали, оператор Кэнни требует корректировки параметров конфигурации, что затрудняет использование предлагаемого алгоритма в разрабатываемой автоматизированной системе корректировки инструмента ЛРК-С.

В [64] рассматривается метод определения контрольных точек корректировки, но его применимость ограничивается небольшой окрестностью текущего положения инструмента ЛРК-С, так как подразумевают локальную аппроксимацию траектории математической функцией.

Детектирование области между свариваемыми кромками с помощью контрастирующей сегментации по яркости в условиях хорошего освещения поверхности детали является наиболее перспективным способом выделения искомого объекта на изображении. Учитывая основное требование ЛС о необходимости позиционировании пятна лазерного излучения в центральной точке между кромками [65], детектирование области между кромками как множества самых темных пикселей при достаточном освещении может позволить значительно снизить требования к распознаваемым кромкам, так как в качестве них могут выступать границы темной области, которые в большинстве случаев совпадают с кромками. Эта особенность может быть выполнена за счет использования двусторонней светодиодной подсветки. Иными словами сегментация темных пикселей не требует подготовки кромок соединения для распознавания. Помимо этого могут быть снижены требования к текстуре поверхности кромок. Распознавание и определение центральной точки темной линии, представляющей собой область между свариваемыми кромками, позволяет не учитывать зеркальные отражения и царапины поверхности за исключением наличия серьезных дефектов, соизмеримых по глубине и длине с распознаваемыми кромками. При этом остается открытым вопрос однозначного определения искомого объекта на изображении, содержащем области входящие в диапазон порогового выделения по яркости, но не являющейся областью между кромками.

Обеспечение возможности наблюдения свариваемых кромок на изображении видеокамеры возможно достичь путем задания ориентации инструмента в точках траектории движения инструмента ЛРК-С для процесса корректировки, обеспечивающей наблюдение свариваемых кромок. Учитывая требования ГОСТ [66] линейное рассогласование соединения для получения высококачественного результата ЛС не должно превышать значения 1 мм, что в свою очередь обеспечивает возможность распознавания свариваемых кромок на резком (сфокусированном) изображении.

Однако стоит отметить, что в анализируемых выше работах остается открытым вопрос определения корректного положения относительно распознанных кромок и текущей позиции инструмента ЛРК-С. Не формализованным остается вопрос трансляции скорректированного положения инструмента из двухмерного пространства изображения в рабочее пространство ЛРК-С с учетом его ориентации, отклоненной от нейтрального положения.

Рассмотрим далее АС ТПП, реализующие современные методы технологической подготовки УП для промышленного ЛРК-С.

1.2 Анализ современных автоматизированных систем технологической подготовки производства на лазерном роботизированном комплексе сварки

Современные АС ТПП в большинстве случаев реализуют подходы оффлайн-программирования. Применяемые для промышленного комплекса ЛРК-С автоматизированные системы ТПП можно разделить на три основные группы:

- 1) От производителей промышленных роботов.
- 2) Коммерческие.
- 3) Академические.

На сегодняшний день почти все основные производители промышленных роботов [67] имеют собственные системы оффлайн-программирования. Примером могут являться следующие системы: ABB RobotStudio, FANUC Roboguide, KUKA CAMRob, Motoman MotoSim EG, Robotmaster KMT CamPro.

Перечисленные программные комплексы в своем составе содержат все необходимые средства для полноценной трехмерной визуализации, моделирования работы контроллера робота и симуляции движения. Помимо этого они содержат необходимые модули разработки траектории движения, программирования и генерации УП промышленного робота.

Автоматизированные системы ТПП производителей роботизированных манипуляторов содержат модули обработки моделей детали, позволяя автоматизировано определять и проектировать траектории сварки на них [68]. Выходным результатом работы в АС ТПП является УП промышленного робота одного из производителей. В состав УП не входит информация о модели детали и значениях параметров технологического режима. В связи с этим затрудняется возможности осуществления автоматизации переноса траектории из пространства моделей в пространство промышленного комплекса датчиком глубины и генерации УП для ЛРК-С.

Наиболее известные коммерческие АС ТПП, позволяющие осуществлять оффлайн-программирование робототехнических комплексов, представлены следующим списком: SprutCAM, RobCAD (или eM-Workplace) и RoboDK.

Система SprutCAM предназначена для разработки УП оборудования с ЧПУ. В своем составе она имеет программные модули моделирования и симуляции большинства промышленных роботов применяемых в различных технологических процессах.

Программная среда RobCAD имеет схожий функционал с SprutCAM, но в первую очередь предназначена для использования робототехническими комплексами. Она имеет широкий набор средств моделирования, оптимизации и оффлайн-программирования роботизированных комплексов. Помимо этого имеются подсистемы автоматизации проектирования различных технологических процессов на моделях деталей.

Программный комплекс RoboDK является системой оффлайн-программирования и моделирования различных роботизированных манипуляторов. Комплекс имеет интерфейс прикладного программирования,

позволяющий осуществлять программное взаимодействие с моделируемым робототехническим комплексом.

Коммерческие АС ТПП в сравнении с системами производителей роботизированных манипуляторов имеют более гибкие инструменты подготовки УП за счет применения подсистем автоматизации проектирования различных технологических процессов и библиотек роботизированных манипуляторов для моделирования и симуляции. Но на сегодняшний день не представляется возможным выделить подсистему автоматизации проектирования процесса ЛС. Коммерческие системы оффлайн-программирования, как и в случае систем от производителей робототехнических манипуляторов, представляют выходной результат в форме УП робота, не обеспечивая возможности автоматизированной, согласованной подготовки УП лазера.

Рассмотрим далее академические программные разработки технологической подготовки УП и составляющие их средства.

В работе [41] осуществлялась автоматизированное сопоставление результата детектирования детали с ее моделью, с использованием специально разработанной программной надстройки для АBB RobotStudio. Взаимодействие с RobotStudio осуществлялось средствами прикладного программного интерфейса системы.

В исследовании [36] коллектив авторов разработал собственную автоматизированную систему оффлайн-программирования робототехнического комплекса. В качестве основополагающих средств разработки использовалась библиотека OCC (Open Cascade) [69] моделирования и трехмерной визуализации объектов, применяемая при разработке САПР и АС ТПП систем.

В работе [40], использующей две бинокулярные видеокамеры, размещенные на штативе для детектирования свариваемой детали, в качестве автоматизированной системы для проектирования траектории и симуляции движения робота применялась система V-REP с интегрированной библиотекой OMPL (Open Motion Planning Library) [70]. Для выполнения сопоставления результата детектирования бинокулярных видеокамер с полигональной моделью детали использовалась библиотека PCL (Point Cloud Library) [71, 72].

В исследовании [35], описывающем метод трехмерного картографирования рабочей области возможного расположения детали ToF-камерой, установленной на инструменте робототехнического комплекса, полученные данные обрабатывались в имитационной среде MATLAB.

Таким образом, на сегодняшний день не представляется возможным выделить АС ТПП, позволяющую осуществлять автоматизацию в целях сокращения времени технологической подготовки УП. Существующие решения частично рассматривают вопрос калибровки положения модели детали и последующей отладки УП робота в собственных программных разработках и надстройках над существующими системами проектирования технологических процессов.

1.3 Выводы по главе и задачи исследования

- На основании анализа современных методов и средств автоматизации технологической подготовки управляющих программ ЛРК-С можно сделать вывод, что время технологической подготовки УП возможно сократить путем исключения операций калибровки положения модели и отладки УП робота, относительно детали и включения вместо них автоматизированных операций.
- Проведен анализ методов сокращения времени калибровки положения модели. Определенно, что калибровку положения модели возможно заменить на автоматизированную трансляцию траектории движения инструмента ЛРК-С, используя средства датчика глубины путем выполнения сопоставления положения результата трехмерного сканирования свариваемой детали и ее модели.
- Проанализированы методы и средства сокращения времени отладки УП робота. Операцию возможно заменить на автоматизированную корректировку положения инструмента ЛРК-С, используя средства машинного зрения по распознаванию свариваемых кромок на изображении, получаемом с видеокамеры установленной на инструменте ЛРК-С. Однако для использования метода в составе автоматизированной системы требуется разработать более совершенные алгоритмы и модели сегментирования и распознавания кромок, определить

относительно них корректное положение инструмента и формализовать трансляцию координат в рабочее пространство ЛРК-С.

- Для применения средств автоматизации на ЛРК-С необходимо осуществить программную реализацию результатов теоретических исследований. Для этого был проведен анализ существующих АС ТПП и составляющих их средств. По результату анализа определено, что на текущий момент не представляется возможным выделить автоматизированную систему реализующую необходимый набор функций (детектирование детали в рабочем пространстве ЛРК-С, проектирование траектории движения датчика глубины закрепленного на инструменте, трансляция координат проектируемой траектории движения ЛС, сегментирование и распознавание свариваемых кромок, трансляция координат из пространства изображения в рабочее пространство ЛРК-С и т.д.). Однако в ходе анализа АС ТПП определены средства позволяющие осуществить собственную программную разработку.

Для достижения поставленной цели по результатам проведенного анализа сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Разработать методику технологической подготовки управляющих программ промышленного ЛРК-С.
2. Разработать метод автоматизированной трансляции траектории инструмента ЛРК-С из пространства моделей в рабочее пространство ЛРК-С, с использованием датчика глубины.
3. Модифицировать модели и алгоритмы автоматизированной корректировки транслированной траектории средствами распознавания свариваемых кромок на видеоизображении.
4. Создать подсистему АС ТПП по подготовке управляющих программ промышленного ЛРК-С.
5. Оценить сокращение времени выполнения технологической подготовки управляющих программ подсистемой АС ТПП на объектах с ЛС, в рамках экспериментального исследования при единичном и мелкосерийном производстве.

Глава 2. Методика автоматизированной технологической подготовки управляющих программ лазерного роботизированного комплекса сварки

2.1 Основные положения методики

По результатам анализа современного состояния автоматизации технологической подготовки управляющих программ ЛРК-С, проведенных в первой главе, сделан вывод, что для достижения цели исследования необходимо разработать новую методику технологической подготовки УП.

Предлагаемая методика автоматизации технологической подготовки УП для ЛРК-С основывается на включении операций автоматизированных операций трансляции траектории движения инструмента, используя средства датчика глубины и корректировки транслированных точек относительно свариваемых кромок, за счет их распознавания на изображении видеокамеры, размещенной на инструменте. В качестве исходных данных на ЛРК-С используется проектное решение, содержащее необходимые данные для выполнения автоматизированных операций и последующей генерации УП. Схема операций методики представлена на рисунке 5.

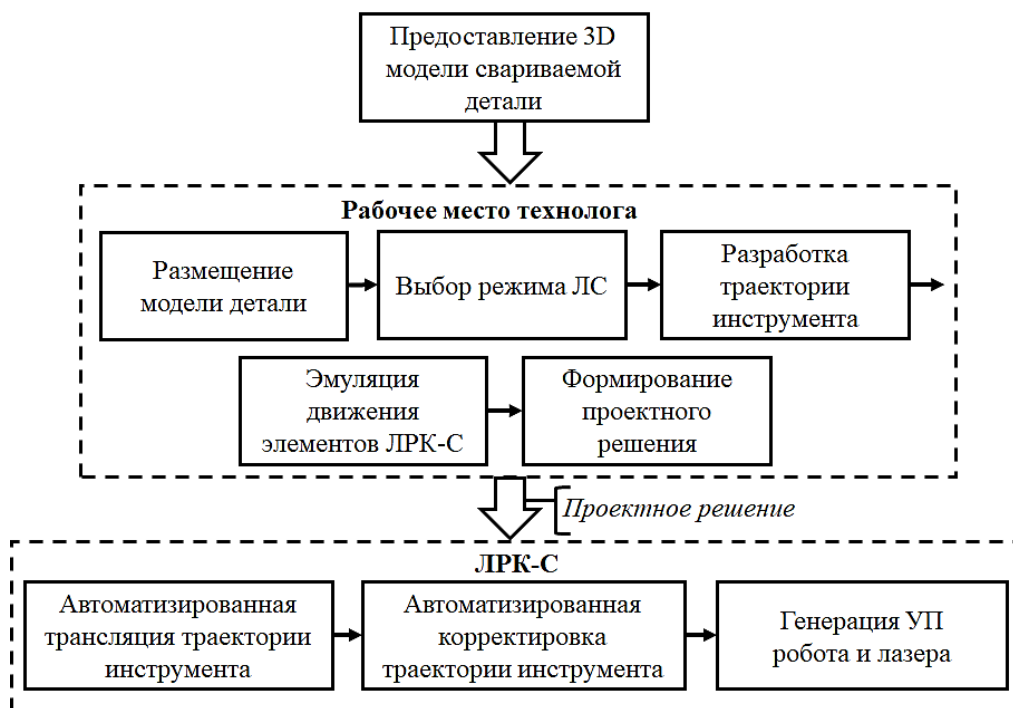


Рисунок 5 - Схема методики технологической подготовки УП

В соответствии со схемой представленной на рисунке 5, предлагаемая методика технологической подготовки УП для ЛРК-С представляется следующей последовательностью операций:

- 1) Размещение модели детали и оснастки в пространстве моделей.
- 2) Выбор технологического режима ЛС.
- 3) Разработка траектории движения инструмента ЛРК-С.
- 4) Эмуляция движения подвижных элементов ЛРК-С (звеньев робота, инструмента, позиционера).
- 5) Формирование проектного решения ЛС.
- 6) Автоматизированная трансляция траектории инструмента ЛРК-С.
- 7) Автоматизированная корректировка транслированной траектории инструмента ЛРК-С.
- 8) Генерация УП робота и лазера.

Таким образом методика предполагает исключение операций калибровки положения модели и отладки УП робота на детали, и включение автоматизированных операций трансляции и корректировки траектории инструмента ЛРК-С.

В качестве входных данных проектирования процесса ЛС выступает трехмерная полигональная модель [73], свариваемой детали, разработанная в конструкторском САПР (например, Аскон КОМПАС-3D, Dassault Systèmes SOLIDWORKS и других). На РМТ осуществляется подготовка проекта ЛС в пространстве моделей. Результат подготовки представляет собой проектное решение разработанного технологического процесса ЛС. Проектное решение передается инженером-технологом на ЛРК-С, где оператор осуществляет выполнение автоматизированных операций трансляции траектории в рабочее пространство промышленного комплекса и ее корректировки относительно свариваемых кромок. На основе проектного решения, используя транслированную и скорректированную траекторию, оператор осуществляет совместную генерацию УП робота и лазера. Здесь и далее под рабочим пространством ЛРК-С подразумевается ограниченное трехмерное пространство позиционирования

инструмента, отсчитываемое относительно системы координат промышленного робота, привязанное к столу или позиционеру, на которых размещается свариваемая деталь.

Проектное решение является структурированным набором данных проекта технологического процесса ЛС и представляется схемой изображенной на рисунке 6. Аналогичная структура данных может быть применена не только к технологическому процессу ЛС, но и смежным процессам лазерной металлообработки, например наплавки [74].

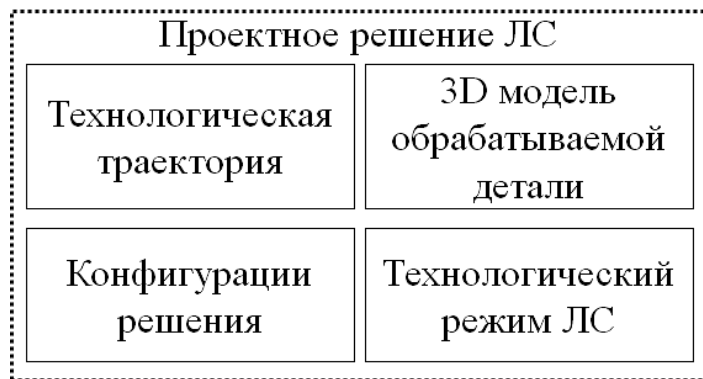


Рисунок 6 - Структурная схема проектного решения ЛС

Таким образом, проектное решение содержит в своей структуре элементы, которые используются в методе оффлайн-программирования, расширяя выходной результат проектирования.

Ключевым элементом проектного решения ЛС является технологическая траектория, представляющая собой упорядоченную последовательность точек траектории движения инструмента ЛРК-С, содержащих состояния готовности (вкл/выкл) технологического оборудования, обеспечивающих идентификацию участков сварки в процессе автоматизированной корректировки и подготовки УП комплекса ЛРК-С.

Инструмент ЛРК-С представляет собой объединение лазерной головки с элементами технологического и контролирующего оборудования, закрепленные на крайнем сочленении роботизированного манипулятора (см. рисунок 7).

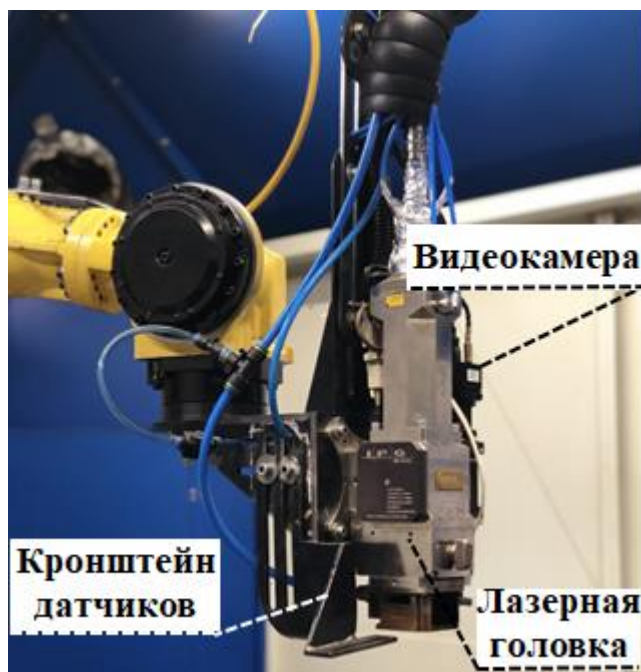


Рисунок 7 - Инструмент ЛРК-С

Структура точки технологической траектории представлена на рисунке 8. Положение \vec{p} и ориентация \vec{n} инструмента задаются векторами $\vec{p} = \{p_x, p_y, p_z\}$ и $\vec{n} = \{n_x, n_y, n_z\}$ в трехмерном пространстве моделей. Величины $\vec{p}^* = \{p_x^*, p_y^*, p_z^*\}$ и $\vec{n}^* = \{n_x^*, n_y^*, n_z^*\}$ соответствуют положению \vec{p} и ориентации \vec{n} инструмента, транслированным из пространства модели в рабочее пространство ЛРК-С. Вращение инструмента вокруг лазерного луча задается значением R , описывающим степень свободы крайнего (инструментального) сочленения робота (см. п. 2.2). Степень сглаживания движения инструмента CNT является параметром, характеризующим уровень сглаживания траектории при движении инструмента от точки к точке. Параметром, характеризующим меру быстроты перемещения инструмента в заданную точку, является скорость V_{tool} . Время изменения мощности лазера Δt определяет рост или падение мощности в заданной точке траектории, в зависимости от требуемого состояния лазерного излучения. Логические параметры D задают состояние готовности вкл/выкл технологического оборудования в каждой точке технологической траектории и обеспечивают идентификацию участков сварки. Единица измерения скорости движения инструмента принимает одно из значений: мм/сек, см/мин, дюйм/мин, градус/сек, за x секунд и за x мс.

| Структура точки технологической траектории ЛС | |
|---|--|
| Положение инструмента \bar{p} | Скорость движения инструмента V_{tool} |
| Ориентация инструмента \bar{n} | Скорость движения позиционера V_{pos} |
| Положение инструмента \bar{p}^* в пространстве ЛРК-С | Единица измерения скорости инструмента T_{tool} |
| Ориентация инструмента \bar{n}^* в пространстве ЛРК-С | Степень сглаживания движения CNT |
| Угол вращения инструмента R | Время изменения мощности лазера Δt |
| Ориентация инст. при корректировке \bar{n}_{cam} | Состояние лазерного излучения вкл/выкл D_{em} |
| Угол вращения инст. при корректировке R_{cam} | Состояние подачи проволоки вкл/выкл D_{wire} |
| Положение позиционера \bar{J} | Состояние подачи защитного газа вкл/выкл D_{gas} |

Рисунок 8 - Структурная схема точки технологической траектории ЛС

Ориентация инструмента \bar{n}_{cam} и угол вращения R_{cam} обеспечивают задание пространственного положения инструмента в процессе корректировки точки технологической траектории относительно распознаваемых кромок.

Положение \bar{J} двухосевого позиционирующего устройства (далее – позиционер, модель кинематики которого представлена в пункте 2.2) описывается плоским вектором $\bar{J} = \{J_1, J_2\}$, задающим углы поворота подвижных звеньев вокруг его осей. Скорость перемещения позиционера V_{pos} в заданное положение является относительной величиной, характеризующейся долей от максимальной скорости движения, заявленной техническим паспортом устройства.

Основные технологические параметры режима ЛС [75] проектного решения, представлены на рисунке 9.

| Структура данных технологического режима ЛС | |
|---|--|
| Мощность лазерного излучения P | Знач. расфокусировки Δf лазерного изл. |
| Скорость движения инструмента V | Расход защитного газа Q_{gas} |
| Скорость подачи проволоки V_{wire} | Тип защитного газа T_{gas} |

Рисунок 9 - Структурная схема режима ЛС

Значение расфокусировки Δf лазерного излучения в технологическом режиме ЛС может иметь как положительное так и отрицательное значение. Под

положительным значением подразумевается положение перетяжки лазерного излучения над свариваемыми кромками, при отрицательном – внутри детали.

Выбранный инженером-технологом режим применяется ко всем точкам технологической траектории, в которых осуществляется ЛС.

Конфигурации решения содержат параметры трехмерной визуализации моделей, оценку сложности формы детали при сканировании, направление обхода трехмерного сканирования, тип используемого стола и матрицу трансляции траектории.

Рассмотрим далее кинематические расчетные модели инструмента и позиционера.

2.2 Кинематические расчетные модели инструмента и позиционера

Точкой позиционирования инструмента $\bar{\tau} = \{\tau_x, \tau_y, \tau_z\}$ ЛРК-С является пространственная точка перетяжки лазерного излучения, лежащая в фокальной плоскости [76] (см. рисунок 10). Положение $\bar{\tau}$ используется в решениях прямой и обратной задач кинематики [77, 78], а также в задачах расчета динамики движения инструмента [79].

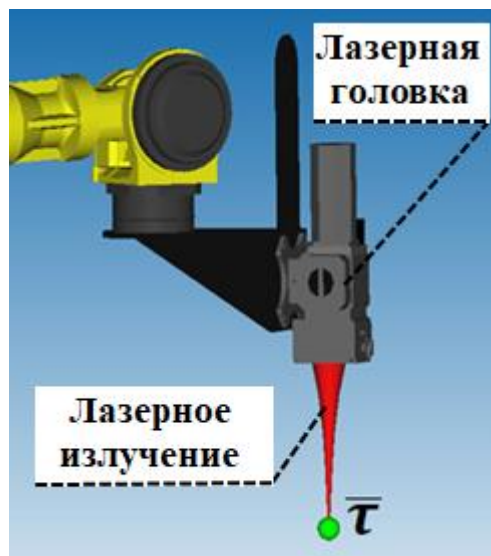


Рисунок 10 - Точка позиционирования $\bar{\tau}$ инструмента ЛРК-С

Система векторов $\bar{j} = \{\bar{j}_1, \bar{j}_2\}$ описывает кинематику позиционера [80] (см. рисунок 11).

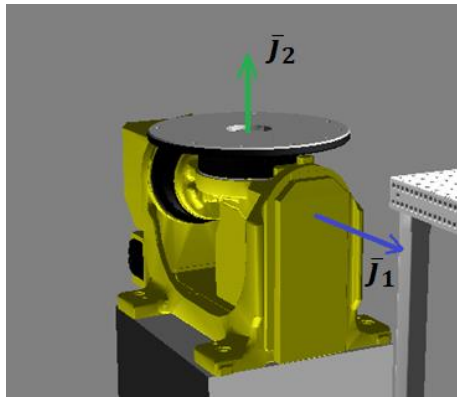


Рисунок 11 - Схема системы векторов \bar{j} характеризующей кинематику позиционера

Система векторов \bar{j} двухосевого позиционирующего устройства, соответствующая углам позиционера $J = \{J_1, J_2\}$, определяется следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\bar{J}_1 &= \bar{J}_1^0, \\ \bar{J}_2 &= R(\bar{J}_1^0, J_1),\end{aligned}$$

где \bar{J}_1^0 – нейтральное положение оси \bar{J}_1 , $R(\bar{J}_1^0, J_1)$ – матрица поворота вектора \bar{J}_1^0 на угол J_1 .

Ориентирование инструмента ЛРК-С роботизированным манипулятором осуществляется в системе углов Эйлера $\bar{\varepsilon} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z\}$ [81]. В проектном решении ориентация инструмента представлена вектором \bar{n} , определяющим направление лазерного луча в точках технологической траектории. С одной стороны вектор \bar{n} позволяет упростить расчет трансляции ориентации инструмента из пространства моделей в рабочее пространство ЛРК-С, но с другой стороны для генерации УП требуется представление ориентации в углах Эйлера. Преобразование вектора ориентации инструмента \bar{n} в углы Эйлера $\bar{\varepsilon}$ осуществляется по формулам:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \text{sign}(n_y) \cdot \arccos\left(\frac{n_z}{\sqrt{n_y^2 + n_z^2}}\right), \\ \varepsilon_y &= -\text{sign}(n_x) \cdot \arccos\left(\sqrt{n_y^2 + n_z^2}\right).\end{aligned}$$

Третий угол Эйлера $\bar{\varepsilon}_z$ характеризует вращение инструмента вокруг оси ориентации инструмента. В структуре проектного решения он записывается, как угол R . Поворот инструмента вокруг оси ориентации обеспечивает вращение

навесного оборудования [82] относительно точки положения инструмента \bar{r} . Схема вращения инструмента и положения элемента навесного оборудования изображена на рисунке 12.

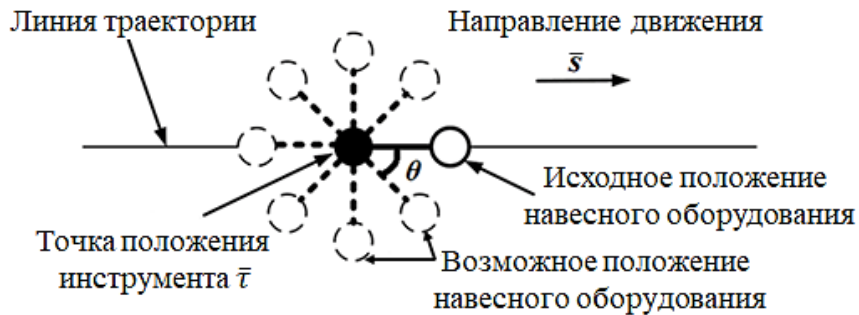


Рисунок 12 - Схема моделирования вращения инструмента (вид сверху)

В таком случае угол вращения ε_z можно определять в зависимости от направления движения $\bar{s} = \bar{r}_i - \bar{r}_{i-1}$ в соответствии со следующей расчетной моделью:

$$\varepsilon_z = -\text{sign}(s_x \cdot \cos\theta - s_y \cdot \sin\theta) \cdot \arccos(s_x \cdot \sin\theta + s_y \cdot \cos\theta),$$

где θ – угол отклонения элемента навесного оборудования от направления движения \bar{s} .

Исходя из расчетной модели угла вращения ε_z , угол R точки технологической траектории проектного решения становится возможным интерпретировать как угол смещения θ .

Используя кинематические расчетные модели инструмента и позиционера рассмотрим далее состав средств автоматизации трансляции технологической траектории из пространства моделей в рабочее пространство ЛРК-С.

2.3 Состав средств автоматизации технологической подготовки управляющих программ

2.3.1 Детектирование и трехмерное сканирование свариваемой детали датчиком глубины

Автоматизированная трансляция технологической траектории из пространства моделей в рабочее пространство промышленного комплекса

достигается за счет использования в качестве связующего звена участков РМТ и ЛРК-С проектного решения.

Проектное решение обеспечивает привязку проектируемой траектории движения инструмента ЛРК-С относительно модели свариваемой детали. Таким образом, автоматизированная трансляция траектории из пространства модели в рабочее пространство промышленного комплекса будет сводиться к решению задачи детектирования и сопоставления положения установленной детали с ее трехмерной моделью.

Получение исходных данных трехмерного положения свариваемой детали в рабочем пространстве ЛРК-С для сопоставления с моделью осуществляется выполнением процесса трехмерного сканирования. Наиболее перспективными средствами получения облака точек, принадлежащих поверхности свариваемой детали, размещенной в рабочем пространстве промышленного комплекса, являются датчики глубины (см. п. 1.1.2).

Датчик глубины размещается на инструменте ЛРК-С, образуя инструмент сканирования детали, схема которого изображена на рисунке 13. Позиционирование инструмента осуществляется относительно точки $\bar{\tau}_{dcam}$, которая определяется, как точка, лежащая на оси поля зрения $\bar{d} = \bar{n} \cdot d$, выходящем из главного сенсора (относительно которого осуществляется позиционирование получаемых данных) датчика и удаленной на расстояние d , характеризующимся как минимальное расстояние рабочего диапазона датчика глубины. Поле зрения датчика определяется парой углов θ_h, θ_v .

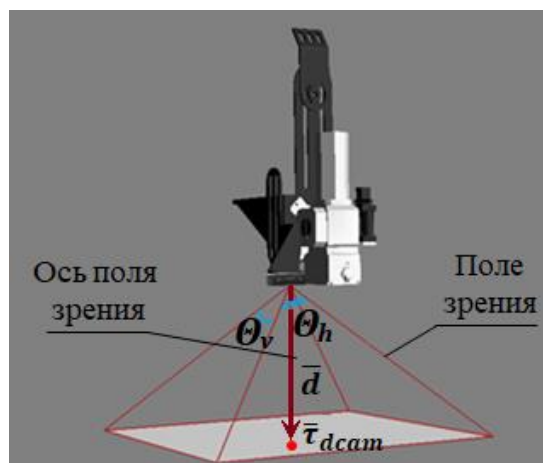


Рисунок 13 - Схема инструмента сканирования детали

Позиционирование облака точек, получаемого датчиком глубины, осуществляется относительно локальной системы, привязанной к главному сенсору (см. рисунок 14).

В таком случае позиционирование пространственного положения главного сенсора датчика глубины позволяет локализовать элементы облака точек, получаемого с датчика, в рабочем пространстве ЛРК-С относительно системы координат роботизированного манипулятора. Положение главного сенсора датчика глубины, размещенной на инструменте ЛРК-С, определяется выражением $\bar{\tau}_{dcam} - \bar{d}$.

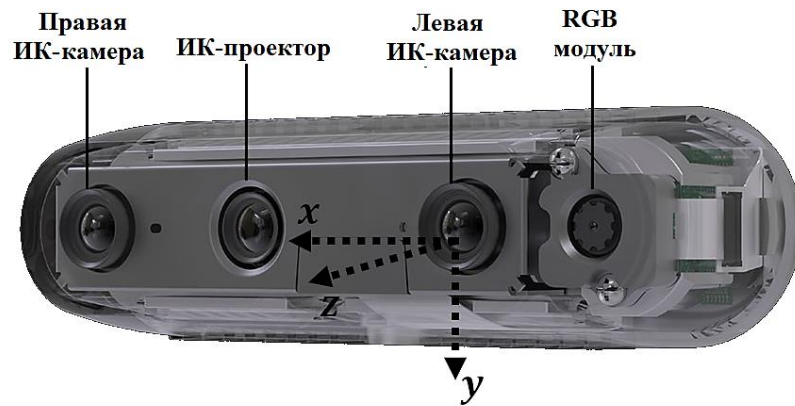


Рисунок 14 - Локальная система координат бинокулярной видеокамеры типа Kinect

Покадровое объединение облаков точек при многостороннем обходе свариваемой детали инструментом сканирования позволяет получить трехмерную цифровую модель детали обработки, локализованную в рабочем пространстве ЛРК-С.

Детектирование свариваемой детали датчиком глубины предлагается осуществлять в пространстве, конфигурируемом относительно стола, входящим в состав ЛРК-С [83]. Стоит отметить, что в качестве стола может использоваться позиционер, обеспечивающий вращение столешницы, на которой размещается свариваемая деталь.

В таком случае детектирование детали инструментом сканирования предлагается осуществлять в пространстве образованном областью возможного расположения на столе. При этом пространство должно обеспечивать

достижимость инструментом проектируемых положений проектного решения. Таким образом, пространство возможного расположения детали будет представлять собой рабочее пространство инструмента ЛРК-С относительно стола.

Для обеспечения выполнения процесса автоматизированной трансляции технологической траектории и генерации УП сформированы следующие требования к созданию траектории сканирования:

- Движение инструмента в процессе сканирования должно исключать возможность столкновения, то есть точка позиционирования инструмента должна находиться в рабочем пространстве инструмента, за вычетом области локализации детали (детектируемая область, в которой непосредственно находится деталь).
- Вращение инструмента должно быть плавным с отклонением на угол φ от нейтрального положения в произвольном направлении, расширяющим доступ поля зрения к элементам поверхности детали.
- Свариваемая деталь должна быть отсканирована с различных направлений, учитывая локальные перекрытия.

В таком случае процесс получения цифровой модели детали осуществляется относительно конфигурируемого рабочего пространства ЛРК-С, и состоит из операций, представленных на схеме изображенной на рисунке 15.

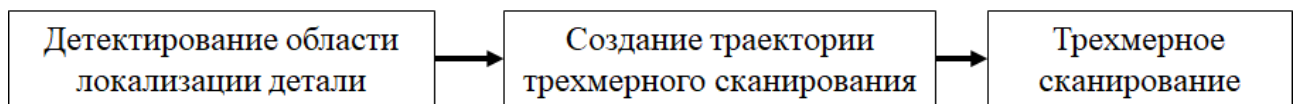


Рисунок 15 - Схема операций трехмерного сканирования свариваемой детали на ЛРК-С

При расположении инструмента сканирования над столом (см. рисунок 4), становится возможным детектировать область локализации свариваемой детали (см. рисунок 16).

Создание траектории движения инструмента сканирования возможно осуществить относительно ребер верхней грани (на рисунке 16 ребра представлены пунктирной линией) области локализации, обеспечивая движение датчика глубины под различным углом.

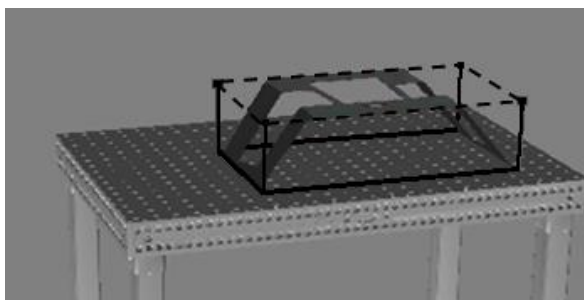


Рисунок 16 - Схема выделенной области локализации свариваемой детали

В процессе движения датчика глубины, закрепленного на инструменте, осуществляется трехмерное сканирование свариваемой детали путем обработки облаков точек. Сканирование детали осуществляется объединением $\Sigma_i = \Sigma(C_i \cup \Sigma_{i-1})$ множеств пространственных точек $\bar{c}_j \in C_i$, входящих в облака точек, получаемых датчиком глубины в ходе нескольких сканирований (здесь Σ – функция объединения). Отметить, что в процессе объединения участвует только та часть облака C_i , которая находится в области локализации детали обработки (см. рисунок 17).

Таким образом, результатом трехмерного сканирования будет являться облако, состоящее из пространственных точек, принадлежащих внешней поверхности свариваемой детали. Полученный результат используется для выполнения операции сопоставления положения детали с моделью.

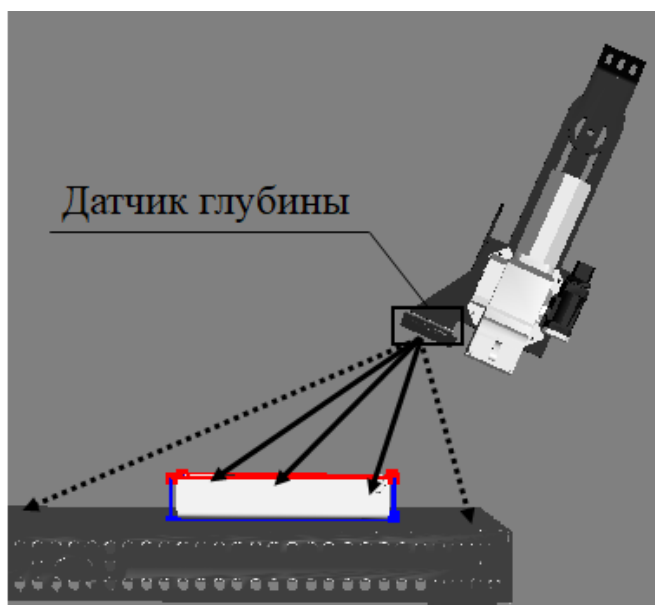


Рисунок 17 - Схема определения точек облака C_i входящих в область локализации (векторы сплошной линии) и находящихся вне области (векторы пунктирной линии)

2.3.2 Сопоставление положения результата сканирования и модели свариваемой детали

Исходными данными для выполнения операции сопоставления положения детали с трехмерной моделью из проектного решения является облако точек, полученное в ходе трехмерного сканирования детали, расположенной в рабочем пространстве инструмента промышленного комплекса, средствами датчика глубины.

Сопоставление положения или же выравнивание модели относительно полученного облака точек позволит определить математическое преобразование трансляции технологической траектории в рабочее пространство промышленного комплекса.

Задача выравнивания в теории обработки пространственных облаков точек относится к классу задач регистрации одного облака точек относительно другого [84]. Процесс регистрации подразумевает вычисление и определение совпадающих особенностей (точек или областей) сравниваемой пары облаков.

Из существующих алгоритмов регистрации облаков точек можно выделить три основные группы:

- 1) Семейство итеративных алгоритмов ближайшей точки.
- 2) Deskriptorные алгоритмы.
- 3) Алгоритмы, основанные на статистических подходах.

Алгоритмы ближайшей точки (Iterative Closest Point - ICP) являются классическими методами сопоставления облаков точек [85]. Принцип работы алгоритмов ICP основан на использовании пары близких точек выравниваемых облаков, расстояние между которыми в процессе работы алгоритма стремится к минимальному значению за счет осуществления преобразований сдвига и поворота. Но как отмечается в работе [86], результат выполнения алгоритма “чувствителен” к начальному положению выравниваемых облаков.

Deskriptorные алгоритмы являются более гибкими инструментами регистрации облаков точек [87]. В основе их принципа лежит определение ключевых точек (детекторы) облаков по специфическим признакам

(дескрипторам). В пространстве признаков задается мера, которая позволяет сравнивать и характеризовать близость исследуемых объектов.

Наибольшее распространение получили дескрипторные алгоритмы, основывающиеся на: сравнении распределения векторного поля нормалей к поверхности (пример алгоритмы *Point Feature Histograms* (PFH), *Fast Point Feature Histograms* (FPFH) [88] и *Sample Consensus-Initial Alignment* (SAC IA) [88]), анализе пространственной сети, состоящей из небольших ячеек, разбивающих глобальное пространство облаков (пример алгоритма *Globally Aligned Spatial Distribution* (GASD)) [89], сравнении ключевых точек проекции облака точек на плоское изображение (пример алгоритма *Normal Aligned Radial Feature* (NARF) [90], статистическом анализе локальной поверхности при вращении локальной системы координат *Rotational Projection Statistics* (RoPs) [91] и многие другие.

Дескрипторные методы показали свою эффективность во многих исследовательских работах. Наибольшее применение они нашли в объединении отдельно полученных сканирований крупногабаритных объектов, например, объединение раздельного результата сканирования комнат одной квартиры.

Алгоритмы выравнивания облаков точек, основывающиеся на статистических методах, используют принципиально другой подход в сравнении с итерационными алгоритмами ближайшей точки и дескрипторными алгоритмами. Статистические алгоритмы регистрации не требуют использования детекторов. Для сравнения они глобально рассматривают облака точек и на основе статистических методов осуществляют определение наилучшей трансформации [92].

