

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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ) на базе Научно-образовательного центра внедрения лазерных технологий (НОЦ ВЛТ).

- Научный руководитель: **Люхтер Александр Борисович**,
кандидат технических наук,
директор Научно-образовательного центра
внедрения лазерных технологий ФГБОУ ВО
ВлГУ
- Официальные оппоненты: **Щербаков Алексей Владимирович**,
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
университет «МЭИ»», профессор кафедры
«Электроснабжение промышленных предприятий
и электротехнологии»
Долгих Иван Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
энергетический университет
имени В.И. Ленина», доцент кафедры
«Теоретические основы электротехники и
электротехнологии»
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт автоматики и
процессов управления Дальневосточного
отделения Российской академии наук»

Защита состоится «4» марта 2022 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» и на сайте http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Rodionov_D.V.pdf.

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.064.02,
канд. техн. наук, доцент



Копылова
Лариса Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования, степень её разработанности.

Применение на производственных предприятиях с технологией лазерной сваркой (ЛС) автоматизированных систем проектирования технологического процесса, проводимого на моделях свариваемых деталей, обеспечивает достижение существенных преимуществ, таких как: автономность проектирования ЛС, моделирование движения узлов робототехнического комплекса, автоматизацию разработки траекторий движения лазерной головки на поверхности модели. При этом современные методы, модели и алгоритмы, составляющие средства 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.

Однако в условиях единичного и мелкосерийного производства, в отличие от массового, трансляция и отладка траектории движения инструмента, основывающихся на существующих средствах технологической подготовки УП, не сопровождается снижением трудоемкости технологической подготовки производства. Вследствие этого возрастает себестоимость продукции и внедрение ЛС в единичное и мелкосерийное производство становится менее рентабельным.

Таким образом развитие методов, моделей и алгоритмов 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. Звезда, 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, C. Kardos.

В диссертации предлагается методика технологической подготовки УП для 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 траектории, 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. Результаты были реализованы в подсистеме автоматизированной системы технологической подготовки производства (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.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

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.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 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, составляющие теоретическую основу подсистемы АС ТПП по подготовки УП, разработаны 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 износо- 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 также 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 конференции «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 мультимедиа-

циплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon 2019» (1-4 октября 2019 г., г. Владивосток), 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования и степень ее разработанности, указаны цель работы, задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробации результатов.

В первой главе «Анализ современного состояния автоматизации технологической подготовки управляющих программ ЛРК-С» описывается современное состояние технологической подготовки УП промышленного ЛРК-С и предпосылки совершенствования средств автоматизации для сокращения времени подготовки УП. Анализируются современные методы и средства автоматизации технологической подготовки УП комплекса лазерной сварки.

Выполнен анализ АС ТПП, используемых для технологической подготовки УП в условиях единичного и мелкосерийного производства.

На основе результата анализа сформулированы задачи исследования.

Вторая глава «Методика автоматизированной технологической подготовки управляющих программ ЛРК-С» посвящена разработанной методике технологической подготовки УП и средствам ее реализации.

Промышленный ЛРК-С представляет собой объединение роботизированного манипулятора, итербиевого волоконного лазера и сопутствующего процессу ЛС технологического оборудования.

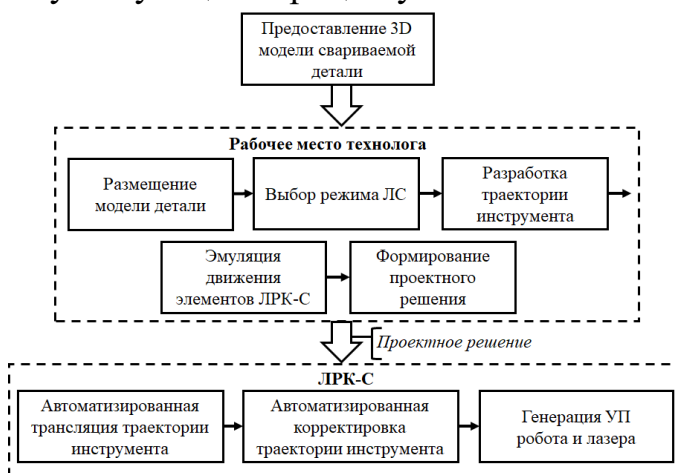


Рисунок 1 – Функциональная схема методики технологической подготовки УП

Поскольку современное состояние технологической подготовки УП для ЛРК-С требует совершенствования средств автоматизации в условиях единичного и мелкосерийного производства, то процесс подготовки предлагается реализовать в соответствии с разработанной методикой, схема которой представлена на рисунке 1.

