

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»  
(наименование)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных  
производств»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Цифровые процессы и системы автоматизированного машиностроения  
(направленность (профиль) / специализация)

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Автоматизация рабочего места лазерной обработки листовых  
панелей автомобиля»

Обучающийся У.Д. Меньшикова (Инициалы Фамилия) \_\_\_\_\_ (личная подпись)

Научный к.т.н., доцент Д.Г. Левашкин \_\_\_\_\_  
руководитель (ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

## Содержание

Введение .....	4
1. Анализ и состояние вопроса.....	6
1.1. Анализ существующего процесса.....	6
1.2. Способ повышения эффективности технологического процесса .....	7
1.3. Промышленный робот с интегрированной лазерной головкой .....	9
1.4. Формулировка задач работы .....	21
3. Расчет и проектирование РТК.....	34
3.1. Описание операции сварки .....	34
3.2. Выбор оборудования и оснастки .....	35
3.3. Траектория движения робота манипулятора.....	38
3.4. Циклограмма производительности лазерной сварки.....	39
3.5. Расчет пневмопривода охлаждения.....	43
4. Расчет и проектирование оснастки РТК.....	46
4.1. Оснастка «спутник».....	46
4.2. РТК в сборке .....	48
5. Расчет параметров и режимов лазерной сварки.....	51
5.1. Основные параметры режимов сварки и их расчет .....	52
6. Разработка циклограммы работы робота манипулятора с лазерной головкой.....	55
7. Безопасность и экологичность технического объекта .....	58
7.1. Воздействие объекта на производственную сферу и окружающую среду	58
7.2. Средства и методы снижения негативного воздействия объекта .....	60
7.3. Эффективность от внедрения средств и методов защиты.....	64
Заключение .....	66
Список используемых источников.....	67

Приложение А .....	72
Приложение Б.....	75

## Введение

Современное машиностроение ставит перед собой важные задачи по повышению качества продукции и росту производительности. Эти направления развития должны не только соответствовать стремительному прогрессу промышленности и науки, но и полностью удовлетворять потребности общества. В условиях жесткой конкуренции и глобализации рынков автоматизация производства становится ключевым инструментом достижения этих целей. Особое место среди автоматизированных систем занимают роботизированные технологические комплексы, которые кардинально меняют подход к организации производственных процессов. Эти системы обеспечивают высокоскоростное и точное выполнение операций, значительно увеличивая объем выпускаемой продукции без привлечения дополнительных трудовых ресурсов. Важнейшим преимуществом таких комплексов является минимизация влияния человеческого фактора, что существенно снижает количество ошибок и повышает стабильность качества выпускаемых изделий.

В современном производстве особую значимость приобретают сварочные технологии как один из наиболее востребованных методов соединения деталей. Традиционные методы сварки, такие как дуговая, хотя и остаются распространенными, но имеют ряд существенных ограничений. Они часто приводят к образованию загрязнений в сварочном шве, возникновению остаточных напряжений и формированию нежелательных структур в зоне термического влияния, что негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках готовых изделий. В данном контексте лазерная сварка представляет собой качественно новый технологический уровень. Её преимущества включают в себя исключительную точность выполнения операций, минимальное термическое воздействие на околошовную зону, значительное снижение вероятности образования дефектов, возможность

работы с миниатюрными деталями и отсутствие необходимости в последующей обработке шва.

Особенно строгие требования предъявляются к сварным соединениям в автомобильной промышленности, где они являются критически важными элементами, непосредственно влияющими на общую прочность кузова, безопасность транспортного средства, долговечность конструкции и эксплуатационные характеристики автомобиля. К таким соединениям предъявляются требования по обеспечению абсолютной герметичности, достижению высокой прочности на разрыв, устойчивости к коррозионным процессам, сохранению заданных параметров жесткости кузова, соблюдению минимальных допустимых зазоров между деталями и способности выдерживать длительные вибрационные и ударные нагрузки.

Основной целью данной работы является разработка современного роботизированного комплекса для лазерной сварки, который сможет обеспечить соответствие всем техническим требованиям, значительно повысить производительность сварочных операций, гарантировать качество соединений, снизить себестоимость процесса и повысить конкурентоспособность продукции. Особое внимание при разработке будет уделено вопросам интеграции системы в существующие производственные линии, удобству эксплуатации и возможности дальнейшей модернизации оборудования.

## **1. Анализ и состояние вопроса**

### **1.1. Анализ существующего процесса**

Одной из главных задач современного автомобилестроения является модернизация и автоматизация своих производственных мощностей, за счет внедрения современного оборудования и новых технологических решений, отвечающих запрашиваемым требованиям.

Переход на автоматизированные производственные системы позволяет минимизировать влияние человеческого фактора, который напрямую влияет на качество производимой продукции, а также на общую безопасность предприятия. Данные изменения оказывают влияние на повышение конкурентоспособности отечественного автопрома в условиях глобального рынка. Важными дополнительными преимуществами автоматизации становятся: существенная оптимизация затрат за счет сокращения расходов на оплату труда, снижение материалоемкости производства, уменьшение энергопотребления благодаря рационализации технологических операций, а также ускорение производственных циклов.

В данной работе в качестве базового технологического процесса рассматривается дуговая сварка с применением роботизированного технологического комплекса.

Современный роботизированный комплекс представляет собой сложную, высокотехнологическую систему, включающую в себя, промышленные роботы-манипуляторы, автоматизированное оборудование, системы позиционирования и контроля, а также специализированное программное обеспечение для управления технологическим процессом [15]. Такой комплексный подход позволяет обеспечить значительное увеличение производительности и качества выполняемых операций за счет высокой точности позиционирования, стабильности рабочих параметров, скорости

выполняемых операций и минимальной потребности в последующей доработке готовых изделий.

Однако, автоматизированный базовый процесс сварки обладает рядом существенных технологических ограничений и недостатков. К примеру, он имеет недостаточную точность формирования сварочного шва, низкую скорость операции, более долгий цикл работы, а также повышенный риск дефектов связанных с термическим воздействием на металл. Эти проблемы являются актуальными, поскольку современное машиностроение требует не только высокую производительность, но и качество, а также гибкость технологических линий и энергоэффективность производственных процессов [24]. Данные параметры вкупе помогают производству оставаться конкурентноспособным.

Для преодоления указанных недостатков и достижения нового уровня производительности сварки требуется проведение комплексного анализа современных технологических решений и обоснованный выбор оптимального оборудования [18].

Реализация этих мер позволит создать высокоэффективное автоматизированное рабочее место, полностью соответствующее предъявляемым требованиям и способное обеспечить дальнейшее поле для обучения и модернизации.

## **1.2 Способ повышения эффективности технологического процесса**

Для поиска эффективных способов исключения существующих технологических ограничений необходимо детально проанализировать недостатки применяемого в настоящее время оборудования.

На данный момент применяются РТК комплексы дуговой сварки. Их недостатками являются:

- ограниченная точность;

- не универсальность;
- низкая скорость сварки;
- долгий цикл работы;
- время наладки.

Чтобы найти способы повышения эффективности технологического процесса сварки, а также повышения уровня автоматизации, необходимо, чтобы готовое решение не имело в себе представленных недостатков. Такой подход позволит существенно улучшить ключевые показатели производственного процесса и вывести возможности предприятия на уровень выше.

При решении поставленной задачи особое внимание уделялось условиям непрерывности производственного процесса, что является критически важным требованием. В ходе проведенного анализа было установлено, что наиболее эффективным и экономически целесообразным решением является внедрение промышленного робота с интегрированной лазерной головкой. Данное техническое решение, представленное на рисунке 1, сочетает в себе высокую точность обработки и технологическую гибкость, что позволяет устранить выявленные ранее недостатки базового РТК.



Рисунок 1– Промышленный робот с интегрированной лазерной головкой

### 1.3 Промышленный робот с интегрированной лазерной головкой

Промышленные роботы массово используются различными производствами в разных сферах деятельности, в том числе и на автомобилестроительных производствах, где они стали неотъемлемой частью современных технологических процессов [6]. Согласно определению, «робот – многофункциональная перепрограммируемая машина, для полностью или частично автоматического выполнения двигательных функций аналогично живым организмам, а также некоторых интеллектуальных функций человека» [3, с. 2].

Самым главным качеством промышленного робота является его универсальность, позволяющая оснащать манипулятор различным технологическим оборудованием в зависимости от конкретных производственных задач [28]. Для внедрения промышленного робота в производство необходимо определить конфигурацию устройства исходя из вводных данных [14]. Таких как:

- производственная площадь;
- эффективная нагрузка;
- количество необходимых степеней свободы;
- точность позиционирования;
- радиус действия.

На рисунке 2 представлена базовая структурная схема промышленного робота, которая наглядно демонстрирует основные компоненты системы [2].

Современный промышленный РТК содержит несколько компонентов. Основу системы составляет блок управления, обеспечивающий координацию всех технологических процессов [32]. Ключевым органом является лазерная установка, генерирующая луч требуемой мощности. Центральным элементом системы выступает манипулятор, конструкция которого имеет одно неподвижное звено и пять последовательно шарнирно сочлененных

подвижных звеньев с индивидуальными приводами, что обеспечивает высокую гибкость и точность позиционирования [27]. Завершающим элементом является фокусирующее устройство, позволяющее точно направить лазерный луч на обрабатываемую поверхность.