Наиболее известным и широко распространенным статистическим методом является алгоритм нормального распределения трансформаций [93] (далее - *Normal Distribution of Transformations* - NDT). Алгоритм осуществляет разбиение облака на элементарные пространственные трехмерные ячейки (воксели) заданных размеров, получая сеть разбиения. В каждой ячейке получившейся сети алгоритм рассчитывает параметры нормального распределения и ковариацию. На основе

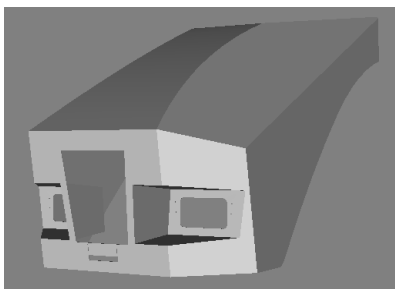
полученных статистических данных осуществляется сравнение выравниваемых облаков точек [94].

Однако, как отмечается в исследовании [95], алгоритм NDT может иметь низкую точность в зависимости от начального расположения выравниваемых облаков точек, и поэтому его применение в автоматизированных системах может быть затруднено.

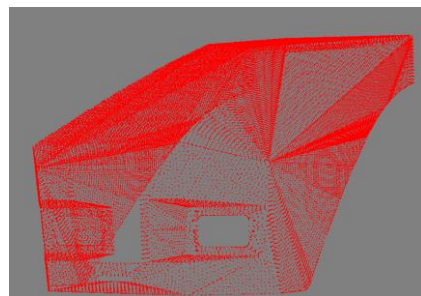
Как отмечается в работах [95, 96], наиболее перспективными методами выравнивания облаков точек является совместное использование различных алгоритмов регистрации для грубого и калибровочного выравнивания. Исходя из исследований [95-97], комбинация алгоритмов грубого SAC-IA и калибровочного ICP выравнивания (далее - SAC-IA-ICP) является предпочтительной, поскольку обеспечивает высокую точность сходимости и приемлемое время исполнения.

В качестве алгоритма ICP используемого в связке SAC-IA-ICP, предполагается использование модифицированного варианта, использующего метод нелинейной оптимизации Левенберга-Маркаварда [98].

Применимость совместного использования алгоритмов SAC-IA и нелинейного ICP для сопоставления облаков точек подтверждается результатами работы [99]. В работе [99] связка алгоритмов SAC-IA и нелинейного ICP использовалась для выравнивания результата детектирования детали, расположенной в рабочей области дугового сварочного комплекса с трехмерной моделью. Результаты показали среднее значение абсолютного отклонения выравнивания облаков точек в 2.43 мм. Для использования алгоритма SAC-IA-ICP модель свариваемой детали трансформируется из трехмерной полигональной модели в облако точек (см. рисунок 18).



а)



б)

Рисунок 18 - Трансформация исходной полигональной модели детали в облако точек

Результатом выравнивания двух облаков точек (см. пример на рисунке 19), будет являться однородная матрица совместного сдвига и поворота модели относительно результата сканирования, имеющая следующий вид:

$$T = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{32} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где элементы r_{ij} – характеризуют вращение и образуют матрицу поворота, а набор чисел $\{t_x, t_y, t_z\}$ – определяет смещение.

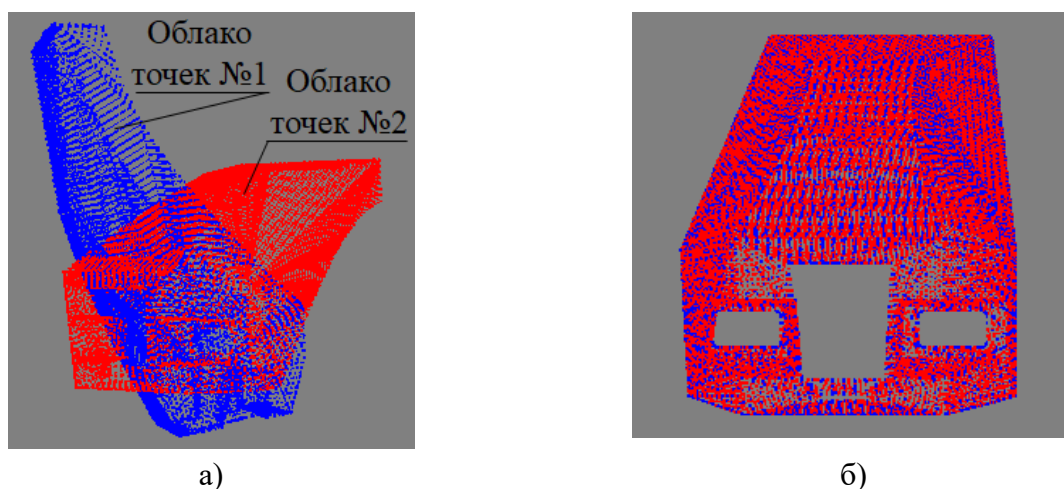


Рисунок 19 - Результат выравнивания алгоритмом SAC-IA-ICP облака точек №1 относительно облака точек №2

Матрица преобразования T применяется к проектируемым положениям \bar{p}_i и ориентациям \bar{n}_i , обеспечивая трансляцию координат из пространства моделей в рабочее пространство ЛРК-С $\bar{p}_i \rightarrow \bar{p}_i^*$ и $\bar{n}_i \rightarrow \bar{n}_i^*$ технологической траектории проектного решения.

2.3.3 Корректировка точек транслированной траектории относительно свариваемых кромок

Выравнивание трансформированной трехмерной модели детали относительно результата сканирования позволяет осуществить сопоставление положения пространственных объектов и достигнуть автоматизированной трансляции проектируемой траектории из пространства моделей в рабочее пространство промышленного комплекса.

Транслированная траектория корректируется относительно свариваемых кромок с использованием средств машинного зрения [100, 101]. Методы и средства обработки изображений, получаемых с видеокамеры, лишены всех недостатков систем слежения за структурным светом (см. п. 1.1.3), но для своей стабильной работы требуют получения качественного изображения, позволяющего распознавать исследуемые геометрические примитивы и очертания с необходимой степенью надежности.

Размещение видеокамеры и системы подсветки осуществляется на инструменте ЛРК-С так, чтобы вектор нормали к сцене поля зрения был коаксиален лазерному излучению. Выполнение этого требования возможно достичь встраиванием видеокамеры непосредственно в лазерную головку [102]. Стоит отметить, что большинство производителей опционально комплектуют лазерные головки видеокамерой. Схема подобной головки представлена на рисунке 20.

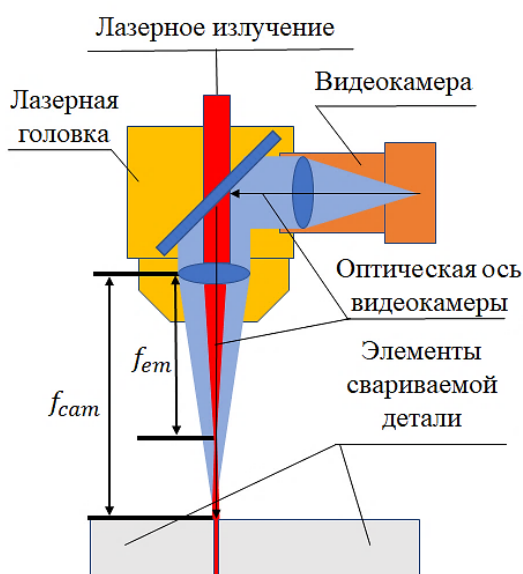


Рисунок 20 - Схема лазерной головки с встроенной видеокамерой

Расположение видеокамеры в соответствии со схемой изображенной на рисунке 20 обеспечивает сонаправленность оптической оси видеокамеры и направления лазерного излучения. Такое расположение видеокамеры позволяет корректировать положение инструмента в заданное технологическим режимом значением расфокусировки f_{em} лазерного излучения, определяющим положения перетяжки лазерного излучения относительно свариваемых кромок (или же пятна

лазерного излучения) вдоль проектируемого вектора ориентации \vec{n} . В таком случае корректировка положения перетяжки относительно свариваемых кромок может быть осуществлена по результату оценки размытости видеоизображения, получаемого с видеокамеры в фиксированном фокусе f_{cam} , путем перемещения инструмента вдоль ориентации \vec{n} .

С учетом вышесказанного, алгоритм корректировки положения инструмента ЛРК-С может быть представлен блок-схемой изображенной на рисунке 21. В теле цикла осуществляется последовательный обход точек транслированной технологической траектории S , где N – количество точек. Если текущая точка траектории $S[i]$ принадлежит участку сварки, то для нее осуществляется фокусировка видеокамеры, распознавание кромок и корректировка положения инструмента. В случае, если кромки не распознаны на видеоизображении, то оператор осуществляет ручную корректировку.

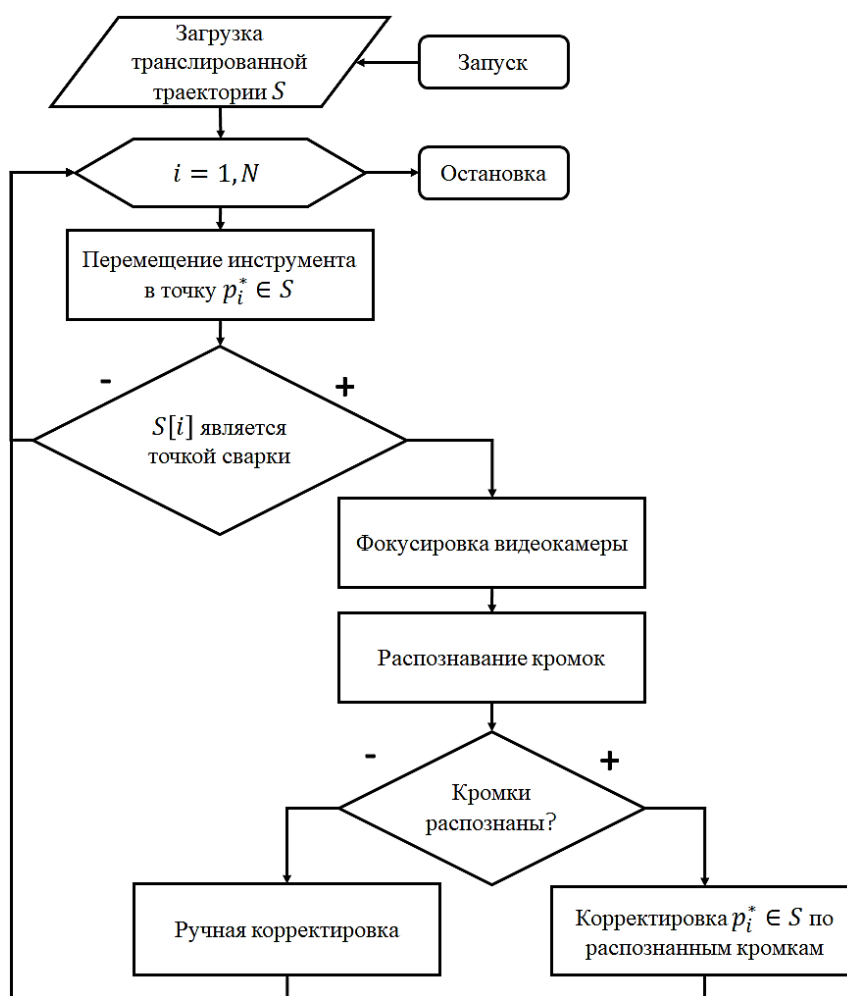


Рисунок 21 - Блок-схема алгоритма корректировки точек транслированной технологической траектории средствами видеокамеры

Таким образом, осуществляется последовательная корректировка положения инструмента в точках сварки за счет средств фокусировки видеокамеры и распознавания свариваемых кромок.

2.4 Алгоритмы подготовки управляющих программ на основе транслированной технологической траектории проектного решения

Структура проектного решения содержит необходимые и достаточные информационно-технологические данные для автоматизированной генерации УП, так как включает траекторию движения инструмента робототехнического комплекса, состояния готовности (вкл/выкл) технологического оборудования и технологический режим ЛС.

Схема переключения состояний (вкл/выкл) технологического оборудования в теле управляющей программе для сварки одного участка изображена на рисунке 22. Схема в совокупности со структурой проектного решения позволяют осуществлять автоматизацию проектирования отрезков разгона и торможения инструмента на краевых участках ЛС [103].

Как видно из приведенной схемы, по командам роботизированного манипулятора инструмент последовательно перемещается из точки начала сварки $P[i - 1]$ в точку конца $P[i]$. В соответствии с управляющими командами программы при достижении положения $P[i - 1]$ осуществляется включение лазерного излучения. В процессе движения до момента времени $t_s + \Delta t_{i-1}$ осуществляется линейный рост мощности лазерного излучения. По достижению времени $t_s + \Delta t_{i-1}$ от начала сварки мощность лазера выходит на заданное значение технологического режима P . При использовании защитного газа в процессе сварки осуществляется его подача в область обработки со значением расхода Q_{gas} .

В соответствии с проектным решением в момент $t_s + \Delta t_{i-1}$ может осуществляться подача присадочного материала (проволоки) в зону сварки. Подача проволоки происходит на протяжении всего процесса сварки.

По достижению положения конца сварки $P[i]$ прекращается подача защитного газа и присадочного материала, линейно снижается мощность излучения. В момент времени $t_e + \Delta t_i$ осуществляется выключение лазерного излучения.

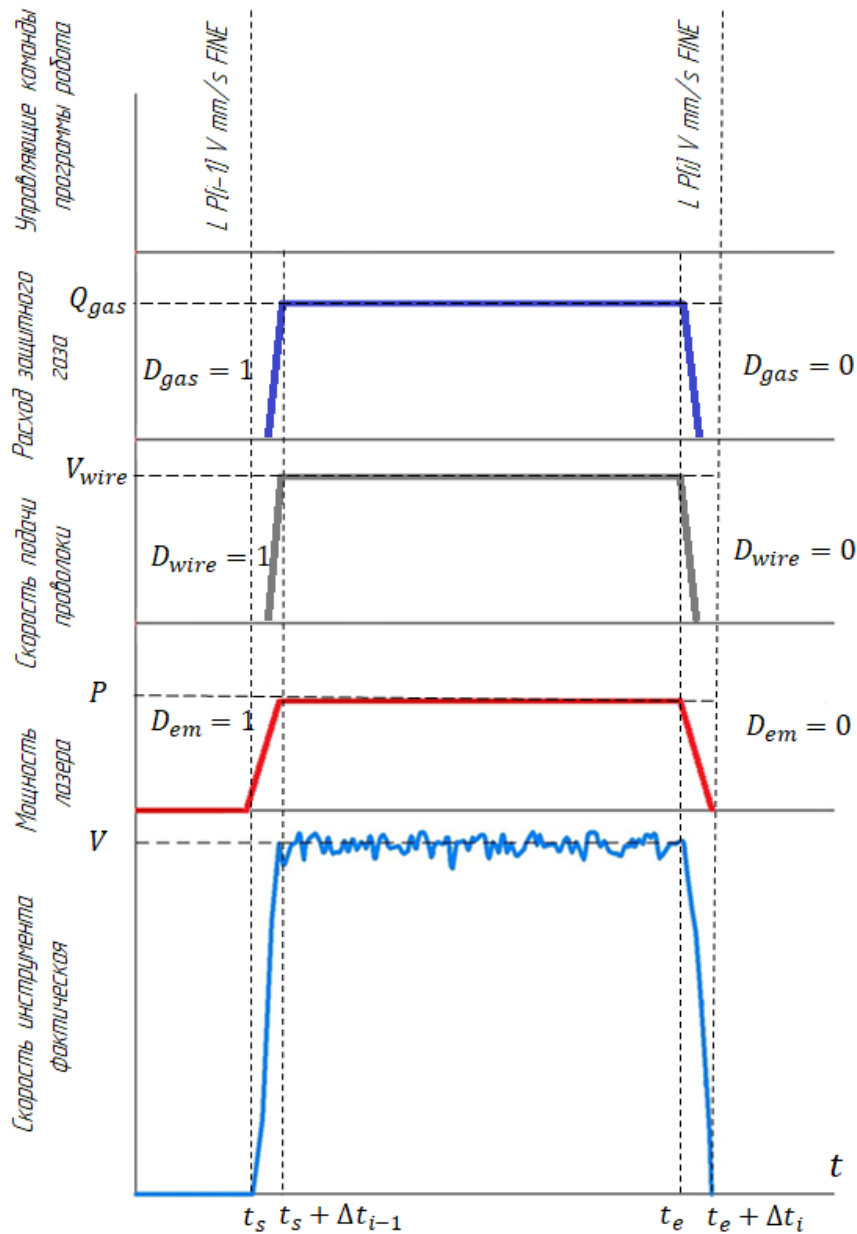


Рисунок 22 - Схема переключения состояний готовности (вкл/выкл) технологического оборудования при подготовке управляющих программ ЛРК-С

Приведенная схема переключения состояний готовности (вкл/выкл) технологического оборудования при подготовке управляющих программ ЛРК-С охватывает один участок сварки. При сварке нескольких участков в рамках одного проектного решения подготовка УП участков сварки осуществляется по аналогии.

Следует отметить, что в зависимости от используемого оборудования ЛРК-С и организации его согласованного функционирования для обеспечения процесса ЛС вышеописанная схема может быть расширена необходимыми временными задержками, синхронизирующими моменты переключения состояния готовности (вкл/выкл) технологического оборудования.

При генерации управляющей программы работа осуществляется инициализация сигналов оборудования в соответствии с режимом обработки и подготовка тела программы, представленной процедурной последовательностью команд перемещения инструмента и позиционера в точку траектории с совместным переключением состояния готовности (вкл/выкл) технологического оборудования. Программное изменение состояния переключения (вкл/выкл) технологического оборудования осуществляет переключения согласованных сигналов взаимодействия.

Алгоритм подготовки управляющих программ работа комплекса ЛРК-С показан на рисунке 23.

Первоначально алгоритм генерирует необходимые инициализирующие команды (установку регулятора давления защитного газа в значение Q_{gas} , включение готовности лазерного излучения и так далее).

В цикле осуществляется обход технологической траектории S и расстановка команд перемещения инструмента и позиционера в текущую точку $S[i]$ транслированной технологической траектории.

В случае использования в процессе ЛС позиционера перед установкой команд на перемещение в точку $S[i]$ осуществляется пересчет положений \bar{p}_i и \bar{n}_i . Необходимость пересчета связана с тем, что локализации точек результата трехмерного сканирования свариваемой детали в процессе объединения измерений датчика глубины осуществляются в определенном положении позиционера $\bar{J}' = (J'_1, J'_2)$ и матрица преобразования T , получаемая по результату выравнивания облаков точек, будет переводить положение инструмента в положение позиционера \bar{J} . В таком случае заданные \bar{p}_i и \bar{n}_i для положения позиционера $\bar{J}_i =$

$(J_{1,i}, J_{2,i})$ точки технологической траектории $S[i]$, относительно \bar{J}' рассчитываются следующими выражениями:

$$\bar{p}_i = R(\bar{J}_2, \pm(J_{2,i} - J'_2)) \cdot R(\bar{J}_1, \pm(J_{1,i} - J'_1)) \cdot \bar{p}_i,$$

$$\bar{n}_i = R(\bar{J}_2, \pm(J_{2,i} - J'_2)) \cdot R(\bar{J}_1, \pm(J_{1,i} - J'_1)) \cdot \bar{n}_i,$$

где \bar{J}_1 и \bar{J}_2 – первая и вторая ось вращения позиционера соответственно, знак \pm определяется в зависимости от кинематики позиционера. Последовательный поворот осуществляется в соответствии с кинематическими расчетными моделями из [104].

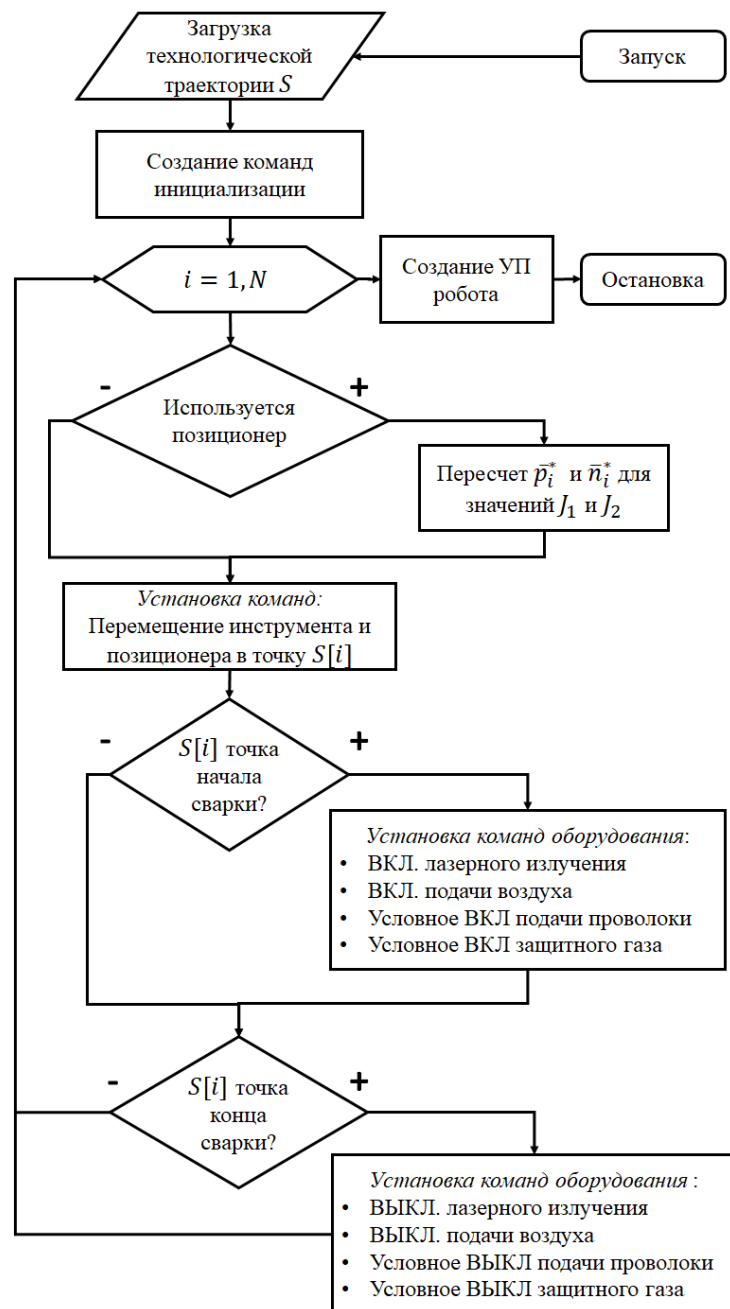


Рисунок 23 - Алгоритм подготовки управляющей программы робота комплекса ЛРК-С

Выбор значения \vec{J}' осуществляется произвольно, далее в работе подразумевается $\vec{J}' = (0,0)$, то есть локализация результата сканирования осуществляется в нейтральном положении позиционера.

После установки команды на перемещение осуществляется проверка точки $S[i]$ на соответствие началу участка сварки. В случае истинности выполнения условия проверки добавляются следующие управляющие команды:

- включения лазерного излучения;
- условное включение подачи проволоки;
- условное включение подачи защитного газа.

Условная установка команд на подачу присадочного материала и защитного газа в УП робота осуществляется по логическим значениям D_{wire} и D_{gas} элементов структуры точки технологической траектории соответственно.

Если текущая точка $S[i]$ в процессе итерационного обхода технологической траектории S является концом участка сварки, то в тело УП добавляются следующие команды:

- выключение лазерного излучения;
- выключение подачи присадочного материала;
- выключение подачи защитного газа.

Завершением подготовки УП робота является формирование и генерация текста программы.

Функционирование промышленного волоконного лазера в процессе ЛС осуществляется по собственной УП, подготавливаемой совместно с УП робота на основании проектного решения. В управляющей программе лазера осуществляется расстановка ожидания синхронизирующих сигналов включения/выключения лазерного излучения и времени роста/падения мощности при выходе на заданное значение P . Получение синхронизирующего сигнала на переключение состояния вкл/выкл лазерного излучения осуществляется программно из УП робота по достижению заданного положения инструментом. Блок-схема алгоритма подготовки УП лазера ЛРК-С представлена на рисунке 24.

Подготовка УП лазера ЛРК-С как и в случае подготовки УП робота, осуществляется последовательным обходом точек технологической траектории S . В теле цикла осуществляется проверка условия равенства мощности излучения $S[i].P = S[i-1].P$ смежных точек траектории. Если $S[i].P \neq S[i-1].P$ и текущая точка $S[i]$ является точкой участка начала сварки, то осуществляется установка команды на ожидание включения лазерного излучения.

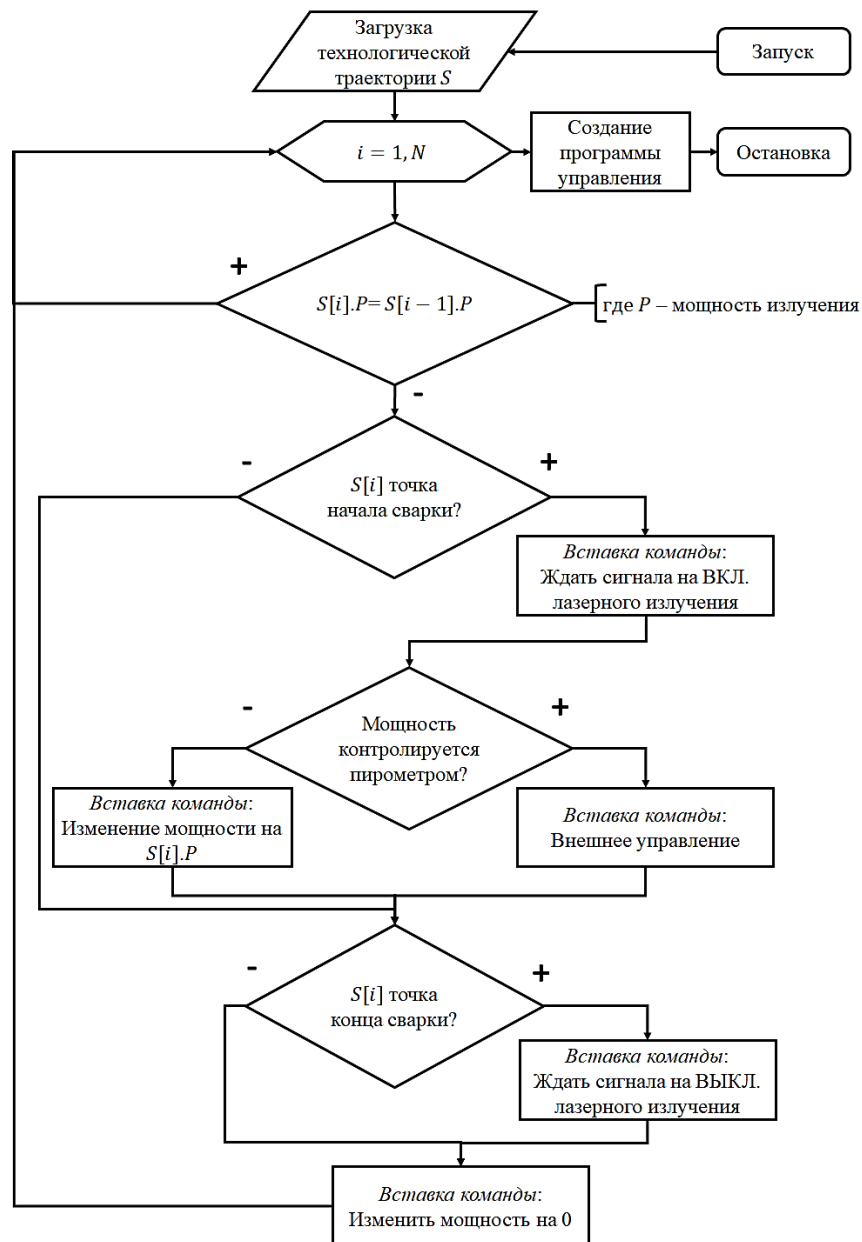


Рисунок 24 - Алгоритм подготовки управляющей программы лазера комплекса ЛРК-С

Если в процессе сварки осуществляется внешний контроль за мощностью излучения, то в УП встраивается команда внешнего управления, иначе встраивается команда установки мощности излучения на $S[i].P$ за Δt секунд.

В случае, если текущая точка $S[i]$ является концом участка сварки, то в УП встраиваются команды ожидания выключения лазерного излучения и изменения мощности излучения в значение 0 за Δt секунд.

Завершение подготовки УП лазера осуществляется выполнением цикла обхода траектории S , формированием и генерацией текста УП.

Таким образом, на основании транслированной траектории проектного технологического решения, структура которого соответствует разработанной методике, осуществляется подготовка управляющих программ работа и лазера комплекса ЛРК-С.

2.5 Выводы по главе

В ходе теоретических исследований во второй главе разработана методика автоматизации технологической подготовки УП промышленного комплекса ЛРК-С, в рамках которой:

- Разработана схема методики, структура и содержание проектного решения, обеспечивающие представление выходного результата проектирования структурой данных, содержащих трехмерную модель детали, значения параметров технологического режима ЛС, проектные конфигурации, технологическую траекторию движения инструмента с заданными состояниями готовности (вкл/выкл) технологического оборудования в каждой точке.
- Осуществлен и обоснован выбор состава средств автоматизации подготовки управляющих программ ЛРК-С, обеспечивающий трансляцию технологической траектории в рабочее пространство ЛРК-С, средствами датчика глубины и корректировку транслированных точек сварки относительно свариваемых кромок на изображении видеокамеры инструмента.
- Разработана схема и алгоритмы подготовки УП работа и лазера из состава ЛРК-С, обеспечивающие генерацию УП на основе транслированной технологической траектории, проектного решения разработанной методики.

Глава 3. Средства автоматизации трансляции технологической траектории в рабочее пространство лазерного роботизированного комплекса и ее корректировки относительно свариваемых кромок

3.1 Метод автоматизированной трансляции технологической траектории в рабочее пространство лазерного роботизированного комплекса сварки

Автоматизация трансляции технологической траектории в рабочее пространство ЛРК-С осуществляется датчиком глубины, размещенным на инструменте промышленного комплекса. В процессе выполнения автоматизированной операции осуществляется трансляция координат точек проектируемой траектории из пространства моделей в рабочее пространство ЛРК-С, представленной координатной системой промышленного робота.

Процесс трансляции траектории включает в себя следующие операции:

- определение области локализации свариваемой детали в рабочем пространстве ЛРК-С средствами датчика глубины;
- создание траектории инструмента сканирования в зависимости от оценки сложности формы внешней поверхности и габаритных размеров детали;
- сопоставления положения модели детали с результатом сканирования.

Рассмотрим каждую операцию и ее элементы в отдельности.

3.1.1 Определение области локализации свариваемой детали в рабочем пространстве

Очевидно, что для детектирования детали необходимо исследовать не все рабочее пространство роботизированного манипулятора, а рабочее пространство инструмента F_T и F_P , образованное столом и позиционером соответственно, на которых располагаются свариваемые детали (см. рисунок 25). Далее под F подразумевается произвольное из F_T или F_P , когда их различие не требует уточнения. Обозначим область локализации детали как L .

Конфигурирование рабочего пространства инструмента относительно стола и позиционера осуществляется указанием пространственных ограничений по каждому измерению:

$$F = \begin{cases} x_{min} \leq x \leq x_{max} \\ y_{min} \leq y \leq y_{max} \\ z_{min} \leq z \leq z_{max} \end{cases}$$

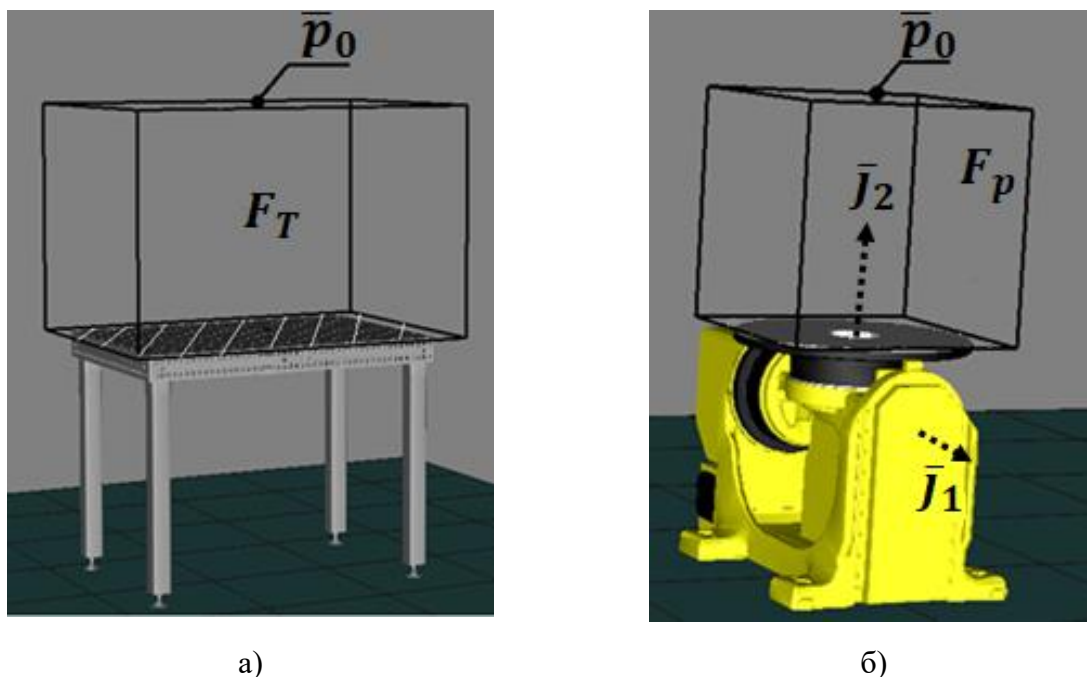


Рисунок 25 - Рабочее пространство инструмента относительно: а - F_T стола; б - F_P позиционера

Алгоритм определения области локализации L свариваемой детали относительно F состоит из трех действий:

1) Перемещение инструмента в центральную точку \bar{p}_0 верхней грани F .
 2) Детектирование пространственных точек поверхности свариваемой детали датчиком глубины, определяемых как $C_F = \{\bar{c} \in F\}$, в положении инструмента детектирования \bar{p}_0 .

3) Определение границ L осуществляется по экстремальным значениям C_F в F . Область D по координатным осям OX и OY определяется как $x_- = \min_x C_F$, $x_+ = \max_x C_F$, $y_- = \min_y C_F$, $y_+ = \max_y C_F$. По оси OZ граница L определяется как $z_- = \min_z F$ и $z_+ = \max_z C_F$.

Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 26.

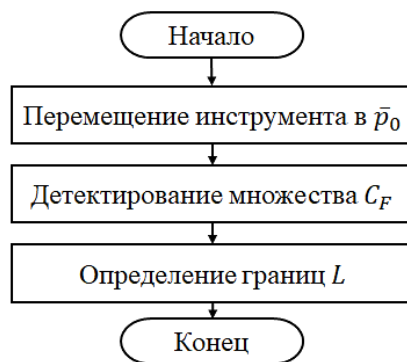


Рисунок 26 - Алгоритм детектирования области локализации свариваемой детали L

Построенная область локализации L будет представлять собой прямоугольный параллелепипед. Схема области локализации относительно детали, расположенной на столе, представлена на рисунке 27.

Создание траектории сканирования осуществляется относительно контура T (на рисунке 29 контур представлен пунктирной линией) верхней грани F . При этом предполагается, что в произвольной точке контура T инструмент достигает ориентации, отклоненной от нейтрального положения на угол φ в произвольном направлении.

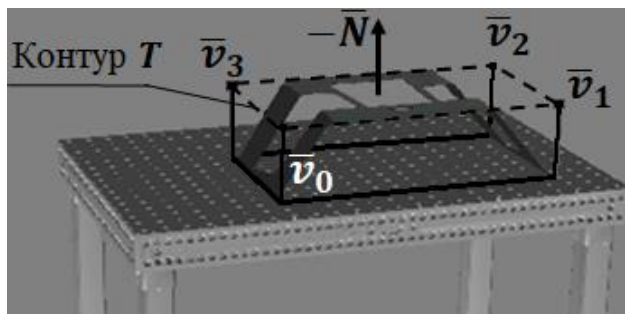


Рисунок 27 - Схема области локализации детали расположенной на столе

Рассмотрим далее алгоритмы создания траектории движения инструмента сканирования.

3.1.2 Расчет траектории движения датчика глубины для трехмерного сканирования простых по форме деталей

Далее под простыми по форме деталями подразумеваются те, для которых процесс трехмерного сканирования осуществляется в один проход датчиком глубины вдоль замкнутой траектории с направлением поля зрения датчика внутрь

области локализации. Оценка сложности сканирования осуществляется инженером-технологом, путем экспертного оценивания детали и указанием значения в конфигурациях проектного решения ЛС.

Создание траектории движения инструмента сканирования осуществляется в пределах верхней грани области L , образованной прямоугольником T .

Алгоритм создания траектории сканирования простых по форме деталей (см. рисунок 28), свариваемых ЛРК-С состоит из четырех действий:

1) Перемещение инструмента сканирования в положение начала движения \bar{v}_0 . В качестве \bar{v}_0 может использоваться самая удаленная вершина от начала координат $\bar{v}_0 = \max_i |\bar{v}_i|$.

2) Упорядочивание точек \bar{v}_i траектории сканирования, начиная с \bar{v}_0 , осуществляется в направлении обхода часовой стрелки на основании ориентированной тройки векторов $\{\bar{N}, (\bar{v}_i - \bar{o}), \bar{n} \times (\bar{v}_i - \bar{o})\}$, где \times - векторное произведение, \bar{N} – вектор нормали T (направлен во внутрь области локализации), точка \bar{o} – барицентр T .

3) Расчет вектора ориентации \bar{n}_i инструмента в вершинах упорядоченного множества \bar{v}_i по $\bar{n}_i = R\left(\frac{\bar{v}_i - \bar{v}_{i-1}}{|\bar{v}_i - \bar{v}_{i-1}|}, \varphi\right) \cdot \bar{N}$ таким образом, чтобы сенсор датчика глубины был направлен внутрь области L под углом φ .

4) Расчет углов Эйлера для \bar{n}_i по кинематическим расчетным моделям совместного ориентирования элементов оснащения и точек технологической траектории (см. п. 2.2).

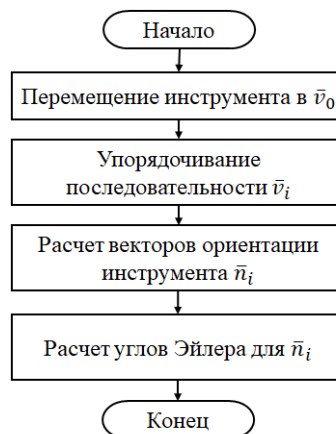


Рисунок 28 - Алгоритм создания траектории сканирования простых по форме деталей

В результате применения алгоритма, траектория сканирования будет представлять собой замкнутую линию, являющуюся контуром T . Пример результата создания траектории сканирования схематично представлен на рисунке 29.