В качестве связующего звена рабочего места технолога (РМТ) и ЛРК-С выступает проектное решение ЛС, представляющее собой структуру данных, содержащую модель обрабатываемой детали, режим обработки, траекторию движения инструмента ЛРК-С и проектные конфигурации.

На основании транслированной траектории из пространства моделей в рабочее пространство ЛРК-С и технологических параметров, заложенных в проектное решение ЛС, осуществляется создание УП робота и лазера.

Для совершенствования средств автоматизации подготовки УП в рамках проектного решения траектория движения инструмента ЛРК-С представляется структурой данных, содержащей помимо координат положения инструмента, данные о состоянии готовности технологического оборудования к выполнению операций в каждой точке траектории.

Технологическая траектория содержит в себе следующие данные: значения положения $\vec{p} = \{p_x, p_y, p_z\}$, ориентации $\vec{n} = \{n_x, n_y, n_z\}$ и угла поворота R инструмента ЛРК-С вокруг \vec{n} , положение двухосевого позиционирующего устройства (далее - позиционер) $\vec{J} = \{J_1, J_2\}$, ориентация \vec{n}_{cam} и угол поворота R_{cam} инструмента вокруг \vec{n}_{cam} при корректировке траектории средствами

видеокамеры, степень сглаживания движения инструмента, скорость движения инструмента и позиционера, время изменения мощности лазерного излучения, состояние вкл/выкл лазерного излучения, состояние вкл/выкл подачи проволоки и состояние вкл/выкл подачи защитного (инертного) газа.

Значения технологических параметров ЛС (скорость движения инструмента и позиционера, мощность лазерного излучения, значения параметров расхода защитного (инертного) газа, марки защитного газа, значение положения расфокусировки лазерного излучения и скорость подачи проволоки) выбираются из режима обработки при разработке проектного решения.

Точкой позиционирования инструмента $\bar{\tau} = \{\tau_x, \tau_y, \tau_z\}$ ЛРК-С является пространственное положение перетяжки лазерного излучения (см. рисунок 2 а). Система векторов $\bar{J} = \{\bar{J}_1, \bar{J}_2\}$ описывает кинематику позиционера (см. рисунок 2 б).

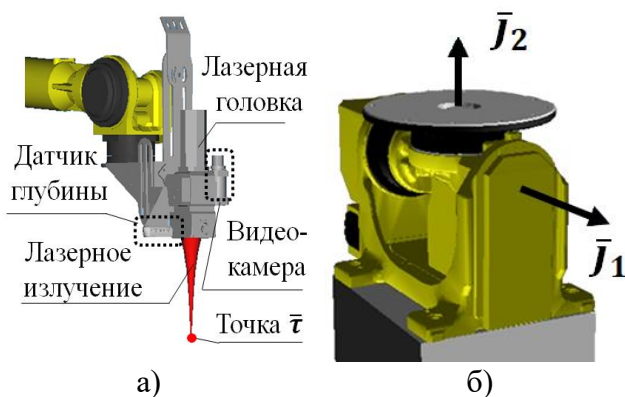


Рисунок 2 – Модели элементов технологического оснащения ЛРК-С:
а – инструмент; б – позиционер

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 \bar{J}_1 , $R(\bar{J}_1^0, J_1)$ – матрица поворота \bar{J}_1^0 на J_1 .

Трансляция координат точек технологической траектории

осуществляется сопоставлением положения результата трехмерного сканирования свариваемой детали с ее моделью. Результат сканирования представляет собой облако точек, координаты которых записаны относительно координатной системы промышленного роботизированного манипулятора ЛРКС. Сканирование осуществляется компактным датчиком глубины, установленным на сварочной головке ЛРК-С и выступающим в качестве инструмента детектирования и сканирования детали (далее – инструмент сканирования). Схема поля зрения датчика глубины, размещенного на инструменте ЛРК-С, представлена на рисунке 3.