Рисунок 2- Структурная схема промышленного робота

Такая конструкция обеспечивает роботу широкие функциональные возможности и позволяет выполнять сложные технологические операции с высокой точностью и повторяемостью [31]. Интеграция лазерного оборудования с роботом манипулятором создает универсальную систему, способную адаптироваться к различным производственным задачам и обеспечивать стабильное качество обработки [17]. Особое значение имеет возможность точного управления параметрами лазерного луча и траекторией движения манипулятора, что открывает новые возможности для автоматизации сложных технологических процессов.

В качестве оснащение промышленного робота требуется установка современной системы лазерной сварки, представляющей собой сложный технологический комплекс. Физической основой данной технологии является термическое воздействие сфокусированного лазерного луча высокой плотности энергии на обрабатываемую поверхность материала [26]. При этом происходит локальный нагрев материала до температуры плавления с формированием точного и прочного сварного шва [19].

Системы лазерной сварки подразделяются на три основных типа:

- твердотельные;
- газовые;
- волоконные.

Каждый тип имеет свои особенности применения. Так твердотельные лазеры, использующие кристаллические или стеклянные активные среды, обеспечивают высокую стабильность параметров излучения. Газовые лазеры, работающие на смеси углекислого газа, азота и гелия, отличаются высокой средней мощностью и хорошим качеством излучения. Наиболее же перспективными для роботизированных технологических систем являются волоконные лазеры, в которых активная среда представляет собой оптическое волокно, что обеспечивает компактность, высокий КПД и исключительную стабильность характеристик.

Выбор конкретного типа лазерной системы для РТК определяется комплексом технико-экономических факторов. Ключевыми критериями выбора будут являться мощность излучения, качество формируемого шва, надежность и долговечность оборудования, а также экономическая эффективность эксплуатации.

Далее рассмотрим конфигурацию каждого отдельного типа лазерных головок по отдельности.

В случае газового лазера (рис. 3), он «содержит лазерную головку, в корпусе которой размещены плоские электроды с зазором, образующим разрядный промежуток, совмещенный с оптическим каналом резонатора.

Канал подвода ВЧ-мощности к разрядному промежутку снабжен согласующим устройством П-типа, например, ленточным проводником, соединенным с ВЧ-электродом в симметричных относительно его центра точках. Система охлаждения выполнена в виде коаксиальных трубок ввода-слива хладагента.» [12, стр. 2]

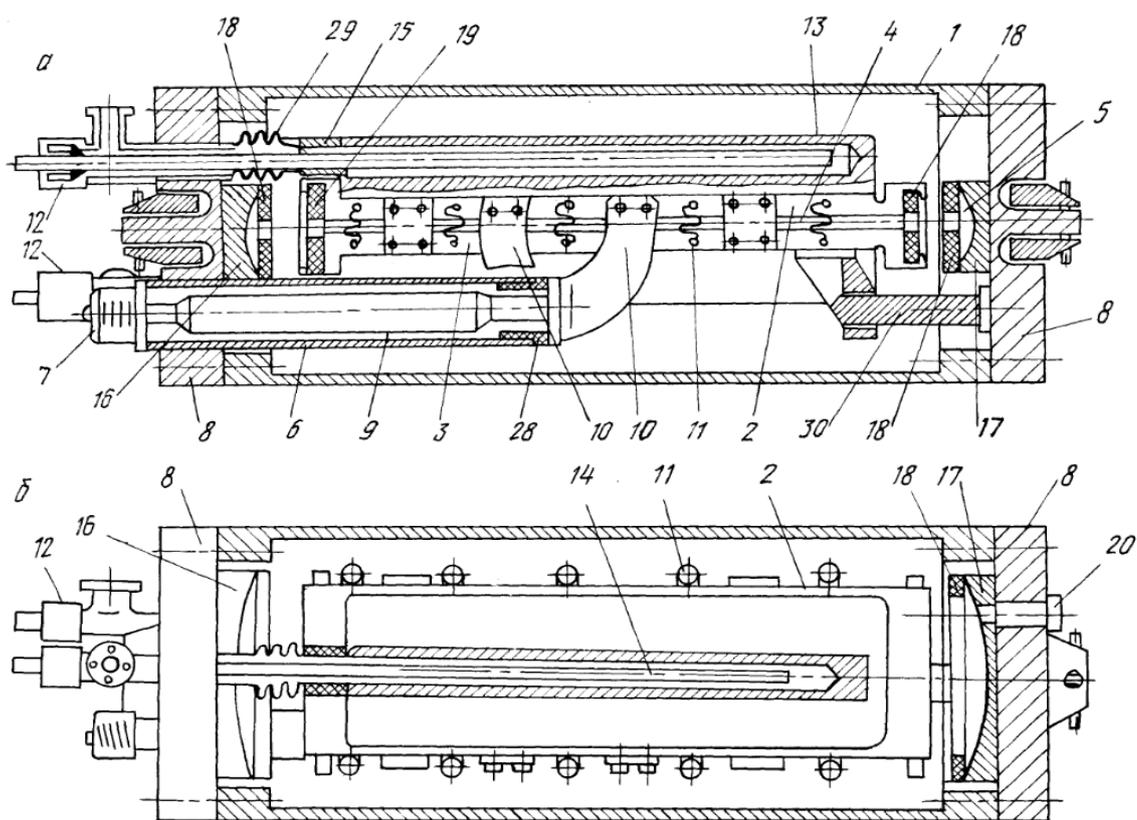


Рисунок 3 – Устройство газовой лазерной головки

На рисунке 3 изображено устройство газовой лазерной головки, включающей в себя: 1 – цилиндрический корпус; 2 – первый плоский электрод; 3 – второй плоский электрод; 4 – разрядный промежуток; 5 – оптический канал; 6 – канал подвода ВЧ-мощности; 7 – электрический ввод; 8 – торцевой фланец; 9 – центральный проводник; 10 – ленточный проводник; 11 – катушки индуктивности; 12 – система охлаждения; 13, 14 – коаксиальные трубки; 15 – изолятор; 16, 17 – зеркало; 18 – защитный экран; 19 – упорные

керамические прокладки; 20 – выводное окно; 21 – поворотное зеркало; 22 – дифракционный ответвитель; 23 – линза; 24 – датчик уровня средней мощности выходного излучения; 25 – ВЧ-генератор возбуждения; 26 – усилитель; 27 – блок управления; 28 – муфты; 29 – сильфон; 30 – штырь.

Твердотельный лазер (рис. 4) «содержит корпус, активный элемент, импульсную лампу накачки, отражатель, модулятор добротности и резонатор, включающий выходное плоское и глухое сферическое зеркала, а также блок питания, электрически связанный с лампой накачки. Отражатель выполнен разъемным и состоит из двух частей, на обращенные друг к другу поверхности, которых нанесено светорассеивающее покрытие. На торцовых гранях корпуса закреплены оправы с зеркалами резонатора, каждая из которых имеет плоскую опорную поверхность для сопряжения с корпусом. В одной из оправ закреплено выходное зеркало резонатора, а в другой оправе, установленной с возможностью котиловочных перемещений вдоль опорной поверхности и фиксации в произвольном положении, закреплено глухое зеркало. На одной из боковых граней корпуса выполнено отверстие для доступа к его внутренней полости, закрываемое крышкой, на другой боковой грани корпуса выполнены элементы сопряжения с изделием применения, во внутренней полости корпуса размещены кронштейн с активным элементом, установленным на эластичных прокладках с возможностью котиловочных поворотов вокруг двух взаимно ортогональных осей, перпендикулярных оси резонатора, а также первая часть отражателя и модулятор добротности, а импульсная лампа накачки и вторая часть отражателя закреплены на крышке, при этом активный элемент выполнен из материала, преобразующего генерируемую на рабочем переходе длину волны излучения в стоксовы компоненты, а блок питания выполнен в виде единой платы, включающей источник питания, конденсатор, формирователь импульсов напряжения, импульсный трансформатор, и электрически связанной с импульсной лампой, модулятором добротности и корпусом.» [5, стр. 1]