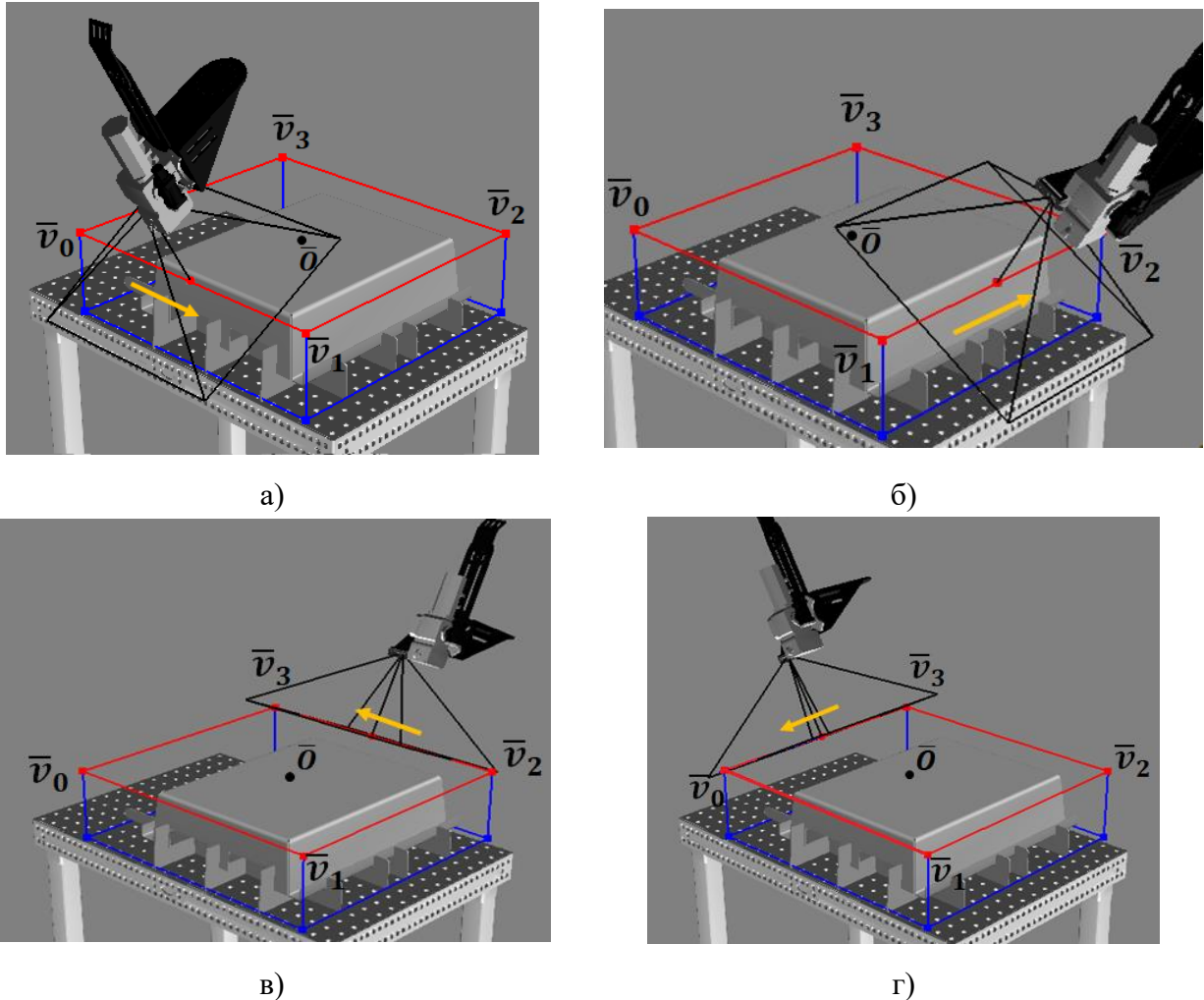


Рисунок 29 - Схемы результата создания траектории сканирования простой по форме детали при движении относительно замкнутого контура верхней грани области локализации L детали, при движении: а – из \bar{v}_0 в \bar{v}_1 ; б – из \bar{v}_1 в \bar{v}_2 ; в – из \bar{v}_2 в \bar{v}_3 ; г – из \bar{v}_3 в \bar{v}_0

Рассмотрим теперь случай трехмерного сканирования сложных по форме деталей датчиком глубины.

3.1.3 Расчет траектории движения датчика глубины для трехмерного сканирования сложных по форме деталей

Под сложными по форме для сканирования деталями в данной работе подразумеваются те детали, которые в сравнении с простыми требуют уточнения

результата, полученного в ходе сканирования и, как следствие, осуществления дополнительных обходов датчиком глубины. Как правило, сложные по форме для процесса трехмерного сканирования детали имеют сложную структуру с большим количеством элементов, перекрывающих друг друга. Определение сложности сканирования детали, как и в случае простых по форме деталей, осуществляется путем экспертного оценивания детали инженером-технологом и указанием соответствующего значения в конфигурациях проектного решения ЛС.

Применение алгоритма создания траектории сканирования простых по форме деталей в один обход при создании траектории сканирования для сложной по форме детали может не позволить выделить из облака дескрипторы, необходимые для процесса сопоставления положения. Вследствие этого на результате сканирования повышается количество неотсканированных областей.

Сокращение количества неотсканированных областей возможно осуществить за счет многопроходных движений датчиком глубины с различной ориентацией инструмента в каждом проходе.

Основополагающим средством подготовки многопроходных движений инструмента сканирования является алгоритм создания траектории сканирования простых по форме деталей. В таком случае сканирование предлагается осуществлять в три последовательных прохода. Алгоритмы создания траектории сканирования во всех трех случаях соответствуют алгоритму создания простых по форме деталей, за исключением определения различных значений углов ориентации \bar{n}_i инструмента. Иными словами, во всех трех проходах траекторией является замкнутый контур T с точкой начала движения \bar{v}_0 и одинаковым направлением обхода.

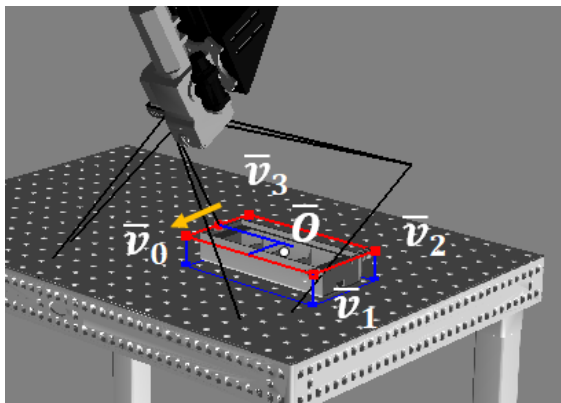
В каждом из проходов вектор ориентации \bar{n}_i рассчитывается следующим образом:

1) В первом проходе вектор ориентации рассчитывается как и в случае сканирования простых по форме деталей, то есть $\bar{n}_i = R\left(\frac{\bar{v}_i - \bar{v}_{i-1}}{|\bar{v}_i - \bar{v}_{i-1}|}, \varphi\right) \cdot \bar{N}$, для упорядоченного множества \bar{v}_i .

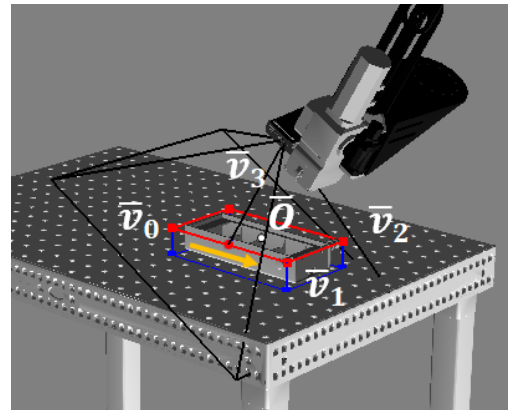
2) Во втором проходе вектор ориентации рассчитывается как $\bar{n}_i = R\left(\frac{\bar{v}_{i-1}-\bar{v}_i}{|\bar{v}_{i-1}-\bar{v}_i|} \times \bar{N}, \varphi\right) \cdot \bar{N}$, обеспечивая наклон инструмента вдоль направления движения инструмента на угол φ .

3) В третьем проходе вектор ориентации рассчитывается как $\bar{n}_i = R\left(\frac{\bar{v}_{i-1}-\bar{v}_i}{|\bar{v}_{i-1}-\bar{v}_i|} \times \bar{N}, -\varphi\right) \cdot \bar{N}$, обеспечивая наклон инструмента вдоль направления движения инструмента на угол $-\varphi$.

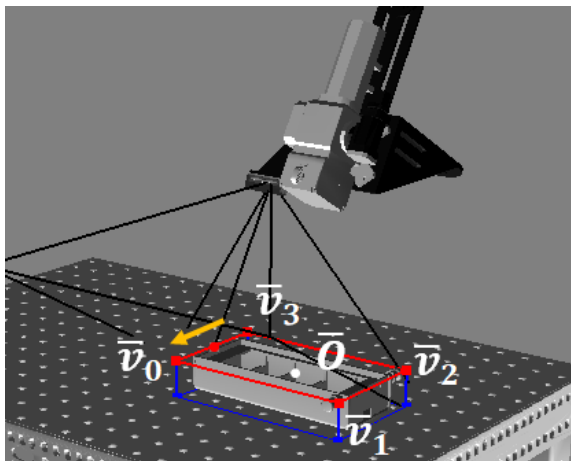
На рисунке 30 представлен схематичный пример второго и третьего прохода на первых двух сегментах трехмерного сканирования сложной по форме детали с углами φ и $-\varphi$ отклонения ориентации инструмента относительно нейтрального положения, вдоль направления движения соответственно.



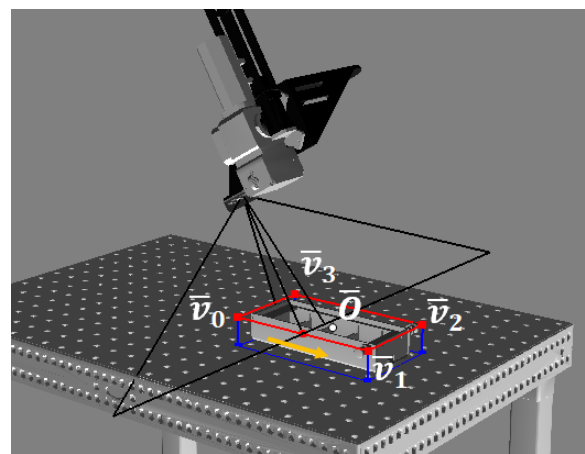
а)



б)



в)



г)

Рисунок 30 - Схемы создания участков траектории сканирования сложной по форме детали второго прохода с углами наклона φ : а - из v_0 в v_1 ; б - из v_1 в v_2 ; и третьего прохода с углом наклона $-\varphi$: в - из v_0 в v_1 ; г - из v_1 в v_2

Движение инструмента вдоль направления движения позволяет улучшить результат сканирования сложной по форме детали, модифицировав алгоритм сканирования простых по форме деталей. Но алгоритм лишь частично решает проблему сокращения неотсканированных областей. Предлагаемые дополнительные обходы не решают проблему образования пустот в центральной области облака точек крупногабаритной детали. Основной причиной образования пустот центральной части является большой размер области L в сравнении с полем зрения датчика глубины, наклоненной на значение угла φ в направлении $\frac{\bar{v}_{i-1}-\bar{v}_i}{|\bar{v}_{i-1}-\bar{v}_i|} \times \bar{N}$. Сократить неотсканированные области на результате сканирования возможно за счет осуществления дополнительных обходов центральной части L . В таком случае рассмотрим случай сканирования сложных по форме деталей имеющие крупногабаритные размеры.

3.1.4 Расчет траектории движения датчика глубины для трехмерного сканирования сложных по форме деталей, имеющих крупногабаритные размеры

В процессе трехмерного сканирования вдоль контура T сложных по форме деталей, имеющих крупногабаритные размеры могут возникать неотсканированные области, локализованные в центральной части L . Вследствие этого результат сканирования, представленный в виде облака пространственных точек, может не содержать достаточно информации о поверхности детали.

Возникновение пустот в центральной области связано с ориентацией инструмента вдоль вектора $\frac{\bar{v}_{i-1}-\bar{v}_i}{|\bar{v}_{i-1}-\bar{v}_i|} \times \bar{N}$ в процессе сканирования второго и третьего обхода сложных по форме деталей. Сокращение неотсканированных областей может быть осуществлено дополнительным обходом инструментом сканирования центральной части прямоугольника, образованного T .

Создание дополнительных обходов предлагается осуществляется с учетом поля зрения датчика глубины в плоскости, образованной контуром T . В таком

случае расчет и создание траектории сканирования осуществляется по проекции поля зрения на плоскость образованную контуром T .

Так как движение инструмента проводится в плоскости контура T , то длина вектора \bar{d} остается постоянной, $|\bar{d}| = \left| \frac{\bar{n}}{|\bar{n}|} \cdot d \right|$. Координаты вершин поля зрения датчика глубины при нейтральном положении инструмента $\bar{n}_0 = (0,0,-1)$ с длиной основания $|\bar{d}|$ примут вид:

$$\begin{aligned}\bar{q}_1 &= R\left(\bar{y}_+, \frac{\theta_v}{2}\right) \cdot R_x\left(\frac{\theta_h}{2}\right) \cdot \bar{n}_0 \cdot |\bar{d}|, \\ \bar{q}_2 &= R\left(\bar{y}_+, -\frac{\theta_v}{2}\right) \cdot R_x\left(\frac{\theta_h}{2}\right) \cdot \bar{n}_0 \cdot |\bar{d}|, \\ \bar{q}_3 &= R\left(\bar{y}_-, \frac{\theta_v}{2}\right) \cdot R_x\left(-\frac{\theta_h}{2}\right) \cdot \bar{n}_0 \cdot |\bar{d}|, \\ \bar{q}_4 &= R\left(\bar{y}_-, -\frac{\theta_v}{2}\right) \cdot R_x\left(-\frac{\theta_h}{2}\right) \cdot \bar{n}_0 \cdot |\bar{d}|,\end{aligned}$$

где $R_x(\theta)$ матрица поворота вокруг оси $OX = (1,0,0)$ на угол θ , $\bar{y}_+ = R_x\left(\frac{\theta_h}{2}\right) \cdot OY$, $\bar{y}_- = R_x\left(-\frac{\theta_h}{2}\right) \cdot OY$ и $OY = (0,1,0)$.

Пространственные точки \bar{q}_i поля зрения датчика глубины относительно точки позиционирования инструмента $\bar{\tau}_{dcam}$ примут следующий вид:

$$\bar{q}_i = \bar{q}_i + (\bar{\tau}_{dcam} - \bar{d}).$$

При позиционировании инструмента в ориентации $\bar{\varepsilon} = (\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$, положения \bar{q}_i преобразовываются по следующей формуле:

$$\bar{q}_i = R_z(\varepsilon_z) \cdot R_y(\varepsilon_y) \cdot R_x(\varepsilon_x) \cdot \bar{q}_i.$$

Пересечения пространственных линий, проходящих вдоль векторов $\bar{q}_i - (\bar{\tau}_{dcam} - \bar{d})$ с плоскостью контура T определяют проекцию поля зрения датчика глубины по следующей расчетной модели:

$$\begin{aligned}q_x &= q_x - \frac{q_x}{|\bar{q}_i|} \cdot \rho, \\ q_y &= q_y - \frac{p_y}{|\bar{q}_i|} \cdot \rho,\end{aligned}$$

$$q_z = q_z - \frac{p_z}{|\bar{q}_i|} \cdot \rho,$$

$$\rho = \left(\frac{n_x \cdot q_x + n_y \cdot q_y + n_z \cdot q_z + |d|}{n_x \cdot \frac{q_x}{|\bar{q}_i|} + n_y \cdot \frac{q_y}{|\bar{q}_i|} + n_z \cdot \frac{q_z}{|\bar{q}_i|}} \right),$$

где q_x, q_y, q_z компоненты вектора \bar{q}_i относительно осей OX, OY и OZ соответственно.

Обозначим проекцию поля зрения датчика на плоскость контура T , образованную точками \bar{q}_i , как Q .

Создание траекторий дополнительных обходов центральной области осуществляется относительно отрезка $[\bar{\eta}_0, \bar{\eta}_1]$ определяемого проекцией поля зрения и представленного на рисунке 31.

Пространственные точки $\bar{\eta}_0$ и $\bar{\eta}_1$ определяются как $(\bar{\eta}_1, \bar{\eta}_0) = \{(\bar{\eta}_j, \bar{\eta}_k) : \bar{\eta}_j, \bar{\eta}_k \in L(\bar{v}_i, \bar{\eta}) \cap Q \text{ и } |\bar{\eta}_j - \bar{\eta}_k| \rightarrow \min \text{ и } \bar{v}_{i-1} \in L(\bar{\eta})\}$, где $\bar{\eta} = \bar{\eta}_j - \bar{\eta}_k$ (далее под $\bar{\eta}$ будет подразумеваться $\bar{\eta} = \bar{\eta}_0 - \bar{\eta}_1$) и $L(\bar{v}_i, \bar{\eta})$ – пространственная линия построенная вдоль вектора $\bar{\eta}$ через точку \bar{v}_i .

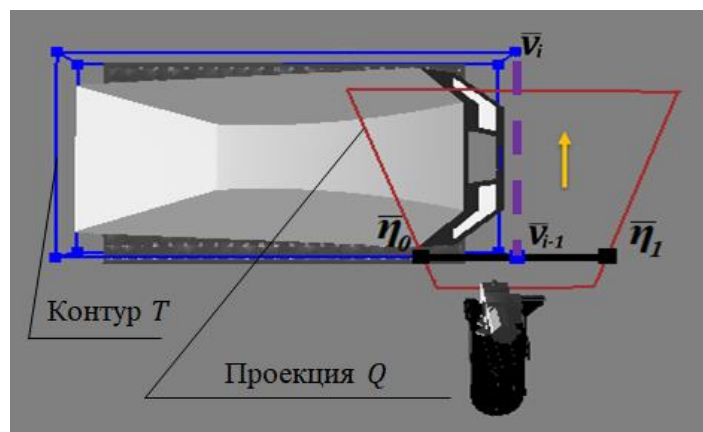


Рисунок 31 - Схема определения дополнительных обходов сканирования неотсканированных центральных областей сложной по форме детали, имеющей крупногабаритные размеры

Учитывая, что по построению T является прямоугольником, при сравнении длин $\bar{\eta}$ и $\bar{v}_{i+1} - \bar{v}_i$ (или же $\bar{v}_{i-1} - \bar{v}_{i-2}$) можно оценить степени покрытия проекцией Q поля зрения датчика глубины прямоугольника T с ориентацией инструмента \bar{n}_i , а значит и степени образования неотсканированных подобластей центральной области.

Пусть выполнение условия $2 \cdot |\bar{\eta} - \bar{v}_{i-1}| < |\bar{v}_{i+1} - \bar{v}_i|$ определяет необходимость в дополнительных обходах инструмента сканирования в направлении движения $\bar{v}_i - \bar{v}_{i-1}$, тогда количество дополнительных проходов центральной области будет определяться как:

$$N = \left[\frac{\bar{v}_{i+1} - \bar{v}_i}{2 \cdot |\bar{\eta} - \bar{v}_{i-1}|} \right],$$

где $[]$ – операция взятия целой части.

На основе числа N , рассчитываются траектории дополнительных проходов относительно разбиения отрезков $\bar{v}_{i+1} - \bar{v}$ и $\bar{v}_{i-1} - \bar{v}_{i-2}$ на N частей. Траектория прохода, в таком случае, строится по точкам разбиения в пошаговой последовательности начиная от самой удаленной точки с вектором ориентации инструмента \bar{n}_i . Схематичный пример результата создания дополнительных пошаговых проходов в центральной области локализации L изображен на рисунке 32.

Разработанные средства создания траектории трехмерного сканирования позволяют осуществлять разностороннее сканирование детали, расположенной на столе. При размещении свариваемой детали на позиционере, возможно осуществление трехмерного сканирования совместным движением инструмента и позиционера. Рассмотрим далее алгоритм создания траектории трехмерного сканирования свариваемой детали, расположенной на позиционере.

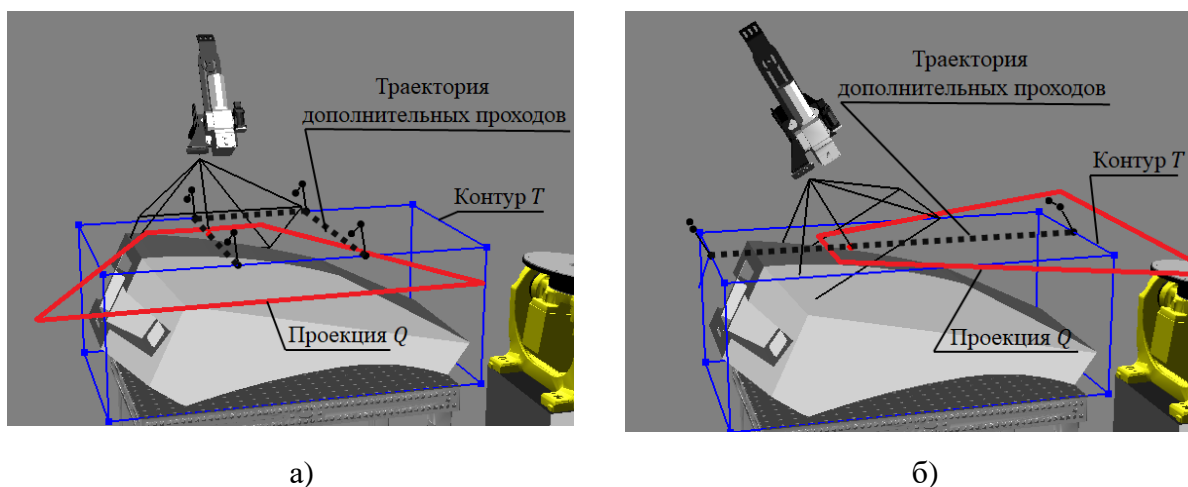


Рисунок 32 - Результат создания траектории сканирования дополнительных проходов (пунктирная линия) центральной части в направлении параллельном: а - длине T и б - ширине T

3.1.5 Расчет траектории движения инструмента и позиционера для трехмерного сканирования деталей, располагаемых на позиционере

Использование двухосевого позиционирующего устройства в качестве стола позволяет не только расширить технологические возможности построения и применения различных вариантов конструкторско-технологических решений при изготовлении сложных по форме металлоизделий, но и минимизировать движение инструмента в процессе трехмерного сканирования детали, за счет поворота подвижных элементов устройства вокруг осей вращения.

Пусть $D = F_p$, тогда трехмерное сканирование свариваемой детали возможно реализовать в два этапа.

Первый этап осуществляется в положении \bar{o} (барицентр T) инструмента с ориентацией, отклоненной от нейтрального положения под небольшим значением $\varphi \in [-10, 10]^\circ$ в произвольном направлении. По достижению позиции \bar{o} инструментом осуществляется поворот позиционером на 360° вокруг оси j_2 .

Второй этап сканирования осуществляется с ориентацией инструмента под 90° к боковой поверхности области L , выполняя следующую последовательность действий:

1) Позиционер перемещается в положение $(J_1, J_2) = (90 - \varphi, 0)$.

2) Инструмент перемещается в точку $-\frac{\bar{N}}{|\bar{N}|} \cdot \frac{h}{2} + \frac{\bar{J}_1 \times \bar{J}_2}{|\bar{J}_1 \times \bar{J}_2|} \cdot \max|\bar{v}_i - \bar{o}| + \bar{o}$, с

ориентацией $\bar{n} = R(\bar{J}_2, \varphi) \cdot \frac{\bar{J}_1 \times \bar{J}_2}{|\bar{J}_1 \times \bar{J}_2|}$, где h - высота L .

3) Поворот позиционера вокруг оси \bar{J}_2 на 360° .

Схемы сканирования свариваемой детали, расположенной на позиционере, показаны на рисунке 33.

Таким образом, средства создания траектории движения датчика глубины, установленной на инструменте ЛРК-С, позволяют осуществлять многосторонние и многопроходные движения простых и сложных по форме деталей, расположенных на столе и позиционере, обеспечивая покадровое объединение облаков точек в трехмерный объект.

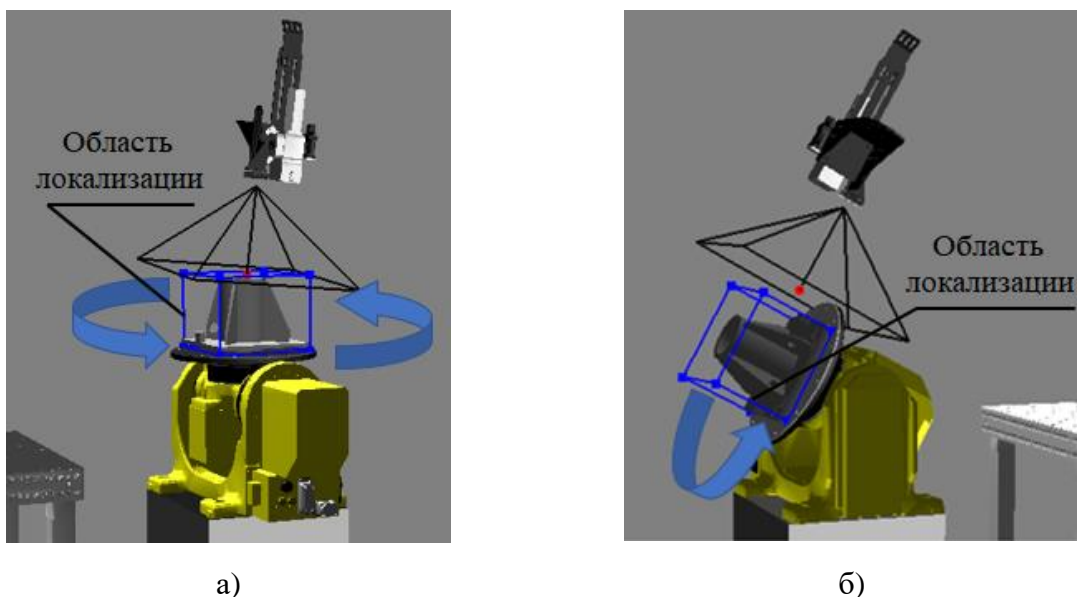


Рисунок 33 - Схема создания траектории сканирования свариваемой детали расположенной на позиционере в два этапа: а - относительно верхней плоскости T ; б - под 90° ориентации инструмента к боковой поверхности области L

Рассмотрим далее расчетные модели, применяемые в процессе трехмерного сканирования.

3.1.6 Расчетные модели трехмерного сканирования свариваемой детали датчиком глубины

Сканирование представляет собой процесс обработки и объединения результатов измерений, полученных при детектировании объектов сенсорами сканирующих устройств [105]. В случае сканирования свариваемой детали датчиком глубины, каждое измерение будет представимо массивом (или облаком) пространственных точек, зафиксированных сенсорами устройства и представленных в локальном базисе датчика (см. рисунок 34).

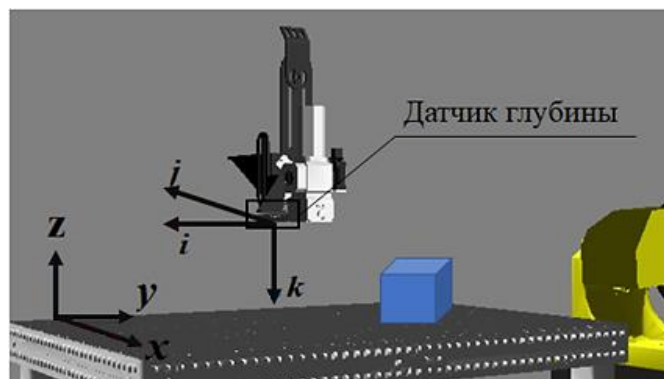


Рисунок 34 - Схема представления локального базиса датчика глубины

Процесс сканирования осуществляется во время движения датчика глубины по заранее созданной траектории. Среди всех элементов, детектируемых датчиком, пространственные точки, принадлежащие свариваемой детали, определяются как множество, образованное элементами, входящими в область локализации L . Иными словами, точка облака $\bar{c} \in C$ принадлежит поверхности детали, если $\bar{c} \in L$. Для определения принадлежности \bar{c} переводится из локального базиса датчика глубины в рабочее пространство ЛРК-С $\bar{c} \rightarrow \bar{c}'$ следующим образом:

$$\bar{c}' = T_3^{-1} \cdot \bar{c} + \bar{t}_{dcam},$$

$$T_3 = \begin{pmatrix} i'_x & i'_y & i'_z \\ j'_x & j'_y & j'_z \\ k'_x & k'_y & k'_z \end{pmatrix},$$

$$\bar{i}' = R_z(\alpha_z - \Delta\bar{\varepsilon}_z) \cdot R_y(\alpha_y - \Delta\bar{\varepsilon}_y) \cdot R_x(\alpha_x - \Delta\bar{\varepsilon}_x) \cdot \bar{i},$$

$$\bar{j}' = R_z(\alpha_z - \Delta\bar{\varepsilon}_z) \cdot R_y(\alpha_y - \Delta\bar{\varepsilon}_y) \cdot R_x(\alpha_x - \Delta\bar{\varepsilon}_x) \cdot \bar{j},$$

$$\bar{k}' = R_z(\alpha_z - \Delta\bar{\varepsilon}_z) \cdot R_y(\alpha_y - \Delta\bar{\varepsilon}_y) \cdot R_x(\alpha_x - \Delta\bar{\varepsilon}_x) \cdot \bar{k},$$

$$\Delta\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_0 - \bar{\varepsilon},$$

где $\bar{\varepsilon}$ – углы Эйлера ориентации инструмента, $\bar{\varepsilon}_0$ – углы Эйлера нейтральной ориентации инструмента, $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ – углы, характеризующее пространственное положение датчика глубины, установленного на инструменте, относительно рабочего пространства ЛРК-С.

В случае использования позиционера при производстве детали точка \bar{c}' , зафиксированная датчиком глубины и представленная относительно координатной системы ЛРК-С в положении (J_1, J_2) , поворачивается в соответствии с кинематикой движения позиционера по следующей расчетной модели:

$$\bar{c}' = \bar{c}' - \bar{\delta}_{j1}, \quad (3.1)$$

$$\bar{c}' = R(\bar{J}_1, -J_1) \cdot \bar{c}', \quad (3.2)$$

$$\bar{c}' = \bar{c}' + \bar{\delta}_{j1}, \quad (3.3)$$

$$\bar{c}' = \bar{c}' - \bar{\delta}_{j2}, \quad (3.4)$$

$$\bar{c}' = R(\bar{J}_2, -J_2) \cdot \bar{c}', \quad (3.5)$$

$$\bar{c}' = \bar{c}' + \bar{\delta}_{j_2}, \quad (3.6)$$

где $\bar{\delta}_{j_1}$ и $\bar{\delta}_{j_2}$ неподвижные точки преобразования $R(\bar{J}_1, -J_1)$ и $R(\bar{J}_2, -J_2)$ соответственно.

Выражения (3.1) – (3.6) обеспечивают локализацию точки \bar{c}' , детектируемой датчиком глубины, в положении позиционера $J_1 = 0$ и $J_2 = 0$.

Стоит так же учесть, что при определении принадлежности точки $\bar{c} \in L$, область L осуществляет поворот в процессе движения позиционера. Поэтому предварительно трансляции $\bar{c} \rightarrow \bar{c}'$ осуществляется пересчет образующих вершин \bar{v}_i области L по выражениям (3.1) – (3.6).

Пусть C_i – облако точек, детектируемое датчиком глубины в i измерении, тогда j точка определяется, как $\bar{c}'_{ij} = \{ \bar{c}'_{ij}: \bar{c}'_{ij} \in C_i \text{ и } \bar{c}'_{ij} \in L \}$. Объединение точек $\cup_i \bar{c}'_{ij}$ представляет собой трехмерное облако точек детали.

В целях сокращения вычислений для каждого облака C_i осуществляется уменьшение количества точек за счет применения аппроксимации вокселизованно-сетчатым методом [106]. Вокселизованно-сетчатый метод подразумевает представление облака точек C_i в виде трехмерной пространственной сетки, состоящей из набора элементарных непересекающихся трехмерных блоков (вокселей, как правило представляющих собой параллелепипед). В таком случае точки облака, входящие в структурные блоки заданного размера, аппроксимируются трехмерным множеством вокселей заданного размера.

Аппроксимация облака точек вокселизованно сетчатым методом осуществляется за счет применения фильтра *Voxel Grid* [107]. Фильтр, вокселизованной аппроксимации V_g , представляется функций двух переменных $V_g(C, d_{sc})$, где C – аппроксимируемое облако, d_{sc} – размер вокселя.

Тогда при аппроксимации облака C_i фильтром $V_g(C_i, d_{sc})$, и объединении с предыдущим измерением датчика получается следующее рекуррентное выражение:

$$\Sigma_i = V_g(C_i \cup \Sigma_{i-1}, d_{sc}).$$

Конечным результатом сканирования будет являться облако точек $\Sigma = \Sigma_i$ вокселизированное фильтром V_g с размерностью сети d_{sc} .

Таким образом, осуществляется расчет покадрового объединения облаков точек датчика глубины, в совокупности составляющих результат сканирования. Полученный результат сканирования применяется для сопоставления положения детали, расположенной в рабочем пространстве ЛРК-С, с трехмерной моделью. Для обеспечения сопоставления положения полигональная модель детали трансформируется из множества плоских многоугольников в облако точек. Рассмотрим далее процесс подготовки модели.

3.1.7 Подготовка трехмерной модели детали к сопоставлению положения с результатом сканирования

Сопоставление положения модели детали из проектного решения с результатом сканирования, представляющим собой облако пространственных точек, осуществляется с помощью алгоритма SAC-IC-ICP. Для применения алгоритма полигональная модель детали трансформируется в облако точек.

С математической точки зрения полигональная модель представляет собой множество плоских многоугольников (как правило, треугольников, поэтому далее под основополагающими геометрическими примитивами модели понимаются треугольники), заданных в трехмерном евклидовом пространстве перечислением координат вершин каждого такого многоугольника. Криволинейные поверхности аппроксимируются набором граней с необходимой степенью детализации в конструкторской САПР.

В таком случае трансформация трехмерной полигональной модели в облако точек осуществляется равномерным заполнением плоских треугольников пространственными точками.

Рассмотрим схему равномерного заполнения одного треугольника пространственными точками представленную на рисунке 35.

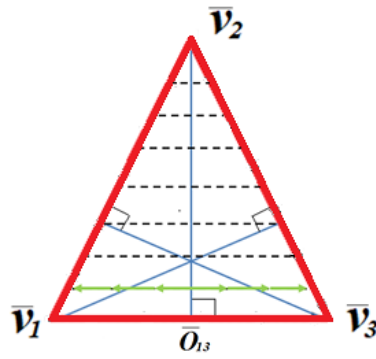


Рисунок 35 - Схема равномерного заполнения треугольника пространственными точками

Заполнение треугольника осуществляется относительно произвольной высоты путем пошагового построения перпендикуляров к ней (см. пунктирные линии на рисунке 37) и равномерной расстановке точек на них, лежащих внутри треугольника. В качестве значения шага в обоих геометрических конструкциях используется одно и то же значение d_m .

Пусть заполнение осуществляется относительно высоты, опущенной из вершины v_2 на сторону $[v_1, v_3]$. Тогда расчетная формула множества точек $\{\bar{p}\}$, трансформирующих модель в облако, примет следующий вид:

$$\{\bar{p}\} = \bigcup_{k_1, k_2} \frac{\bar{v}_2 - \bar{O}_{13}}{|\bar{v}_2 - \bar{O}_{13}|} \cdot d_m \cdot k_1 \pm \frac{\bar{v}_1 - \bar{v}_3}{|\bar{v}_1 - \bar{v}_3|} \cdot d_m \cdot k_2,$$

где $k_1 = \overline{1, N_1}$, $k_2 = \overline{1, N_2}$, $N_1 = \frac{|\bar{v}_2 - \bar{O}_{13}|}{d_m}$, $N_2 = \frac{|\frac{\bar{v}_2 - \bar{O}_{13}}{|\bar{v}_2 - \bar{O}_{13}|} \cdot d_m \cdot k_1 - \bar{c}|}{d_m}$, \bar{c} – точка пересечения линии проходящей через точку $\frac{\bar{v}_2 - \bar{O}_{13}}{|\bar{v}_2 - \bar{O}_{13}|} \cdot d_m \cdot k_1$ и сторону треугольника $[v_1, v_2]$ (или $[v_3, v_2]$ в зависимости от знака \pm).

Пример результата заполнения трехмерной полигональной модели капота трактора изображен на рисунке 36.

Таким образом, заполнение полигонов точками позволяет равномерно трансформировать полигональную модель в облако точек с заданным шагом. Облако точек, получаемое по результату трансформации модели детали, обеспечивает применение алгоритма SAC-IA-ICP для сопоставления положения с результатом сканирования. Рассмотрим далее параметры алгоритма SAC-IA-ICP.

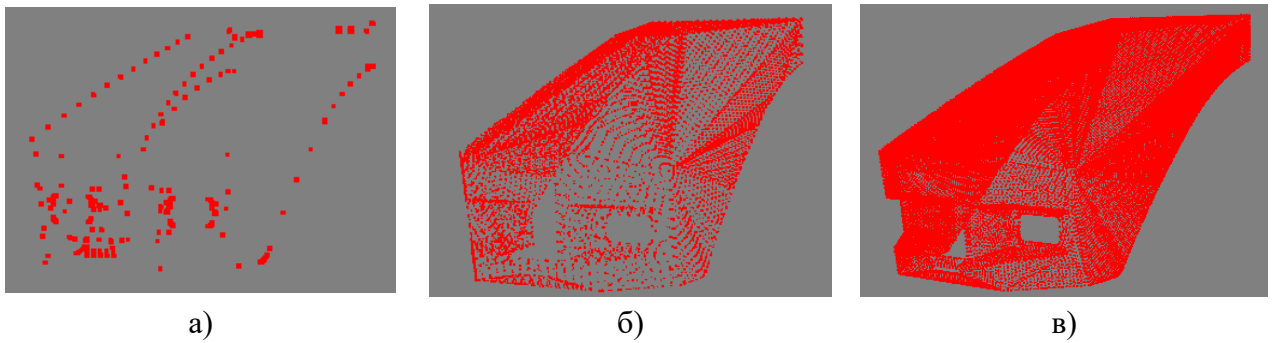


Рисунок 36 - Результат заполнения трехмерной полигональной модели капота трактора:
 а – вершины полигонов исходной модели; б – заполнение модели точками с шагом $d_m = 25$ мм; в – заполнение модели точками с шагом $d_m = 10$ мм

3.1.8 Определение параметров алгоритма SAC-IA-ICP выравнивания результата сканирования с моделью свариваемой детали

В качестве алгоритма сопоставления результата сканирования Σ с моделью свариваемой детали, трансформированной в облако точек M , применяется связка SAC-IA-ICP алгоритмов грубого SAC-IA и калибровочного ICP выравнивания облаков точек.

Предварительно выравниванию облака точек Σ и M вокселизируются структурной сетью. Размер вокселизированной сети d_a (см. схемы на рисунке 37) выравниваемых облаков точек Σ и M определяется из соображений соизмеримости значений d_{sc} и d_m . Однако трансформация модели в облако точек с выбором параметра $d_m = d_{sc}$ может создать облако, содержащее чрезмерное количество точек. Выбор значения $d_a = \frac{d_m}{2}$ и $d_a = d_{sc}$ позволит с одной стороны сохранить геометрическую структуру модели в результате трансформации облако точек, а с друга стороны сократить количество точек облака модели и время вычисления.

Алгоритм SAC-IA-ICP имеет несколько основных параметров, требующих конфигурирования перед началом использования [88]:

- Радиус окрестности r_n вычисления вектора нормали аппроксимируемой поверхности.
- Радиус окрестности r_f точки вычисления дескриптора.

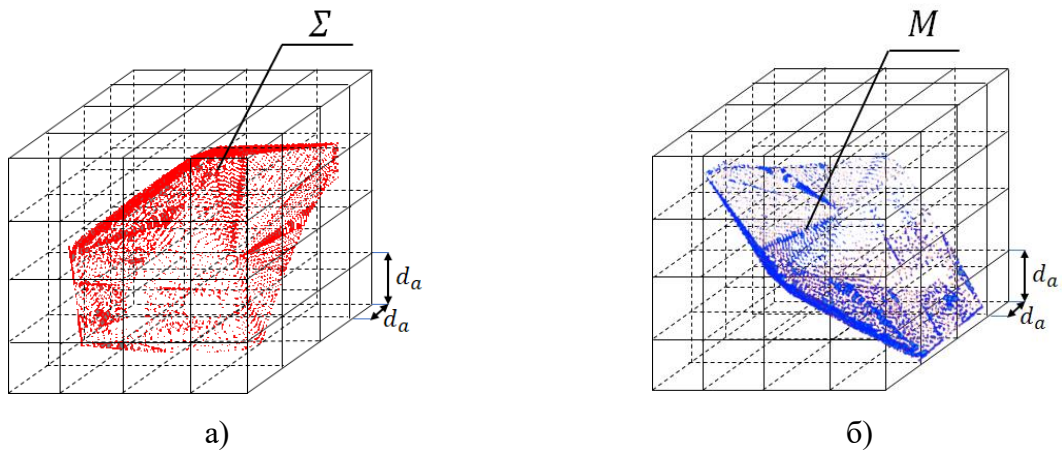


Рисунок 37 - Вокселизированные структуры выравниваемых облаков точек с размером вокселя d_a : а – модель результата сканирования Σ ; б – модели проектного решения M

Модифицированный алгоритм ICP, использующий метод нелинейной оптимизации Левенберга-Марквардта, конфигурируется параметром минимальной разницы выравниваемых облаков ε (или же погрешность) [108], используемой как условие завершения работы алгоритма.