Результатом сопоставления двух облаков точек является матрица совместного поворота и сдвига 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 $\{t_x, t_y, t_z\}$ – определяют сдвиг.

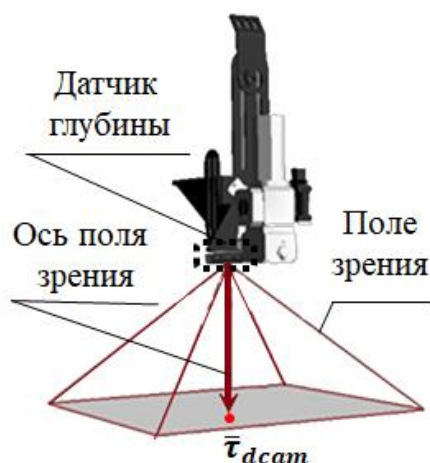


Рисунок 3 – Схема поля зрения датчика глубины расположенного на инструменте ЛРК-С, с точкой позиционирования \bar{t}_{dcam}

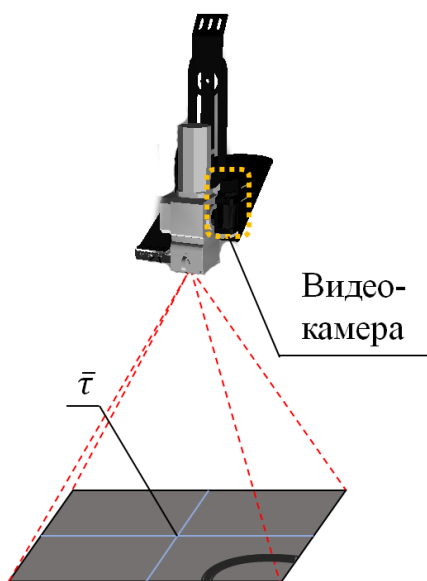


Рисунок 4 – схема поля зрения видеокамеры встроенной в лазерную головку ЛРК-С, с точкой позиционирования \bar{t}

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

Реальные детали в сравнении с идеализированными конструкторскими моделями, криволинейные поверхности которых аппроксимируются плоскими геометрическими примитивами (как правило треугольниками), могут иметь неприемлемые отклонения геометрии для ЛС. Помимо этого 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. В связи с этим траектория сварочного луча, построенная по трехмерной модели, может оказаться вне свариваемого стыка детали даже в случае идеального сопряжения координатных систем модели и облака точек.

Одним из решений устранения несоответствия координат точек транслированной траектории зазору между свариваемыми кромками является использование методов и средств корректировки, функционирующих в наладке и автоматизировано адаптирующих траекторию движения инструмента под установленную деталь на столе, при оптимальном диаметре пятна лазерного излучения сварки, находящемся в диапазоне от 0.5 до 1 мм.

Наиболее перспективным методом для автоматизированной коррекции положения инструмента в точках транслированной траектории является распознавание свариваемых кромок на изображениях, получаемых с видеокамеры, встраиваемой в лазерную головку (см. рисунок 4).

Алгоритм корректировки транслированной технологической траектории представляет собой последовательный проезд точек сварки инструментом, в процессе которого каждая точка исследуется на отклонение положения пятна лазерного излучения относительно свариваемых кромок (см. рисунок 5).