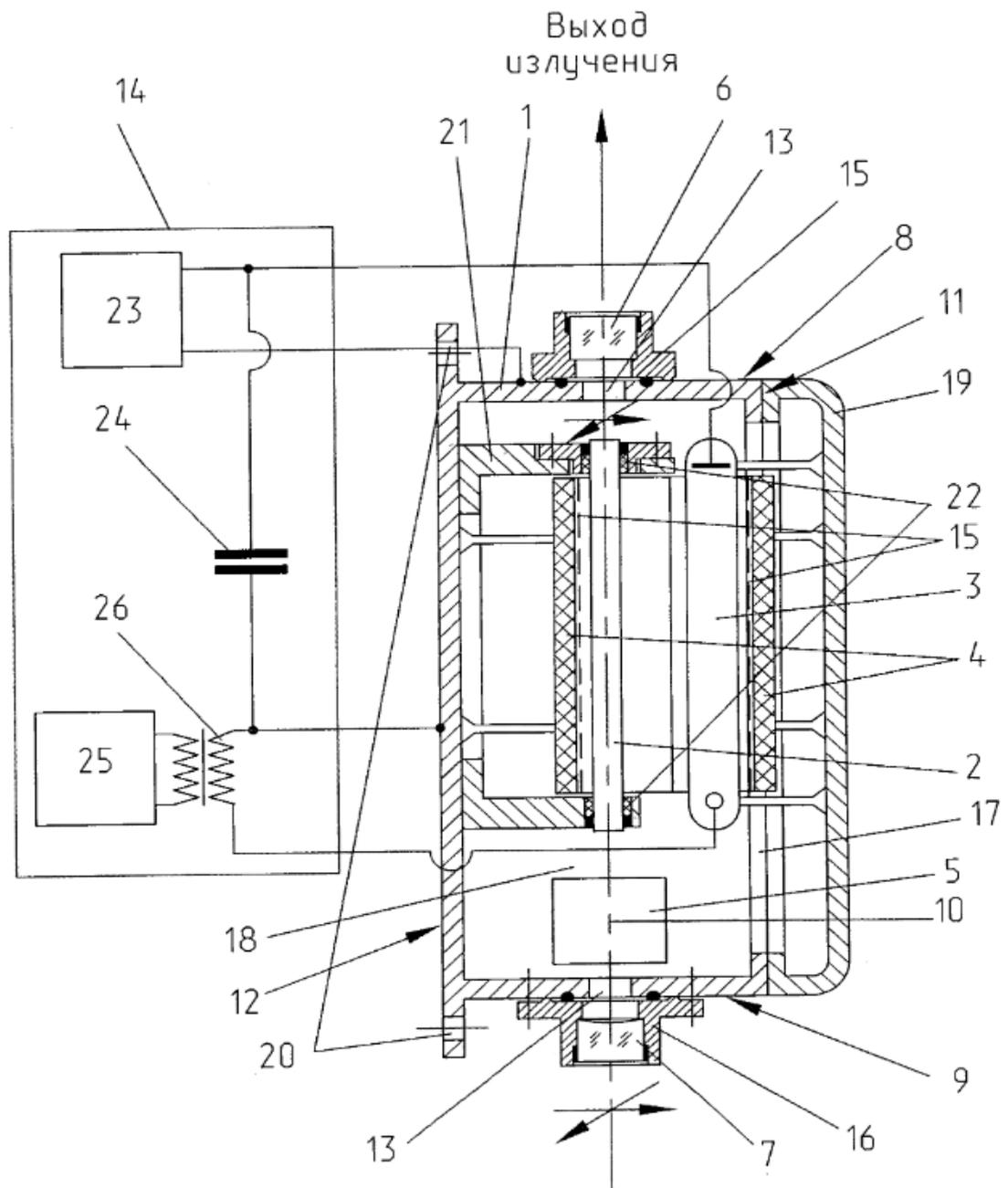


Рисунок 4 – Устройство твердотельной лазерной головки

На рисунке 4 изображено устройство твердотельной лазерной головки, включающей в себя: 1 – корпус; 2 – активный элемент; 3 – импульсная лампа накачки; 4 – отражатель; 5 – модулятор добротности; 6 – выходное зеркало; 7 – глухое зеркало; 8, 9 – торцовые грани; 10 – резонатор; 11, 12 – боковые грани; 13 – сквозное отверстие; 14 – блок питания; 15, 16 – оправы; 17 – отверстие для доступа к внутренней полости; 18 – внутренняя полость; 19 – крышка; 20 – элементы сопряжения; 21 – кронштейн; 22 – эластичные прокладки; 23 –

источник питания; 24 – конденсатор; 25 – формирователь импульсов напряжения.

Преимуществами газового лазера являются:

- легкость в использовании;
- универсальность;
- миниатюрные габариты;
- возможность интенсивной эксплуатации.

Твердотельный лазер имеет же следующие преимущества:

- мощность излучения;
- фокусное расстояние;
- наличие дополнительного функционала (например, автофокус).

В данной работе в качестве оптимальной системы лазерной резки будет использован оптоволоконный иттербиевый лазер, имеющий преимущества, такие как отсутствие отражающих зеркал и меньшие потери мощности, с газовой головкой [13]. В качестве рабочей среды в представленном оборудовании выступает чистый кислород, который имеет ряд преимуществ по сравнению с лазерами на углекислом газе:

- меньшая длина волны (1,07 мкм), обеспечивающая больший коэффициент поглощения излучения для металлов и соответственно повышение эффективности обработки;
- высокое качество излучения;
- подвод излучения к оптической головке по оптоволокну (отсутствие трассовой оптики);
- высокая энергетическая эффективность (КПД до 30 %);
- возможность реализации режима дистанционной обработки;
- минимальные затраты на обслуживание и эксплуатацию.

«Волоконный лазер состоит из блока питания и излучателя, который включает оптически связанные активный элемент в виде активного волоконного световода и источник диодной накачки, при этом первый выход блока питания электрически связан с входом излучателя, отличающийся тем,

что излучатель дополнительно содержит термодатчик, выход которого электрически связан с входом блока питания, и устройство нагревания активного элемента, выполненное в виде металлической пластины с установленными на ней одним или несколькими электрическими нагревательными элементами, силовые выводы которых электрически связаны с вторым выходом блока питания.» [4, стр. 1]

Волоконные лазеры (рис. 5) имеют преимущества перед другими типами лазеров, такие как компактность, гибкость и возможность работы на больших расстояниях, а также существуют различные типы синхронизации мод в волоконных лазерах, включая активную и пассивную синхронизацию [23].

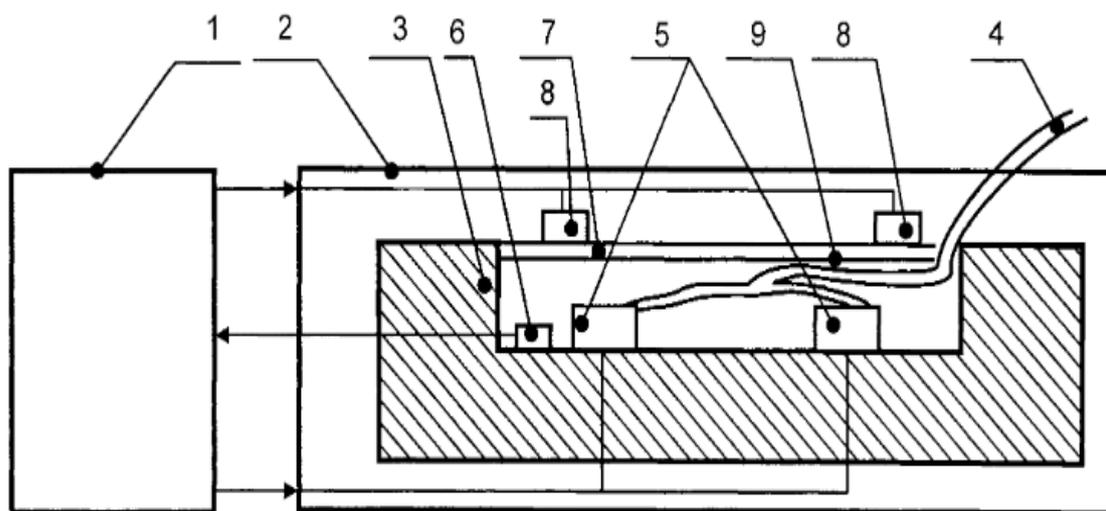


Рисунок 5 – Устройство волоконного лазера:

На рисунке 5 изображено устройство волоконного лазера, включающего в себя: 1 – блок питания; 2 – излучатель; 3 – корпус; 4 – оптически связанный активный элемент; 5 – полупроводниковые диоды; 6 – термодатчик; 7 – металлическая пластина; 8 – нагревательные элементы; 9 – поверхность пластины 7.

Так же рассмотрим различные варианты оснастки, сравнив их между собой. Так как её выбор может значительно повлиять на производительность и эффективность технологического процесса.

Существует множество видов оснастки таких как: поворотный стол, тактовый стол и прочие.

Поворотный стол (рис.6, 7) представляет из себя оснастку, которая помогает расширить функциональные возможности оборудования. С помощью такой оснастки возможна многокоординатная обработка, то есть обработка четырех и пяти осевых операций за один установ благодаря конструкции, что в свою очередь сокращает время, которое затрачивается на переустановку детали.