Погрешность ε является условием завершения работы алгоритма ICP, а ее значение определяется из соображений последующего выполнения операции корректировки положения инструмента.

Рассмотрим схему (см. рисунок 38) поля зрения видеокамеры, применяемой для корректировки точек проектируемой траектории. Так как поле зрения камеры, используемой в процессе корректировки имеет размер $w \times h$, то для обеспечения наличия свариваемых кромок в поле зрения камеры, при осуществлении корректировки положения инструмента \bar{t} , определим ε как $\varepsilon = \frac{\min(w,h)}{2}$.

В таком случае получаемая по результату выравнивания облаков точек однородная матрица преобразования T позволит сдвинуть и повернуть облако модели M относительно результата сканирования Σ при погрешности $\varepsilon = \frac{\min(w,h)}{2}$ использования алгоритма SAC-IA-ICP.

Последовательные операции детектирования свариваемой детали, создания траектории движения инструмента сканирования, трехмерного сканирования, подготовки полигональной модели к выравниванию, определения параметров

алгоритма SAC-IA-ICP в совокупности представляют новый метод трансляции траектории средствами датчика глубины.

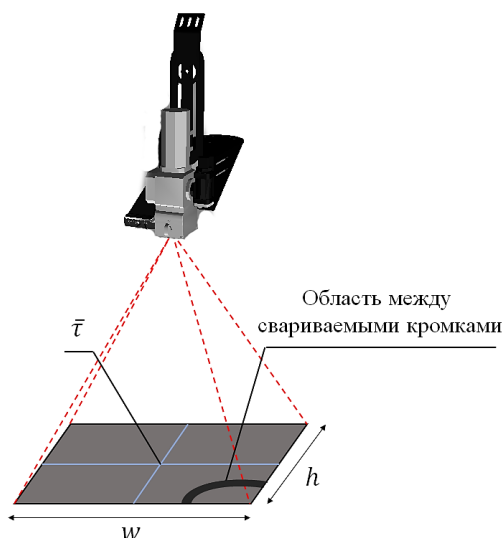


Рисунок 38 - Схема поля зрения видеокамеры, применяемой для корректировки положения инструмента в точках сварки

Разработанный метод позволяет автоматизировать трансляцию траектории, но для обеспечения позиционирования ее точек строго по центру зазора свариваемых кромок необходимо осуществить корректировку положения инструмента. Как было показано во второй главе, на сегодняшний день существуют решения, позволяющие осуществлять автоматизированную корректировку, но наиболее перспективный метод, подразумевающий распознавание свариваемых кромок на видеоизображении, требует совершенствования, поэтому далее рассмотрим составляющие его алгоритмы и модели.

3.2 Модели и алгоритмы корректировки точек транслированной технологической траектории средствами распознавания свариваемых кромок на видеоизображении

Автоматизированная трансляция технологической траектории средствами датчика глубины достигается трехмерным сканированием свариваемой детали и сопоставлением положения ее модели относительно результата сканирования. Но результат выравнивания может не обеспечивать точности позиционирования инструмента ЛРК-С относительно свариваемых кромок.

Применение методов и средств распознавания свариваемых кромок на изображении, получаемом с видеокамеры, установленной на инструменте, является наиболее перспективным и предпочтительным методом корректировки точек транслированной траектории. Однако изображение должно обеспечивать возможность распознавания геометрических примитивов и очертаний распознаваемых кромок подлежащих сварке. При этом возникает ряд проблем.

Первой проблемой, возникающей при распознавании, является размытое изображение, полученное в результате отклонения положения инструмента ЛРК-С от проектируемого. Следствием отклонения является расфокусировка видеокамеры в точках транслированной траектории из пространства моделей в рабочее пространство ЛРК-С. Устранение размытости изображения возможно за счет автоматизированной фокусировки видеокамеры путем перемещения инструмента вдоль собственной оси ориентации (вдоль оси лазерного луча). Иными словами проблема решается разработкой системы автоматизированного наведения на резкость изображения видеокамеры, использующей перемещение инструмента промышленного комплекса и оценку размытости изображения в различных положениях.

Второй проблемой получения качественного изображения является наличие шумов. Проблема может быть решена освещением исследуемой зоны двусторонней светодиодной подсветкой, вынесенной на внешнюю сторону инструмента [102] (см. рисунок 39).

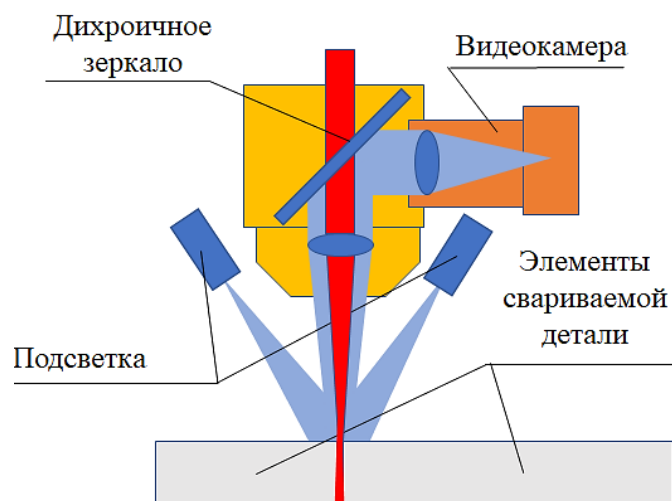


Рисунок 39 - Схема системы подсветки при распознавании свариваемых кромок

Для осуществления корректировки точек транслированной траектории относительно свариваемых кромок положение инструмента совместно с камерой принимает значения ориентации \bar{n}_{cam} и поворота крайней оси манипулятора R_{cam} , удерживающей инструмент. Величины \bar{n}_{cam} и R_{cam} проектируются инженером-технологом в АС ТПП. Указание величин ориентации инструмента в точках технологической траектории позволяет обеспечить применимость метода распознавания для различных случаев соединения свариваемых заготовок (угловые, нахлесточные, тавровые и другие).

В таком случае корректировка положения инструмента промышленного ЛРК-С в предпроцессе ЛС за счет обработки изображений, получаемых с видеокамеры, позволяет создать и внедрить автоматизированную подсистему корректировки точек транслированной траектории ЛРК-С.

Для разработки подсистемы корректировки положения инструмента в точках транслированной технологической траектории по результату распознавания свариваемых кромок на изображении с видеокамеры, осуществляется:

- 1) Разработка средства автоматизации корректировки положения перетяжки лазерного излучения в соответствии с проектируемым значением расфокусировки Δf по результату фокусировки видеокамеры за счет перемещения инструмента ЛРК-С вдоль оси ориентации.
- 2) Определение зависимости граничных значений диапазона порогового выделения пикселей области между кромками на изображении с видеокамеры, позволяющего осуществить однозначную сегментацию свариваемых кромок.
- 3) Формализация признака распознавания свариваемых кромок на результате сегментации.
- 4) Определение корректного положения точек транслированной траектории по результату распознавания кромок.
- 5) Формализация трансляции скорректированного значения точек проектируемой траектории из плоского пространства изображения в рабочее пространство ЛРК-С с учетом ориентации инструмента.

Рассмотрим далее каждый пункт в отдельности.

3.2.1 Совместная корректировка положения перетяжки лазерного излучения по результату фокусировки видеокамеры в точках транслированной траектории

Корректировка инструмента в заданное проектным решением значение расфокусировки Δf положения перетяжки лазерного излучения относительно свариваемых кромок возможно осуществить с помощью оценки размытости изображения при перемещении инструмента вдоль заданного положения оси ориентации \bar{n}_{cam} инструмента в точке траектории (см. рисунок 40).

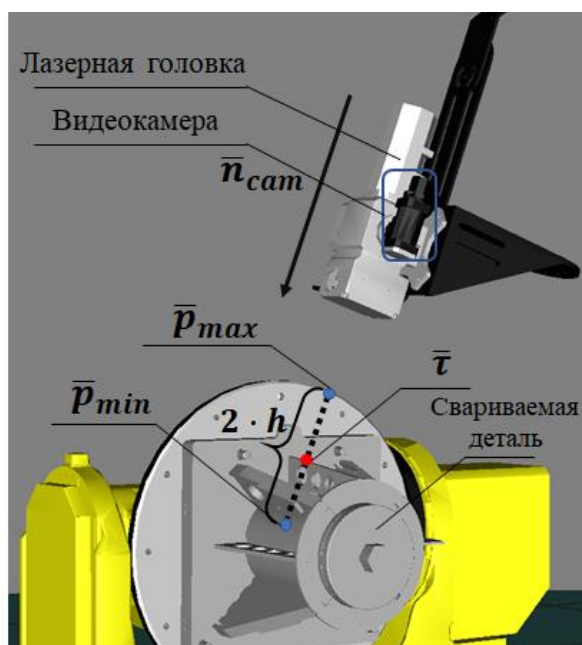


Рисунок 40 - Схема перемещения инструмента в процессе автоматизированного определения, в положении резкого изображения видеокамеры

В работе [109] рассматривают различные методы оценки размытости изображения, получаемого с видеокамеры. В качестве наиболее перспективного метода, применимого для системы корректировки, стоит выделить методы, основанные на вычислении градиента изображения. Основными преимуществами градиентного метода можно считать высокую скорость вычисления и эффективное функционирование в условиях небольшой области изображения, имеющей в четком состоянии контрастирующие переходы.

Определение значения, на основании которого осуществляется оценка размытости изображения, в таком случае будет представляться следующей последовательностью действий:

- 1) Гауссово размытие P_g исходного изображения P .
- 2) Вычисление градиента $\text{grad } P_g$ изображения P_g .
- 3) Вычисление суммы $S(P) = \sum_{i,j} I(\text{grad } P_g)$, где $I(\text{grad } P_g)$ – функциональная матрица яркости плоского изображения.

Наиболее четкое изображение среди зафиксированных $P_i = \{P_i\}$ определяется экстремальным значением $S(P_i) \rightarrow \max$, в процессе перемещения инструмента ЛРК-С вдоль области локализации начиная с положения \bar{p}_{\max} и заканчивая в \bar{p}_{\min} , где:

$$\begin{aligned}\bar{p}_{\max} &= -h \cdot \bar{n}_{\text{cam}} + \bar{\tau}, \\ \bar{p}_{\min} &= h \cdot \bar{n}_{\text{cam}} + \bar{\tau},\end{aligned}$$

h – величина, характеризующая протяженность области локализации резкого изображения.

Пусть положение $\bar{\tau}$ инструмента относительно видеокамеры является сфокусированным положением наблюдаемых объектов с фокусом f_{cam} , тогда проектируемое положение $\bar{\tau}^*$ инструмента с заданным значением расфокусировки определяется как:

$$\bar{\tau}^* = ((f_{\text{cam}} - f_{\text{em}}) - \Delta f) \cdot \bar{n} + \bar{\tau}. \quad (3.7)$$

Примеры изображений, зафиксированных видеокамерой в процессе автоматизированной фокусировки, представлены на рисунке 41. Результаты оценки четкости изображений рисунка 41 представлены на рисунке 42.

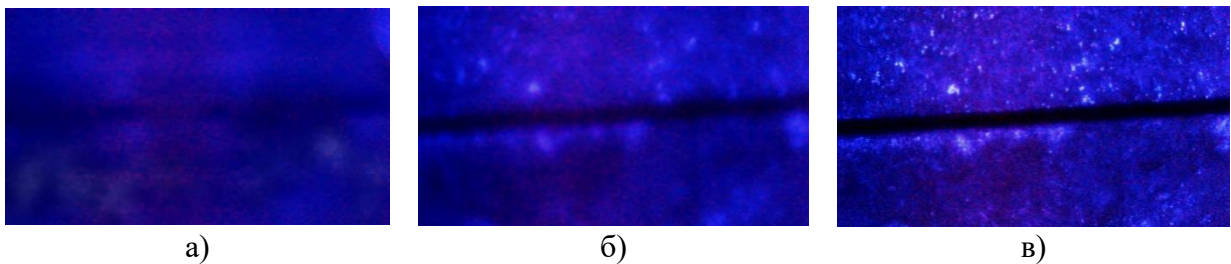
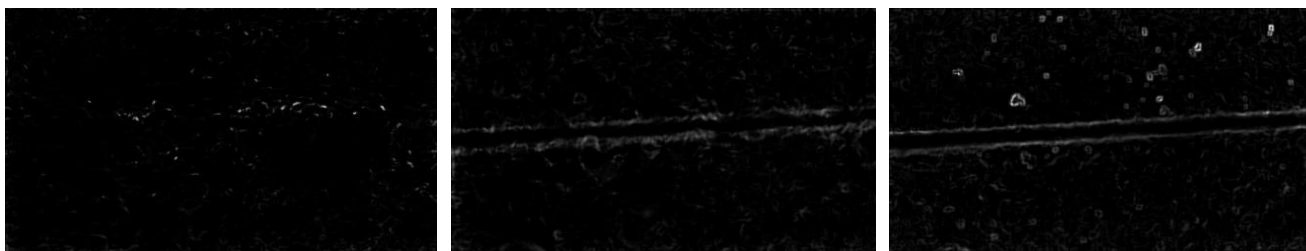


Рисунок 41 - Изображения, полученные видеокамерой в процессе автоматизированной фокусировки: а – на расстояние 12 мм от сфокусированного положения; б – на расстояние 6 мм от сфокусированного положения; в – резкое изображение видеокамеры



а)

б)

в)

Рисунок 42 - Результат оценки размытости изображения по функции $S(P)$: а – оценка $S(P) = 0.16 \cdot 10^7$ изображения 17 а; б – оценка $S(P) = 0.38 \cdot 10^7$ изображения 17 б; в – оценка $S(P) = 0.57 \cdot 10^7$ изображения 17 в

Рассмотрим далее сегментацию области между свариваемыми кромками на резком изображении.

3.2.2 Сегментация области между свариваемыми кромками на видеоизображении

Распознавание свариваемых кромок осуществляется по результату яркостной сегментации изображения. Для этого используется тот факт, что при двустороннем освещении область между кромками на изображении представляется непрерывной темной полосой.

Схематичная иллюстрация, разрабатываемых алгоритмов и моделей, далее иллюстрируется изображениями, представленными на рисунке 43.

Для сегментации темной полосы определяется диапазон ее яркости и осуществляется пороговое выделение. Но свариваемые металлические поверхности, которые для снижения уровня шума на изображении освещаются светодиодной подсветкой, в зависимости от детали могут иметь различные коэффициенты отражения и, как следствие, разный диапазон выделения пикселей.

Для определения диапазона осуществляется распределение пикселей изображения в пространстве HSV [110] по значению яркости (см. рисунок 44), где яркость представляется значением в диапазоне от 0 до 255 (0 – низкая яркость, а 255 – высокая яркость).

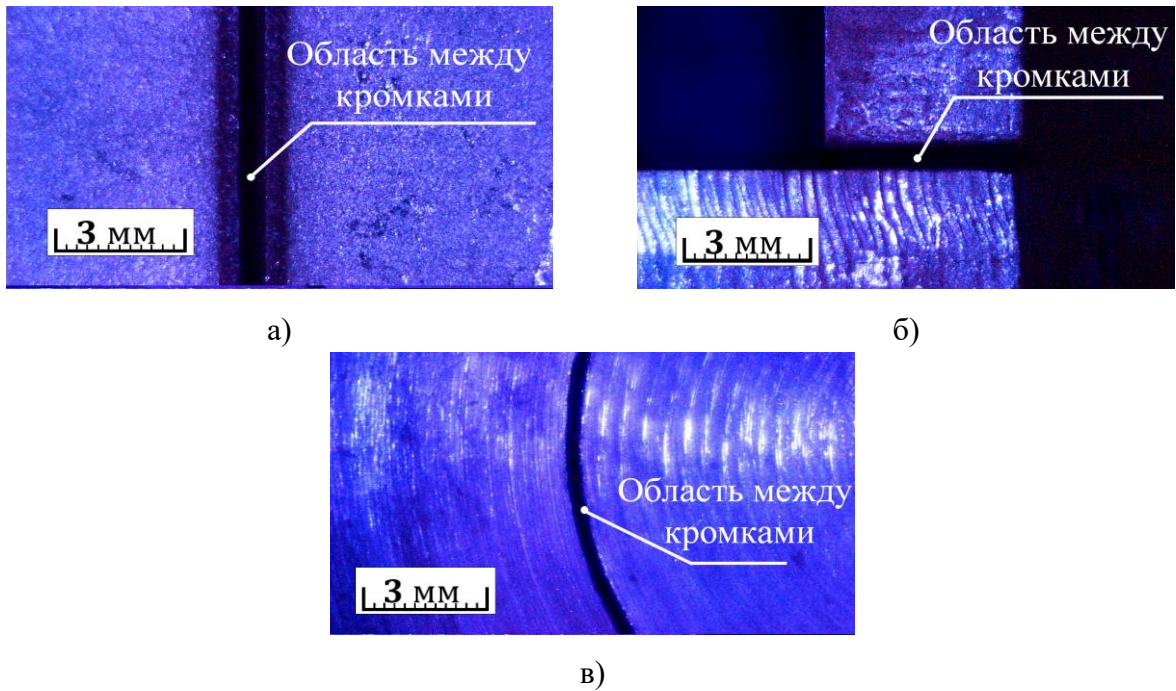
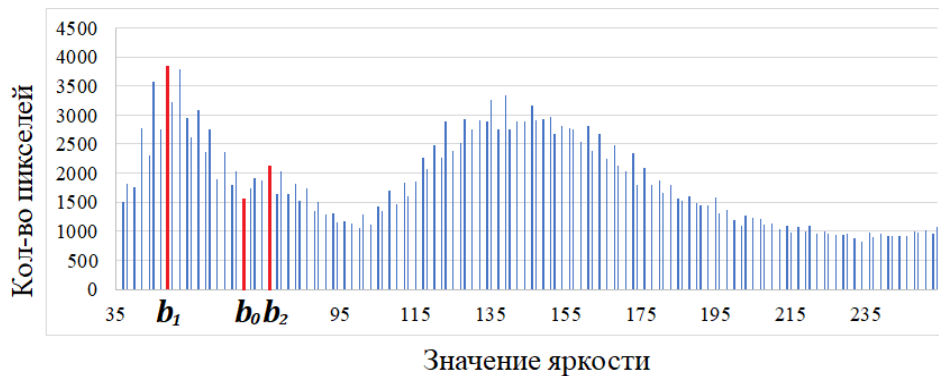


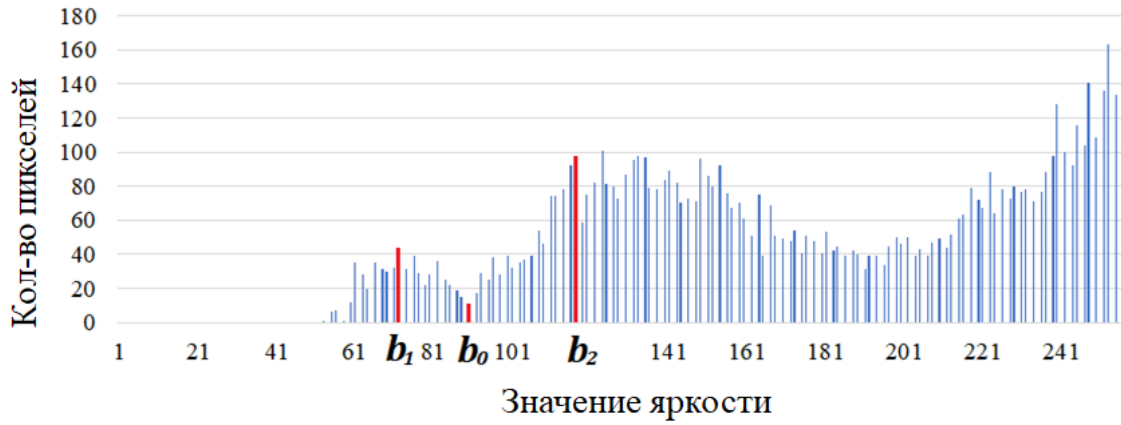
Рисунок 43 - Изображения, полученные с видеокамеры установленной на инструменте ЛРК-С: а – часть области между плоскими кромками детали; б - полная область между кромками; в – часть области между кромками круглых деталей

Из гистограмм распределений видно (см. рисунок 44), что для области пикселей, имеющей низкую яркость, характерно наличие локального максимума распределения b_1 . Значение b_1 соответствует доминирующей яркости пикселей области между кромками.

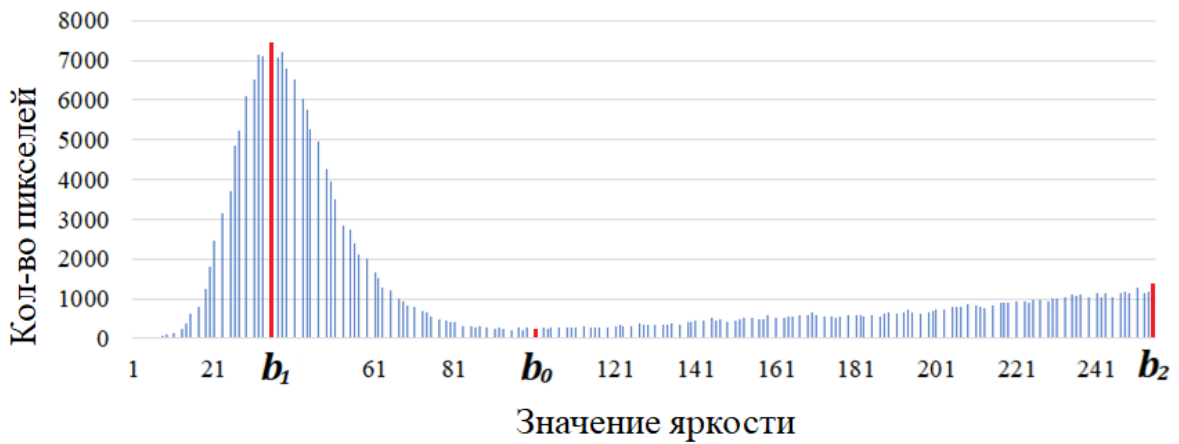
Переход яркости области между кромками характеризуется значением b_0 , являющейся точкой локального минимума. Точка локального минимума определяется на интервале $b_0 \in (b_1, b_2)$, где b_2 – точка локального максимума следующего за b_1 . Таким образом, получается, что пиксели принадлежат области между свариваемыми кромками, если их яркость входит в диапазон $[0, b_0]$.



а)



б)



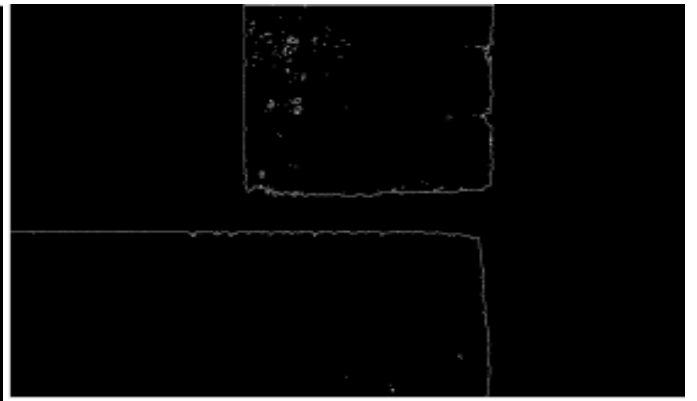
в)

Рисунок 44 - Гистограммы распределения пикселей изображений рисунка 45 в пространстве HSV

В качестве иллюстрации на рисунке 45 представлены результаты порогового выделения пикселей области между кромками в диапазоне $[0, b_0]$ изображений рисунка 45.



а)



б)



в)

Рисунок 45 - Результат порогового выделения пикселей между кромками в диапазоне яркости $[0, b_0]$ изображений рисунка 45

Определение диапазона порогового выделения пикселей, составляющих область между свариваемыми кромками по экстремальным значениям, позволяет однозначно получать бинаризованное изображение, содержащее контуры кромок. На основе контурного анализа изображения осуществляется распознавание кромок и определение корректного положения инструмента. Рассмотрим далее распознавание свариваемых кромок.

3.2.3 Распознавание свариваемых кромок на результате сегментации

Свариваемые кромки характеризуются двумя условно параллельными линиями. Условность заключается в том, что кромки могут не обеспечивать равномерную ширину зазора по всей длине и в работе допускается незначительное локальное отклонение.

Распознавание свариваемых кромок на результате сегментации осуществляется средствами контурного анализа. Под контуром в области машинного зрения понимается внешняя граница, описывающая очертание геометрического объекта на изображении [111]. Процесс получения всех контуров $K = \{K\}_{i=1}^N$ (N – количество контуров) изображения может проводиться стандартными средствами библиотек машинного зрения (к примеру OpenCV [112]). Результатом в таком случае будет являться массив контуров, каждый из которых представлен множеством отрезков $K_i = \{[a_{ij}, b_{ij}]\}_{j=1}^{N_i}$, где N_i – количество отрезков i контура, заданных двумя точками a_{ij} и b_{ij} на плоскости.

Для определения пары X и $Y \in K$ контуров, характеризующих кромки, используются следующие условия:

$$\exists X \text{ и } Y: \|Y\| - k_0 \cdot \|X\| < \|X\| < \|Y\| + k_0 \cdot \|X\|, \quad (3.8)$$

$$\forall K_i, \exists! X \text{ и } Y: \|K_i\| < k_1 \cdot \|X\| \text{ и } \|K_i\| < k_1 \cdot \|Y\| \text{ и } K_i \neq X, Y, \quad (3.9)$$

$$\mu(X, Y) = \sum_k \frac{|m_k^X - m_k^Y|}{|m_k^Y|} > \mu_0, \quad (3.10)$$

где, $X = \max(\|C_i\|)$, $\| \|$ – длина контура, $m_k^X = \text{sign}(h_k^X) \cdot \log(h_k^X)$, h_k^X – Хью момент [113] и m_k^Y вычисляется аналогично m_k^X .

Выполнение выражения (3.8) обеспечивает наличие среди контуров K_i двух X и Y почти равных по длине с коэффициентом разницы длин k_0 . Выполнение выражения (3.9) позволит выделить среди всех K_i контуры X и Y , длины которых превышают произвольный контур K_i с коэффициентом допуска длины k_1 . Момент выражения (3.10) характеризует статистическую схожесть контуров с параметром близости μ_0 .

Если $X \cup Y = \emptyset$ или $|X \cup Y| > 2$, где $| |$ – мощность множества, то результат сегментации содержит большие помехи или ложные геометрические очертания похожие на кромки стыка.

Результат распознавания контуров, содержащих свариваемые кромки, изображения рисунка 45 в соответствии условиями (3.8) – (3.10) представлен на рисунке 46.

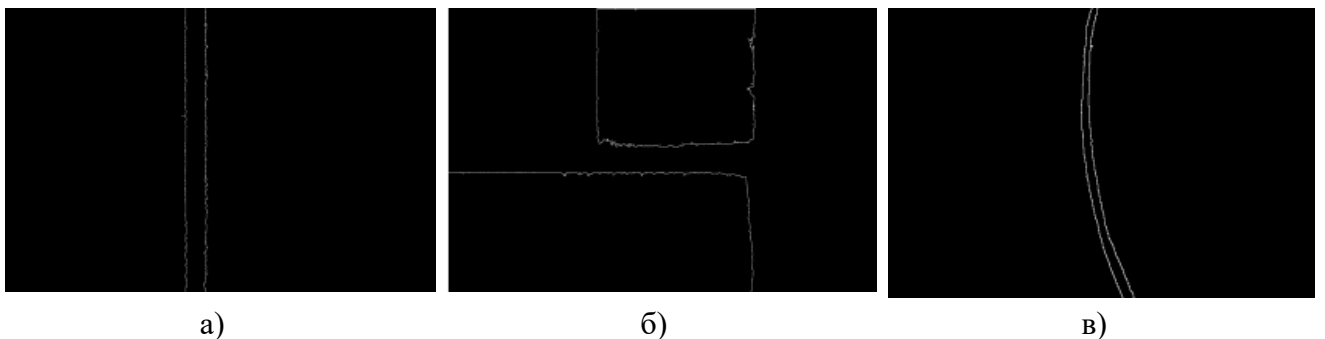


Рисунок 46 - Результат распознавания контуров содержащих свариваемые кромки изображений рисунка 47

В случае если среди всех контуров K не найдется пара X и Y удовлетворяющая условиям (3.8) – (3.10), но найдется один контур Z , для которого выполняется одно из условий (3.9), то на изображении свариваемые кромки представлены одним непрерывным контуром (см. рисунок 47).

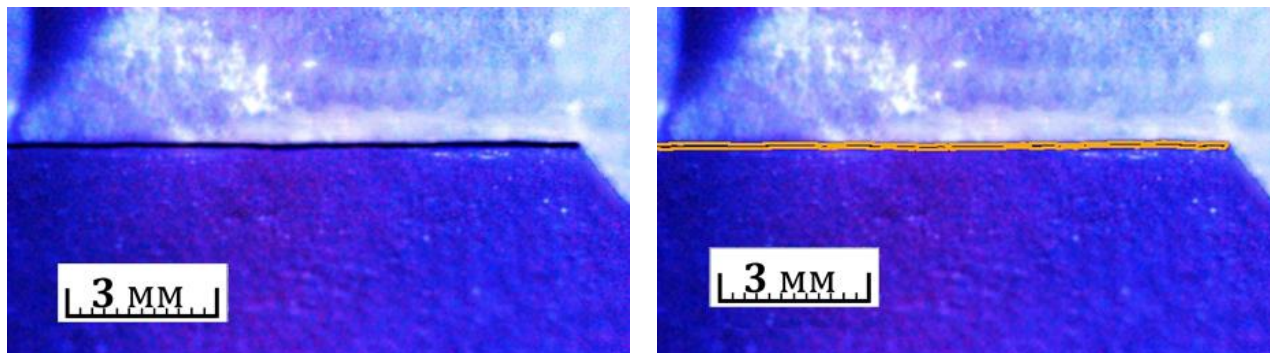


Рисунок 47 - Пример распознавания свариваемых кромок, представленных на изображении непрерывным контуром

Рассмотрим далее случай наличия двух контуров, характеризующих свариваемые кромки. Распознаваемые контуры X и Y представляют собой объединение множества сегментов (или отрезков) $X = \cup_i X_i$ и $Y = \cup_i Y_i$ малой длины. В таком случае для определения отрезков, принадлежащих кромкам $X_i \subseteq X$ и $Y_j \subseteq Y$, применяется признак, предполагающий, что локально X_i и Y_j представляют собой условно параллельные контуры.

Так как контуры X и Y могут состоять из большого количества сегментов, то для снижения времени вычислений осуществляется их сокращение за счет применения алгоритма Дугласа-Пекеря [114].

Определение отрезков, принадлежащих свариваемым кромкам, осуществляется методом перебора и парного сравнения элементов, входящих в X и Y .

В таком случае получается, что отрезки $[a_x, b_x] \in X_i$ и $[a_y, b_y] \in Y_j$ составляют кромки стыка, если выполняются следующие условия:

$$\angle([a_x, b_x], [a_y, b_y]) < \varphi, \quad (3.11)$$

$$[a_x, b_x^+] \cup [b_x, b_x^+] \cup [a_x^+, b_x^+] \cup [a_x, b_x^-] \cup [b_x, b_x^-] \cup [a_x^-, b_x^-] \cap [a_y, b_y] \neq \emptyset, \quad (3.12)$$

где \angle угол между сегментами, $b_x^+ = \frac{w_{gap}}{2} \cdot \bar{n} + b_x$, $b_x^- = \frac{w_{gap}}{2} \cdot (-\bar{n}) + b_x$ (аналогично a_x^+ и a_x^-), \bar{n} определяется как $\bar{n} \perp [a_x, b_x]$ и w_{gap} – коэффициент характеризующий ширину зазора.

Выполнение выражений (3.11) и (3.12) схематично представляется построением плоского замкнутого контура, состоящего из отрезков $[b_x^-, b_x^+]$, $[b_x^+, a_x^+]$, $[a_x^+, a_x^-]$, $[a_x^-, b_x^-]$ (см. рисунок 48), на котором отрезок a_y, b_y считается условным параллельным, если входит внутрь прямоугольника и угол между сегментами не превышает заданное значение φ .

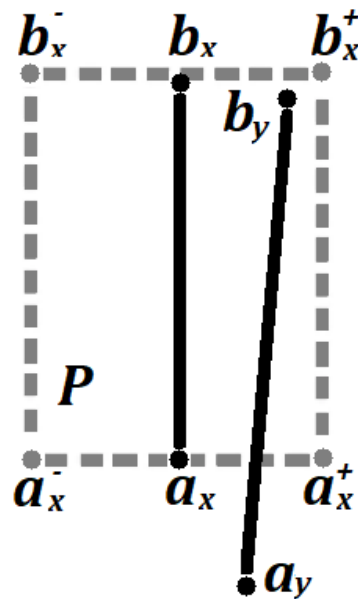
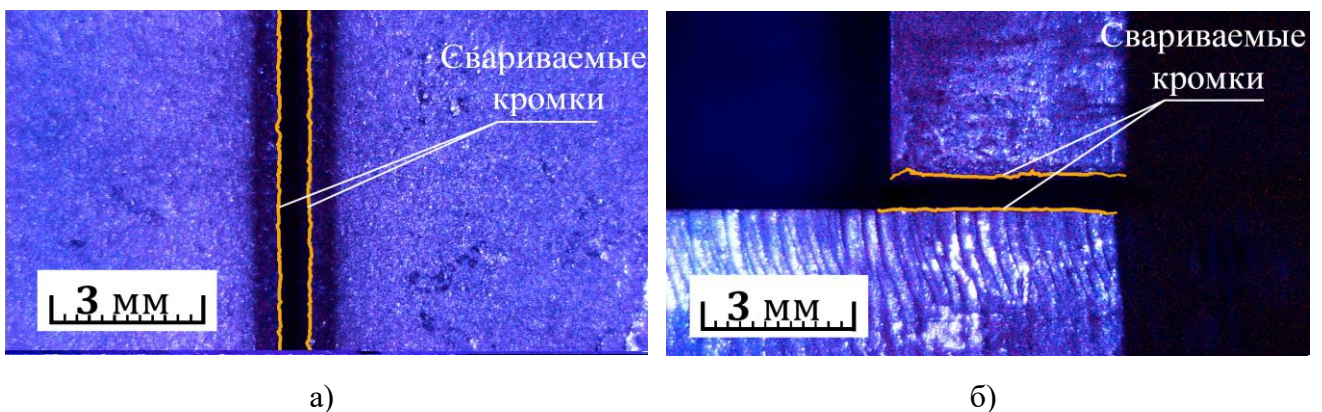
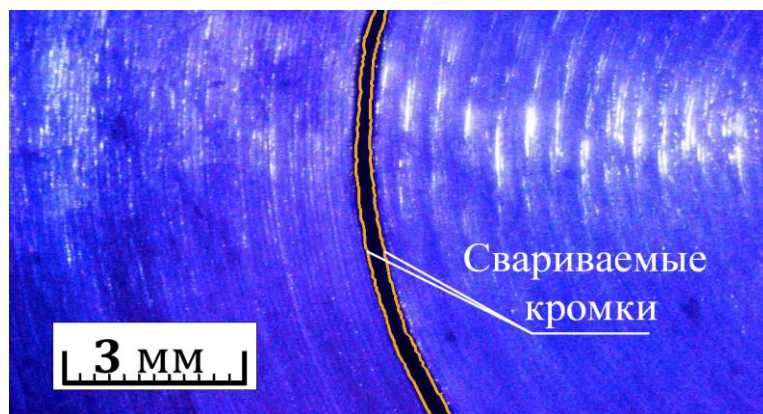


Рисунок 48 - Схема определения отрезков, принадлежащих свариваемым кромкам

Определенные множества отрезков X_i и Y_j будут представлять собой свариваемые кромки. Пример результата распознавания представлен на рисунке 49.





в)

Рисунок 49 - Результат распознавания кромок со значениями параметров: **а** – $w_{gap} = 65$, $\varphi = 5$, $\mu_0 = 0.4$, $k_0 = 0.1$, $k_1 = 0.7$; **б** – $w_{gap} = 55$, $\varphi = 8$, $\mu_0 = 3.5$, $k_0 = 0.5$, $k_1 = 0.5$; **в** – $w_{gap} = 30$, $\varphi = 11$, $\mu_0 = 0.4$, $k_0 = 0.1$, $k_1 = 0.7$

Таким образом, распознавание свариваемых кромок на основе результата сегментации было реализовано путем определения пары непрерывных, условно параллельных сегментов, входящих в контуры сегментированного изображения. Рассмотрим далее расчет корректного положения инструмента по распознанным кромкам.

3.2.4 Расчет корректного положения инструмента на результате распознавания кромок

Корректировка положения инструмента ЛРК-С в точке траектории движения проводится в том случае, когда текущее положение \bar{t} не находится внутри области между свариваемыми кромками.

Корректное положения \bar{t}' относительно распознанных кромок и текущего положения инструмента \bar{t} определяется при рассмотрении трех случаев, если на изображении:

1) Не распознаны края кромок, то корректное положение \bar{a}_0 определяется как ближайшая центральная между кромками, рассчитываемая выражением $\bar{a}_0 = \frac{\bar{a}_1 + \bar{a}_2}{2}$ (см. рисунок 50 а), где \bar{a}_1 и \bar{a}_2 определяются из следующих условий:

$$\bar{a}_1 = \{\bar{a}_1 \in [a, b] \text{ и } [a, b] \in (X_i \cup Y_j): |\bar{a}_1 - \bar{t}| \rightarrow \min\}, \quad (3.13)$$

$$\bar{a}_2 = ((X_i \cup Y_j) / \bar{a}_1) \cap L(\bar{a}_1, \bar{n}), \quad (3.14)$$

$$L(\bar{a}_1, \bar{n}) \equiv \left(\frac{x - a_{1,x}}{n_x} - \frac{y - a_{1,y}}{n_y} = 0 \right), \quad (3.15)$$

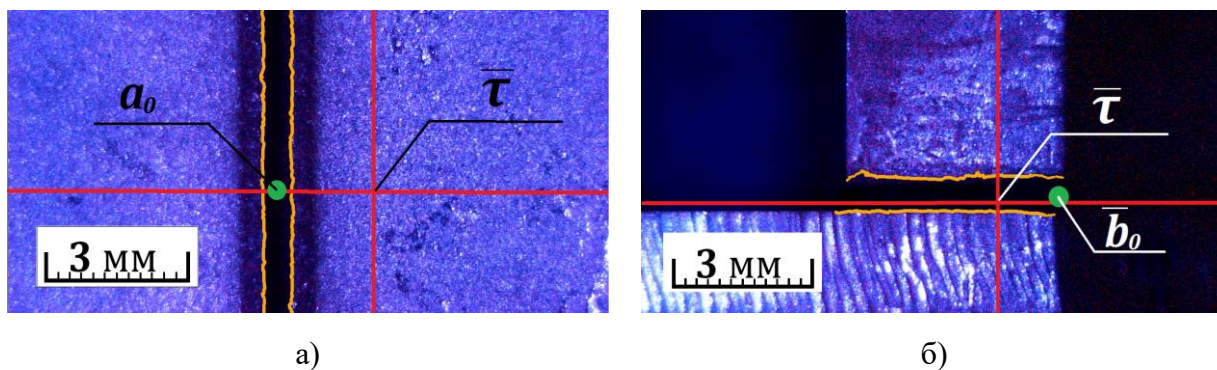
где $\bar{n} \perp [a, b]$ и $L(\bar{a}_1, \bar{n})$ прямая линия на плоскости, проходящая через точку \bar{a}_1 в направлении \bar{n} .