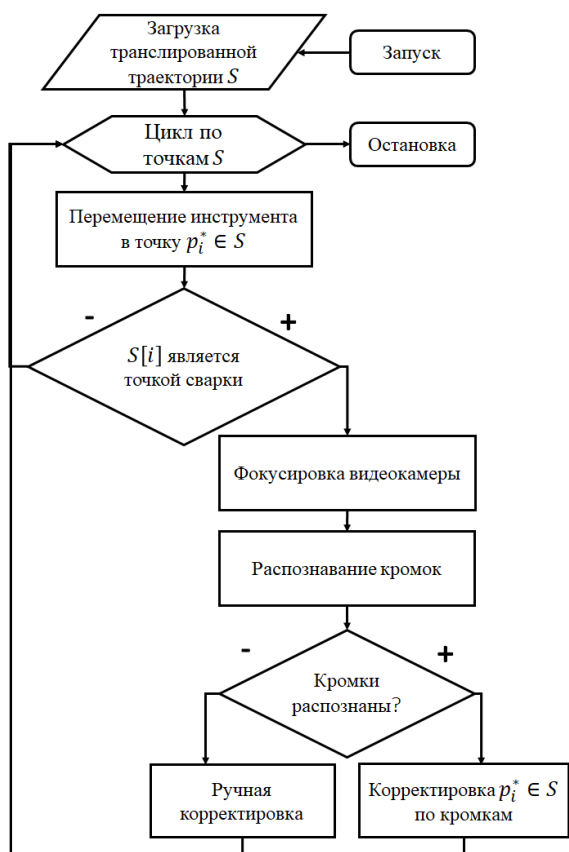


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма корректировки точек транслированной технологической траектории средствами видеокамеры

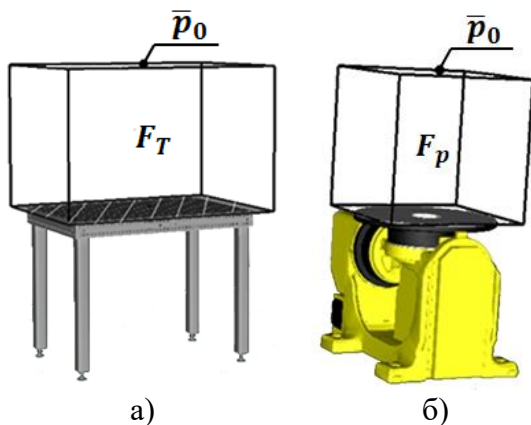


Рисунок 6 – Рабочая область инструмента, привязанная к столу (а), к позиционеру (б)

На основании транслированной и скорректированной технологической траектории проектного решения осуществляется создание УП робота и лазера комплекса ЛРК-С.

Третья глава «Средства автоматизации трансляции технологической траектории в рабочее пространство ЛРК-С и ее корректировки относительно свариваемых кромок» посвящена методу трансляции проектируемой технологической траектории, моделям и алгоритмам корректировки ее точек в рабочем пространстве промышленного комплекса.

Процесс получения облака пространственных точек поверхности свариваемой детали представляет собой последовательность действий:

- 1) определение области локализации свариваемой детали L в рабочем пространстве F_T и F_P (далее - F) инструмента (см. рисунок 6);
- 2) создание траектории сканирования относительно L ;
- 3) объезд контура T верхней грани области локализации L инструментом сканирования (см. рисунок 7);
- 4) покадровая обработка и объединение массивов пространственных точек, получаемых с датчика.

Область L определяется пересечением пространственных ограничений расположения детали, фиксируемых датчиком глубины в точке \bar{p}_0 при вертикальной ориентации инструмента с рабочей областью инструмента F .

На основании L и поля зрения датчика глубины обрабатываемая деталь классифицируется по размерам. Классификация сложности детали по форме для трехмерного сканирования осуществляется инженером-технологом и сохраняется в конфигурациях проектного решения ЛС. Классификация позволяет создать траекторию сканирования различных деталей средствами датчика глубины (см. пример на рисунке 7).