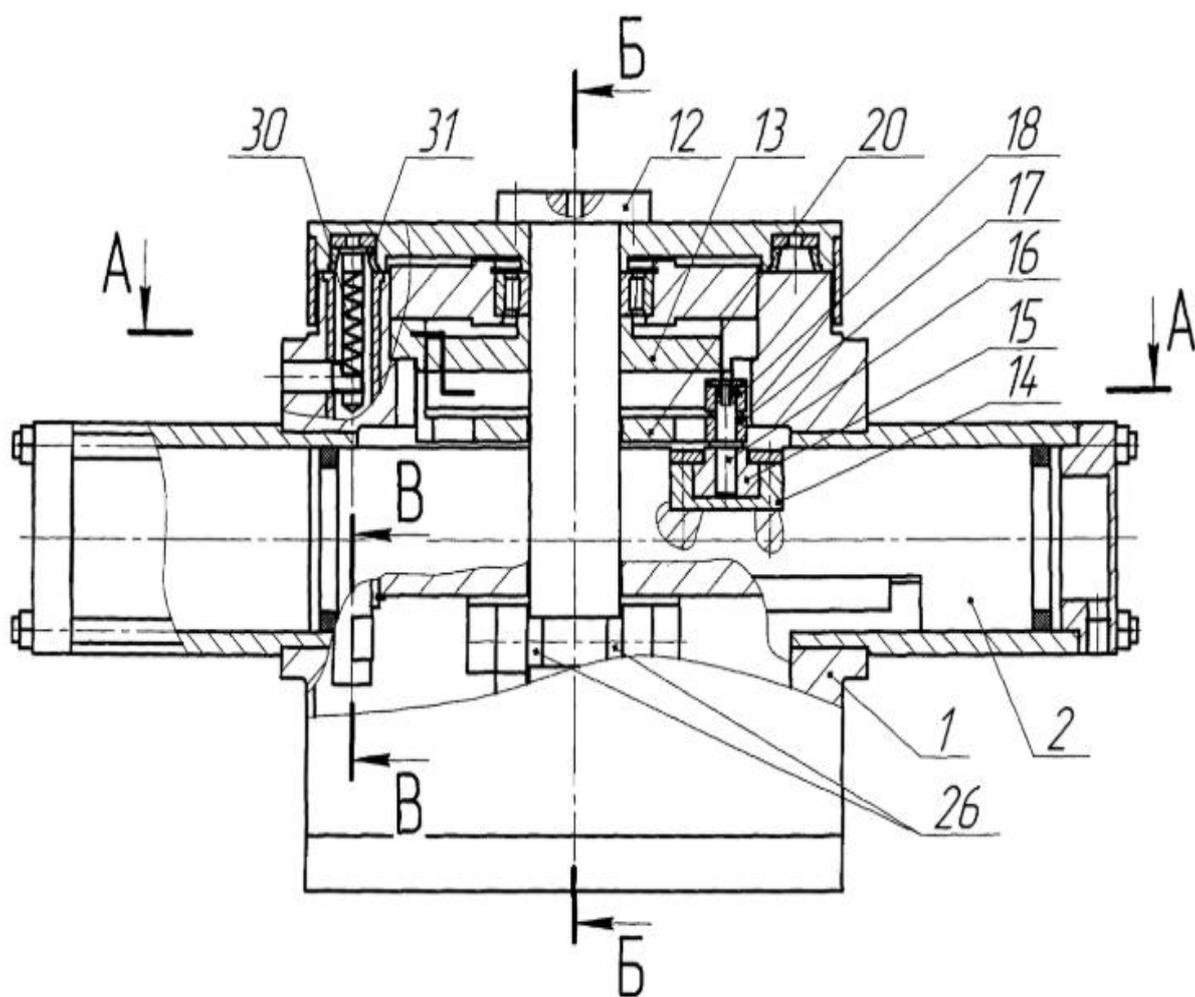


Рисунок 6 – Устройство поворотного стола

# Б-Б

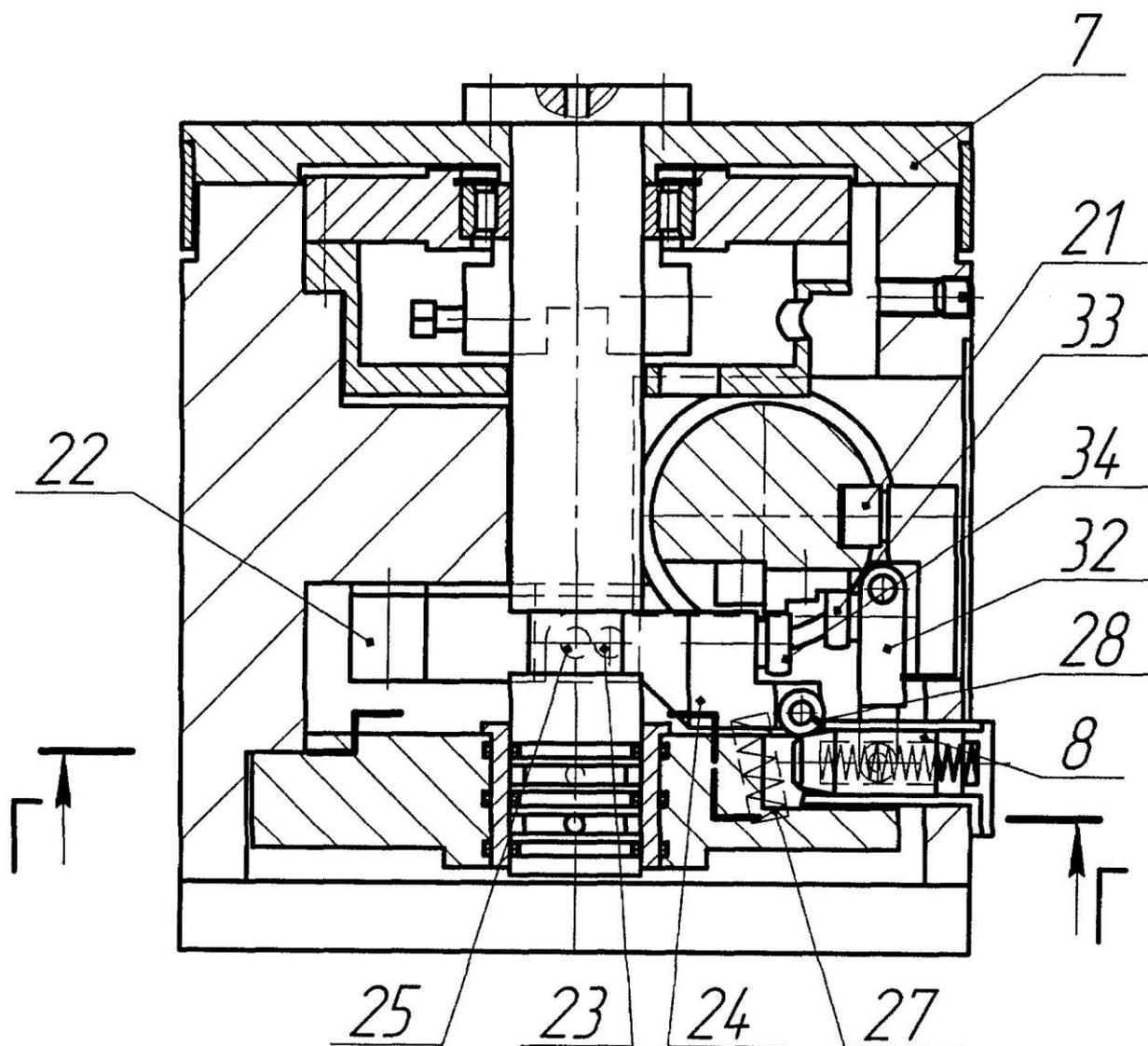


Рисунок 7 – Устройство поворотного стола сечение Б-Б

На рисунках 6 и 7 показано устройство поворотного стола, включающего в себя: 1 – корпус; 2 – шток; 7 – поворотная планшайба; 8 – подпружиненный плунжер; 12 – боковые грани; 13 – водило с прямолинейным пазом; 14 – направляющая; 15 – ползун; 16 – несущий палец; 17, 18 – ролики; 20 – стакан; 21, 33 – ролики; 22 – кронштейн; 23, 25 – ось; 24, 28, 32 – вилки; 27 – пружины; 26 – сухари; 30 – подпружиненная пружина; 31 – втулка.

«Стол поворотный, содержащий корпус с осью, установленную на оси поворотную планшайбу и размещенные в корпусе механизмы фиксации, подъема, поворота и прижима планшайбы, отличающийся тем, что в корпусе размещен шток с установленными на нем параллельно кулачками управления механизмами фиксации, подъема и прижима планшайбы, причем кулачок управления механизмом фиксации планшайбы имеет постоянный профиль, а кулачок управления механизмом подъема и прижима планшайбы имеет два профиля - профиль подъема и прижима планшайбы и профиль усиления прижима последней.» [1, стр 1]

Так же в роботизированных технологическом комплексах используются тактовые столы (рис 8), представляющие из себя загрузочное устройство с шаговым перемещением. На нем устанавливается запас заготовок, которые обрабатываются согласно заданному такту их перемещения. Это помогает автоматизировать процесс. Однако, в рассматриваемом случае не является целесообразным.

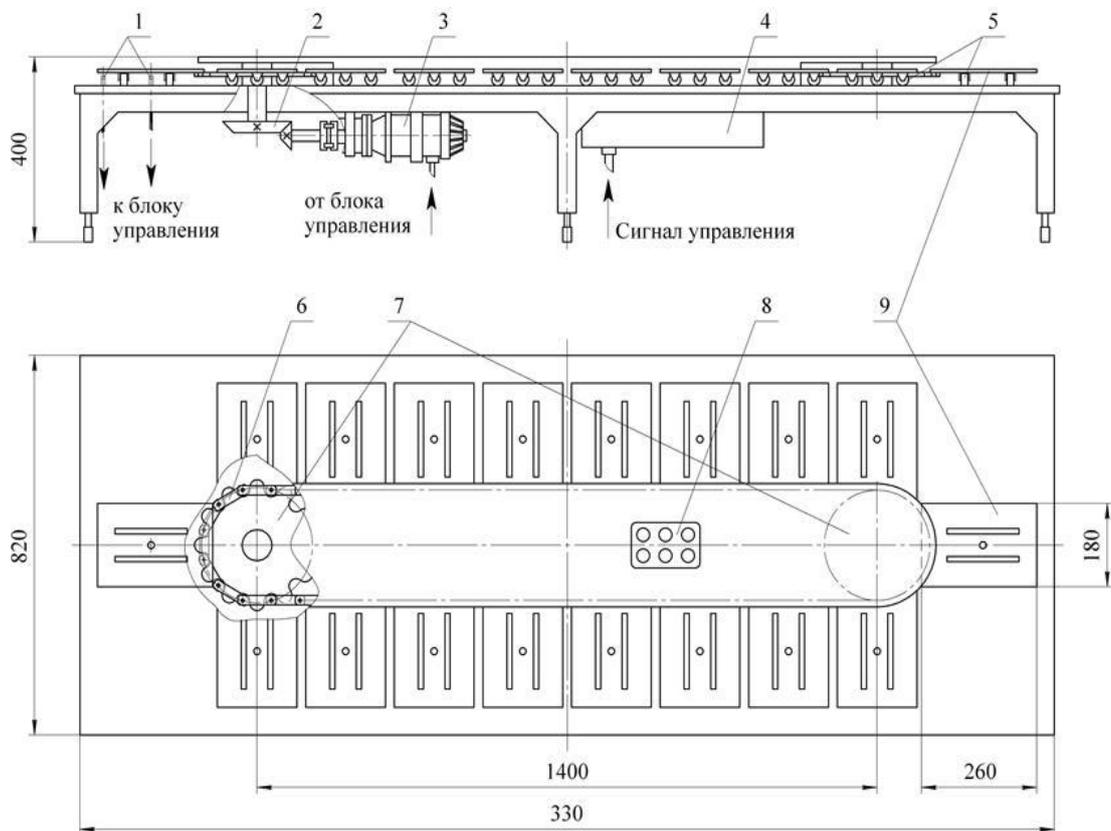


Рисунок 8 – Общий вид тактового стола

В проектируемом РТК оптимальным будет использование поворотного стола с оснасткой «спутник», представленный на рисунке 9:

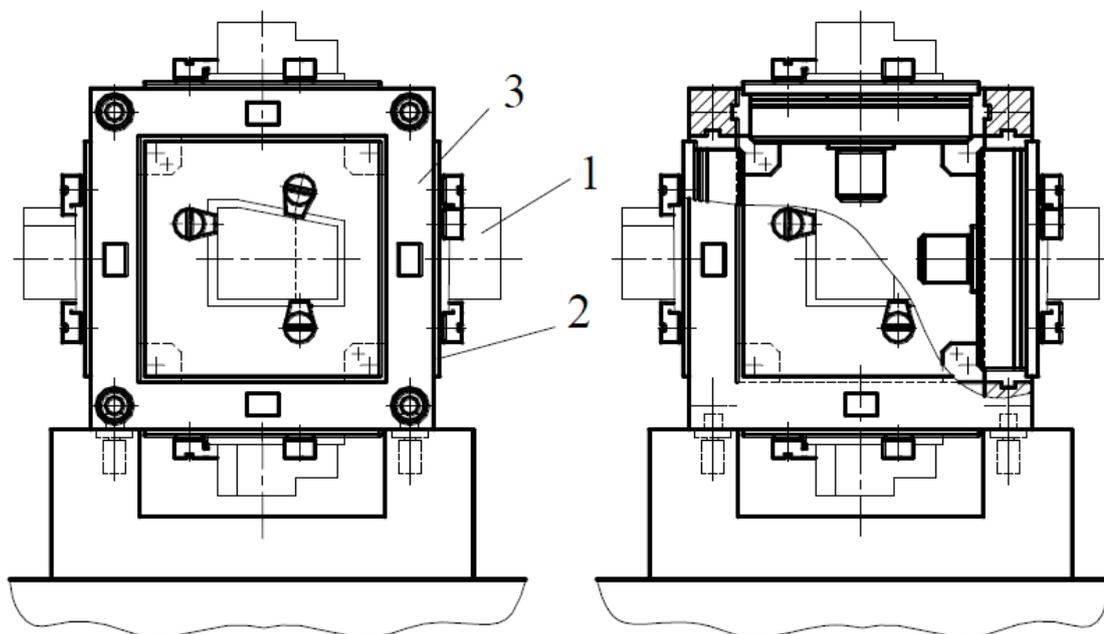


Рисунок 9- Общий вид оснастки «Спутник»

«Многоместное приспособление - спутник содержит многогранную раму призматической формы, которая выполнена сборной. Рама состоит и собрана из трехпалых крестовин с расходящимися от вершины крестовины выступами призматического сечения. Выступы оканчиваются опорными торцами. Вдоль каждого выступа крестовины имеется ступенчатое отверстие, при этом отверстия всех выступов крестовины расположены в различных направлениях, но сходятся и взаимопересекаются в одной точке у вершины крестовины. Отверстие в выступе выполнено сквозным, имеет вход со стороны вершины на боковой грани крестовины и выход со стороны опорного торца выступа крестовины. Каждая пара крестовин между собой взаимно состыкована парами противоположно направленных выступов этих крестовин с прилеганием их опорных торцов и соединена устройством базирования и крепления. Имея несколько выступов, каждая крестовина своими выступами соединена с выступами различных крестовин. Устройства базирования и

крепления установлены в соосных ступенчатых отверстиях выступов состыкованных крестовин в месте расположения опорных торцев выступов. Устройство базирования и крепления состоит, например, из установочного пальца с резьбовым отверстием и двух винтов. Выступы крестовин стянуты с двух сторон винтами, ввинченными в резьбовое отверстие установочного пальца. Имеется вариант рамы с плавающими крестовинами, при этом между опорными торцами выступов на установочных пальцах дополнительно размещены упругие элементы, например пружины и крестовины, имеют возможность скольжения относительно установочных пальцев» [30, с. 3].

Данная конструкция обеспечивает высокоточную многоместную, многоинструментальную и многостороннюю обработку деталей в условиях автоматизированного производства, благодаря своей конфигурации, позволяющей использовать все её плоскости для закрепления и базирования деталей.

#### **1.4 Формулировка задач работы**

Использование дуговой сварки, несмотря на свою распространенность и отработанность технологического процесса, демонстрирует существенные ограничения в современных условиях производства. Этот метод не соответствует растущим требованиям к производительности, уровню автоматизации и качеству обработки. Кроме того, эксплуатация дугового сварочного оборудования сопряжена с рядом технических сложностей, которые существенно снижают эффективность производственного процесса.

В современных условиях возникает необходимость в принципиально ином технологическом решении. А именно оборудование, которое будет соответствовать новым критериям, а также обладать более высоким уровнем автоматизации, повышенной точностью обработки и гарантированной надежностью. Представленный выше анализ показывает перспективность в направлении использования промышленных роботов с интегрированными

лазерными головками, входящими в состав роботизированных технологических комплексов.

Данное решение имеет ряд преимуществ. Во-первых, лазерная сварка обеспечивает существенно более высокую скорость обработки при минимальном термическом воздействии на материал деталей. Во-вторых, РТК лазерной сварки позволяет достичь высокой точности позиционирования, что критически важно при работе с листовыми панелями автомобиля. В-третьих, система способна поддерживать высокую стабильность параметров обработки на протяжении всего производственного процесса благодаря современным системам управления и датчикам.

Важно отметить, что интеграция такого технологического процесса, как лазерная сварка, открывает новые возможности для автоматизации процесса. Современные системы позволяют осуществлять адаптивное управление параметрами обработки в реальном времени и автоматический контроль качества сварного шва. Все это делает РТК лазерной сварки оптимальным решением для современного автомобилестроения, где требования к качеству, производительности и гибкости процессов постоянно возрастают.

## **2. Разработка структурной схемы системы управления**

### **2.1. Предъявляемые требования к системе управления**

На основе проведенного анализа существующих технических решений был выбран промышленный робот с интегрированной лазерной головкой как оптимальный вариант для автоматизации процесса сварки. Однако для обеспечения корректной работы всего роботизированного технологического комплекса требуется разработка системы управления, включающей комплекс датчиков и контролирующих устройств.

В современной робототехнике активно применяются различные сенсорные системы, играющие ключевую роль в обеспечении точности и надежности работы промышленных роботов. В рассматриваемом случае датчики будут выполнять несколько функций:

- контроль точности позиционирования;
- мониторинг качества сварного шва;
- обеспечение выполнения всех технических требований.

К датчикам системы управления предъявляется ряд строгих требований, обусловленных спецификой работы роботизированного комплекса. Прежде всего, они должны обладать компактными габаритами и простой конструкцией, чтобы не усложнять кинематику робота-манипулятора. Вес датчиков имеет особое значение, так как их установка на конце исполнительного органа влияет непосредственно на динамические характеристики сервоприводов и общую маневренность системы [9].

Не менее важным требованием является жесткость конструктивных элементов датчиков, что обеспечивает необходимую точность определения пространственных координат. Помехоустойчивость оборудования – обязательное условие для стабильной работы в условиях промышленного производства.

Надежность датчиков должна быть достаточно высокой, учитывая интенсивность эксплуатации промышленного оборудования. Они должны сохранять работоспособность при изменении параметров окружающей среды – температуры, влажности, вибрационных нагрузок. Конструкция должна предусматривать гальваническую развязку входных и выходных цепей для обеспечения электробезопасности.

Точность измерения должна строго соответствовать техническим требованиям процесса сварки, так как от этого напрямую зависит качество готовых изделий. Особые требования предъявляются к эргономике обслуживания, экономической эффективности эксплуатации и безопасности работы с оборудованием. Все эти факторы в совокупности определяют выбор конкретных моделей датчиков и их интеграцию в систему управления РТК.

## **2.2. Датчики управления**

Датчики являются важнейшим компонентом промышленных роботов, обеспечивая точное управление их движениями и действиями. Без этих устройств невозможно представить работу современного автоматизированного производства. Все датчики, используемые в робототехнике, можно разделить на две основные группы – датчики внешней и внутренней информации.