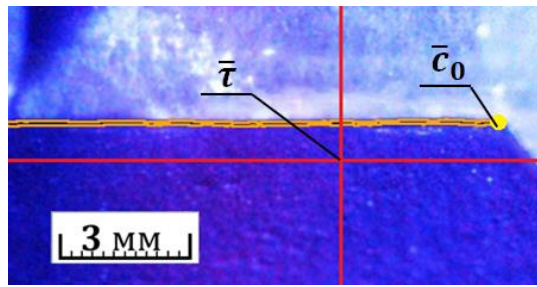
2) Распознаны два края кромок (см. рисунок 50 б), то корректное положение определяется как ближайшая краевая точка \bar{b}_0 , определяемая выражением $\bar{b}_0 = \frac{\bar{b}_1 + \bar{b}_2}{2}$, где точки \bar{b}_1 и \bar{b}_2 являются ближайшими крайними положения контуров X_0 и Y_0 соответственно.

3) Распознан один край кромки (см. рисунок 50 в), то корректным положением будет являться центральная точка \bar{c}_0 перегиба контура, образующего свариваемые кромки.

Корректное положение \bar{c}_0 при наличии одного края свариваемых кромок на изображении определяется из множества сегментов контура Z , образующих перегиб. Множество перегиба определяется за счет применения разработанных средств распознавания свариваемых кромок на результате сегментирования. Распознавание сегментов контура свариваемых противоположащих кромок осуществляется с использованием условий (3.13) – (3.15) (см. рисунок 48). Сегменты контура K , не входящие в множество распознанных кромок, образуют множество перегиба.

Учитывая, что контур может иметь несколько участков перегиба, корректное положение \bar{c}_0 определяется как $\bar{c}_0 = \min_i |\bar{\tau} - \bar{c}_i|$, где \bar{c}_i – барицентр множеств сегментов, образующих перегибы в контуре K .





в)

Рисунок 50 - Результат определения корректного положения относительно текущего положения инструмента $\bar{\tau}$ для распознанных кромок

Таким образом, для текущего положения $\bar{\tau}$ инструмента и распознанных кромок осуществляется расчет корректного положения $\bar{\tau}'$. Рассмотрим далее формализацию трансляции скорректированного положения $\bar{\tau}'$ на плоском изображении в рабочее пространство ЛРК-С.

3.2.5 Трансляция координат скорректированного положения из пространства изображения в рабочее пространство

Позиционирование инструмента ЛРК-С в рабочем пространстве описывается положением $\bar{\tau}$ и ориентацией лазерного луча, представленной системой углов Эйлера $\bar{\epsilon}$.

Позиционирование пикселей изображения осуществляется относительно левого верхнего края с направлением осей вдоль краев в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 51.

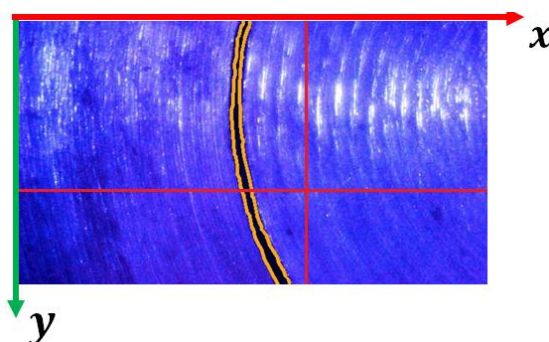


Рисунок 51 - Координатная система изображения

Вектор скорректированного положения инструмента $\bar{\tau}'$ на изображении транслируется в пространство промышленного комплекса преобразованием:

$$\bar{\tau} = s \cdot \bar{\tau}' \cdot T_2,$$

$$T_2 = \begin{pmatrix} i'_x & i'_y \\ j'_x & j'_y \\ k'_x & k'_y \end{pmatrix},$$

$$\bar{i}' = R_z(\beta_z - \Delta\varepsilon_z) \cdot R_y(\beta_y - \Delta\varepsilon_y) \cdot R_x(\beta_x - \Delta\varepsilon_x) \cdot i,$$

$$\bar{j}' = R_z(\beta_z - \Delta\varepsilon_z) \cdot R_y(\beta_y - \Delta\varepsilon_y) \cdot R_x(\beta_x - \Delta\varepsilon_x) \cdot j,$$

$$\bar{k}' = R_z(\beta_z - \Delta\varepsilon_z) \cdot R_y(\beta_y - \Delta\varepsilon_y) \cdot R_x(\beta_x - \Delta\varepsilon_x) \cdot k,$$

где s – масштабный коэффициент, i , j и k орты базиса рабочего пространства ЛРК-С (см. рисунок 52), $R_x(\varphi)$, $R_y(\varphi)$ и $R_z(\varphi)$ матрицы поворота на угол φ вокруг i , j и k соответственно, $\beta = (\beta_x, \beta_y, \beta_z)$ – вектор углов, характеризующих расположение поля зрения видеокамеры в пространстве ЛРК-С в нейтральной ориентации $\bar{\varepsilon}_0$, $\Delta\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_0 - \bar{\varepsilon}$ отклонение инструмента от нейтрального положения $\bar{\varepsilon}_0$ на значение $\bar{\varepsilon}$.

Таким образом, осуществляется трансляция корректного положения $\bar{\tau}'$ инструмента, определенного по распознанным краям сегментированного изображения и представленного в плоском пространстве изображения. Скорректированное положение инструмента $\bar{\tau}$ записывается в значение \bar{p}^* поля структуры проектного решения корректируемой точки траектории.

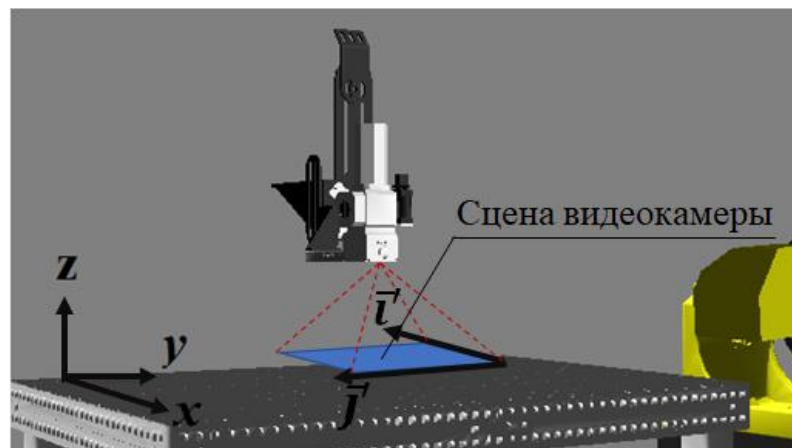


Рисунок 52 - Схема локализации базиса изображения $\{i', j'\}$ в рабочем пространстве ЛРК-С

Средства автоматизированной трансляции и корректировки положения инструмента обеспечивают позиционирование точек сварки проектируемой технологической траектории в центре зазора и в совокупности позволяют создать подсистему подготовки УП для ЛРК-С.

3.3 Выводы по главе

В ходе теоретических исследований третьей главы разработаны:

- метод автоматизированной трансляции проектируемой траектории из пространства моделей в рабочее пространство промышленного комплекса, включающий:
 - определение области локализации свариваемой детали, пространственными ограничениями в рабочем пространстве ЛРК-С на основании данных, получаемых с датчика глубины;
 - расчет траектории инструмента сканирования относительно области локализации;
 - формализацию трансляции проектируемой технологической траектории за счет сопоставления положения результата трехмерного сканирования свариваемой детали с ее моделью с использованием алгоритма SAC-IA-ICP выравнивания облаков точек.
- алгоритмы и модели корректировки точек транслированной технологической траектории относительно свариваемых кромок посредством обработки изображения, полученного с видеокамеры, установленной на инструменте ЛРК-С, включающие:
 - корректировку положения перетяжки лазерного излучения в заданное значение расфокусировки по результату фокусировки видеокамеры;
 - формализацию признаков сегментации области между кромками на изображении по экстремальным значениям распределения пикселей по яркости;
 - распознавание свариваемых кромок как локально параллельных и эквидистантных непрерывных линий;
 - расчета корректного положения инструмента относительно результата распознавания.

Глава 4. Подсистема АС ТПП по подготовке управляющих программ лазерного роботизированного комплекса сварки и экспериментальное исследование

4.1 Подсистема АС ТПП по подготовке управляющих программ

4.1.1 Структурная схема АС ТПП

В соответствии со схемой методики автоматизации технологической подготовки УП промышленного комплекса ЛРК-С, представленной на рисунке 5, подсистема АС ТПП по подготовке УП должна функционировать на ЛРК-С. В таком случае структурная схема АС ТПП представляется схемой, изображенной на рисунке 53.

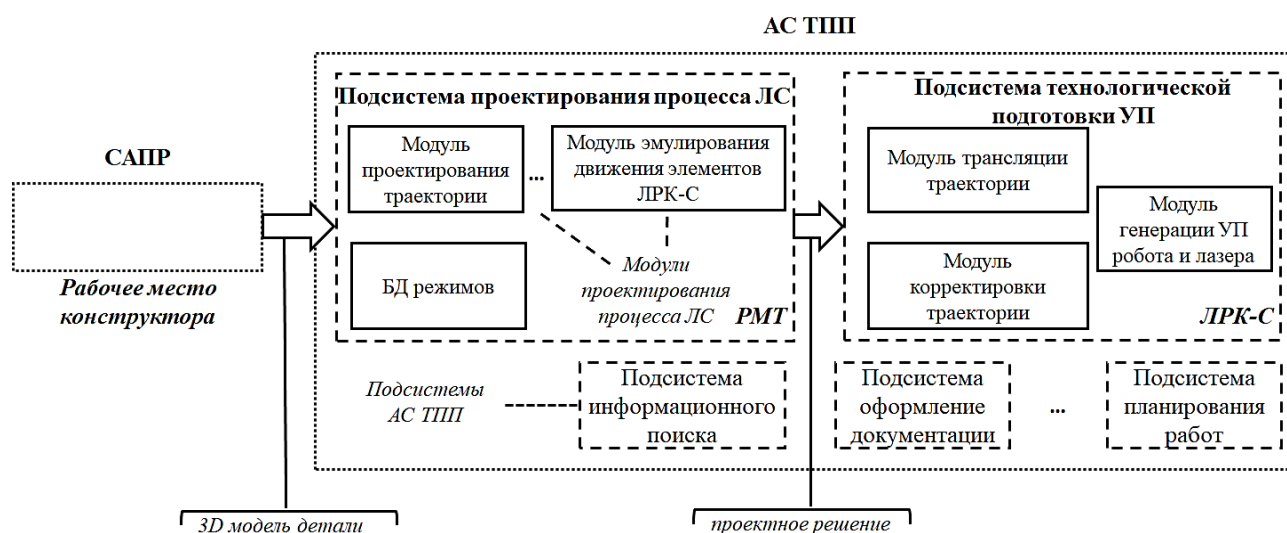


Рисунок 53 - Структурная схема АС ТПП для ЛРК-С

Согласно структурной схеме АС ТПП, подсистема подготовки УП осуществляет взаимодействие с подсистемой проектирования ЛС.

Проектирование процесса ЛС осуществляется на РМТ, что позволяет удаленно разрабатывать процесс ЛС на моделях свариваемых деталей [11, 27]. В системе проектирования ЛС осуществляется: разработка технологической траектории на модели детали, определение и подбор параметров обработки из базы данных (БД) режимов, симуляция движения подвижных элементов промышленного комплекса, корректировка проектного решения и другое [115].

Разработанное инженером-технологом проектное решение ЛС в системе проектирования сохраняется в файл. Затем решение передается оператору на ЛРК-С для подготовки УП в соответствующей подсистеме.

В системе подготовки УП средствами ее подсистем осуществляется автоматизированная трансляция технологической траектории разработанного проекта ЛС из пространства моделей в рабочее пространство ЛРК-С. После трансляции спроектированной траектории средствами подсистемы осуществляется корректировка точек сварки. С использованием скорректированной траектории в рабочем пространстве промышленного комплекса, значений состояния готовности (вкл/выкл) технологического оборудования в каждой точке и режимов обработки в подсистеме осуществляется генерация УП промышленного комплекса.

Так как разрабатываемые элементы методики автоматизации технологической подготовки УП, относящиеся к системе проектирования ЛС, модифицируют расчетные модели и выходной результат проектирования, то состав средств и функциональное назначение подсистем, составляющих структуру системы, остаются неизменными.

Разработанный метод автоматизированной трансляции технологической траектории и средства ее корректировки реализуются на промышленном комплексе в подсистеме подготовки УП. Рассмотрим далее составляющие ее модули в отдельности.

4.1.2 Архитектура модуля автоматизированной трансляции технологической траектории

Модуль трансляции траектории предназначен для переноса технологической траектории из пространства моделей проектного решения в рабочее пространство ЛРК-С. Структурная схема изображена на рисунке 54.

В своем составе модуль содержит четыре программных компонента:

- 1) Обработки данных с датчика глубины.
- 2) Создание траектории движения инструмента сканирования.
- 3) Трехмерного сканирования.

4) Трансляции траектории.

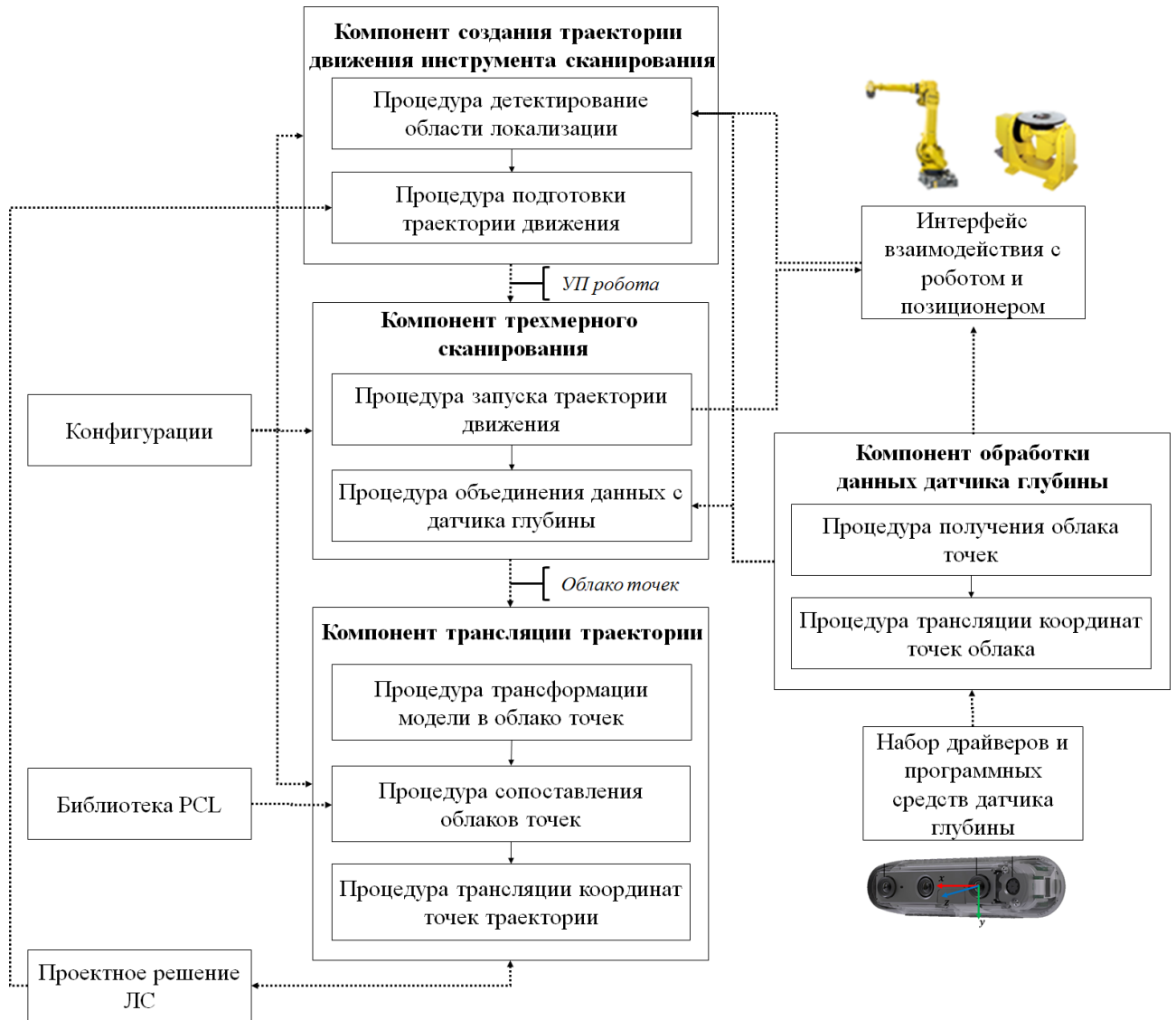


Рисунок 54 - Структурная схема модуля автоматизированной трансляции технологической траектории

Модуль автоматизированной трансляции траектории осуществляет взаимодействие с датчиком глубины, используя набор драйверов и программных средств, представляющих собой необходимые библиотеки и конфигурационные настройки. Взаимодействие с промышленным роботом и позиционером ЛРК-С осуществляется через программный интерфейс.

Начало функционирования модуля трансляции траектории осуществляется с программного компонента создания траектории движения инструмента сканирования. Определение границ области расположения свариваемой детали в рабочем пространстве F осуществляется исполнением процедуры детектирования

области локализации. Процедура выполняется в соответствии с разработанным алгоритмом метода трансляции, согласно которому осуществляется перемещение инструмента детектирования в точку p_0 верхней грани рабочего пространства F (определяемые из конфигураций), откуда средствами программного компонента обработки данных датчика глубины определяются границы области локализации L . На основании полученной области L и конфигураций проектного решения осуществляется выполнение процедуры создания траектории движения инструмента сканирования и на ее основе – УП робота для процесса трехмерного сканирования.

Программный компонент трехмерного сканирования свариваемой детали в качестве входного значения использует УП робота, представляющую собой траекторию движения инструмента сканирования. В процедуре компонента осуществляется запуск УП на исполнение. В процессе движения осуществляется исполнение процедуры обработки и объединения данных датчика глубины, соответствующей процессу трехмерного сканирования свариваемой детали. Результатом функционирования компонента сканирования является облако точек поверхности детали, локализованного в рабочем пространстве ЛРК-С.

Сопоставление положения отсканированной детали с его полигональной моделью из проектного решения осуществляется в программном компоненте трансляции координат точек траектории. Для этого первоначально выполняется процедура, трансформирующая исходную модель из полигональной структуры в облако точек. Регистрация облака точек результата сканирования в облаке точек модели осуществляется в процедуре сопоставления положений. В качестве средств программной реализации алгоритмов SAC-IA и ICP, а также необходимого набора программных компонентов используется библиотека PCL (Point Cloud Library [71, 72]). Средствами библиотеки PCL осуществляется сопоставление облаков точек и получение матрицы трансформации T . Окончание функционирования программного компонента осуществляется исполнением процедуры трансляции координат точек траектории, подразумевающий применение матрицы T над

значениями положений \bar{p}_i и ориентаций \bar{n}_i инструмента для представления соответствующих транслированных значений \bar{p}_i^* и \bar{n}_i^* в рабочем пространстве ЛРК-С.

Таким образом, результатом последовательного исполнения программных компонентов модуля автоматизированной трансляции технологической траектории являются множества \bar{p}_i^* и \bar{n}_i^* , записываемые в каждой точке технологической траектории проектного решения, и матрица трансляции T . Далее в модуле автоматизированной корректировки траектории осуществляется редактирование значения величин \bar{p}_i^* и \bar{n}_i^* .

4.1.3 Архитектура модуля автоматизированной корректировки транслированной технологической траектории

Модуль корректировки траектории предназначен для автоматизированной коррекции положения инструмента в точках транслированной технологической траектории относительно распознаваемых кромок в соответствии с результатами теоретических исследований, описанных в главах 2 и 3. В своем составе модуль содержит три программных компонента, взаимодействующих с видеокамерой, роботом и позиционером. Структурная схема модуля изображена на рисунке 55.

Модуль корректировки имеет следующий состав программных компонентов: исполнения процесса корректировки, автоматизированной фокусировки видеокамеры, распознавания свариваемых кромок.

Начало функционирования модуля корректировки транслированной траектории осуществляется запуском процедуры контроля процесса корректировки. Процедура циклически перебирает точки сварки. В теле цикла осуществляется перемещение инструмента, автоматизированная фокусировка видеокамеры, распознавание кромок, определение корректного положения, расчет положения фокальной плоскости лазерного излучения и трансляции координат корректного положения в рабочее пространство ЛРК-С.



Рисунок 55 - Структурная схема модуля автоматизированной корректировки технологической траектории

Исполнение итерации цикла начинается с перемещения инструмента в положение \bar{p}_i^* , $\bar{n}_{i,cam}$ и $R_{i,cam}$ за счет интерфейса взаимодействия с роботом и позиционером. В достигнутом положении осуществляется запуск процедуры фокусировки видеокамеры путем исполнения программного компонента.

Программный компонент фокусировки видеокамеры реализует подготовку и запуск УП робота, соответствующей фокусирующей траектории движения видеокамеры, установленной на инструменте. В момент начала движения запускается процедура обработки изображения и оценки его размытости.

По достижении достаточной резкости изображения с видеокамеры, запускается программный компонент распознавания свариваемых кромок. Функционирование программного компонента осуществляется последовательным исполнением процедур сегментации области между кромками на изображении и распознавания самих кромок в соответствии с разработанными средствами.

После распознавания свариваемых кромок запускается на исполнение процедура определения и расчета корректного положения инструмента относительно сегментов кромок.

По окончании расчета корректного положения запускается процедура трансляции координат. В процессе исполнения процедуры определенное корректное значение транслируется из плоского пространства изображений в рабочее пространство ЛРК-С.

На основании значений f_{cam} , f_{em} и Δf в соответствии с формулой (3.7) рассчитывается положение фокальной плоскости лазерного излучения в точке транслированной технологической траектории.

Расчетом положения фокальной плоскости лазерного излучения завершается выполнение одной итерации корректировки точки транслированной технологической траектории. При этом скорректированное значение сохраняется в \bar{p}_i^* проектного решения.

Далее проектное решение, инкапсулирующее в себе значения транслированной, скорректированной траектории, используется для генерации УП промышленного ЛРК-С.

4.1.4 Архитектура модуля генерации управляющих программ робота и лазера

Модуль генерации УП предназначен для автоматизации совместного создания УП робота и лазера и использует в качестве входных данных проектное решение ЛС. Структурная схема модуля представлена на рисунке 56.

Модуль содержит генератор УП робота и лазера, состоящий из двух программных компонентов.

Управляющие программы робота на основе проектного решения ЛС генерируются в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 23. По завершению выполнения алгоритма результат работы, представляющий собой текстовый документ программы, отправляется на контроллер робота.

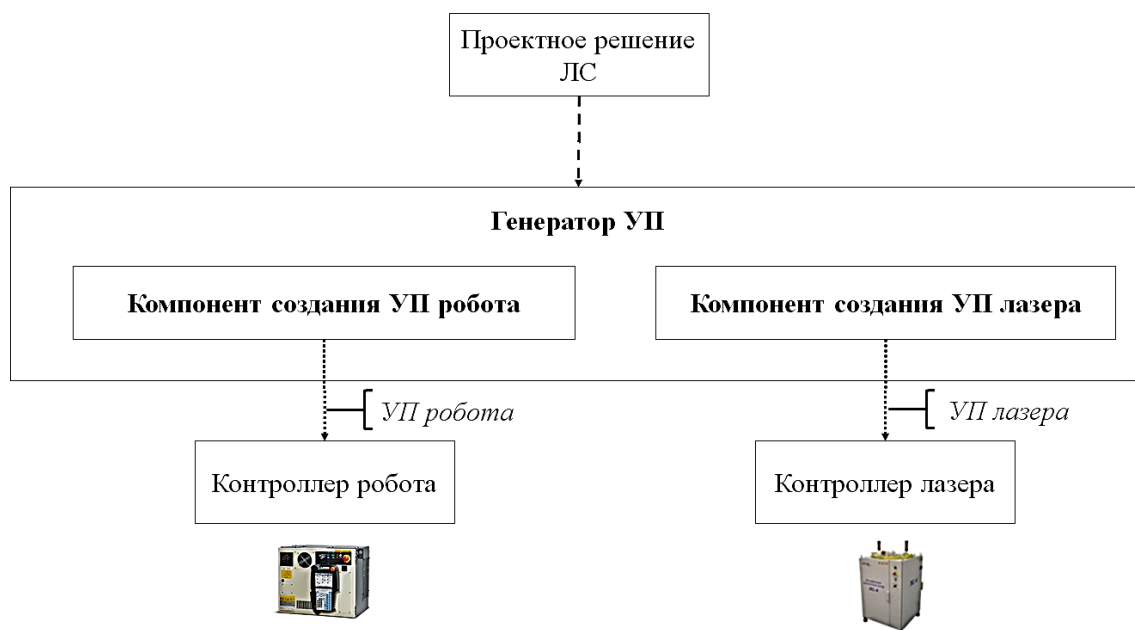


Рисунок 56 - Структурная схема модуля по генерации УП робота и лазера

Управляющая программа лазера генерируется на основе проектного решения ЛС в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 24. Созданная

программа в ходе выполнения алгоритма отправляется на контроллер лазера, завершая подготовку и генерацию УП лазера.

Структурные схемы программных модулей в совокупности с разработанной методикой позволяют создать подсистему АС ТПП подготовки УП промышленного ЛРК-С, реализующую разработанные средства автоматизации.

Рассмотрим далее программную реализацию подсистем АС ТПП, реализующих проектирование процесса ЛС и подготовку УП.

4.1.5 Программная реализация подсистемы проектирования процесса лазерной сварки

По результатам теоретических разработок был создан программный комплекс АС ТПП ЛРК, реализующий подсистему проектирования процесса ЛС. Изображение интерфейса пользователя АС ТПП ЛРК представлено на рисунке 57.

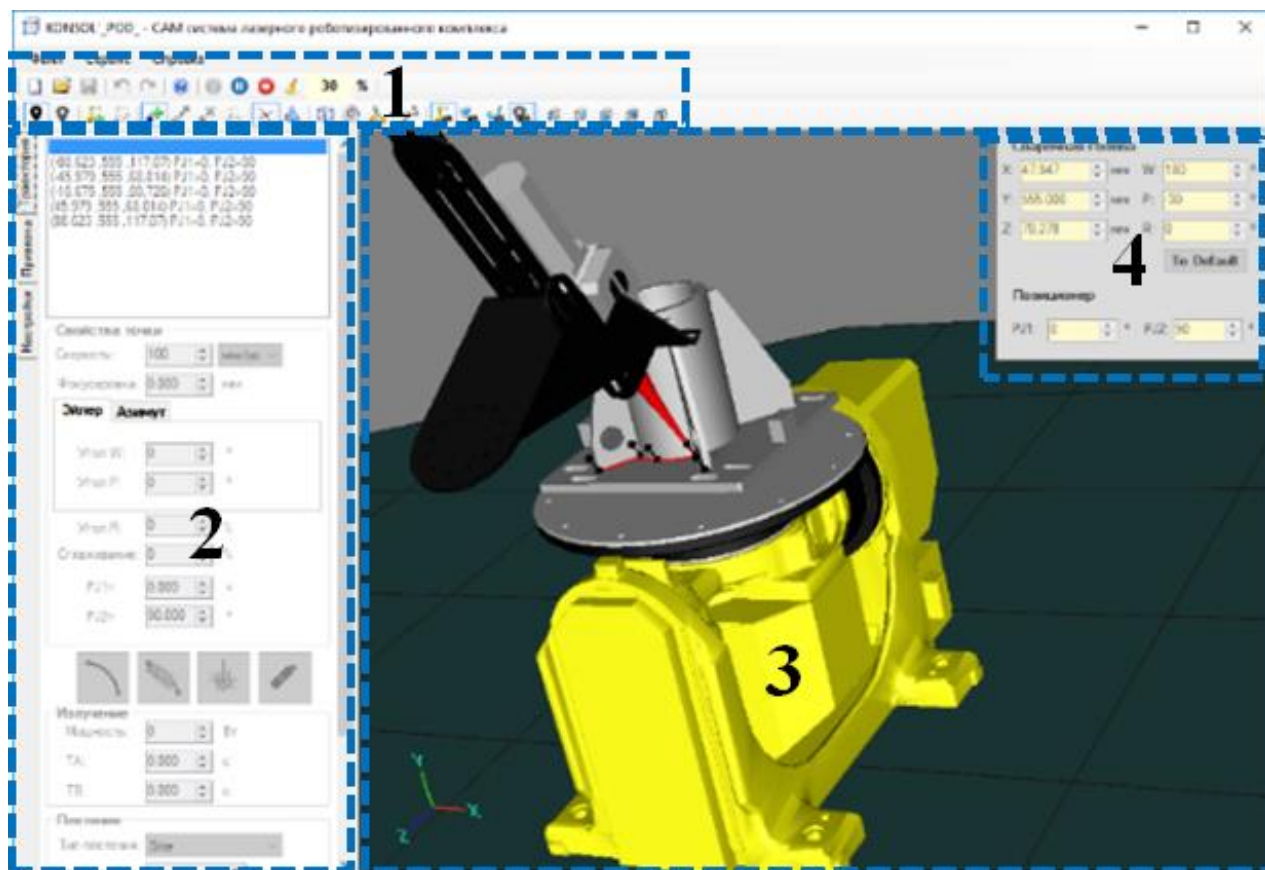


Рисунок 57 - Пользовательский интерфейс АС ТПП ЛРК, где: 1- панель инструментов; 2 – панель технологической траектории; 3 – окно визуализации; 4 – панель симуляции движения элементов ЛРК

Программный комплекс АС ТПП ЛРК предназначен для проектирования различных технологических процессов, осуществляемых на лазерных роботизированных комплексах обработки металлоизделий и реализующих технологические процессы сварки, термоупрочнения и наплавки. Программный комплекс разворачивается на РМТ и обеспечивает разработку проекта технологического процесса удаленно от промышленного комплекса.

Автоматизированная система в качестве входных данных принимает трехмерную полигональную модель детали в формате STL [73]. Средствами подсистем комплекса разрабатывается технологическая траектория, при этом в каждой точке осуществляется расстановка значений состояния активности (вкл/выкл) технологического оборудования средствами пользовательского интерфейса.

Комплекс включает в себя модули симуляции движения и корректировки траектории, основанные на разработанных в данной диссертации расчетных моделях кинематики позиционирования и ориентирования элементов технологического оснащения в точках технологической траектории. Указанные модули позволяют осуществлять создание новых и корректировку существующих точек траектории как на поверхности модели, так и в произвольной точке пространства моделей.

Система взаимодействует с базой данных технологических режимов в соответствии со структурой, представленной в методике автоматизации технологической подготовки УП. На код создания структуры базы данных получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [116]. Окно интерфейса взаимодействия инженера-технолога с базой данных в системе АС ТПП ЛРК показано на рисунке 58.

Результат проектирования формируется в файл, инкапсулирующий спроектированную технологическую траекторию, режим обработки, STL-модель детали и проектные конфигурации. Файл передается из АС ТПП ЛРК на промышленный комплекс, где оператор в подсистеме подготовки УП осуществляет создание программ и запуск процесса обработки.

| Id | Имя | Тип сварки | Материал | Тип соединения | Скорость | Мощность | Фокус | С |
|----|---------------|--------------|----------|----------------|----------|----------|-------|----|
| 16 | встык_Ст3_3mm | проплавление | Ст3 | встык | 60 | 1800 | 196 | бе |
| 17 | встык_Ст3_3mm | проплавление | Ст3 | встык | 60 | 1800 | 196 | ар |
| 18 | встык_Ст3_3mm | проплавление | Ст3 | встык | 60 | 1800 | 196 | бе |
| 19 | встык_Ст3_3mm | проплавление | Ст3 | встык | 60 | 1800 | 196 | бе |
| 20 | встык_Ст3_3mm | проплавление | Ст3 | встык | 50 | 1500 | 196 | бе |
| 21 | встык_Ст3_3mm | проплавление | Ст3 | встык | 50 | 1500 | 196 | бе |
| 22 | встык_Ст3_3mm | проплавление | Ст3 | встык | 50 | 1500 | 196 | бе |
| 23 | встык_Ст3_3mm | проплавление | Ст3 | встык | 50 | 1500 | 196 | бе |
| 24 | встык_Ст3_3mm | проплавление | Ст3 | встык | 40 | 1200 | 196 | бе |
| 25 | встык_Ст3_3mm | проплавление | Ст3 | встык | 40 | 1200 | 196 | бе |
| 26 | встык_Ст3_3mm | проплавление | Ст3 | встык | 40 | 1200 | 196 | бе |
| 27 | встык_Ст3_3mm | проплавление | Ст3 | встык | 40 | 1200 | 196 | бе |
| 28 | встык_Ст3_3mm | проплавление | Ст3 | встык | 60 | 2160 | 196 | бе |
| 29 | встык_Ст3_3mm | проплавление | Ст3 | встык | 60 | 2160 | 196 | бе |
| 30 | встык_Ст3_3mm | проплавление | Ст3 | встык | 60 | 2160 | 196 | бе |
| 31 | встык_Ст3_3mm | проплавление | Ст3 | встык | 60 | 2160 | 196 | бе |

Рисунок 58 - Окно интерфейса взаимодействия инженера-технолога с базой данных технологических режимов АС ТПП ЛРК

На программный комплекс АС ТПП ЛРК получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [117].

4.1.6 Программная реализация подсистемы АС ТПП подготовки управляющих программ

Основываясь на разработанной архитектуре модулей и компонентов, подсистема подготовки УП и концептуальной схемы системы управления, рассмотренной в [118], был реализован программный модуль автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) на ЛРК.

Комплекс АСУ ТП ЛРК представляет собой систему взаимодействия оператора с промышленным ЛРК и предназначен для управления техническими элементами и технологическими процессами лазерной обработки металлоизделий. Системой исполнения УП для АСУ ТП ЛРК может являться модуль [119]. Главное окно интерфейса оператора АСУ ТП ЛРК представлено на рисунке 59.

Интегрирование подсистемы подготовки УП в АСУ ТП связано с необходимостью использования средств подсистемы и интерфейса взаимодействия с промышленным роботом. Помимо этого, пользовательский интерфейс оператора АСУ ТП ЛРК содержит необходимые элементы управления, а также подсистемы отладки и диагностики неисправностей, позволяющие оператору контролировать

ход выполнения процессов трансляции координат, корректировки траектории и генерации УП.

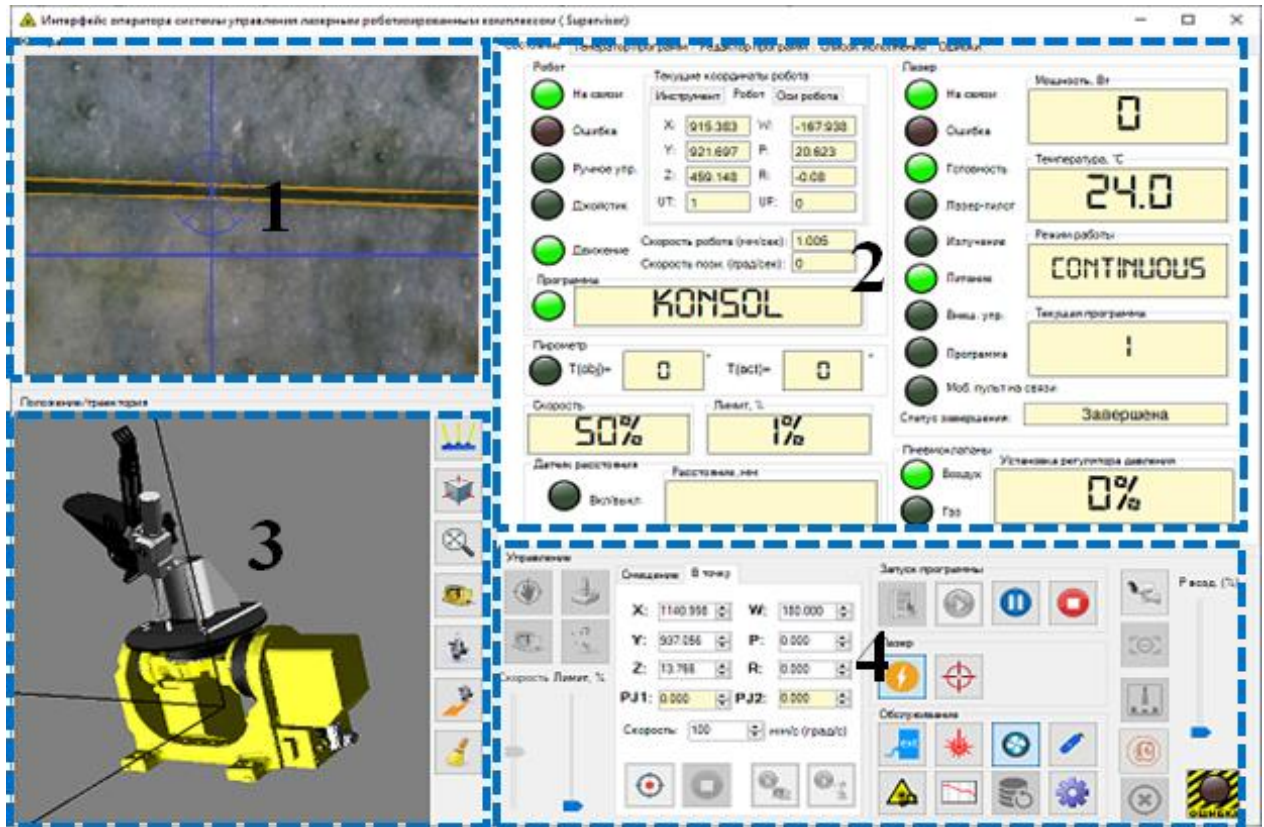


Рисунок 59 - Главное окно интерфейса оператора АСУ ТП ЛРК, где: 1 – окно отрисовки изображения, получаемого с видекамеры; 2 – панель индикаторов состояния ЛРК; 3 – окно трехмерной визуализации элементов ЛРК и моделей детали; 4 – панель элементов управления ЛРК

Подсистема подготовки УП в качестве входных данных получает файл проектного решения, разработанного в АС ТПП ЛРК. Взаимодействие оператора с системой подготовки УП осуществляется в панели, размещенной в отдельной вкладке АСУ ТП ЛРК (см. рисунок 60). Запуск последовательности процессов автоматизированной трансляции траектории, корректировки положения инструмента в точках траектории и генерации УП осуществляется взаимодействием оператора промышленного комплекса с элементами управления вкладки создания программ.

Программный комплекс АСУ ТП ЛРК в процессе трансляции технологической траектории и корректировки ее точек осуществляет промежуточный вывод результатов. Программными средствами трехмерной

графики визуализируются автоматизировано-генерируемые траектории движения инструмента. Средствами библиотеки OpenCV осуществляется визуализация изображений с видеокамеры, промежуточных результатов распознавания кромок и определения на их основе корректного положения инструмента.