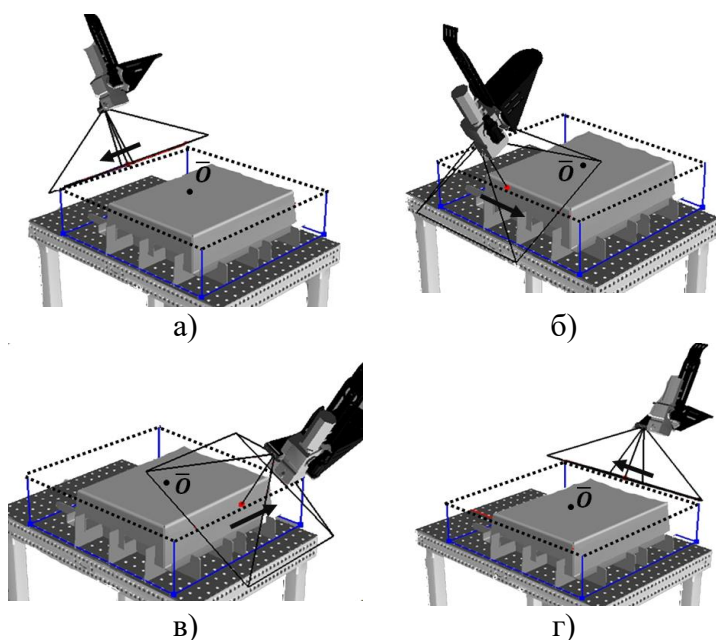


Рисунок 7 – Схемы сканирования детали датчиком глубины относительно контура T верхней грани (пунктирные линии) области локализации L (сплошные линии)

Трансляция технологической траектории в рабочее пространство ЛРК-С осуществляется на основе сопоставления результата сканирования с моделью обрабатываемой детали из проектного решения ЛС, сводящееся к задаче регистрации одного облака точек в другом. Для этого исходная модель трансформируется в облако точек путем равномерного заполнения полигонов пространственными точками.

Сопоставление облаков осуществляется за счет совместного применения

алгоритмов начального согласованного выравнивания (известного как *Sample Consensus-Initial Alignment* – SAC IA) и итерационного алгоритма ближайшей точки (известного как *Iterative Closest Point* – ICP). Результат сопоставления положения облаков точек позволяет определить матрицу преобразования T .

Точки транслированной траектории корректируются относительно свариваемых кромок. По результату обработки изображения, получаемого с видеокамеры, установленной в инструменте, осуществляется корректировка его положения. Расположение видеокамеры выбирается таким образом, чтобы сцена поля зрения камеры была перпендикулярна лазерному лучу.

Фокусное расстояние видеокамеры имеющее постоянную разницу с фокусным расстоянием лазерного излучения, обеспечивает определение положения фокальной плоскости сфокусированного излучения относительно положения инструмента с наиболее резким изображением видеокамеры в заданной ориентации.

Корректировка положения пятна лазерного излучения относительно свариваемых кромок осуществляется распознаванием кромок на изображении с видеокамеры (см. рисунок 8). В каждой точке осуществляется распознавание области между кромками по признакам яркостной сегментации. Двустороннее освещение обеспечивает подсветку поверхности детали в поле зрения камеры, при этом область между кромками определяется как множество самых темных пикселей изображения. Пороговое выделение пикселей, составляющих область между кромками, осуществляется на основании распределения пикселей изображения по яркости, где границы выделения определяются по минимальному значению яркости и первому локальному минимуму распределения.