Датчики внешней информации представляют собой сложные устройства, которые непрерывно контролируют состояние рабочего объекта. Эти сенсоры необходимы для корректного выполнения технологических операций, так как определяют ключевые параметры объекта, такие как форму, точное положение в пространстве, размеры и другие. Благодаря этим данным робот может адаптировать свои действия под конкретные производственные условия.

Датчики внутренней информации же выполняют иную функцию. Они следят за точностью выполнения и повторяемостью технологических

операций. Эти устройства являются обязательным условием для стабильной работы любого промышленного робота. Для реализации этой функции в современных роботизированных системах применяются высокоточные сервомеханизмы с обратной связью, которые постоянно получают и анализируют данные о состоянии рабочих органов.

Среди всего многообразия датчиков, используемых в робототехнике, можно выделить четыре основных типа, а именно датчики положения и перемещения, силы и момента, расстояния и визуальные. Каждый из этих типов выполняет свою функцию в системе управления роботом.

Датчики положения и перемещения отвечают за контроль линейных и угловых перемещений рабочих органов робота. Эти устройства с высокой точностью определяют не только текущее положение механических частей, но и скорость их движения, что особенно важно для плавного и точного выполнения операций.

Датчики силы и момента же работают на принципе измерения механических деформаций. Эти устройства позволяют точно определить величину прикладываемого усилия или крутящего момента, что критически важно для таких операций как сборка, шлифовка или запрессовка деталей. Благодаря этим датчикам робот может дозировать усилие, предотвращая повреждение как обрабатываемых деталей, так и собственных механизмов.

Датчики расстояния обеспечивают роботу возможность определять дистанцию до объектов в рабочей зоне. Эти устройства используют различные физические принципы работы, такие как ультразвуковые волны или лазерное сканирование. Полученная информация позволяет роботу принимать решение о траектории движения, избегая при этом столкновения и точно позиционируя инструмент относительно обрабатываемой детали.

Визуальные датчики, работающие в оптическом диапазоне, предоставляют роботу информацию о геометрических и физических характеристиках окружающей среды. Эти сложные системы, включающие в себя камеры и специализированное программное обеспечение, позволяют

распознавать объекты, определять их положение в пространстве, выявлять дефекты и принимать решение на основе визуального анализа.

Все перечисленные виды датчиков являются неотъемлемой частью современных промышленных роботов. Без них невозможно выполнение сложных технологических операций, требующих высокой точности и адаптивности. Современные роботизированные системы обычно комбинируют несколько типов датчиков, что позволяет создавать гибкие и эффективные производственные решения [20]. Ниже мы рассмотрим более подробно несколько типов датчиков, которые будут использоваться в нашем случае.

Ультразвуковой датчик (рис.10) расстояния относится к датчикам внешней информации бесконтактного типа. При использовании датчиков такого типа из-за отсутствия непосредственного соприкосновения объектом не приходится опасаться ударов об объект или плохого контакта, а так как рабочий орган рассматриваемого робота – это лазерная головка, контактный датчик был бы не целесообразен и не подходил бы под заданные условия [29].



Рисунок 10– Ультразвуковой датчик

В конструкции данного датчика находится пьезоэлектрический преобразователь, являющийся как излучателем, так и приемником одновременно [16]. Преобразователь излучает пакет звуковых импульсов. После он принимает эхо от импульсов и преобразует сигнал в напряжение, которое следом подается на контроллер. Он, в свою очередь, обрабатывает данные и вычисляет расстояние до объекта.

Частота ультразвукового датчика находится в диапазоне 65 кГц до 400 кГц, в зависимости от типа датчика, а частота следования импульсов — между 14 Гц и 140 Гц.

Датчик имеет активный диапазон, являющийся рабочим диапазоном обнаружения. Этот диапазон представляет собой расстояние, в пределах которого ультразвуковой датчик может обнаружить объект, и неважно, приближаются ли объект к чувствительному элементу в осевом направлении или двигается поперек звукового конуса [7].

Индуктивный датчик перемещений (рис.11) основан на принципе электромагнитной индукции, а также, как и ультразвуковой является бесконтактным. Принцип работы заключается в том, что электромагнитные поля способны изменять свои параметры в зависимости от значения магнитной проводимости на пути протекания потока [25]. Его работа основывается на классическом варианте катушки, намотанный на сердечник.



Рисунок 11– Индуктивный датчик перемещений

Магнитное поле генерируется при протекании электрического тока по виткам в катушке. Ферромагнитный материал обеспечивает максимальную пропускную способность во время того, как магнитное поле движется по сердечнику.

Они обладают высокой надежностью за счет простой конструкции, а также отсутствия подвижных контактов. Датчик может функционировать, как и от преобразователей, так и от бытовой сети, а также он способен обеспечивать значительную мощность на входе.

Датчик высоты (рис.12) является одним из важных устройств для лазерных головок и выполняет функцию отслеживания и поддержания оптимального зазора между лазерной головкой и обрабатываемой поверхностью.



Рисунок 12– Датчик высоты

Его работа основана на принципе емкостного измерения, что позволяет добиться высокой точности позиционирования. Датчик жестко закреплен на корпусе лазерной головки и соединен с соплом через экранированный кабель. Для предотвращения электрических наводок и обеспечения стабильности

сигнала между соплом и корпусов установлена керамическая изолирующая проставка, обладающая высокой диэлектрической прочностью и термостойкостью.

При изменении расстояния между соплом и поверхностью обрабатываемого металла возникает вариация электрической емкости в системе. Датчик фиксирует эти изменения, преобразуя их в цифровой или аналоговый сигнал, который передается в контроллер блока управления [11]. Управляющая программа анализирует полученные данные и формирует корректирующий сигнал серводвигателя. Тот, в свою очередь, перемещает лазерную головку в вертикальной плоскости, компенсируя отклонения и поддерживая постоянный рабочий зазор.

Автофокус представляет собой автоматизированный процесс, обеспечивающий точную настройку фокусного расстояния между линзой и материалом без участия оператора. Датчик автофокуса непрерывно измеряет расстояние от фокусирующей линзы до поверхности заготовки, а система управления регулирует высоту либо за счет перемещения рабочего стола, либо за счет вертикального хода самой головки [10].

При помощи датчика автофокуса осуществляется измерение расстояния от фокусирующей линзы до поверхности материала, при этом плоскость рабочего стола движется вверх и вниз, пока электронное устройство не установит нужное расстояние для резки или гравировки.

При вводе в программу данных о толщине материала лазерная система оперативно адаптирует положение линзы [33]. По сути, автофокусировка устраняет необходимость вмешательства человека, повышая эффективность и точность операций лазерной обработки.

Ультразвуковые датчики фокуса интегрированы в режущую головку (рис.13), а также требуют ввода параметров объектива в программу.



Рисунок 13– Ультразвуковой датчик фокуса интегрированный в режущую головку

Датчики с автофокусировкой обеспечивают постепенное многоступенчатое приближение сопла к поверхности, что позволяет лазерному лучу точно проникать в металл [34]. Линза динамически перемещается внутри лазерной головки вертикально, подбирая оптимальное фокусное расстояние в зависимости от положения сопла

### **2.3. Структурная схема системы управления**

При разработке системы управления учитывались современные требования к автоматизированным системам контроля, включающие в себя высокую точность позиционирования, минимальное время реакции, а так же бесперебойную работу во время рабочего цикла и соответствие стандартам промышленной безопасности. Основной акцент был сделан на обеспечение бесконтактного высокоточного позиционирования лазерной головки в процессе выполнения технологических операций.

Система построена по многоуровневой архитектуре. Чувствительный модуль включает емкостные датчики высоты, оптические системы позиционирования, ультразвуковые дальнометры для грубого

позиционирования и термодатчики для температурной компенсации. Вычислительный блок представлен промышленным бортовым компьютером с многоядерным процессором реального времени, дискретными входами/выходами и аппаратными ускорителями для обработки сигналов. Исполнительные устройства состоят из серводвигателей с энкодерами, линейных приводов и системы аварийного останова.

Система функционирует по следующему алгоритму: непрерывный сбор данных со всех датчик, цифровая фильтрация сигналов, анализ параметров в реальном времени с сравнением с технологическими допусками и прогнозированием тенденций изменения параметров. На основе анализа система принимает решения о корректирующих воздействиях через сервоприводы или инициирует аварийную остановку при превышении температурных пределов, выходе за границы рабочей зоны или потере сигнала с важных датчиков.

Для реализации алгоритма работы промышленного робота, а также оптимального технологического процесса была разработана структурная схема управления промышленным роботом с лазерной головкой (рис. 14).