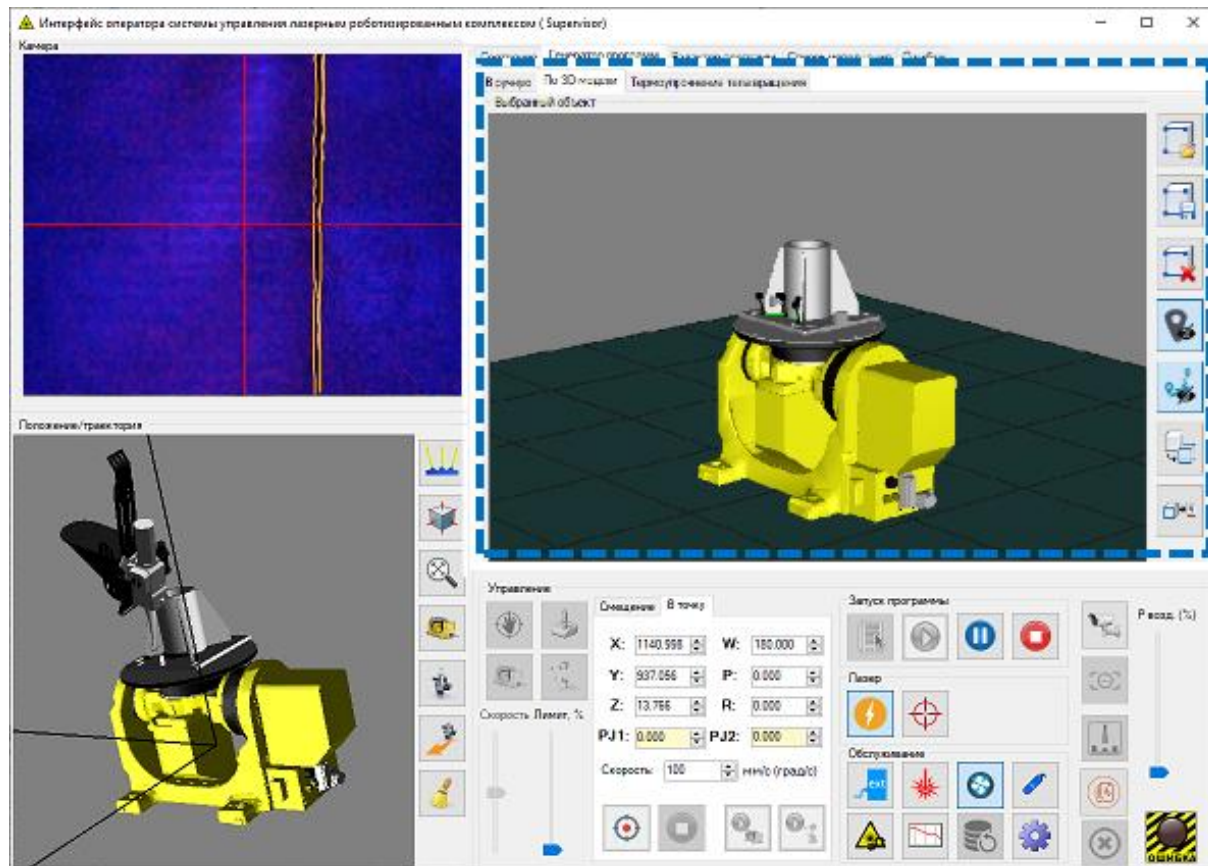


Рисунок 60 - Панель запуска автоматизированной трансляции траектории, корректировки положения инструмента в точках траектории и генерации УП (выделена черной рамкой на главном окне АСУ ТП ЛРК)

После выполнения процессов подготовки УП программ их текст отправляется на контроллеры робота и лазера, после чего оператор осуществляет запуск процесса ЛС детали.

На программный комплекс АСУ ТП ЛРК получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [120].

Таким образом, используя проектное решение, разработанное инженером-технологом в системе АС ТПП ЛРК, оператор промышленного комплекса выполняет автоматизированную генерацию УП в программном модуле подготовки УП системы АСУ ТП ЛРК.

4.2 Программа и методика экспериментального исследования подсистемы АС ТПП по подготовке управляющих программ

4.2.1 Цель и задача экспериментального исследования

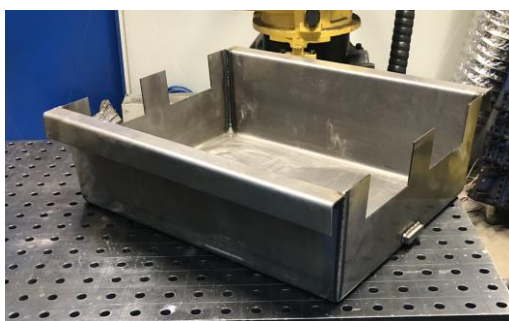
Цель экспериментального исследования – оценка повышения эффективности средств автоматизации подготовки УП, генерируемых в подсистеме АС ТПП, на контрольных образцах объектов исследования в сравнении с нормой времени отладки УП для ЛС объектов исследования в Научно-образовательном центре внедрения лазерных технологий (НОЦ ВЛТ) ВлГУ.

Задачей экспериментального исследования является оценка сокращения времени технологической подготовки УП для каждого объекта исследования.

4.2.2 Объекты исследований

Объектами экспериментального исследования автоматизированной технологической подготовки УП промышленного ЛРК-С являются:

- 1) Форма вспенивания пеностекла (рисунок 61 а).
- 2) Корпус магнитного устройства (рисунок 61 б).
- 3) Консоль суппорта погрузчика Ant-1000 (рисунок 61 в).



а)



б)



в)

Рисунок 61 - Объекты экспериментального исследования: а – форма вспенивания пеностекла; б – корпус магнитного устройства; в – консоль суппорта погрузчика Ant-1000

Форма является составным узлом автоматизированного устройства вспенивания шихты пеностекла в форме блока. Изготавливается деталь из листов материала 12Х18 толщиной 3 мм. Лазерной сваркой осуществляется соединение ребер (без вершин).

Технологический режим ЛС формы вспенивания приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Технологический режим ЛС формы вспенивания

| Наименование и обозначение технологического параметра ЛС | Значение технологического параметра ЛС | Единица измерения |
|--|--|-------------------|
| Скорость движения инструмента V_{tool} | 10 | мм/с |
| Мощность лазерного излучения P | 2.5 | кВт |
| Скорость подачи проволоки V_{wire} | 8 | мм/с |
| Значение расфокусировки Δf | 25 | мм |
| Расход 100%-го аргона Q_{gas} | 14 | л/мин |

Корпус магнитного устройства изготавливается из листов материала 09Г2С толщиной 4 мм. Лазерной сваркой производится соединение стыковых кромок элементов сборки.

Режим ЛС корпуса магнитного устройства указан в таблице 2.

Таблица 2 – Технологический режим ЛС корпуса магнитного устройства

| Наименование и обозначение технологического параметра ЛС | Значение технологического параметра ЛС | Единица измерения |
|--|--|-------------------|
| Скорость движения инструмента V_{tool} | 10 | мм/с |
| Мощность лазерного излучения P | 1.8 | кВт |
| Значение расфокусировки Δf | 4 | мм |

Консоль суппорта является деталью ходовой системы погрузчика Ant-1000. Изготавливается деталь ЛС в четыре этапа (см. рисунок 62):

- 1) Прихватка ребер.
- 2) Прихватка платиков.
- 3) Сварка верхних соединений пластины с трубой, платиками и ребрами.
- 4) Сварка нижних соединений пластины с трубой.

Материалом для изготовления консоли суппорта является сталь 09Г2С с толщиной ребер 10 мм и 16 мм остальных элементов.

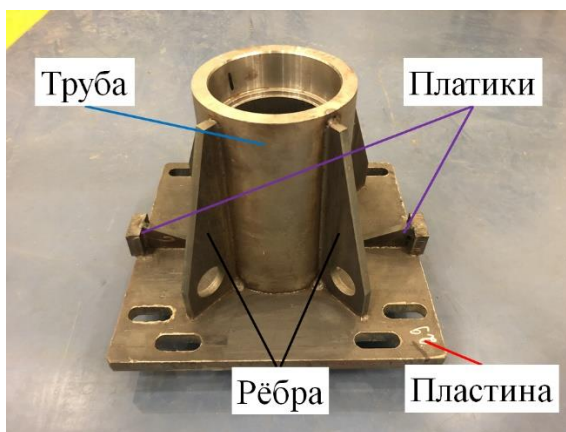


Рисунок 62 - Свариваемые элементы консоли суппорта

Технологический режим ЛС консоли суппорта приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Технологический режим ЛС консоли суппорта

| Наименование и обозначение технологического параметра ЛС | Значение технологического параметра ЛС | Единица измерения |
|--|--|-------------------|
| Скорость движения инструмента V_{tool} | 10 | мм/с |
| Мощность лазерного излучения P | 5 | кВт |
| Значение расфокусировки Δf | 4 | мм |
| Время излучения прихвата | 4 | мс |

4.2.3 Оценочные показатели и способы их определения

Оценочным показателем сокращения времени выполнения технологической подготовки УП на объектах экспериментального исследования является величина:

$$\frac{t_n}{t_a'}$$

где t_n – норма времени выполнения операций технологической подготовки УП объекта исследования промышленного ЛРК-С в НОЦ ВЛТ ВлГУ, t_a' – время выполнения автоматизированных операций технологической подготовки УП. Величина t_n определяется как:

$$t_n = t_{n1} + t_{n2} + t_{n3} + t_{n4},$$

где t_{n1} – норма времени выполнения операции калибровки положения модели детали, t_{n3} – норма времени генерации УП робота и передачи на контроллер, t_{n3} –

норма времени выполнения операции отладка УП робота на детали, $t_{н4}$ – норма времени создания УП лазера. Величина t_a определяется как:

$$t_a = t_{a1} + t_{a2} + t_{a3},$$

где t_{a1} – время выполнения трансляции технологической траектории, t_{a2} – время выполнения корректировки точек транслированной траектории, t_{a3} – время совместной генерации УП робота и лазера. Причем, величина t_{a1} определяется как совокупность времени, затрачиваемого на действия, входящие в состав операции:

$$t_{a1} = t_{a11} + t_{a12} + t_{a13},$$

где время t_{a11} – время детектирования области локализации, t_{a12} – время трехмерного сканирования свариваемой детали, t_{a13} – время сопоставления положения результата сканирования с трехмерной моделью детали.

Оценкой сокращения времени выполнения операции калибровки положения модели в сравнении с операцией трансляции технологической траектории из пространства моделей в рабочее пространство промышленного комплекса средствами датчика глубины является величина:

$$\frac{t_{н1}}{t_{a1}}.$$

Оценкой сокращения времени выполнения операции отладки УП робота относительно свариваемой детали в сравнении с операцией корректировки точек транслированной траектории движения инструмента является величина:

$$\frac{t_{н3}}{t_{a2}}.$$

Значения нормы времени t_n выполнения операций составляющих технологическую подготовку УП промышленного ЛРК-С в НОЦ ВЛТ ВлГУ для формы вспенивания, корпуса магнитного устройства и консоли суппорта представлены в таблицах 4, 5 и 6 соответственно (см. Приложение А выписка из операционной карты). Калибровка положения модели детали в пространстве моделей осуществляется средствами ROBOGUIDE. Отладка УП робота проводится полуавтоматизированным способом с использованием лазерного триангуляционного датчика расстояния и средств ручной корректировки точек

относительно свариваемых кромок. Создание УП лазера осуществляется в программном обеспечении LaserNET.

Таблица 4 – Норма времени выполнения операций технологической подготовки УП для ЛС формы вспенивания в НОЦ ВЛТ ВлГУ

| Наименование операции | Обозначение нормы времени | Норма времени выполнения, мин |
|-----------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Калибровка положения модели | $t_{н1}$ | 10 |
| Генерация УП робота | $t_{н2}$ | 1 |
| Отладка УП робота на детали | $t_{н3}$ | 7 |
| Генерация УП лазера | $t_{н4}$ | 2 |
| Итого $t_{н}$: | | 20 |

Таблица 5 – Норма времени выполнения операций технологической подготовки УП для ЛС корпуса магнитного устройства в НОЦ ВЛТ ВлГУ

| Наименование операции | Обозначение нормы времени | Норма времени выполнения, мин |
|-----------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Калибровка положения модели | $t_{н1}$ | 10 |
| Генерация УП робота | $t_{н2}$ | 1 |
| Отладка УП робота на детали | $t_{н3}$ | 12 |
| Генерация УП лазера | $t_{н4}$ | 4 |
| Итого $t_{н}$: | | 27 |

Таблица 6 – Норма времени выполнения операций технологической подготовки УП для ЛС консоли суппорта в НОЦ ВЛТ ВлГУ

| Наименование операции | Обозначение нормы времени | Норма времени выполнения, мин |
|-----------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Калибровка положения модели | $t_{н1}$ | 30 |
| Генерация УП робота | $t_{н2}$ | 1 |
| Отладка УП робота на детали | $t_{н3}$ | 25 |
| Генерация УП лазера | $t_{н4}$ | 9 |
| Итого $t_{н}$: | | 65 |

4.2.4 Испытательное оборудование

Подготовка УП и их последующее исполнение осуществлялось на ЛРК-С в НОЦ ВЛТ ВлГУ (рисунок 63).

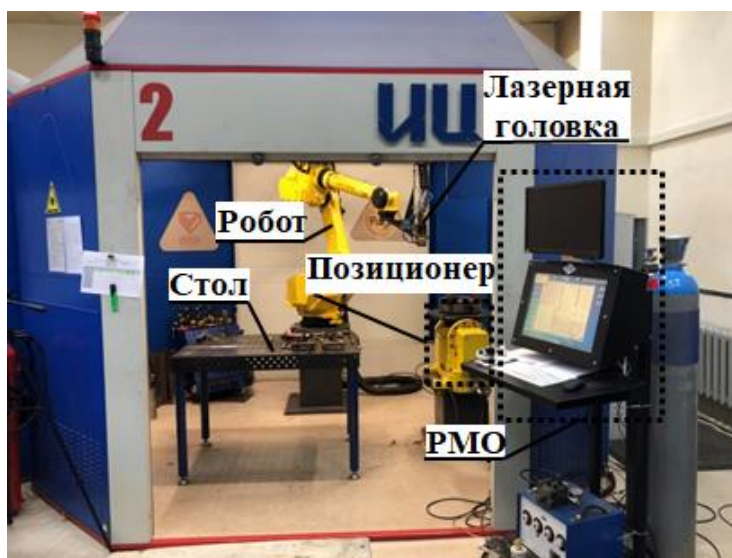


Рисунок 63 - Лазерный роботизированный комплекс сварки центра НОЦ ВЛТ ВлГУ

Комплекс ЛРК-С в своем составе имеет техническое оснащение, приведенное в таблице 7.

Таблица 7 – Состав технических средств ЛРК-С

| Наименование элемента комплекса | Модель устройства |
|----------------------------------|---|
| Промышленный робот | FANUC M-710iC/50 |
| Позиционер | FANUC 2-axis positioner |
| Волоконный лазер | IPG LC-5 |
| Оптическая головка | IPG FLW-D50 |
| Устройство подачи проволоки | КЕДР MIG-350GF/500GF |
| Датчик глубины | Intel Realsense D-435i |
| Видеокамера | STC-HD93DV |
| Система подсветки | Двусторонняя система светодиодной подсветки |
| Устройство подачи защитного газа | Редукторная система подачи с системой Cross Jet |
| Рабочее место оператора | Промышленный компьютер Аxiomtek серии IPC |

Технические характеристики промышленного робота FANUC M-710iC/50 приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Характеристики роботизированного манипулятора FANUC M-710iC/50

| Наименование тех. характеристики | Номинальное значение |
|----------------------------------|----------------------|
| Количество осей | 6 |
| Повторяемость | 0.07 мм |
| Достигаемость | 2050 мм |

Технические характеристики датчика глубины Intel Realsense D-435i и видеокамеры STC-HD93DV, встраиваемой в лазерную головку, представлены в таблицах 9 и 10 соответственно.

Таблица 9 – Основные технические характеристики датчика глубины Intel Realsense D-435i

| Наименование тех. характеристики | Номинальное значение |
|----------------------------------|----------------------|
| Рабочий диапазон | 0.2 - 10 метров |
| Максимальное разрешение | 1280 × 720 пикселей |
| Частота кадров | 30 кадров в секунду |
| Размер поля зрения | 87° × 58° |
| Интерфейс соединения | USB 3.0 |

Таблица 10 – Основные технические характеристики видеокамеры STC-HD93DV

| Наименование тех. характеристики | Номинальное значение |
|----------------------------------|----------------------|
| Максимальное разрешение | 1280 × 720 пикселей |
| Частота кадров | 60 кадров в секунду |
| Размер сенсора | 1/3 дюйма |
| Минимальная освещенность сцены | 4 Лк при F1.2 |
| Интерфейс соединения | HDMI |
| Размер поле зрения | 12.8 × 7.2 мм |

Для улучшения освещения области поверхности свариваемых кромок, попадающей в поле зрения видеокамеры, на инструменте размещается

двусторонняя подсветка, источником освещения в которой является однодиодный фонарь мощностью 3 Вт с рассеивающей линзой.

Состав аппаратных компонентов промышленного компьютера Axiomtek рабочего места оператора (РМО) приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Состав промышленного компьютера Axiomtek РМО

| Наименование элемента РМО | Модель устройства |
|-------------------------------------|-------------------------|
| Процессор | Intel Core i5 4440 |
| Оперативное запоминающее устройство | 8 Гб |
| Жесткий диск | SSD Smartbuy |
| Видеоадаптер | nVidia GeForce GTX 1650 |

Промышленный компьютер Axiomtek имеет 64-битную операционную систему Microsoft Windows Server 2008 R2 Standard. В качестве системы управления базой данных используется Microsoft SQL Server 2014 Express.

4.2.5 Подготовка к испытаниям

Видеокамера STC-HD93DV устанавливается в соответствующее ей посадочное место на лазерной головке IPG FLW-D50. Положение камеры в посадочном месте калибруется таким образом, чтобы точка ориентации инструмента была в центре изображения.

Исходя из размеров поля зрения 12.8×7.2 мм видеокамеры при установке в головку IPG FLW-D50, параметр выравнивая облаков точек ε определяется как $\varepsilon = \frac{\min(w,h)}{2} = \frac{7.2}{2} = 3.6$ мм. Значение ε позволяет определить значение величины h , характеризующее протяженность области (см. рисунок 40), в которой находится сфокусированное положение видеокамеры. Величина будет определяться следующим выражением $h = 2 \cdot ([\varepsilon] + 1) = 8$ мм, где $[]$ - операция взятия целой части числа.

Датчик глубины Intel Realsense D-435i закрепляется на кронштейне, устанавливаемом на лазерную головку таким образом, чтобы навесное оборудование инструмента не пересекалось с полем зрения камеры

(см. рисунок 64) и расстояние от главного сенсора датчика до лазерной головки стремилось к минимуму.



Рисунок 64 - Размещение датчика глубины Intel Realsense D-435i на лазерной головке

Угол отклонения инструмента φ от нейтрального положения в произвольном направлении в процессе осуществления сканирования выбирается $\varphi = 30^\circ$. Выбор значения 30° величины φ обеспечивает выполнение процесса трехмерного сканирования “под углом” и позволяет достигать инструментом отклонений от нейтрального положения подготавливаемых траекторий движения.

Рабочее пространство инструмента F (см. рисунок 25) конфигурируется таким образом, чтобы инструмент в произвольной точке области мог отклониться на значение $\varphi = 30^\circ$.

Исходя из технических характеристик камеры, значение удаленности $|\bar{d}|$ точки позиционирования инструмента сканирования (см. рисунок 13) определяется, как $|\bar{d}| = 150$ мм.

Скорость движения V_1 датчика глубины, установленного на инструменте ЛРК-С, в процессе сканирования определяется по времени t_{v1} получения и обработки одного кадра, оцениваемого как $t_{v1} < 35$ мс. При выборе значения

минимальной абсолютной погрешности $\delta_2 = \frac{[\varepsilon]+1}{2} = 2$ мм скорость движения V_1 будет составлять $V_1 = \frac{\delta_2}{t_{v1}} \approx 60$ мм/с.

Скорость вращения позиционера V_2 в процессе трехмерного сканирования оценивается по аналогии со скоростью движения датчика глубины. При выборе значения минимальной абсолютной погрешности $\delta_3 = 1^\circ$ скорость вращения позиционера будет составлять $V_2 = \frac{\delta_3}{t_{v1}} \approx 28$ град/с.

Размер вокселизированной структурной сети d_a выравнивания облаков точек определяется как $d_a = [\varepsilon] + 1 = 4$ мм. Исходя из $d_a = 4$ мм определяются величина $d_m = 2 \cdot d_a = 8$ мм и величина $d_{sc} = d_a = 4$ мм.

Радиус окрестности r_n вычисления вектора нормали аппроксимируемой поверхности был определен значением $r_n = 30$ мм. Радиус r_f окрестности точки вычисления дескриптора определен значением $r_f = 50$ мм.

Классификация объектов исследования с технологической точки зрения процесса трехмерного сканирования датчиком глубины для подготовки траектории сканирования указан в таблице 12.

Таблица 12 – Вид процесса трехмерного сканирования для объектов исследования

| Наименование объекта исследование | Вид трехмерного сканирования |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Форма вспенивания пеностекла | Простая форма |
| Коробка магнитного устройства | Сложная форма |
| Консоль суппорта | На позиционере |

Скорость движения инструмента V_3 в процессе фокусировки видеокамеры, определяемая схемой (см. рисунок 40), при минимальной абсолютной погрешности $\delta_0 = 0.1$ мм и времени обработки видеоизображения, оцениваемом как $t_{v2} < 5$ мс, в процессе фокусировки равна $V_3 = 20$ мм/с.

Скорость движения инструмента V_4 в процессе последовательного обхода точек сварки и корректировки их положения, относительно кромок принимается равной $V_4 = 100$ мм/с.

Параметры распознавания пары кромок на изображении определяются в соответствии с таблицей 13.

Таблица 13 – Значения параметров распознавания кромок на изображении

| Обозначение параметра | Значение |
|-----------------------|-------------|
| k_0 | 15% |
| k_1 | 20% |
| μ_0 | 0.4 |
| φ | 15° |
| w_{gap} | 45 пикселей |

Для осуществления корректного выполнения операции сопоставления положения в случае симметричной конструкции детали вспомогательная оснастка должна быть дополнена конструктивными элементами нарушения симметрии. При этом должна быть обеспечена соответствующая модификация конструкторской модели.

Развертывание АСУ ТП ЛРК и ее средств на РМО промышленного ЛРК-С осуществляется в соответствии с эксплуатационной документацией.

4.2.6 Проведение испытаний

Каждый объект экспериментального исследования испытывается независимо друг от друга. Разработка проектного решения ЛС проводится инженером-технологом в АС ТПП ЛРК на трехмерных моделях деталей.

Форма вспенивания закрепляется в оснастку и согласованно с разработанным технологическим проектом размещается в рабочей области инструмента F_t на столе.

Элементы коробки магнитного устройства собираются в единую конструкцию. Далее, как и в случае с объектом формы вспенивания, полученная конструкция устанавливается в рабочей области инструмента F_t на столе таким образом, чтобы инструмент ЛРК-С осуществлял безопасные движения в процессе выполнения ЛС.

Консоль суппорта производится в четыре этапа на позиционере. В процессе каждого этапа осуществляется демонтаж промежуточного результата из оснастки предыдущего этапа (за исключением первого) и монтаж в оснастку нового этапа. На каждом этапе свариваемые элементы консоли совместно с оснасткой устанавливаются произвольным образом в зажимной патрон позиционера. Для каждого этапа последовательно выполняется процесс подготовки УП и их исполнение.

После установки объекта экспериментального исследования в рабочей области инструмента оператором комплекса ЛРК-С в подсистеме подготовки УП осуществляется открытие проектного решения и запуск процесса автоматизированной подготовки УП. В процессе исполнения операций подготовки УП оператор промышленного комплекса осуществляет контроль хода выполнения средствами АСУ ТП ЛРК.

По завершению процесса трансляции технологической траектории и корректировки положения инструмента в ее точках генерируется УП работа и лазера. Результат генерации УП отображается соответствующим информационным сообщением автоматизированной системы.

4.2.7 Обработка и анализ результатов

Подсистемой технологической подготовки УП осуществляется замер времени исполнения каждой операции подготовки. После выполнения операций подготовки УП подсистемой генерируется файл журнала, содержащий время начала и окончания выполнения каждой операции. На основании полученного файла журнала осуществляется обработка и анализ результатов времени выполнения технологической подготовки УП.

4.2.8 Объем испытаний

Количество образцов для каждого объекта экспериментального исследования составляет не менее 5 штук.

4.3 Результаты экспериментальных исследований подсистемы АС ТПП по подготовке управляющих программ

4.3.1 Форма вспенивания пеностекла

Установленные в оснастку формы вспенивания в соответствии с технологически решением размещались на столе. (см. рисунок 65).

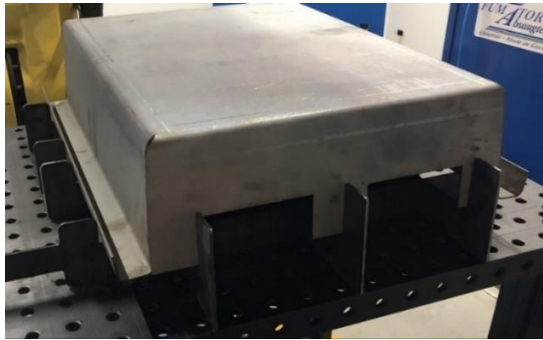


Рисунок 65 - Размещение производимой формы в оснастке на столе

Инструментом сканирования свариваемая деталь была детектирована и локализована в рабочей области инструмента. Результат замера времени детектирования области локализации составил $t_{a11} < 0.01$ секунд. Полученная область детектирования представлена схемой в пространстве моделей на рисунке 66.

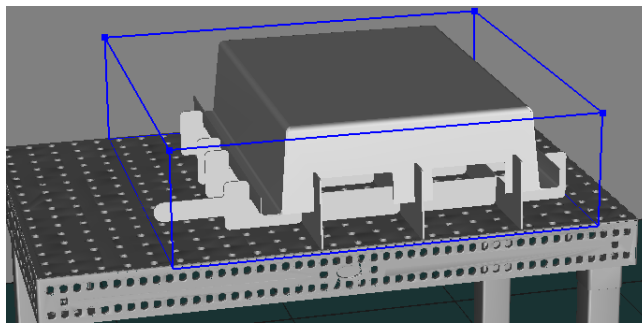
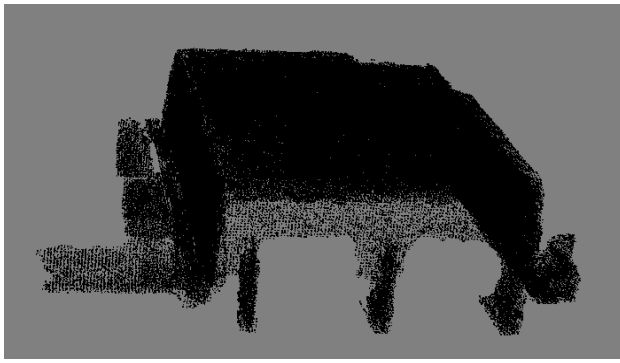
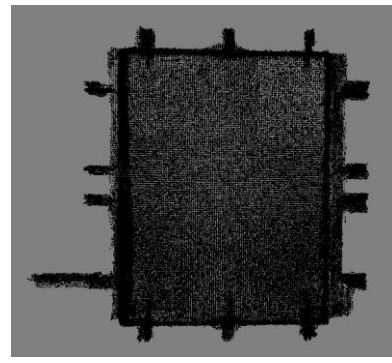


Рисунок 66 - Схема результата детектирования области локализации свариваемой формы инструментом сканирования

Относительно области локализации в соответствии с алгоритмом создания траектории сканирования простой по форме детали была создана траектория. Результат замера времени трехмерного сканирования формы вспенивания по всему объему испытаний составил $t_{a12} = 1,1$ минуты. Результат сканирования, представленный облаком точек, изображен на рисунке 67.



а)



б)

Рисунок 67 - Результат трехмерного сканирования формы вспенивания

Исходная модель свариваемых форм вспенивания, размещенных в оснастку, трансформируется в облако точек (см. рисунок 68).

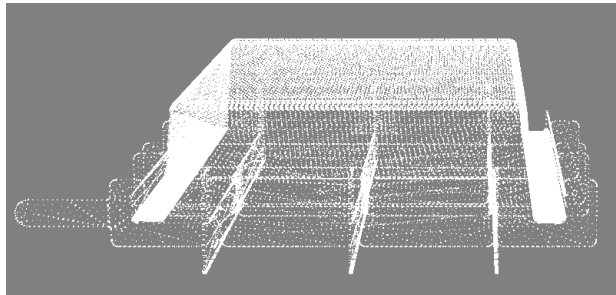
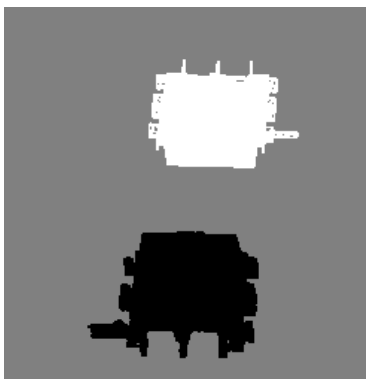
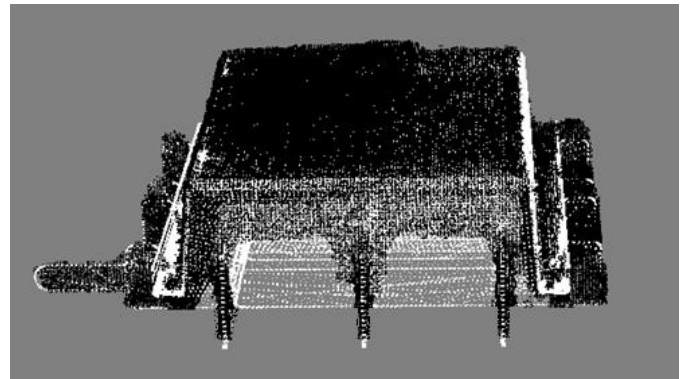


Рисунок 68 - Результат трансформации полигональной модели свариваемой формы вспенивания пеностекла с оснасткой в облако точек

В ходе успешного выравнивания облаков точек модели и результата сканирования алгоритмом SAC-IA-ICP было осуществлено сопоставление положения. Результат сопоставления представлен на рисунке 69.



а)



б)

Рисунок 69 - Сопоставление положения трехмерного результата сканирования формы вспенивания и ее модели трансформированной в облако точек: а – исходная локализация; б – сопоставленное положение

Результаты времени выполнения операции сопоставления положения детали формы вспенивания с моделью (t_{a13}) в объеме испытания 5 штук представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Результат замера времени t_{a13} выполнения сопоставления положения формы вспенивания с моделью

| Номер испытания | Время t_{a13} , мин |
|-----------------|-----------------------|
| 1 | 2.06 |
| 2 | 2.08 |
| 3 | 2.11 |
| 4 | 2.17 |
| 5 | 2.12 |

Среднее значения $\langle t_{a13} \rangle$ времени t_{a13} составило $\langle t_{a13} \rangle = 2.1$ минуты.

По результату сопоставления положения облаков точек была осуществлена автоматизированная трансляция технологической траектории. Транслированная в рабочее пространство ЛРК-С траектория была скорректирована в 16 точках лазерной сварки. Ширина зазора не превышала значения 1 мм. Исходная фотография, полученная с видеокамеры, и результат обработки программным компонентом распознавания свариваемых кромок подсистемы технологической подготовки УП в точке транслированной траектории представлены на рисунке 70.

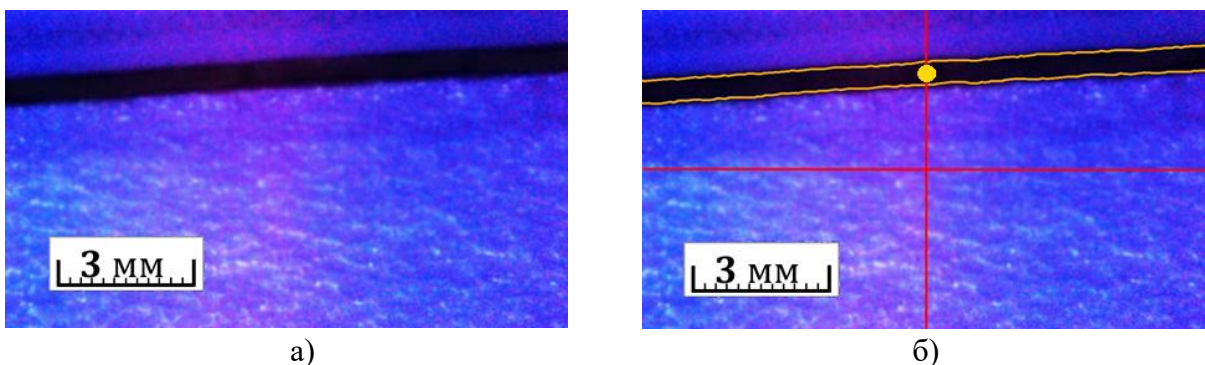


Рисунок 70 - Результат распознавания кромок и определения корректного положения в точке транслированной траектории ЛС формы вспенивания

Замер времени выполнения операции корректировки точек транслированной траектории ЛС формы вспенивания представлен в таблице 15.

Таблица 15 – Результат замера времени t_{a2} выполнения корректировки точек транслированной траектории ЛС формы вспенивания

| Номер испытания | Время t_{a2} , мин |
|-----------------|----------------------|
| 1 | 2.22 |
| 2 | 2.21 |
| 3 | 2.2 |
| 4 | 2.19 |
| 5 | 2.2 |

Среднее значения $\langle t_{a2} \rangle$ времени t_{a2} составило $\langle t_{a2} \rangle = 2.2$ минуты.

Время операции t_{a3} подготовки УП робота и лазера на основе транслированной технологической траектории и данных проектного решения ЛС по всему объему испытаний составило $t_{a3} < 0.01$ минуты.

Время t_a выполнения автоматизированной технологической подготовки УП для производства детали формы вспенивания пеностекла лазерной сваркой составило:

$$t_a = 0.01 + 1.1 + 2.1 + 2.2 + 0.01 \approx 5.4 \text{ минуты.}$$

Значение отношения, характеризующего сокращение времени подготовки УП формы вспенивания пеностекла составило:

$$\frac{t_H}{t_a} = \frac{20}{5.4} = 3.7.$$

Оценка $\frac{t_{H1}}{t_{a1}}$ сокращения времени выполнения операции калибровки положения модели в сравнении с операцией трансляции технологической траектории для формы вспенивания составила:

$$\frac{t_{H1}}{t_{a1}} = \frac{t_{H1}}{t_{a11} + t_{a12} + t_{a13}} = \frac{10}{3.21} = 3.11.$$

Оценка $\frac{t_{H3}}{t_{a2}}$ сокращения времени выполнения операции отладки УП относительно свариваемой детали в сравнении с операцией корректировки точек транслированной траектории для формы вспенивания составила:

$$\frac{t_{H3}}{t_{a2}} = \frac{7}{2.2} = 3.18.$$

4.3.2 Корпус магнитного устройства

Сборка корпуса магнитного устройства располагалась произвольным образом, согласно разработанному технологическому решению, на столе (см. рисунок 71).



Рисунок 71 - Размещение корпуса магнитного устройства на столе

В ходе детектирования детали в рабочем пространстве инструмента относительно стола была определена область локализации. Схема области локализации корпуса магнитного устройства на столе изображена на рисунке 72. Время t_{a11} детектирования области локализации корпуса магнитного устройства составило $t_{a11} < 0.01$ минуты.

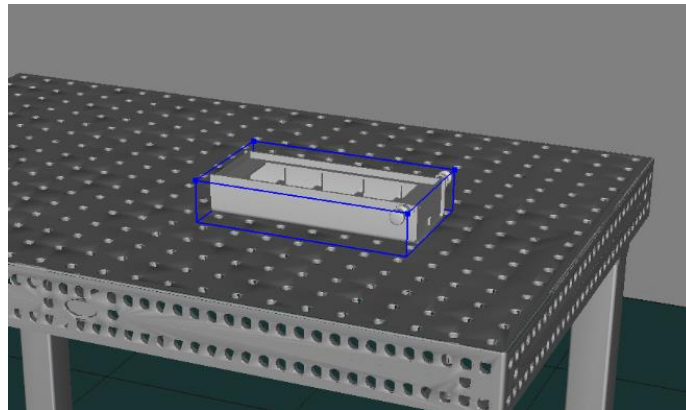


Рисунок 72 - Схема результата детектирования области локализации корпуса магнитного устройства

На основании контура области локализации, относительно контура верхней грани была построена траектория трехмерного сканирования сложной по форме детали. Результат замера времени трехмерного сканирования корпуса магнитного устройства по всему объему испытаний составил $t_{a12} = 2,2$ минуты. Облако точек,

полученное в ходе одного из испытаний в процессе сканирования корпуса магнитного устройства изображено на рисунке 73.

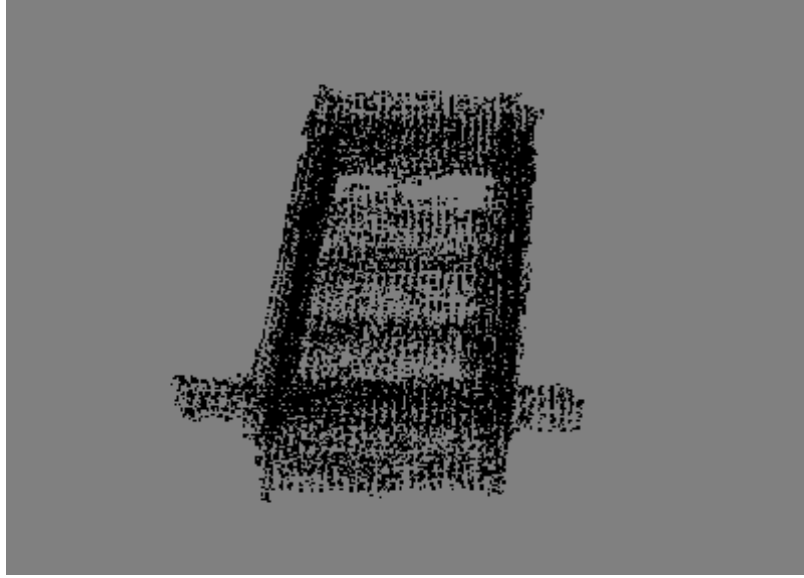


Рисунок 73 - Результат трехмерного сканирования корпуса магнитного устройства

Модель корпуса магнитного устройства была трансформирована в облако точек. Результат трансформации изображен на рисунке 74.

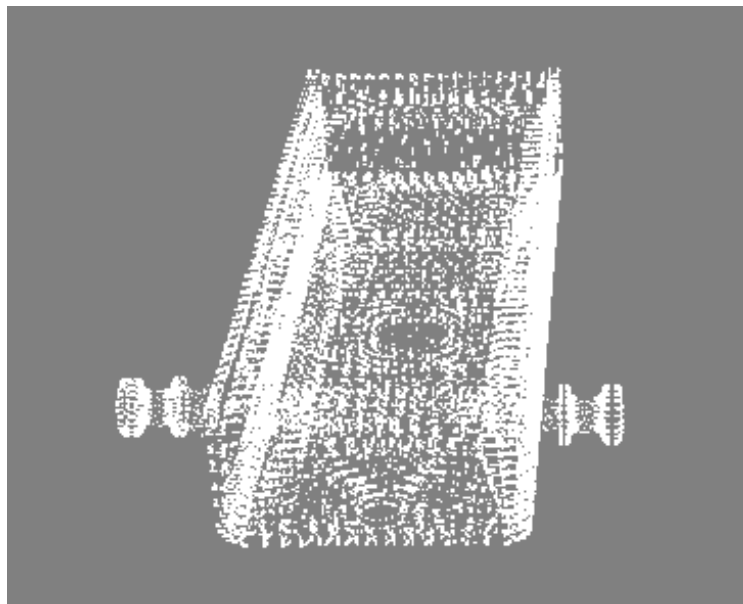


Рисунок 74 - Результат трансформации полигональной модели корпуса магнитного устройства в облако точек

Результат сканирования и трансформированная в облако точек модель корпуса в ходе всего объема испытаний были успешно сопоставлены. Результат выравнивания облаков точек изображен на рисунке 75.