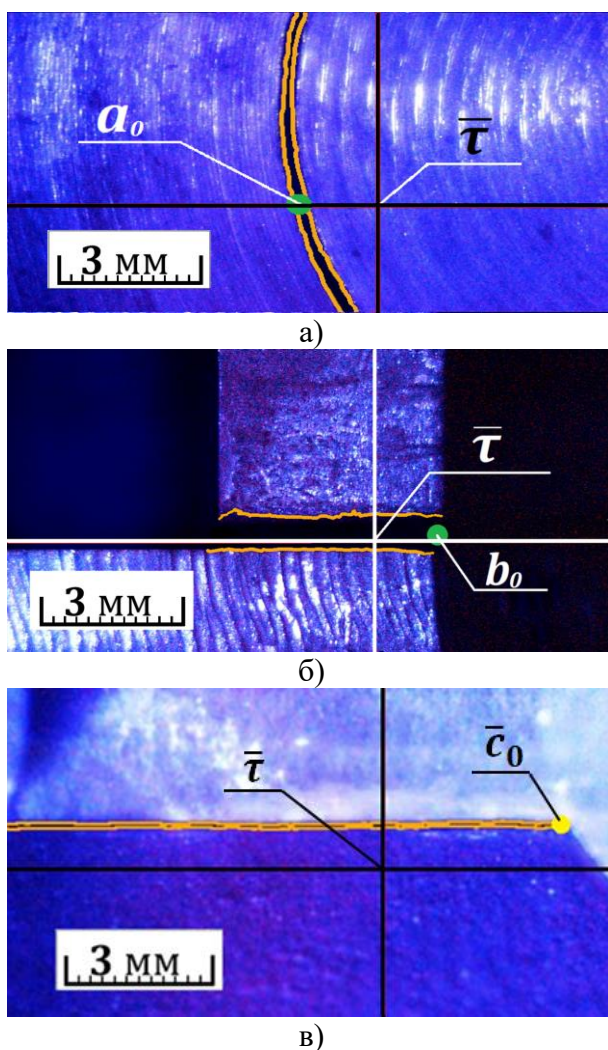


Рисунок 8 – Схемы определения правильного положения относительно распознанных кромок для текущего положения инструмента $\bar{\tau}$: а – в точке a_0 ; б – в точке b_0 ; в – в точке c_0

По результату выделения границ осуществляется распознавание контуров кромок, представляющих собой два множества локально-параллельных сегментов. Таким образом на металлическую поверхность детали, наблюдаемую видеокамерой, накладываются требования в отсутствии потертостей и царапин соизмеримых по размерам со свариваемым стыком.

Точки корректного положения инструмента относительно свариваемых кромок определяются для различных результатов распознавания. В случае расположения точки позиционирования $\bar{\tau}$ инструмента на изображении относительно кромок, продолжающихся за пределы изображения, корректное положение определяется как ближайшая центральная точка \bar{a}_0 зазора (см. рисунок 8 а). Если на изображении присутствуют края кромок (см. рисунок 8 б), то корректное положение $\bar{\tau}$ определяется как ближайшая краевая точка центра зазора \bar{b}_0 . При наличии на изображении одного края распознанных свариваемых кромок, корректное положение точки позиционирования инструмента

$\bar{\tau}$ определяется как барицентр \bar{c}_0 сегментов, составляющих множество перегиба кромок, представленных единым контуром (см. рисунок 8 в).

В четвертой главе «Подсистема АС ТПП по подготовке УП для ЛРК-С и экспериментальное исследование» представлен созданный программный комплекс, реализующий разработанные средства автоматизации, и результаты его экспериментального исследования.

Поскольку методика технологической подготовки УП подразумевает реализацию автоматизированных операций на ЛРК-С, то АС ТПП, содержащая подсистему по подготовке УП для ЛРК-С, представляется структурной схемой, изображенной на рисунке 9.

В подсистеме проектирования ЛС инженер-технолог осуществляет разработку технологического проектного решения ЛС, затем проект передается на производственный участок ЛРК-С. На ЛРК-С в подсистеме подготовки УП оператор осуществляет автоматизированную трансляцию и коррекцию технологической траектории. На основе проектного решения и

скорректированной траектории движения инструмента осуществляется генерация УП робота и лазера.

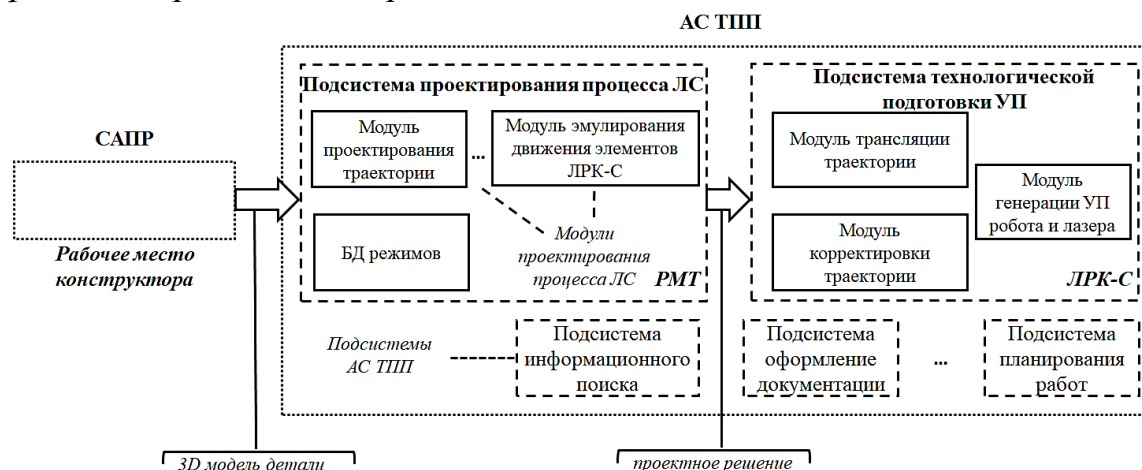


Рисунок 9 – Структурная схема АС ТПП для промышленного ЛРК-С

Платформой экспериментальных исследований подсистемы подготовки УП являлся ЛРК-С лаборатории лазерной сварки НОЦ ВЛТ ВлГУ. Объектами экспериментального исследования являлись детали, производимые ЛС (см. рисунок 10).