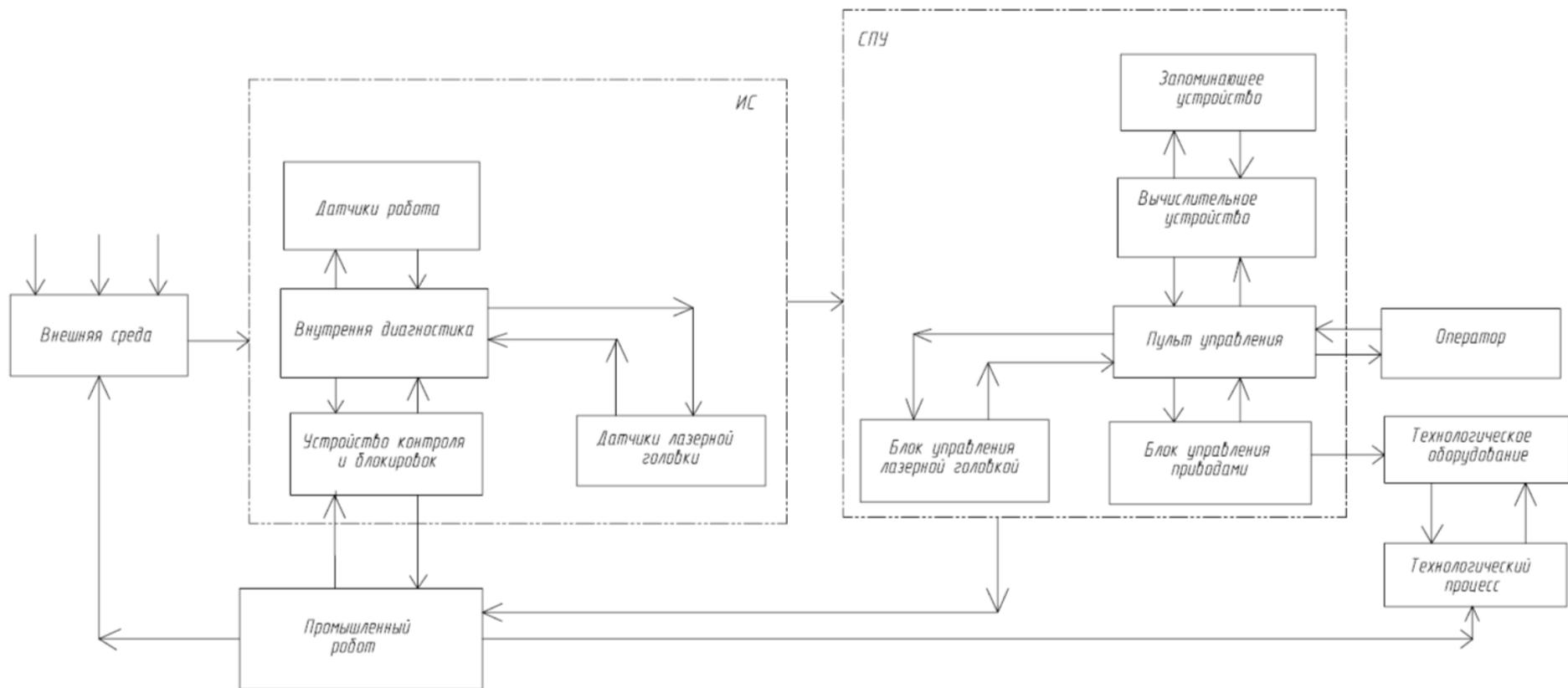


Рисунок 14– Структурная схема управления

Разработанная в ходе выполнения данного раздела структурная схема системы управления промышленным роботом с интегрированной лазерной головкой представляет собой комплексное техническое решение, обеспечивающее слаженное взаимодействие всех функциональных подсистем. Данная система демонстрирует высокую эффективность за счет оптимального сочетания компонентов и программных алгоритмов.

Важным преимуществом предложенного решения является его масштабируемость и гибкость конфигурации. Структура системы позволяет легко адаптировать её для работы с различными типами лазерного оборудования и промышленных роботов, а также интегрировать дополнительные функциональные модули по мере необходимости. При этом сохраняется высокая степень автоматизации процессов и минимизируется необходимость вмешательства оператора в работу системы.

### 3. Расчет и проектирование РТК

#### 3.1. Описание операции сварки

Рассматриваемый базовый вариант сварки представлен на рис.15:



Рис.15 - Базовый вариант сварки

Сварка является технологическим процессом, благодаря которому на итоге мы получаем неразъемные соединения твердых материалов. Они скрепляются посредством установления межатомных связей между двумя деталями.

В машиностроение сварка является одной из ключевых операций, без которой невозможно было бы представить большую часть производимой продукции. Но при условиях крупносерийного производства данный процесс требует улучшения и большой автоматизации процессов, что увеличит производительность. По этой причине рассматривается РТК комплекс с лазерной головкой. Но невозможно представить подобный комплекс без использования робота манипулятора, который перемещает деталь, но также является ключевым в технологическом процессе, так как на него закрепляется рабочий орган.

### **3.2. Выбор оборудования и оснастки**

Выбор модели манипулятора с лазерной головкой, а также манипулятора, который будет перемещать заготовку будет определяться различными критериями.

Для выбора манипулятора с захватным устройством необходимо учитывать прежде всего:

- особенности технологического процесса;
- грузоподъемность;
- критерии сопоставимости;
- расположение приводов;
- способ уравнивания сил звеньев;
- количество степеней свободы.

Для манипулятора же с лазерной головкой необходимыми требованиями являются:

- особенности технологического процесса;
- требования к рабочему органу и системе управления;
- динамическое поведение системы;
- оптимизация положения манипулятора относительно контура резки.

Так же стоит учесть быструю установку необходимого оборудования, демонтаж. Таким образом лучшим вариантом является использование мобильного манипулятора с лазерной головкой.

«Возможности движения робота манипулятора напрямую зависят от кинематической схемы, иными словами структуры «скелета» руки робота.

Манипулятор является открытой кинематической цепью. Каждое его звено соединено между собой кинематическими парами таким образом, что одно из них крепится к основанию, которое может быть подвижным или неподвижным, а другое прикреплено к рабочему органу (захватное устройство, инструмент). В данных устройствах чаще всего такие кинематические пары являются одноподвижными, входящими в пятый класс, то есть воспроизводящими вращательные или поступательные движения. Однако, в случае, когда кинематическая цепь не имеет внутренних замкнутых контуров, тогда количество кинематических пар определяется с помощью числа степеней подвижности манипулятора.» [9, стр 2]

«Проведем анализ существующих типов манипуляторов для последующего выбора кинематической схемы.

Перемещение манипулятора в нужную точку рабочего пространства необходимо три кинематических сочленения, так и для обеспечения ориентации в пространстве для рабочего органа требуется еще три кинематических сочленения.

Манипуляторы делятся между собой на 4 категории в зависимости от способа пространственных перемещений:

- манипулятор декартового типа, имеющий три поступательных сочленения;
- манипулятор шарнирного типа, – три вращательных сочленения;
- манипулятор цилиндрического типа, – одно вращательное и два поступательных сочленения;
- манипулятор сферического типа, – одно поступательное и два вращательных сочленения.» [10, стр 3]

Описанные выше типы компоновки изображены на рисунке 16.

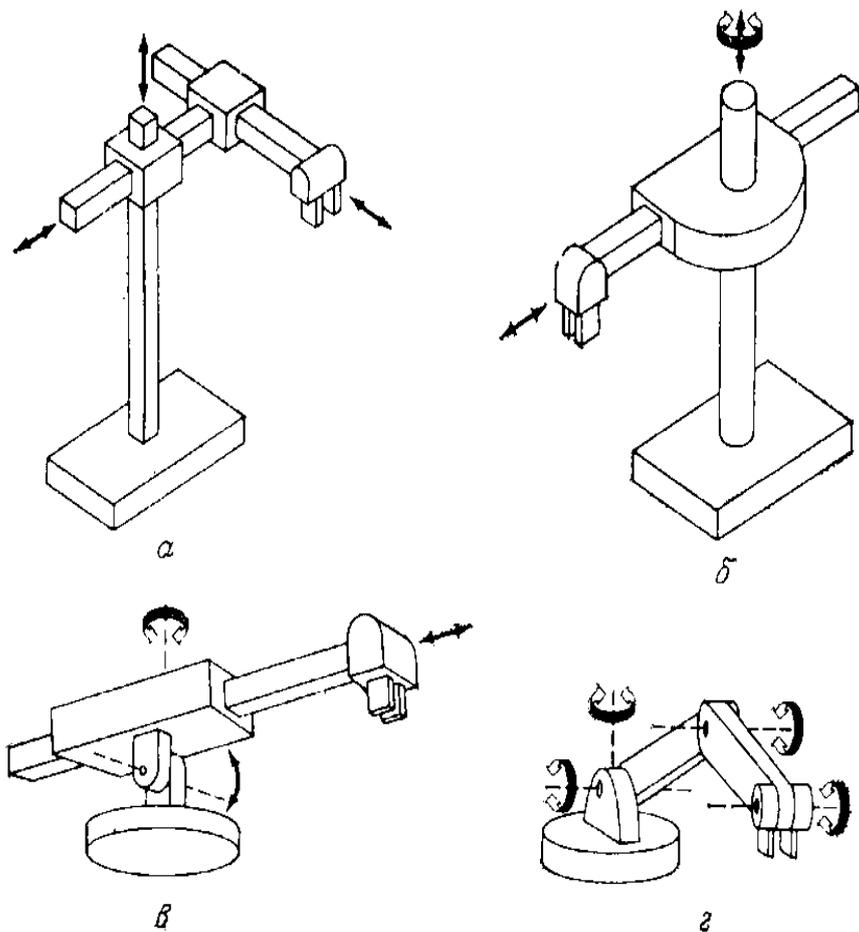


Рисунок 16– Типовые промышленные манипуляторы; а– манипулятор декартового типа; б– манипулятор цилиндрического типа; в– манипулятор сферического типа; г– манипулятор шарнирного типа.

Оптимально выбранное количество кинематических пар манипулятора позволит снизить стоимость системы управления, а также увеличить её точность.

Шарнирный тип является оптимальным для рассматриваемого случая. Так как он позволит вырезать отверстия вне зависимости от конфигурации детали.