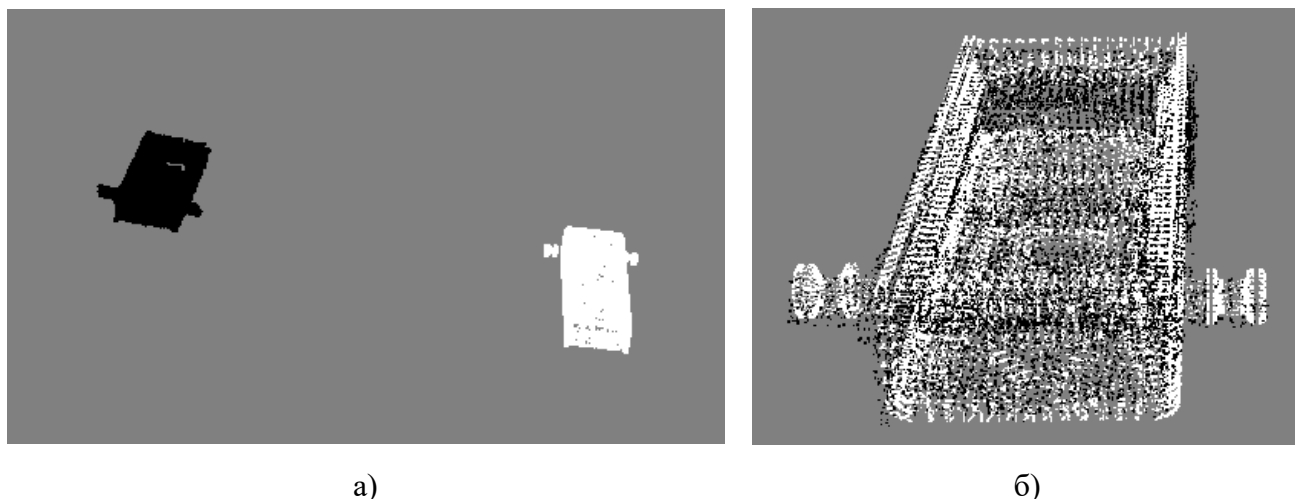


Рисунок 75 - Сопоставление положения трехмерного результата сканирования корпуса магнитного устройства и его модели трансформированной в облако точек: а – исходная локализация; б – сопоставление положения

Результаты замера времени t_{a13} выполнения сопоставления положения корпуса магнитного устройства с моделью в полном объеме испытаний представлены в таблице 16.

Среднее значение $\langle t_{a13} \rangle$ времени t_{a13} составило $\langle t_{a13} \rangle = 0.3$ минуты.

Таблица 16 – Результаты замера времени t_{a13} выполнения сопоставления положения корпуса магнитного устройства с моделью

| Номер испытания | Время t_{a13} , мин |
|-----------------|-----------------------|
| 1 | 0.32 |
| 2 | 0.33 |
| 3 | 0.28 |
| 4 | 0.3 |
| 5 | 0.31 |

Транслированная технологическая траектория была скорректирована во всех 36 точках лазерной сварки корпуса магнитного устройства. Фотография области между свариваемыми кромками и результат их распознавания с последующим определением корректного положения изображены на рисунке 76.

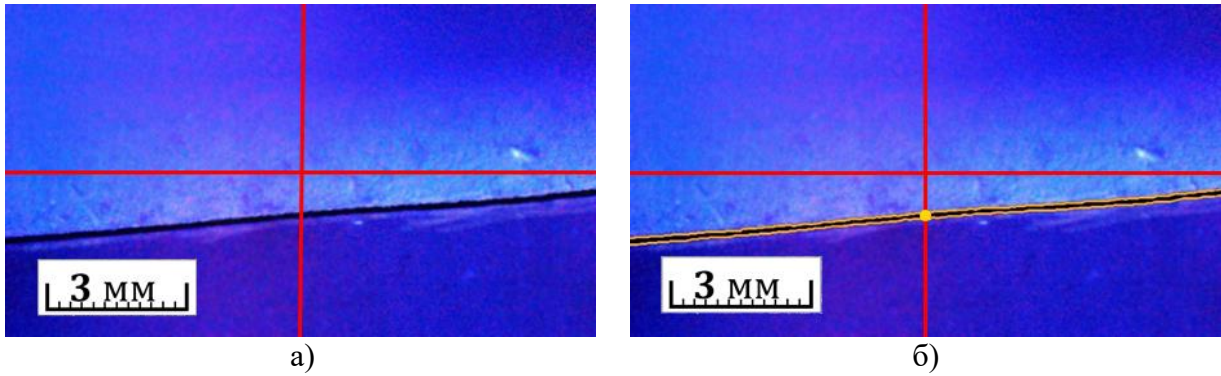


Рисунок 76 - Результат распознавания кромок (желтые линии) и определения корректного положения (желтая точка) в точке транслированной траектории ЛС корпуса магнитного устройства

Замер времени выполнения операции корректировки точек транслированной траектории ЛС корпуса магнитного устройства представлен в таблице 17.

Таблица 17 – Результат замера времени t_{a2} выполнения корректировки точек транслированной траектории ЛС корпуса магнитного устройства

| Номер испытания | Время t_{a2} , мин |
|-----------------|----------------------|
| 1 | 4.0 |
| 2 | 4.04 |
| 3 | 4.02 |
| 4 | 3.98 |
| 5 | 4.02 |

Среднее значение $\langle t_{a2} \rangle$ времени t_{a2} составило $\langle t_{a2} \rangle = 4$ минуты.

Время t_{a3} выполнения операции подготовки УП робота и лазера на основе транслированной технологической траектории и данных проектного решения ЛС по всему объему испытаний составило $t_{a3} < 0.01$ минуты.

Время t_a выполнения автоматизированной технологической подготовки УП для производства детали корпуса магнитного устройства лазерной сваркой составило:

$$t_a = 0.01 + 2.2 + 0.3 + 4 + 0.01 \approx 6.5 \text{ минуты.}$$

Значение отношения, характеризующего сокращение времени технологической подготовки УП корпуса магнитного устройства составило:

$$\frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{а}}} = \frac{27}{6.5} = 4,1.$$

Оценка $\frac{t_{\text{н1}}}{t_{\text{а1}}}$ сокращения времени выполнения операции калибровки положения модели в сравнении с операцией трансляции технологической траектории для корпуса магнитного устройства составила:

$$\frac{t_{\text{н1}}}{t_{\text{а1}}} = \frac{t_{\text{н1}}}{t_{\text{а11}} + t_{\text{а12}} + t_{\text{а13}}} = \frac{10}{2.5} = 4.$$

Оценка $\frac{t_{\text{н3}}}{t_{\text{а2}}}$ сокращения времени выполнения операции отладки УП относительно свариваемой детали в сравнении с операцией корректировки точек транслированной траектории для корпуса магнитного устройства составила:

$$\frac{t_{\text{н3}}}{t_{\text{а2}}} = \frac{12}{4} = 3.$$

4.3.3 Консоль суппорта погрузчика Ant-1000

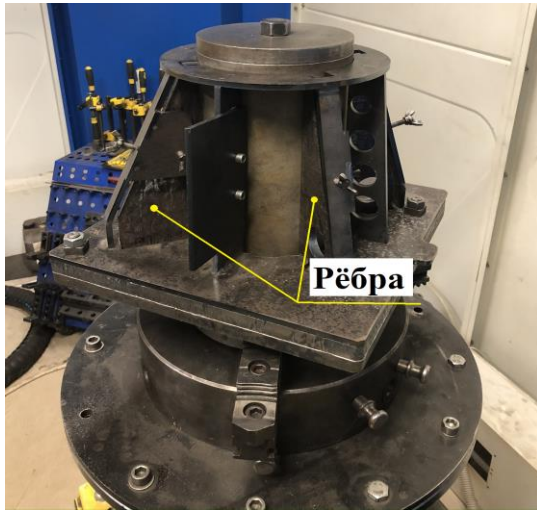
Деталь консоль суппорта производится ЛС в четыре этапа. Во всех этапах деталь размещается в позиционере.

На первом производственном этапе прихватываемые ребра устанавливались в оснастке и стягивались к трубе. Произвольным образом, согласно разработанному технологическому решению ЛС, сборка устанавливалась в зажимной патрон позиционера (см. рисунок 77 а). После автоматизированной подготовки УП и выполнения прихвата осуществлялся демонтаж оснастки.

На втором производственном этапе консоль сохраняла свое положение в зажимном патроне позиционера (см. рисунок 77 б). На площадке устанавливались пластики и зажимались в оснастке. После автоматизированной подготовки УП и прихвата пластики оснастка снималась.

На третьем этапе консоли сохраняла свое размещение в зажимном патроне позиционера (см. рисунок 77 в). Для процесса трехмерного сканирования размещался конструктивный элемент нарушения симметричности (см. рисунок 78 а). После выполнения трехмерного сканирования осуществлялся его демонтаж.

По завершению автоматизированной подготовки УП и сварки верхних соединений пластины с трубой, платиками и ребрами оснастка демонтировалась.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 77 - Расположение консоли суппорта погрузчика Ant-1000 в патроне позиционера в четырех производственных этапах

На четвертом этапе консоль снималась с позиционера и зажималась верхней частью трубы в патроне (см. рисунок 77 г). В четвертом этапе, так же как и в третьем для процесса трехмерного сканирования осуществлялась установка конструкционного элемента нарушающего симметричность (см. рисунок 78 б).

В качестве области локализации детали выступала рабочая область инструмента относительно позиционера во всех четырех этапах подготовки УП,

поэтому операция детектирования локализации детали не осуществлялась. В таком случае время t_{a11} выполнения операции детектирования локализации во всех четырех этапах будет $t_{a11} = 0$.



а)

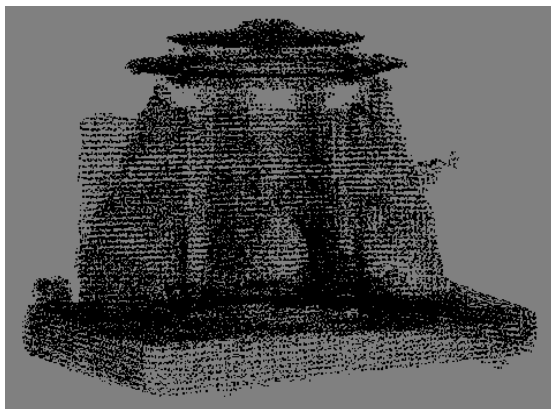


б)

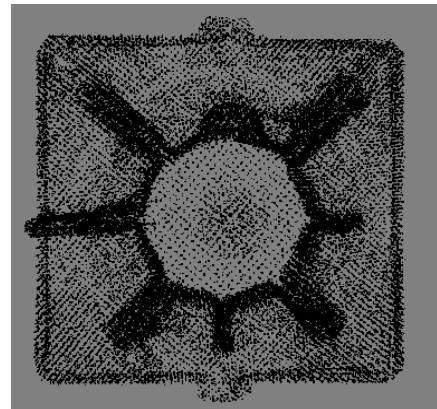
Рисунок 78 - Установленные элементы нарушения симметричности конструкции консоли для осуществления процесса сопоставления положения: а – третьего этапа; б – четвертого этапа

По результату выполнения операции трехмерного сканирования в объеме испытаний были получены трехмерные облака точек. Замер времени выполнения операции трехмерного сканирования консоли суппорта во всех четырех этапах $t_{a12} = 0.5$ минуты.

Облака точек результата сканирования консоли на первом, втором, третьем и четвертом производственных этапах изображены на рисунках 79, 80, 81 и 82 соответственно.

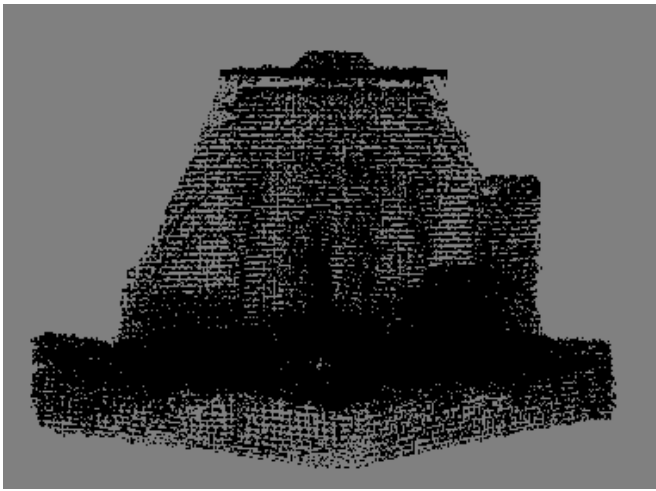


а)

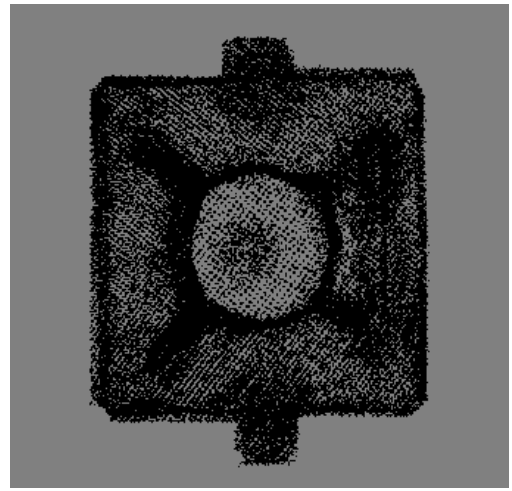


б)

Рисунок 79 - Результат трехмерного сканирования консоли суппорта на первом производственном этапе

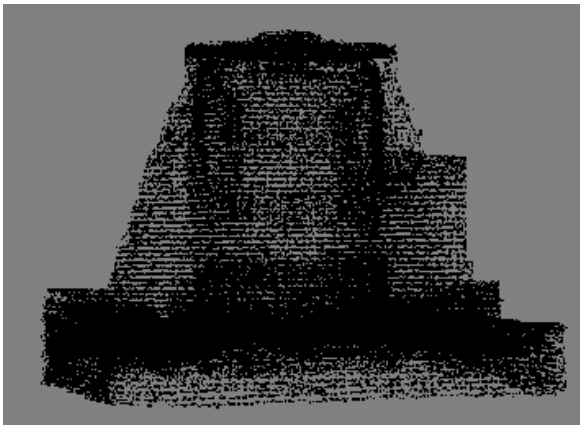


a)

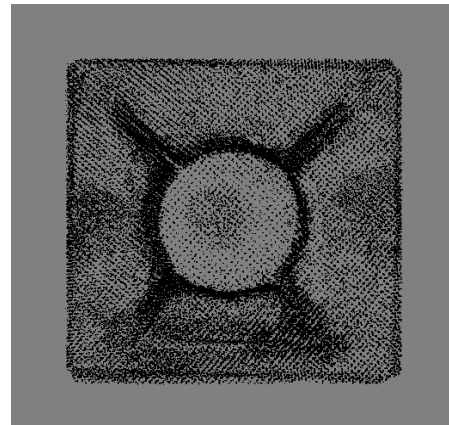


б)

Рисунок 80 - Результат трехмерного сканирования консоли суппорта на втором производственном этапе

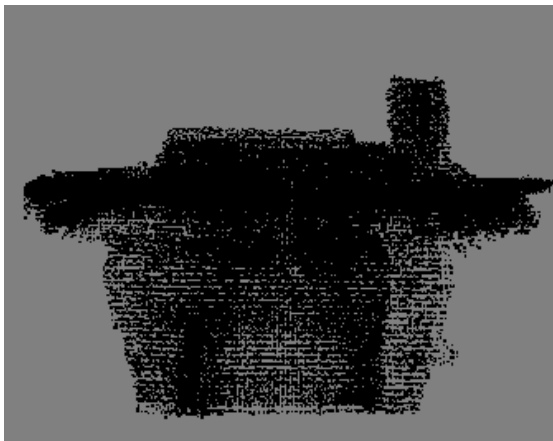


a)

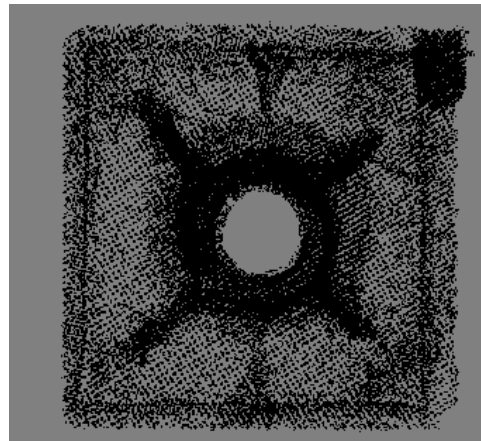


б)

Рисунок 81 - Результат трехмерного сканирования консоли суппорта на третьем производственном этапе



a)



б)

Рисунок 82 - Результат трехмерного сканирования консоли суппорта на четвертом этапе производства

Результаты трансформации полигональных моделей в облака точек четырех производственных этапов консоли суппорта представлены на рисунке 83.

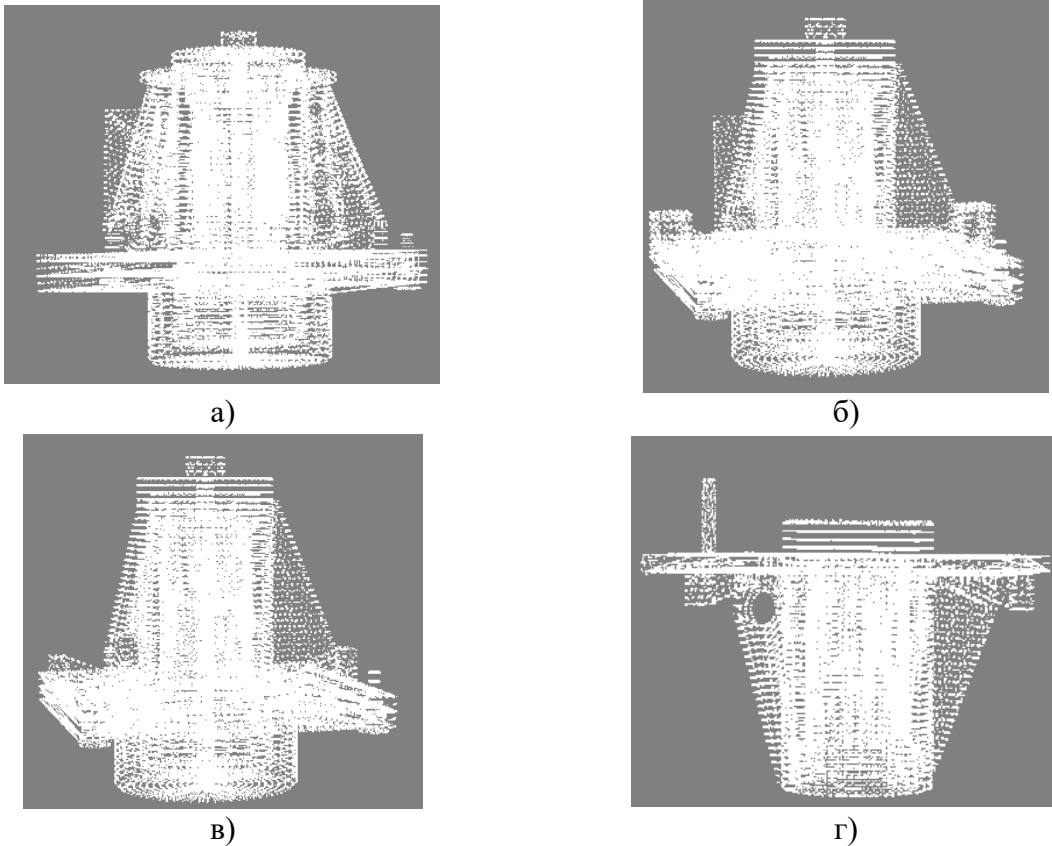
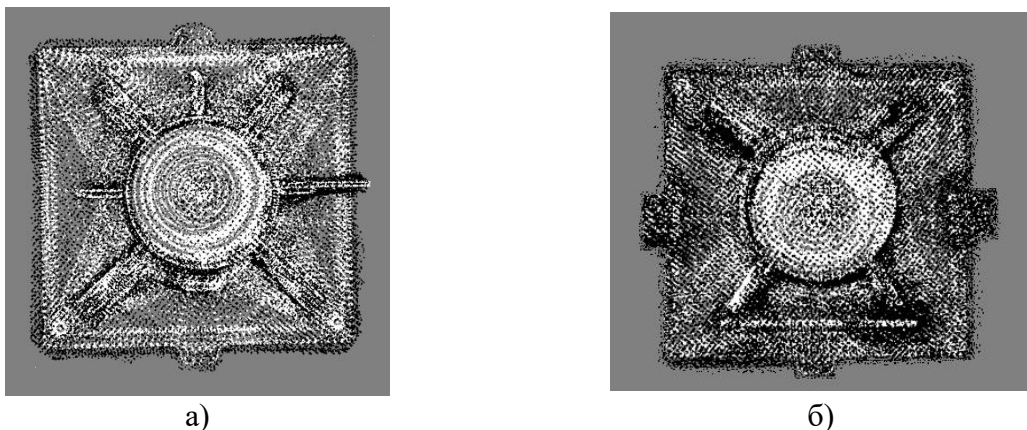
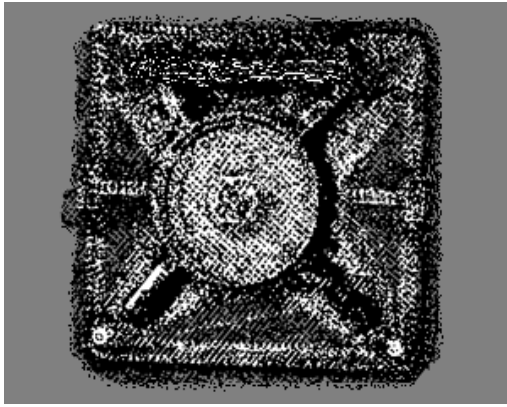


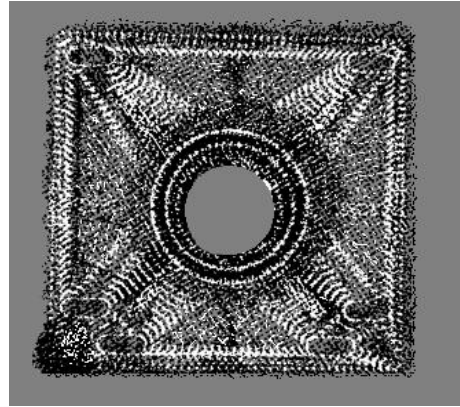
Рисунок 83 - Результаты трансформации моделей консоли суппорта в облака точек четырех производственных этапов: а – первый этап; б – второй этап; в – третий этап; г – четвертый этап

В ходе экспериментального исследования подготовки УП консоли суппорта в полном объеме испытаний в четыре этапа было осуществлено сопоставление положения результата сканирования и облако точек трансформированного из трехмерной полигональной модели. Результат сопоставления изображен на рисунке 84.





в)



г)

Рисунок 84 - Сопоставление положения (вид сверху) трехмерного результата сканирования консоли суппорта и его модели трансформированной в облако точек в четырех этапах: а – первый этап; б – второй этап; в – третий этап; г – четвертый этап

Время выполнения операции сопоставления положения результатов трехмерного сканирования консоли суппорта и трансформированных в облака точек моделей на каждом производственном этапе представлена в таблице 18.

Таблица 18 – Результат время t_{a13} выполнения сопоставления положения консоли суппорта с моделью для четырех производственных этапов

| Номер этапа | Номер испытания | Время t_{a13} , мин |
|-------------|-----------------|-----------------------|
| 1 | 1 | 1.41 |
| 1 | 2 | 1.39 |
| 1 | 3 | 1.32 |
| 1 | 4 | 1.36 |
| 1 | 5 | 1.45 |
| 2 | 1 | 1.52 |
| 2 | 2 | 1.59 |
| 2 | 3 | 1.34 |
| 2 | 4 | 1.36 |
| 2 | 5 | 1.53 |
| 3 | 1 | 1.59 |
| 3 | 2 | 1.79 |
| 3 | 3 | 1.86 |
| 3 | 4 | 1.95 |
| 3 | 5 | 1.90 |
| 4 | 1 | 0.56 |

| | | |
|---|---|------|
| 4 | 2 | 0.72 |
| 4 | 3 | 0.56 |
| 4 | 4 | 0.53 |
| 4 | 5 | 0.60 |

Среднее значения $\langle t_{a13} \rangle$ времени t_{a13} сопоставления положения результата сканирования и модели консоли суппорта трансформированной в облако точек на четырех производственных этапах представлено в таблице 19.

Таблица 19 – Среднее значение $\langle t_{a13} \rangle$ времени t_{a13} сопоставления приложения консоли суппорта с моделью в четырех производственных этапах

| № этапа | Время $\langle t_{a13} \rangle$, мин |
|---------|---------------------------------------|
| 1 | 1.5 |
| 2 | 1.6 |
| 3 | 1.8 |
| 4 | 0.6 |

Транслированная технологическая траектория была скорректирована в 16 точках на первом этапе, в 12 точках на втором этапе, в 42 точках на третьем этапе и в 1 точке на четвертом этапе. Фотография области между свариваемыми кромками и результат их распознавания с последующим определением корректного положения изображены на рисунках 85, 86 и 87.

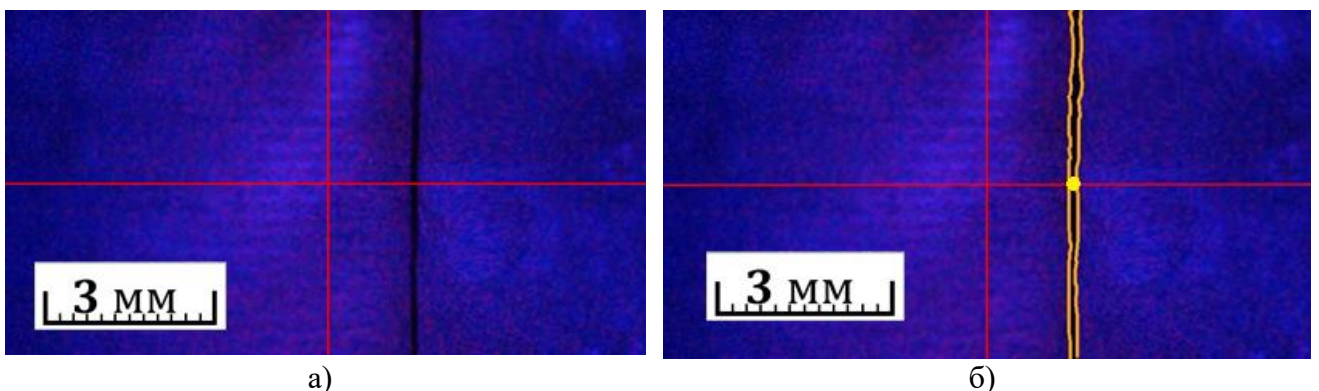


Рисунок 85 - Результаты распознавания кромок (желтые линии) и определения корректного положения (желтая точка) в точке прихвата ребер к трубе

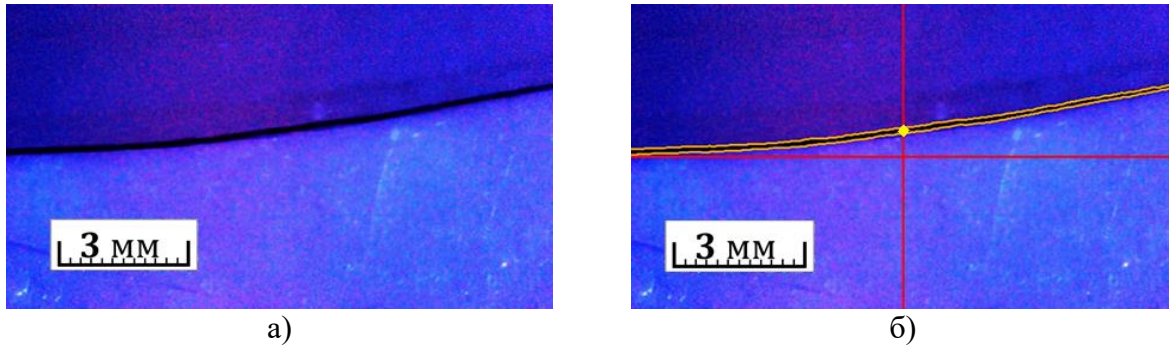


Рисунок 86 - Результаты распознавания кромок (желтые линии) и определения корректного положения (желтая точка) в точке ЛС трубы и пластины

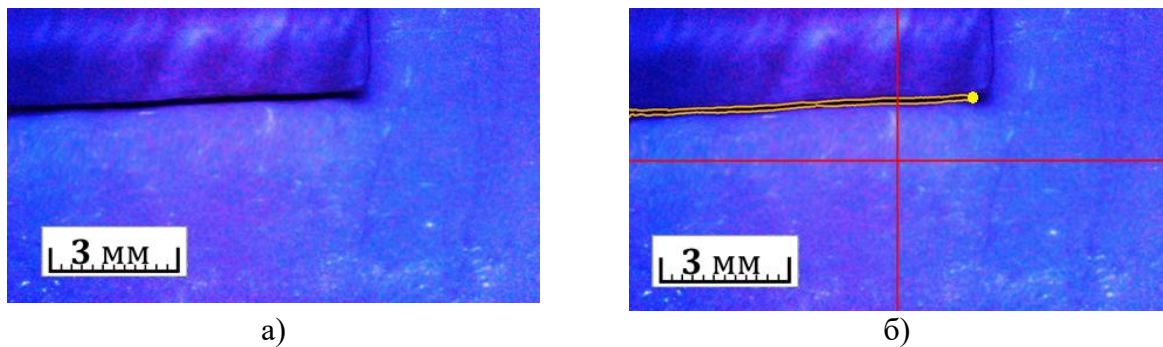


Рисунок 87 - Результаты распознавания кромок (желтые линии) и определения корректного положения (желтая точка) в точке ЛС пластика и пластины

Замер времени t_{a2} выполнения операции корректировки точек транслированной траектории ЛС на каждом производственном этапе консоли суппорта представлен в таблице 20.

Таблица 20 – Результат замера времени t_{a2} выполнения корректировки точек транслированной траектории ЛС консоли суппорта

| Номер этапа | Номер испытания | Время t_{a2} , мин |
|-------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 1 | 3.69 |
| 1 | 2 | 3.68 |
| 1 | 3 | 3.68 |
| 1 | 4 | 3.70 |
| 1 | 5 | 3.69 |
| 2 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 1.01 |
| 2 | 3 | 0.99 |
| 2 | 4 | 1.01 |

| | | |
|---|---|------|
| 2 | 5 | 1 |
| 3 | 1 | 4.02 |
| 3 | 2 | 4.01 |
| 3 | 3 | 3.99 |
| 3 | 4 | 4.03 |
| 3 | 5 | 4.03 |
| 4 | 1 | 0.1 |
| 4 | 2 | 0.1 |
| 4 | 3 | 0.1 |
| 4 | 4 | 0.1 |
| 4 | 5 | 0.1 |

Среднее значение $\langle t_{a2} \rangle$ время t_{a2} корректировки положения инструмента в точках транслированной технологической траектории на четырех производственных этапах представлено в таблице 21.

Таблица 21 – Среднее значение $\langle t_{a2} \rangle$ времени t_{a2} корректировки положения инструмента в точка технологической траектории ЛС консоли

| № этапа | Время $\langle t_{a2} \rangle$, мин |
|---------|--------------------------------------|
| 1 | 3.7 |
| 2 | 1 |
| 3 | 4 |
| 4 | 0.1 |

Время t_{a3} выполнения подготовки УП робота и лазера на основе транслированной технологической траектории и данных проектного решения ЛС по всему объему испытаний составило $t_{a3} < 0.01$ минуты.

Оценочное время t_a технологической подготовки УП для производства консоли суппорта лазерной сваркой:

$$t_a = 0.01 + 4 \cdot 0.5 + 1.5 + 1.6 + 1.8 + 0.6 + 3.7 + 1 + 4 + 0.1 \approx 16.3 \text{ минуты}$$

Значение отношения, характеризующего сокращение времени технологической подготовки УП консоли составило:

$$\frac{t_H}{t_a} = \frac{65}{16.3} \approx 4.$$

Оценка $\frac{t_{н1}}{t_{а1}}$ сокращения времени выполнения операции калибровки положения модели в сравнении с операцией трансляции технологической траектории для консоли суппорта составила:

$$\frac{t_{н1}}{t_{а1}} = \frac{t_{н1}}{t_{а11} + t_{а12} + t_{а13}} = \frac{30}{7.5} = 4.$$

Оценка $\frac{t_{н3}}{t_{а2}}$ сокращения времени выполнения операции отладки УП относительно свариваемой детали в сравнении с операцией корректировки точек транслированной траектории для консоли суппорта составила:

$$\frac{t_{н3}}{t_{а2}} = \frac{25}{8.8} = 2.8.$$

4.4 Выводы по главе

- Создана подсистема АС ТПП подготовки УП для промышленного ЛРК-С.
- Результаты экспериментального исследования созданной подсистемы АС ТПП показали сокращение времени выполнения технологической подготовки УП по сравнению с нормой времени на производстве НОЦ ВЛТ ВлГУ для: формы вспенивания в 3 раза, корпуса магнитного устройства в 4.1 раза и консоли суппорта в 4 раза.
- По результату экспериментального исследования подсистемы АС ТПП технологической подготовки УП было определено: сокращение времени выполнения операции калибровки положения модели, в сравнении с операцией трансляции технологической траектории движения инструмента из пространства моделей в рабочее пространство промышленного комплекса средствами датчика глубины, более чем в 3 раза; сокращение времени выполнения операции отладки УП работа относительно свариваемой детали, в сравнении с операцией автоматизированной корректировки точек транслированной траектории, более чем в 2.5 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика технологической подготовки УП, основанная на проектном решении ЛС и автоматизированных операциях трансляции траектории инструмента из пространства моделей в рабочее пространство ЛРК-С датчиком глубины и корректировки положения инструмента в транслированных точках траектории средствами распознавания свариваемых кромок на видеоизображении.

2. Разработан метод автоматизированной трансляции проектируемой технологической траектории из пространства моделей в рабочее пространство ЛРК-С средствами датчика глубины. В своем составе метод включает определение области локализации свариваемой детали, формализацию подготовки траектории инструмента сканирования, сопоставление результата трехмерного сканирования свариваемой детали с ее моделью. Реализация метода позволяет сократить время выполнения в сравнении с операцией калибровки положения модели более чем в 3 раза.

3. Модифицированы модели и алгоритмы метода корректировки точек транслированной траектории инструмента относительно свариваемых кромок, распознаваемых на видеоизображении, позволяющие осуществить: корректировку положения фокальной плоскости лазерной головки, сегментацию области между свариваемыми кромками, распознавание кромок и определение корректного положения. Реализация моделей и алгоритмов обеспечивает сокращение времени отладки положения инструмента в УП относительно свариваемых кромок более чем в 2.5 раза.

4. На основании теоретических разработок осуществлено создание подсистемы АС ТПП по автоматизированной технологической подготовке УП промышленного ЛРК-С.

5. Результаты экспериментального исследования созданной подсистемы АС ТПП показали сокращение времени выполнения технологической подготовки УП в сравнении с нормой времени в НОЦ ВЛТ ВлГУ более чем в 3 раза.

б. Результаты работы переданы для применения на производственное предприятие ООО «ИЦ при ВлГУ» в г. Владимире и использованы в учебном процессе направлений бакалавриата и магистратуры ВлГУ. Соответствие произведенных изделий требованиям конструкторской документации подтверждено при входном контроле на АО «Ковровский электромеханический завод» в г. Коврове.

Достигнутые в диссертации результаты предлагается использовать при развитии автоматизации технологической подготовки управляющих программ лазерных роботизированных комплексов, реализующих технологические процессы порошковой наплавки и термоупрочнения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АС ТПП – автоматизированная система технологической подготовки производства

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическими процессами

БД – база данных

ЛРК-С – лазерный роботизированный комплекс сварки

ЛС – лазерная сварка

РМО – рабочее место оператора

РМТ – рабочее место технолога

САПР – система автоматизированного проектирования

УП – управляющая программа

ЧПУ – численно программное управление

ЭВМ – электронно-вычислительная машин

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шиганов, И.Н.** Исследование влияния скорости лазерной сварки на свойства и структуру алюминиевых сплавов, легированных литием и скандием / И.Н. Шиганов и [др.] // Сварочное производство, 2005. – № 7. – С. 21-26. – ISSN: 0491-6441.
2. **Шиганов, И.Н.** Лазерная сварка алюминиевых сплавов авиационного назначения / И.Н. Шиганов, С.В. Шахов, А.А. Холопов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение» – Спец. выпуск. –2012. – №. 5. – С. 34-50. – ISSN 0236-3941.
3. **Туричин, Г.А.** Теоретические основы лазерной сварки металлов: учебное пособие / Г.А. Туричин, Е.А. Валдайцева и Е.В. Земляков. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 140 с.
4. **Шиганов, И.Н.** Поперечные деформации при лазерной, электронно-лучевой и аргонно-дуговой сварке / И.Н. Шиганов, А.И. Пашкевич и В.В. Иванов // Автоматическая сварка, 1983. – № 11. ISSN: 0005-111X.
5. **Рахимов, Р.Р.** Технологические особенности лазерной сварки металлических изделий / Р.Р. Рахимов и В.В. Звездин // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация, 2020. – №2. – С. 29-36.
6. **Умнов, В.П.** Комплексование манипуляционной исполнительной системы роботизированных технологических центров гибридной обработки / В.П. Умнов, И.Н. Егоров и С.В. Молостов // Современные проблемы науки и образования, 2014. – №1. – С. 190-197.
7. **Умнов, В.П.** Функциональные связи в комплексированных исполнительных системах технологических роботов и их нарушения / В.П. Умнов и И.Н. Егоров // Фундаментальные исследования, 2015. – №12. – С. 955-959.
8. **Шолохов, М.А.** Опыт внедрения роботов в сварочное производство / М.А. Шолохов, А.А. Зиновкин, А.М. Фивейский и А.Ю. Мельников // Сварка и диагностика, 2014. – №4, – С. 41-43.

9. **Рассказчиков, Н.Г.** Управление роботизированным лазерным комплексом / Н.Г. Рассказчиков и А.В. Пименов // Мехатроника, Автоматика и Робототехника, 2020. – №5. – С. 70-73.
10. **Туричин, Г.А.** Инновационные лазерные технологии на судостроительном производстве: экономические, технологические и организационные аспекты внедрения / Г.А. Туричин, М.Е. Гоголюхина и Л.Э. Мамедова // АНИ: экономика и управление, 2018. – №4. – С. 316-318.
11. **Erdős, G.** Process planning and offline programming for robotic remote laser welding systems / Erdős, G. and [others] // International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2016. – Vol. 29. – №12, – PP. 1287-1306.
12. **Аверченков, А.В.** Автоматизированная подготовка производства инновационных изделий в условиях малых машиностроительных предприятий / А.В. Аверченков и Е.Э. Аверченкова // Вестник Брянского государственного технического университета, 2010. – №3, – С. 49-59.
13. **Krasilnikyants, E. V.** Robot Manipulator Control System / E. V. Krasilnikyants, A. A. Varkov, and V. V. Tyutikov // Automation and Remote Control, 2013. – Vol. 74, – PP. 1589-1598. ISSN 0005-1179.
14. **Технологическая** подготовка производства. Термины и определения основных понятий [Текст]: ГОСТ 14.004-83.-01.07.1983.
15. **Аверченков, А.В.** Автоматизация технологической подготовки производства для малых инновационных предприятий в машиностроении: автореф. дис. док. тех. наук: 05.13.06; [Место защиты: БГТУ], 2011. – 35 с.
16. **Вотинова, Е.Б.** Основы технологической подготовки производства: учебное пособие / Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов и А.М. Фивейский. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2017. – 172 с.
17. **Шамов, С.А.** Автоматизация подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ в условиях информационно - технологической среды: Автореф. дис. канд. тех. наук: 05.13.06; [Место защиты: МГТУ Станкин], 2012. – 24 с.
18. **Единая** система технологической подготовки производства. Правила организации работ по механизации и автоматизации инженерно-технических задач

и задач управления технологической подготовки производства. [Текст]: ГОСТ 14.401-73.-15.03.1973.

19. **Коростелев, В.Ф.** Автоматизация технологических процессов (АТП) и производств: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки дипломированных специалистов "Конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств"; "Автоматизир. технологии и пр-ва" / В.Ф. Коростелев. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-т, 2005. – 148 с.