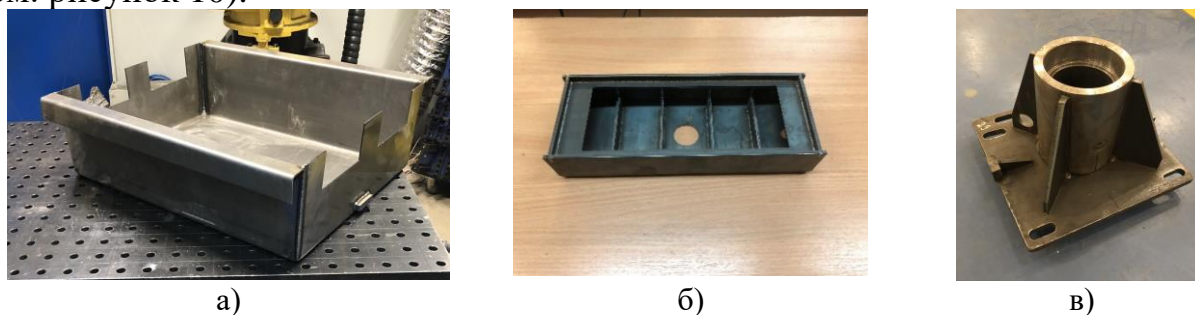


Рисунок 10 – Объекты экспериментального исследования: а – форма вспенивания пеностекла; б – корпус магнитного устройства; в – консоль суппорта погрузчика Ant-1000

В ходе экспериментального исследования была проведена опытная автоматизированная подготовка УП для каждого объекта в объеме пять штук. По результату подготовки УП была осуществлена ЛС.

Оценочным показателем сокращения времени выполнения технологической подготовки УП является величина t_n/t_a , где t_n – норма времени технологической подготовки УП и t_a – время выполнения автоматизированной подготовки УП.

Величина t_a определяется как сумма времени выполнения операций:

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

где t_{a1} – время трансляции технологической траектории, t_{a2} – время корректировки точек транслированной траектории, t_{a3} – время совместного создания УП робота и лазера:

Величина t_n определяется как сумма нормы времени:

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

где t_{n1} – норма времени калибровки положения модели детали, t_{n2} – норма времени создания УП робота, t_{n3} – норма времени операции отладка УП робота на детали, t_{n4} – норма времени создания УП лазера.

Оценка сокращения времени выполнения технологической подготовки УП составила: в 3 раза для формы вспенивания, в 4.1 раза для корпуса магнитного устройства и в 4 раза для консоли суппорта.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационного исследования, теоретические и практические выводы:

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. 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. Средства обеспечивают 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.

6. 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.

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

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Люхтер А.Б.** Перенос координат трехмерных САД-моделей в пространство обрабатываемых деталей в роботизированных станочных комплексах / Люхтер А.Б., Звягин М. Ю., Голубев А. С., Родионов Д.В. // Динамика сложных систем - XXI век, 2017. Т. 11. – №1. – С. 40-46. – издательство Радиотехника. – ISBN 1999-7493;
2. **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. – издательство Радиотехника. – ISBN 1999-7493;
3. **Родионов Д.В.** Расчет точек технологической траектории лазерного роботизированного комплекса относительно инструмента и оснастки в САМ / Родионов Д.В., Люхтер А.Б., Прокошев В.Г. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление, 2019. – Т. 12. – № 4. – С. 123-135. DOI: 10.18721/JCSTCS.12410;

Публикации в научных изданиях, индексируемых международной системой цитирования SCOPUS