20. **Савина, Е.С.** Сокращение срока технологической подготовки производства корпусных деталей на станках с числовым программным управлением / Е.С. Савина и В.Г. Гусев // Master's Journal, 2016. – №1. – С.153-157.

21. **Красильникъянц, Е. В.** Программное обеспечение системы управления IntNCR манипуляционным роботом / Е. В. Красильникъянц, А. А. Варков, В. В. Тютиков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 3. – С. 31-36.

22. **Варков, А. А.** Компоненты программного обеспечения манипуляционного робота / А. А. Варков, Е. В. Красильникъянц, В.В. Тютиков // Вестник ИГЭУ, 2011. – №4. – С.1-5.

23. **Tyutikov, V. V.** Robot Manipulator Control System with Dynamic Moment Compensation / V. V. Tyutikov, E. V. Krasilnikyants and A. A. Varkov // Automation and Remote Control, 2019. – Vol. 80, – PP. 189-199. ISSN 0005-1179.

24. **Larkin, N.** Automatic weld path generation for mesh objects / N. Larkin, A. Short, Z. Pan and S. van Duin // In 2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), 2017. – PP. 338-343.

25. **Смоленцева, Л.А.** Совершенствование технологической подготовки производства на основе информационной поддержки решений при разработке управляющих программ для оборудования с ЧПУ в условиях информационно-технологической среды / Л.А. Смоленцева и Л.А. Татарова // Вестник МГТУ Станкин, 2012. – №3. – С. 134-139.

26. **Pan, Z.** Recent progress on programming methods for industrial robots / Z. Pan and [others] // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012. – Vol. 28. – №2. – PP.87-94.
27. **Pan, Z.** Automated offline programming for robotic welding system with high degree of freedoms / Z. Pan and [others] // *In Advances in computer, communication, control and automation*, 2011. – Vol. 121. – PP. 685-692.
28. **Филаретов, В.Ф.** Разработка метода совмещения трехмерных моделей обрабатываемых деталей с их САД-моделями при наличии деформаций / Филаретов, В.Ф. и [другие] // *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2016. – №3. – С. 60-69.
29. **Аверченков, А.В.** Научное исследование технологии обработки заготовок на станках с ЧПУ и программирование в САМ-системе / А.В. Аверченков, И.Е. Колошкина и С.А. Шептунов // *Научные исследования в машиностроении*, 2019. – №4. – С. 31-39.
30. **Kuss, A.** Manufacturing task description for robotic welding and automatic feature recognition on product CAD models / A. Kuss, T. Dietz, K. Ksensow and A. Verl // *Procedia Cirp*, 2017. – Vol. 60. – PP. 122-127.
31. **Polden, J.** Adaptive partial shortcuts: Path optimization for industrial robotics / J. Polden, Z. Pan, N. Larkin and S. van Duin // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017. – Vol. 86. – №1, – PP. 35-47.
32. **Horváth, C.M.** Supportive Robotic Welding System for Heavy, Small Series Production with Non-Uniform Welding Grooves / C.M. Horváth and P. Korondi // *Acta Polytechnica Hungarica*, 2018. – Vol. 15. – №8. – PP. 141-165.
33. **Trapani, S.** Task Oriented Programming and Service Algorithms for Smart Robotic Cells / *Doctoral Dissertation, Computer Science. Politecnico Di Torino*, 2019. – p. 150.
34. **Люхтер, А.Б.** Перенос координат трехмерных САД-моделей в пространство обрабатываемых деталей в роботизированных станочных комплексах / А.Б. Люхтер, М. Ю. Звягин, А. С. Голубев и Д.В. Родионов // *Динамика сложных систем - XXI век*, 2017. Т. 11. – №1. – С. 40-46.

35. **Larkin, N.** 3D mapping using a ToF camera for self programming an industrial robot / N. Larkin, Z. Pan, S. Van Duin and J. Norrish // In 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2013. – PP. 494-499. – IEEE.
36. **Bedaka, A.K.** Automatic robot path integration using three-dimensional vision and offline programming / A.K. Bedaka, J. Vidal and C.Y. Lin // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. – Vol. 102. – №5. – PP. 1935-1950.
37. **Попов, Д.И.** Обзор технологии Intel RealSense / Д.И. Попов, Д.Г. Демидов и В.А. Зотов // Вестник МГУП, 2015. – №6. – 4 с.
38. **Lourenço, F.** Intel RealSense SR305, D415 and L515: Experimental Evaluation and Comparison of Depth Estimation / F. Lourenço and H. Araujo // In Proceedings of the 16th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2021), 2021. – Vol. 4. – PP. 362-369.
39. **Коряков, Г.В.** Технология ToF на примере камеры Kinect Azure / Г.В. Коряков // Инновационное развитие наукоемких технологий и интеллектуальных систем, Сборник статей III Международной научно-практической конференции, 2020. – С. 39-44.
40. Ahmed, S.M. Object detection and motion planning for automated welding of tubular joints / S.M. Ahmed and [others] // In 2016 IEEE /RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016. – PP. 2610-2615. – IEEE.
41. **Maiolino, P.** Flexible robot sealant dispensing cell using RGB-D sensor and off-line programming / P. Maiolino and [others] // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017. – Vol. 48. – PP. 188-195.
42. **Филаретов, В.Ф.** Разработка алгоритма построения компьютерных моделей обрабатываемых изделий с помощью систем технического зрения / В.Ф. Филаретов, Д.А. Юхимец, А.В. Зувев и А.С. Губанков // Десятая всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2017), 2017. – С. 245-247.
43. **Филаретов, В.Ф.** Метод обработки гибких деталей произвольной геометрической формы с помощью многозвенных манипуляторов, оснащаемых системами технического зрения / В.Ф. Филаретов, Д.А. Юхимец, А.В. Зувев и А.С.

Губанков // Сетевое партнерство в науке, промышленности и образовании, 2016. – С. 193-200.

44. **Звездин, В.В.** Позиционирование лазерного излучения относительно сварного шва как показатель качества технологического процесса / В.В. Звездин, А.В. Хамадеев, Р.Г. Загиров и И.Р. Шангараев // Вестник казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева, 2008. – №3. – С. 17-19. – издательство КГТУ им. А.Н. Туполева.

45. **Звездин, В.В.** Метод управления лазерным технологическим комплексом сварки металлов / В.В. Звездин, И.Х. Ибрафилов и Григорьянц А.Г. // Вестник МГТУ им. НЭ Баумана. Сер. Машиностроение, 2012. – №6. – С. 190-196.

46. **Ahn, M.S.** Analysis and noise modeling of the Intel RealSense D435 for mobile robots / M.S. Ahn and [others] // In 2019 16th International Conference on Ubiquitous Robots (UR), 2019. – PP. 707-711. – IEEE.

47. **Сао, Y.P.** Real-time high-accuracy three-dimensional reconstruction with consumer RGB-D cameras / Y.P. Cao, L. Kobbelt and S.M. Hu // ACM Transactions on Graphics (TOG), 2018. – Vol. 37. – №5. – PP. 1-16.

48. **Кобзев, А.А.** Анализ алгоритмов коррекции программной траектории в устройстве формирования управляющего воздействия для приводов робототехнических систем / А.А. Кобзев, Н.А. Новикова, А.В. Лекарева и А.А. Махфуз // Современные проблемы науки и образования, 2014. – №6. – 9 с.

49. **Кобзев, А.А.** Исследование алгоритмов адаптации управляющего воздействия для приводов робототехнических систем с помощью симулятора межкоординатных возмущений / А.А. Кобзев, Н.А. Новикова, А.В. Лекарева // Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2015. – №3. – С. 50-56.

50. **Njaastad, E. B.** Automatic Touch-Up of Welding Paths Using 3D Vision / E.B. Njaastad and O. Egeland // IFAC-PapersOnLine, 2016. – Vol. 49. – №31. – PP. 73-78.

51. **Zeng, J.** A vision-aided 3D path teaching method before narrow butt joint welding / J. Zeng and [others] // Sensors, 2017. – Vol. 17. – №5. – p. 15.

52. **Мальшев, Д.А.** Применение лазерной системы слежения для управления процессом автоматической гибридной сварки / Д.А. Мальшев и В.Ф. Коростелев

// Технические и математические науки. Студенческий научный форум, 2018. – С. 50-55.

53. **Larkin, N.** Automated programming for robotic welding / N. Larkin, A. Short, Z. Pan and S. van Duin // In Transactions on Intelligent Welding Manufacturing, 2018. – PP. 48-59. – Springer.

54. **Larkin, N.** Automatic program generation for welding robots from CAD / N. Larkin, A. Short, Z. Pan and S. van Duin // In 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2016. – PP. 560-565.

55. **Бабкин, К.Д.** Использование технического зрения в системе автоматического управления для лазерной сварки со сканированием / К.Д. Бабкин, Е.В. Земляков, Г.А. Туричин и А.В. Кузнецов // Материаловедение. Энергетика, 2015. – №3. – С. 142-148.

56. **Dinham, M.** Autonomous weld seam identification and localisation using eye-in-hand stereo vision for robotic arc welding / M. Dinham and G. Fang // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013. – PP. 288-301.

57. **Dinham, M.** Weld seam detection using computer vision for robotic arc welding / M. Dinham and G. Fang // 2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2012. – PP. 771-776. – IEEE.

58. **Shah, H. N. M.** An experiment of detection and localization in tooth saw shape for butt joint using KUKA welding robot / H. N. M. Shah and [others] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. – PP. 3153-3162.

59. **Chen, H.** Seam tracking and dynamic process control for high precision arc welding / H. Chen, T. Lin and S. Chen // Robotic Welding, Intelligence and Automation, 2011. – PP. 193-201. – Springer.

60. **Shi, F.** Efficient weld seam detection for robotic welding from a single image / F. Shi, L. Zhou, T. Lin and S. Chen // Robotic Welding, Intelligence and Automation, 2007. – PP. 289-294. – Springer.

61. **Cieszyński, W.** Real time trajectory correction system of optical head in laser welding / W. Cieszyński, M. Zięba and J. Reiner // Acta mechanica et automatica, 2015. – Vol. 9. – №4, – PP. 265-269.

62. **Nilsen, M.** In-process Monitoring and Control of Robotized Laser Beam Welding of Closed Square Butt Joints / M. Nilsen, F. Sikström, A.K. Christiansson and A. Ancona // *Procedia Manufacturing* 2018. – Vol. 25. – PP. 511-516.
63. **Huo, Y.K.** An adaptive threshold for the Canny Operator of edge detection / Y.K. Huo, G. Wei, Y.D. Zhang and L.N. Wu // In 2010 International Conference on Image Analysis and Signal Processing, 2010. – PP. 371-374. – IEEE.
64. **Голубев, А.С.** Технологический контроль стыков в процессе лазерной сварки средствами машинного зрения / А.С. Голубев и И.В. Власов // *Технические науки—от теории к практике*, 2015. – №10. – С. 7-11.
65. **Jeng, J.Y.** Prediction of laser butt joint welding parameters using back propagation and learning vector quantization networks / J.Y. Jeng, T.F. Mau and S.M. Leu // *Journal of Materials Processing Technology*, 2000. – Vol. 99. – PP. 207-218.
66. **Сварка.** Соединения, полученные электронно-лучевой и лазерной сваркой. Руководство по оценке уровня качества для дефектов. [Текст]: ГОСТ ISO 13919-2-2017.-01.03.2019.
67. **Iglesiasa, I.** Overview of the state of robotic machining: Current situation and future potential / I. Iglesiasa, M.A. Sebastián and J.E. Aresc // *ScienceDirect. Procedia Engineering*, 2015. – Vol. 132. – PP. 911-917.
68. **Рассказчиков, Н.Г.** Автоматизация процесса гибридной сварки рамных конструкций / Н.Г. Рассказчиков и А.Е. Кузнецов // *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2020. – Vol. 19. – PP. 26-30.
69. **Bedaka, A.K.** Autonomous path generation platform for robot simulation / A.K. Bedaka and C.Y. Lin // In 2017 international conference on advanced robotics and intelligent systems (ARIS), 2017. – PP. 63-68. – IEEE.
70. **Sucan, I.A.** The open motion planning library / I.A. Sucan, M. Moll and L.E. Kavraki // *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2012. – Vol. 19. – №4. – PP. 72-82.
71. **Zhou, Q.Y.** Open3D: A modern library for 3D data processing / Q.Y. Zhou, J. Park and V. Koltun // *arXiv*, 2018. – p. 6.

72. **Rusu, R.B.** 3d is here: Point cloud library (PCL) / R.B. Rusu and S. Cousins // In 2011 IEEE international conference on robotics and automation, 2011. – PP. 1-4. – IEEE.
73. **Rodionov, D.** The mechanisms of constructing trajectories of a laser robotic complex for 3d polygonal models / D. Rodionov, A. Lyukhter and V. Prokoshev // Beam Technologies and Laser Application, Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1109, 2018. – p. 9.
74. **Rodionov, D.** Methods of designing technological trajectories of single layer of laser powder cladding on flat surfaces of part model in CAM / D. Rodionov, A. Lyukhter and V. Prokoshev // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020), 2021. – Vol. 6. – PP. 509-519. – Springer.
75. **Саубанов, Р.Р.** Управление процессом лазерной сварки / Р.Р. Саубанов, В.В. Звездин, Р.М. Хисамутдинов и С.М. Портнов // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация, 2020. – №2. – С. 47-56.
76. **Ивашко, А.М.** Метод определения положения фокальной плоскости фокусирующих компонентов / А.М. Ивашко, В.Э. Кисель и Н.В. Кулешов // Приборы и методы измерений, 2017. – №1. – С. 49-54.
77. **Кобзев, А.А.** Способ преодоления избыточности при решении обратной задачи кинематики / А.А. Кобзев и А.В. Лекарева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии, 2017. – С. 73-74.
78. **Варков, А. А.** Решение задач кинематики и динамики манипуляционных роботов / А. А. Варков, В. В. Тютиков // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XV Бенардосовские чтения): Тезисы докладов Международной научно-технической конференции, Иваново, 27–29 мая 2009 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2009. – С. 253.
79. **Умнов, В.П.** Управление и моделирование движения многокоординатного комплексированного исполнительного устройства лазер-робота / В.П. Умнов, И.Н.

Егоров и С.В. Молостов // Современные проблемы науки и образования, 2014. – №6. – 9 с.

80. **Rodionov, D.** 3D modeling of laser robotic complex motion in CAM spaces / D. Rodionov, A. Lyukhter and V. Prokoshev // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2019. – PP. 1-6. – IEEE.

81. **Kucuk, S.** Robot kinematics: Forward and inverse kinematics / S. Kucuk and Z. Bingul // INTECH Open Access Publisher, 2006. – PP. 117-148.

82. **Родионов, Д.В.** Расчет точек технологической траектории лазерного роботизированного комплекса относительно инструмента и оснастки в САМ / Д.В. Родионов, А.Б. Люхтер и В.Г. Прокошев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление, 2019. – Т. 12. – № 4. – С. 123-135.

83. **Shinde, S.N.** Design of Welding Fixtures and Positiners / S.N. Shinde and [others] // Int. J. Eng. Res. Gen. Sci, 2014. – Vol.2. – №5. – PP. 681-689.

84. **Dong, Z.** Registration of large-scale terrestrial laser scanner point clouds: A review and benchmark / Z. Dong and [others] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020. – Vol. 163. – PP. 327-342.

85. **Маковецкий, А.Ю.** Точные решения вариационной задачи алгоритма ICP в классе аффинных преобразований / А.Ю. Маковецкий, С.М. Воронин, Д.В. Тихоньких и М.Н. Алексеев // Челябинский физико-математический журнал, 2017. – №3. – С. 282-294.

86. **Pottmann, H.** Registration without ICP / H. Pottmann, S. Leopoldseder and M. Hofer // Computer Vision and Image Understanding, 2004. – Vol. 95 – №1. – PP. 54-71.

87. **Приступа, А.В.** Применение глобальных дескрипторов формы для идентификации 3D объектов / А.В. Приступа, И.Л. Лапатин и А.В. Замятин // Вестн. Том. гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика, 2019. – №48. – С. 57-66.

88. **Rusu, R.B.** May. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration / R.B. Rusu, N. Blodow and M. Beetz // In 2009 IEEE international conference on robotics and automation, 2009. – PP. 3212-3217. – IEEE.

89. **Do Monte Lima, J.P.S.** An efficient global point cloud descriptor for object recognition and pose estimation / J.P.S. Do Monte Lima and V. Teichrieb // Proceedings of the 29th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images, 2016. – PP. 56–63.
90. **Hänsch, R.** Comparison of 3D interest point detectors and descriptors for point cloud fusion / R. Hänsch, T. Weber and O. Hellwich // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014. – Vol. 2. – №3, – p. 57.
91. **Guo, Y.** Rotational projection statistics for 3D local surface description and object recognition / Guo Y. and [others] // International journal of computer vision, 2013. – Vol. 105, – №1, – PP. 63-86.
92. **Jun, L.** Point cloud registration algorithm based on NDT with variable size voxel / L. Jun, L. Wei, D. Donglai and S. Qiang // In 2015 34th Chinese Control Conference (CCC), 2015. – PP. 3707-3712. – IEEE.
93. **Stoyanov, T.** Fast and accurate scan registration through minimization of the distance between compact 3D NDT representations / T. Stoyanov, M. Magnusson, H. Andreasson and A.J. Lilienthal // The International Journal of Robotics Research, 2012. – Vol. 31. – №12. – PP. 1377-1393.
94. **Magnusson, M.** The three-dimensional normal-distributions transform: an efficient representation for registration, surface analysis, and loop detection. Doctoral dissertation, Computer Sciences. Örebro universitet, 2009. – p. 201.
95. **Gao, Y.** HEALPix-IA: a global registration algorithm for initial alignment / Y. Gao and [others] // Sensors, 2019. – Vol.19. – №2. – p. 15.
96. **Shi, X.** The iterative closest point registration algorithm based on the normal distribution transformation / X. Shi and [others] // Procedia Computer Science, 2019. – Vol. 147. – PP. 181-190.
97. **Yousif, K.** Real-time RGB-D registration and mapping in texture-less environments using ranked order statistics / K. Yousif, A. Bab-Hadiashar and R. Hoseinnezhad // In 2014 IEEE /RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014. – PP. 2654-2660. – IEEE.

98. **Fitzgibbon, A.W.** Robust registration of 2D and 3D point sets / A.W. Fitzgibbon // Image and vision computing, 2003. – Vol. 21. – PP. 1145-1153.
99. **Njåstad, E.B.** Robotsveising med korreksjon fra 3D-kamera / Master's thesis, NTNU, 2015. – p. 155.
100. **Rodionov, D.** Methods of automatic correction of the technological trajectory of the laser robotic welding complex by means of computer vision / D. Rodionov, A. Lyukhter and V. Prokoshev // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2020. – p. 6. – IEEE.
101. **Rodionov, D.** Development of mechanisms for automatic correction of industrial complex tools in the processing of laser welding for small-scale and piece production using computer vision / D. Rodionov, A. Lyukhter and V. Prokoshev // Machines, 2020. 8(4), 86. – p. 18. ISSN 2075-1702.
102. **Chkalov, R.V.** Laser powder cladding automated control method based on advanced monitoring system of processing area by CCD-camera / R.V. Chkalov and [others] // In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. – Vol. 896. – p. 7. – IOP Publishing.
103. **Родионов, Д.В.** Управление лазерным роботизированным комплексом в краевых участках зоны обработки / Родионов Д. В. // Динамика сложных систем – XXI век, 2019. – Т. 13. – №3. – С. 5-13.
104. **Фу, К.** Робототехника / К. Фу, Р. Гонсалес и К. Ли //: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 624 с. – ISBN 5-03-000805-5.
105. **Цапко, И.В.** Алгоритмы и методы обработки информации в задачах трехмерного сканирования объектов / И.В. Цапко и С.Г. Цапко // Известия ТПУ, 2010. – №5. – С. 134-140.
106. **Катасонов, А.В.** Вокселизация функциональных форм / А.В. Катасонов, С.И. Вяткин и Б.С. Долговесов // International Conference Graphicon, 2005. – С. 372-377.
107. **Orts-Escolano, S.** Point cloud data filtering and downsampling using growing neural gas / S. Orts-Escolano, V. Morell, J. Garcia-Rodriguez and M. Cazorla // In The 2013 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2013. – PP. 1-8. – IEEE.

108. **Rusinkiewicz, S.** Efficient variants of the ICP algorithm / S. Rusinkiewicz and M. Levoy // In Proceedings third international conference on 3-D digital imaging and modeling, 2001. – PP. 145-152. – IEEE.
109. **Ватаманюк, И.В.** Применение методов оценивания размытости цифровых изображений в задаче аудиовизуального мониторинга / И.В. Ватаманюк и А.Л. Ронжин // Информационно-управляющие системы, 2014. – №4. – С. 16-23.
110. **Cardani, D.** Adventures in HSV space / D. Cardani // Laboratorio de Robótica, Instituto Tecnológico Autónomo de México, 2001. – p. 10.
111. **Marengoni, M.** High level computer vision using openCV / M. Marengoni and D. Stringhini // In 2011 24th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns, and Images, 2011. – PP. 11-24.
112. **Байбикова, Т.Н.** Комплексы программ для цифровой обработки изображений / Т.Н. Байбикова // Вестник МФЮА, 2016. – №2. – С. 255-266.
113. **Pouli, T.** Image Statistics in Visual Computing / T. Pouli, D.W. Cunningham and E. Reinhard – CRC Press, 2014. – p.354. – ISBN 978-1-4665-3982-2.
114. **Wu, S.T.** A non-self-intersection Douglas-Peucker algorithm / S.T. Wu and M.R.G. Marquez // In 16th Brazilian symposium on computer graphics and Image Processing (SIBGRAPI 2003), 2003. – PP. 60-66. – IEEE.
115. **Гуляев, В.В.** Автоматизация проектирования технологического процесса сварки / В. В. Гуляев и И. Г. Хармац // Известия ТулГУ. Технические науки, 2008. – №2. – С. 191-105.
116. **Программный** комплекс материалов и режимов лазерной сварки внахлест алюминия со сталью [Текст]: свид. о гос. рег. 2017662255 РФ: авторы и заявители Родионов Д.В., Бакулин А.А. и Люхтер А.Б.; патентообладатель ООО «Бакулин Моторс Групп»; заявл. 23.12.2016; опубл. 01.11.2017.
117. **Автоматизированная** система технологической подготовки производства на лазерном роботизированном комплексе (АС ТПП ЛРК) [Текст]: свид. о гос. рег. 2020619863 РФ: авторы и заявители Родионов Д.В., Люхтер А.Б. и Прокошев В.Г.; патентообладатель Люхтер А. Б.; заявл. 07.08.2020; опубл. 25.08.2020.

118. **Коростелев, В.Ф.** Алгоритмическое и программное обеспечение системы управления процессом литья с наложением давления / В.Ф. Коростелев, А.Н. Рассказчиков и И.Е. Мартынов // Мехатроника, автоматизация, управление, 2008. – №1. – С. 35-41.

119. **Модуль** формирования и выполнения управляющей программы для системы управления манипуляционным роботом [Текст]: свид. о гос. рег. 2016663272 РФ: авторы А. А. Варков, В. В. Тютиков, Е. В. Красильникьянц [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ). заявл. 12.10.2016 : опубл. 29.11.2016

120. **Автоматизированная** система управления технологическими процессами лазерного роботизированного комплекса (АСУ ТП ЛРК) [Текст]: свид. о гос. рег. 2020661002 РФ: авторы и заявители Родионов Д.В., Люхтер А.Б. и Прокошев В.Г.; патентообладатель Люхтер А.Б.; заявл. 07.08.2020; опубл. 16.09.2020.

Приложение А

Акты об использовании результатов диссертационной работы



**Владимирский
Инжиниринговый
центр при ВлГУ**

Общество с ограниченной ответственностью
«Владимирский инжиниринговый центр использования
лазерных технологий в машиностроении при ВлГУ»
ООО «ИЦ при ВлГУ»
ИНН 3327128460; КПП 332801001

600014, Владимир
ул. Белокопской д.3
корп. 4 лит.А пом.3
+7 (4922) 47 77 70
info@laser33.ru
www.laser33.ru



С.П. Милитеев

2021 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Д.В. Родионова «Совершенствование средств автоматизации технологической подготовки управляющих программ комплекса лазерной сварки при единичном и мелкосерийном производстве», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Научно-техническая комиссия в составе председателя – научного консультанта, доцента, к.т.н. В.Ф. Гуськова, заместителя начальника конструкторского-технологического отдела (КТО) А.В. Аброскина, инженер-технолог по сварке А.В. Завиткова установила, что в работе Центра используются следующие разработки диссертационной работы «Совершенствование средств автоматизации технологической подготовки управляющих программ комплекса лазерной сварки при единичном и мелкосерийном производстве»:

1. Автоматизированная система технологической подготовки производства на лазерном роботизированном комплексе сварки;
2. Автоматизированная система управления технологическими процессами лазерного роботизированного комплекса;
3. Подсистема взаимодействия с техническими средствами автоматизированной системы управления технологическими процессами лазерного роботизированного комплекса;
4. Подсистема взаимодействия технических средств измерения высоты наплавляемого валика с системой управления лазера;
5. Автоматизированная система управления лазерной роботизированной порошковой наплавкой.

Материалы указанных разработок позволяют уменьшить трудоемкость подготовки управляющих программ для лазерного роботизированного комплекса сварки при выполнении сторонних заказов.

Председатель комиссии:

Научный консультант, доцент, к.т.н.

Члены комиссии:

Зам. начальника КТО

Инженер-технолог по сварке

Гуськов В.Ф.

Аброскин А.В.

Завитков А.В.

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по образовательной
деятельности ВлГУ
А.А. Панфилов
«11» сентября 2021 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Д.В. Родионова «Совершенствование средств автоматизации технологической подготовки управляющих программ комплекса лазерной сварки при единичном и мелкосерийном производстве», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В учебном процессе направлений бакалавриата и магистратуры в дисциплинах «Проектирование автоматизированных систем» и «Автоматизация технологических процессов, манипуляционные, робототехнические системы» используются следующие материалы диссертационной работы Д.В. Родионова «Совершенствование средств автоматизации технологической подготовки управляющих программ комплекса лазерной сварки при единичном и мелкосерийном производстве»:

1. Методика технологической подготовки управляющих программ лазерных роботизированных комплексов сварки;
2. Метод трансляции проектируемой траектории инструмента из пространства моделей в рабочее пространство промышленного комплекса средствами датчика глубины, установленного на инструменте;
3. Алгоритмы и модели корректировки точек транслированной технологической траектории относительно свариваемого зазора, распознаваемых средствами технического зрения на изображениях.

Заведующий кафедрой
«Автоматизация, мехатроника и
робототехника» ВлГУ,
доктор технических наук, профессор

В.Ф. Коростелев В.Ф. Коростелев



**Владимирский
Инжиниринговый
центр при ВлГУ**

Общество с ограниченной ответственностью
«Владимирский инжиниринговый центр использования
лазерных технологий в машиностроении при ВлГУ»
ООО «ИЦ при ВлГУ»
ИНН 3327128460; КПП 332801001

600014, Владимир
ул. Белокопской д.3
корп. 4 лит.А пом.3
+7 (4922) 47 77 70
info@laser33.ru
www.laser33.ru

УТВЕРЖДАЮ

И.о. генерального директора
ООО «ИЦ при ВлГУ»



С.П. Милитеев
2021 г.

Выписка

из операционных карт серийно изготавливаемых изделий

Для серийно изготавливаемых изделий:

1. Формы вспенивания пеностекла (ОГМ.200.070.010-5 СБ), согласно операционной карте (ОК) «ВТФЕ.60190.00039», нормы времени калибровки положения модели 10 минут, генерации управляющих программ работа 1 минуту, отладки управляющей программы работа на детали 7 минут и генерации управляющей программы лазера 2 минуты. Общее время на подготовку управляющих программ составляет 20 минут;
2. Корпуса магнитного устройства (ЕАЖИ.684126.612.200 СБ), согласно ОК «ВТФЕ.60190.00040», нормы времени калибровки положения модели 10 минут, генерации управляющих программ работа 1 минуту, отладки управляющей программы работа на детали 12 минут и генерации управляющей программы лазера 4 минуты. Общее время на подготовку управляющих программ составляет 27 минут;
3. Консоли суппорта погрузчика Ant-1000 (ANT 651.80.00.700 СБ), согласно ОК «ВТФЕ.60190.00002», нормы времени калибровки положения модели 30 минут, генерации управляющих программ работа 1 минуту, отладки управляющей программы работа на детали 25 минут и создания управляющей программы лазера 9 минут. Общее время на подготовку управляющих программ составляет 65 минут.

Сведения предоставлены Родионову Дмитрию Викторовичу для проведения диссертационного исследований по теме: «Совершенствование средств автоматизации технологической подготовки управляющих программ комплекса лазерной сварки при единичном и мелкосерийном производстве».

Инженер-технолог по сварке

Завитков А.В.

«10» сентября 2021



УТВЕРЖДАЮ

Исполнительный директор АО «КЭМЗ»

М.И. Черников

АКТ

входного контроля

г. Ковров «10» сентября 2021г.

Предприятие АО «Ковровский электромеханический завод»

Комиссия в составе:



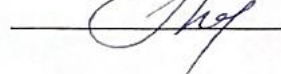
Главного металлурга – начальника производства Королева Александра Юрьевича

Начальника центральной заводской лаборатории Жокина Алексея Владимировича

ИО начальника отдела технического контроля Бухвалова Сергея Евгеньевича

составила настоящий акт о том, что партия консолей суппорта погрузчика Ant-1000 (ANT 651.80.00.700 СБ) в количестве 40 шт., произведенных ООО «Инжиниринговый центр при ВлГУ» на лазерном роботизированном сварочном комплексе, оснащенном подсистемой технологической подготовки управляющих программ робота и лазера автоматизированной системы технологической подготовки производства, созданной Родионовым Дмитрием Викторовичем по результатам диссертационной работы «Совершенствование средств автоматизации технологической подготовки управляющих программ комплекса лазерной сварки при единичном и мелкосерийном производстве», согласно указаниям ГОСТ ISO 13919-1-2017 «Сварка. Соединения, полученные электронно-лучевой и лазерной сваркой. Руководство по оценке уровня качества для дефектов. Часть 1. Сталь» соответствует требованиям конструкторской документации.

Комиссия:


 _____ А.Ю. Королев

 _____ А.В. Жокин

 _____ С.Е. Бухвалов

Приложение Б

Свидетельства регистрации программы ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020619863

Автоматизированная система технологической подготовки
производства на лазерных роботизированных комплексах
(АС ТПП ЛРК)

Правообладатель: *Люхтер Александр Борисович (RU)*

Авторы: *Родионов Дмитрий Викторович (RU), Люхтер Александр
Борисович (RU), Прокошев Валерий Григорьевич (RU), Гусев
Дмитрий Сергеевич (RU)*

Заявка № 2020618623

Дата поступления 07 августа 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 25 августа 2020 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020661002

Автоматизированная система управления
технологическими процессами лазерного роботизированного
комплекса (АСУ ТП ЛРК)

Правообладатель: *Люхтер Александр Борисович (RU)*

Авторы: *Родионов Дмитрий Викторович (RU), Люхтер Александр
Борисович (RU), Прокошев Валерий Григорьевич (RU), Гусев
Дмитрий Сергеевич (RU), Шамин Павел Юрьевич (RU)*

Заявка № 2020618605

Дата поступления 07 августа 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 сентября 2020 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020661572

Программный комплекс автоматизированной системы
управления лазерной порошковой наплавкой (АСУ ЛРПН)

Правообладатель: *Люхтер Александр Борисович (RU)*

Авторы: *Родионов Дмитрий Викторович (RU), Гусев Дмитрий
Сергеевич (RU), Люхтер Александр Борисович (RU), Прокошев
Валерий Григорьевич (RU)*

Заявка № 2020618610

Дата поступления 07 августа 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 25 сентября 2020 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Изrael

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017662255

**«Программный комплекс материалов и режимов лазерной
сварки внахлест алюминия со сталью»**

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
«Бакулин Моторс Групп» (ООО «БМГ»)* (RU)

Авторы: *Родионов Дмитрий Викторович (RU), Бакулин Алексей
Анатольевич (RU), Люхтер Александр Борисович (RU)*

Заявка № 2016664282

Дата поступления 23 декабря 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 01 ноября 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017662472

**Программа анализа и оптимизации результатов испытаний
сварных швов**

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
«Бакулин Моторс Групп» (ООО «БМГ»)* (RU)

Авторы: *Родионов Дмитрий Викторович (RU), Бакулин Алексей
Анатольевич (RU), Люхтер Александр Борисович (RU)*

Заявка № **2016664177**

Дата поступления **23 декабря 2016 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **09 ноября 2017 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020617348

**Подсистема взаимодействия технических средств измерения
высоты наплавленного валика с системой управления
лазера**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Владимирский государственный университет имени Александра
Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (RU)*

Авторы: *Родионов Дмитрий Викторович (RU), Гусев Дмитрий
Сергеевич (RU), Люхтер Александр Борисович (RU), Прокошев
Валерий Григорьевич (RU)*

Заявка № 2020616358

Дата поступления 29 июня 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 июля 2020 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Иелиев

Приложение В

Патент полезной модели и заявки патентов на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 202295

Устройство для лазерной многослойной наплавки порошковых материалов

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение образования "Владимирский Государственный Университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых" (ВлГУ) (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2020129730

Приоритет полезной модели 08 сентября 2020 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 10 февраля 2021 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 08 сентября 2030 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



Авторы: *Гоц Александр Николаевич (RU), Гусев Дмитрий Сергеевич (RU), Жокин Алексей Владимирович (RU), Завитков Алексей Викторович (RU), Кочуев Дмитрий Андреевич (RU), Люхтер Александр Борисович (RU), Родионов Дмитрий Викторович (RU), Прокошев Валерий Григорьевич (RU), Чкалов Руслан Владимирович (RU)*

**Федеральная служба по интеллектуальной собственности
Федеральное государственное бюджетное учреждение**

**«Федеральный институт промышленной собственности»
(ФИПС)**

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-5, 125993

Теле фон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

| | | |
|-------------------------|-------------------|--------------------------|
| 29.06.2020 | 037333 | 2020121743 |
| <i>Дата поступления</i> | <i>Входящий №</i> | <i>Регистрационный №</i> |

25-1036-246

Заявление о выдаче патента Российской Федерации на изобретение

| | | |
|--|---|-------------------|
| ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ <small>(срок поступления оригинала заявленного изобретения)</small> | (21) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ № | ВХОДЯЩИЙ № |
| 29 ИЮН 2020 | | |
| (85) ДАТА ПЕРЕВОДА <small>исходящей заявки на национальную фазу</small> | | |
| <input type="checkbox"/> (86) СТ. 117 <small>(номер и дата международной заявки и дата международной публикации)</small> | АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ <small>Россия, 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, патентная группа</small> | |
| <input type="checkbox"/> (87) <small>(номер и дата международной публикации)</small> | Телефон: (4922)79918 Факс: АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕПИСКИ <small>(используется при подаче заявки на секретные изобретения)</small> | |
| <input type="checkbox"/> (96) <small>(номер европейской заявки и дата ее подачи)</small> | | |
| <input type="checkbox"/> (97) <small>(номер и дата публикации европейской заявки)</small> | | |
| ЗАЯВЛЕНИЕ <small>о выдаче патента Российской Федерации на изобретение</small> | В Федеральную службу <small>по интеллектуальной собственности</small> Бережковская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-5, 125993, Российская Федерация | |
| (54) НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ Способ лазерной наливки порошковых материалов с контролем высоты наливаемого слоя | | |
| (71) ЗАЯВИТЕЛЬ <small>(фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (полное наименование юридического лица), место жительства или адрес (последнее, из которых является основным) заявителя)</small> | ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ | |
| Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ) Россия, 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ | ОГРН 1023301283190 КПП 332701041 ИНН 3327102091 СНИЛС ДОКУМЕНТ (серия, номер) КОД СТРАНЫ (если он указан) | |
| <input type="checkbox"/> изобретение создано за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком исполнитель работ (использовать только в заявках на патенты) | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту заказчик работ (использовать только в заявках на патенты) | | |
| Соглашение о предоставлении субсидии от 03 декабря 2019 г. № 05.604.21.0245 | | |
| (74) ПРЕДСТАВИТЕЛЬ(И) ЗАЯВИТЕЛЯ <small>(фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) лица, исполняющего обязанности своего профессионального представителя для подачи заявки на патент и дальнейшей процедуры по интеллектуальной собственности или адвоката, имеющего в силу закона право представлять по закону)</small> | <input checked="" type="checkbox"/> патентный поверенный <input type="checkbox"/> представитель по доверенности <input type="checkbox"/> представитель по закону | |

26/1

ОТД № 17

01 ИЮЛ 2020

240-60-15



| | | |
|---|----|------------------------------------|
| Общее количество документов в листах | 26 | Лицо, зарегистрировавшее документы |
| Из них - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца) | 0 | Можаева И.М. |
| Количество платежных документов | 1 | |
| Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются на сайте ФИПС по адресу « www.fips.ru » в разделе «Информационные ресурсы / Открытые реестры» | | |

**Федеральная служба по интеллектуальной собственности
Федеральное государственное бюджетное учреждение**

**«Федеральный институт промышленной собственности»
(ФИПС)**

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-5, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

| | | |
|-------------------------|-------------------|--------------------------|
| 23.09.2020 | 057108 | 2020131465 |
| <i>Дата поступления</i> | <i>Входящий №</i> | <i>Регистрационный №</i> |

93324433P

Заявление о выдаче патента Российской Федерации на изобретение

| | | |
|---|--|------------|
| ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ (дата регистрации) приложение № 94 | (2) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ № | ВХОДЯЩИЙ № |
| 23 СЕН 2020 | (15) ДАТА ПЕРЕВОДА интеллектуальной заявки на национальную фазу | |
| <input type="checkbox"/> (86) международная заявка и/или национальная заявка в области техники, относящаяся к патенту (или патентам) | АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ Россия, 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, патентная группа | |
| <input type="checkbox"/> (87) заявка и/или национальная заявка в области техники | Телефон: (4922)479918 Факс: Адрес электронной почты: АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕПИСКИ (используется при подаче заявки на секретные изобретения) | |
| <input type="checkbox"/> (89) патентная заявка и/или патент | | |
| <input type="checkbox"/> (97) заявка и/или патент на изобретение | | |
| ЗАЯВЛЕНИЕ о выдаче патента Российской Федерации на изобретение | В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережковская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-5, 125993, Российская Федерация | |
| (54) НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ Способ лазерной газопорошковой наплавки защитных покрытий | | |
| (71) ЗАЯВИТЕЛЬ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (полное наименование документа), место жительства или место нахождения, почтовый адрес) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ) Россия, 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ | ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ ОГРН 1023301283290 КПП 333701001 ИНН 3337161091 СНИЛС ДОКУМЕНТ (серия, номер) КОД СТРАНЫ (если не указывается) | |
| <input type="checkbox"/> изобретение создано за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком исполнитель работ (физическое или юридическое лицо) <input checked="" type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту заказчик работ (физическое или юридическое лицо) Соглашение о предоставлении субсидии от 03 декабря 2019 г. № 05.604.21.0245 | | |
| (74) ПРЕДСТАВИТЕЛЬ(И) ЗАЯВИТЕЛЯ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) лица, наименование организации, место жительства или место нахождения, место нахождения организации, почтовый адрес) представитель по доверенности представитель по закону | <input type="checkbox"/> патентный поверенный <input type="checkbox"/> представитель по доверенности <input type="checkbox"/> представитель по закону | |

22/1

ОТД №17

25 СЕН 2020

240-60-15



| | | |
|--|----|------------------------------------|
| Общее количество документов в листах | 22 | Лицо, зарегистрировавшее документы |
| Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца) | 0 | Можаева И.М. |
| Количество платежных документов | 1 | |
| Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются на сайте ФИПС по адресу «www.fips.ru» в разделе «Информационные ресурсы / Открытые реестры» | | |