4. **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, V. Prokoshev // Machines, 2020, 8(4), 86. ISSN 2075-1702. doi: 10.3390/machines8040086;
5. **Rodionov D.** The mechanisms of constructing trajectories of a laser robotic complex for 3d polygonal models. / D. Rodionov, A. Lyukhter, V. Prokoshev // Beam Technologies and Laser Application, Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1109, 2018, Procedia Engineering 132. doi: 10.1088/1742-6596/1109/1/012007;
6. **Rodionov D.** 3D modeling of laser robotic complex motion in CAM spaces / D. Rodionov, A. Lyukhter, V. Prokoshev // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2019, IEEE. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934248;
7. **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, V. Prokoshev // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020), 2021, Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-54817-9_60;
8. **Rodionov D.** Methods of automatic correction of technological trajectory of laser welding complex by means of computer vision. / D. Rodionov, A. Lyukhter, V. Prokoshev // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2020, IEEE. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112025;
9. **Chkalov R.V.** Laser powder cladding automated control method based on advanced monitoring system of processing area by CCD-camera. / Chkalov R.V.,

Kochuev D.A., Rodionov D.V., Prokoshev V.G. and Lyukhter A.B. // In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, Volume 896, IOP Publishing. doi: 10.1088/1757-899X/896/1/012128;

Публикация в других научных изданиях

10. **Люхтер А. Б.** Методы обработки информации, полученной посредством сканирования детали датчиком расстояния для оптимизации траектории / Люхтер А. Б., Родионов Д. В., Лоханов А. В. // Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2017, 2017. Т. 2. – С.138-141;

Свидетельства о регистрации программы ЭВМ и патенты

11. **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., Прокошев В.Г., Гусев Д.С.; патентообладатель Люхтер А.Б.; заявл. 07.08.2020; опубл. 25.08.2020;
12. **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;
13. **Программа** анализа и оптимизации результатов испытаний сварных швов [Текст]: свид. о гос. рег. 2017662472 РФ: авторы и заявители Родионов Д.В., Бакулин А.А. и Люхтер А.Б.; патентообладатель ООО «Бакулин Моторс Групп»; заявл. 23.12.2016; опубл. 09.11.2017;
14. **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;
15. **Подсистема** взаимодействия технических средств измерения высоты наплаваемого валика с системой управления лазера [Текст]: свид. о гос. рег. 2020617348 РФ: авторы и заявители Родионов Д.В., Гусев Д.С., Люхтер А.Б. и Прокошев В.Г.; патентообладатель ВлГУ; заявл. 29.06.2020; опубл. 06.07.2020;
16. **Автоматизированная система** управления лазерной роботизированной порошковой наплавкой (АСУ ЛРПН) [Текст]: свид. о гос. рег. 2020661572 РФ авторы и заявители Родионов Д.В., Гусев Д.С., Люхтер А.Б. и Прокошев В.Г.; патентообладатель Люхтер А.Б. заявл. 07.08.2020; опубл. 25.09.2020;
17. **Устройство** для лазерной многослойной наплавки порошковых материалов [Текст]: патент на полезную модель № 202295, Гоц А.Н., Гусев Д.С., Жокин А.В., Завитков А.В., Кочуев Д.А., Люхтер А.Б., Родионов Д.В., Прокошев В.Г., Чкалов Р.В.; патентообладатель ВлГУ; заявл. № 2020129730 от 08.09.2020; опубл. 10.02.2021;

18. **Способ** лазерной наплавки порошковых материалов с контролем высоты наплавляемого слоя [Текст]: патент на изобретение, Гоц А.Н., Гусев Д.С., Жокин А.В., Завитков А.В., Кочуев Д.А., Люхтер А.Б., Родионов Д.В., Прокошев В.Г., Чкалов Р.В.; патентообладатель ВлГУ; заявл. № 2020121743 от 29.06.2020;
19. **Способ** лазерной газопорошковой наплавки защитных покрытий [Текст]: патент на изобретение, Гоц А.Н., Гусев Д.С., Завитков А.В., Кочуев Д.А., Люхтер А.Б., Родионов Д.В.; патентообладатель ВлГУ; заявл. № 2020131465 от 23.09.2020.

Подписано в печать 21.12.21

Формат бумаги 60x84/16. Усл. печ. Л. 1,25. Тираж 100 экз.

Заказ № 102

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.