### 3.3. Траектория движения робота манипулятора

Построение циклограммы требует определение временных связей оборудования и механизмов РТК. Для этого необходимо построить траекторию движения промышленного робота, скорость перемещения узлов и механизмов, а также определение времени выполнения каждого движения.

Траектория движения робота определяется возможностью его перемещения и возможности выполнения тех или иных операций [8]. В данном случае рассматривается модель робота манипулятора CRP-RH18-20, траектория которого показана на рисунке 17:

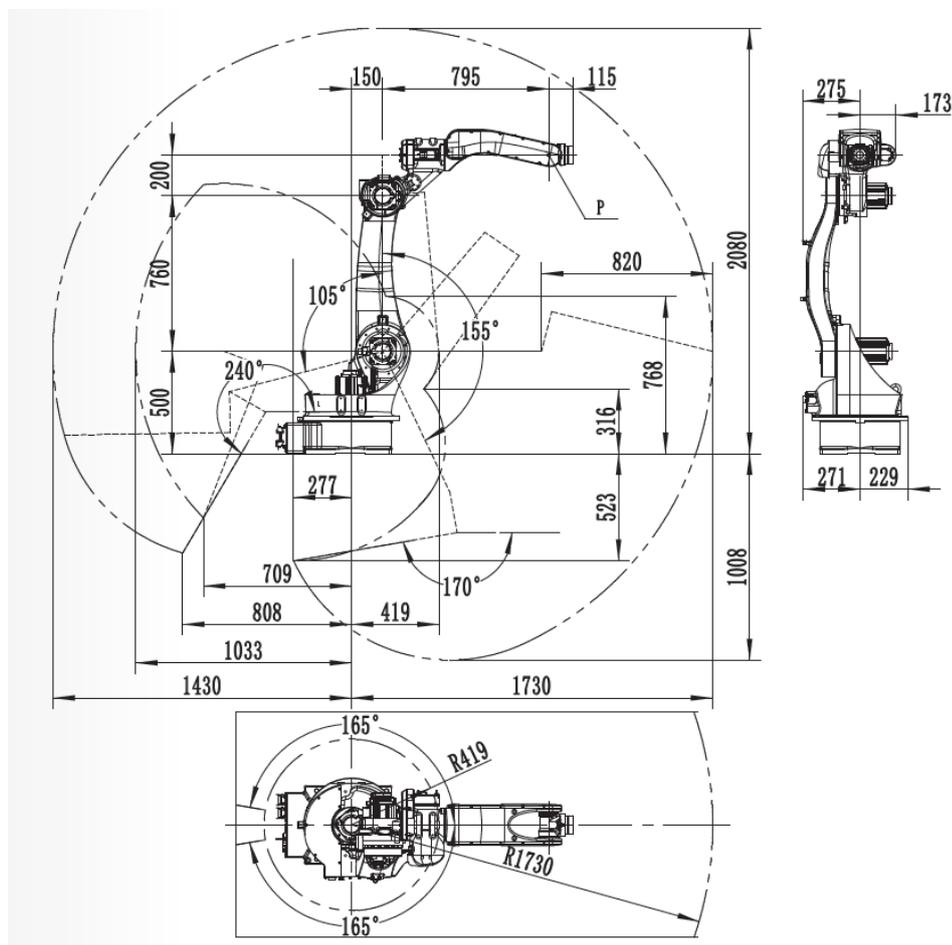


Рисунок 17 – Траектория движения робота манипулятора

Зная траекторию робота, а также его технические характеристики, указанные на чертеже в приложение А.1, дальше построим и рассмотрим циклограмму производительности РТК.

### 3.4. Циклограмма производительности лазерной сварки

Рассмотрим несколько циклограмм (рис.18) для различных компоновок РТК. Где в базовом варианте используется традиционная оснастка, а в двух других разная конфигурация «спутника».

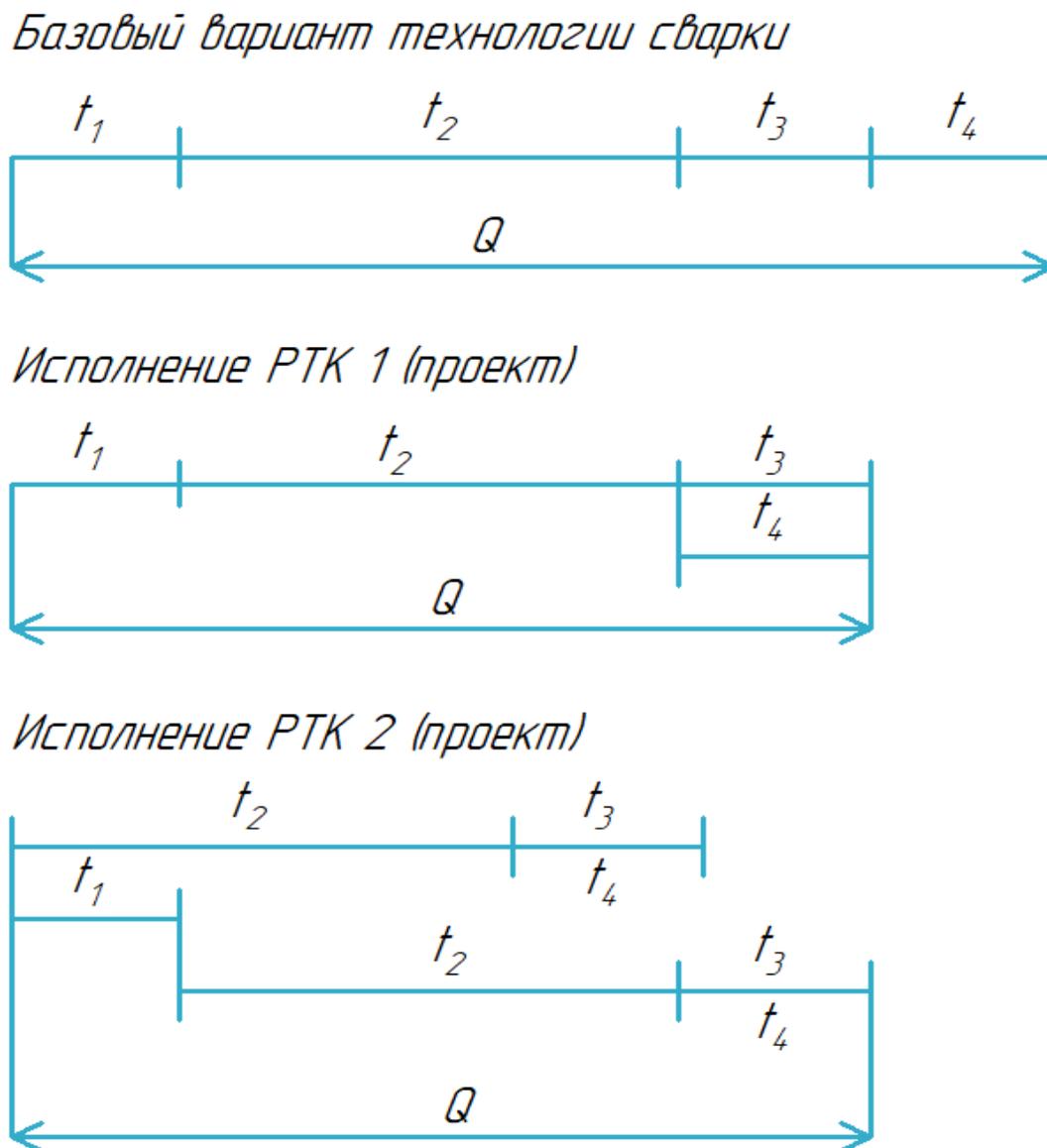


Рисунок 18- Циклограмма технологической операции сварки

На данной циклограмме можно заметить, как сильно различается цикл с использованием оснастки «спутник» в отличие от базового технологического процесса. Причем во втором случае используется более сложная его конфигурация.

Проведем сравнительный расчет по данным циклограммам для всех трех вариантов.

Номинальная производительность базового процесса рассчитывается по формуле 1:

$$Q_H = \frac{t_2}{t_1+t_2+t_3+t_4} \quad (1)$$

где  $t_1$  – время загрузки;

$t_2$  – время работы оборудования;

$t_3$  – время выгрузки;

$t_4$  – время выхода в 0 манипулятора;

Фактическая производительность данного процесса рассчитывалась по формуле (2):

$$Q_\Phi = Q_H - Q_{\text{пер}} \quad (2)$$

где  $Q_{\text{пер}} = \frac{t_{\text{пер}}}{t_p}$ ,  $t_{\text{пер}}$  – время переналадки оборудования

Так же был рассчитан коэффициент использования, который помогает комплексно оценить и понять возможности повышения производительности роботизированного технологического комплекса, а также уровень эксплуатации. Для базового варианта технологического процесса он будет выглядеть следующим образом (3):

$$K_{\text{исп.РТК}} = \frac{Q_\Phi}{Q_H} \quad (3)$$

Во втором случае формула (4) расчета номинальной производительности меняет свой вид, так как время выгрузки и выхода манипулятора в 0 происходят одновременно:

$$Q_H = \frac{t_2}{t_1 + t_2 + t_3} \quad (4)$$

где  $t_1$  – время загрузки;

$t_2$  – время работы оборудования;

$t_3$  – время выгрузки и выхода манипулятора в 0.

Фактическая производительность РТК исполнения 1 (5):

$$Q_{\Phi} = Q_H - Q_{\text{пер}} \quad (5)$$

Коэффициент для РТК в исполнение 1 (6):

$$K_{\text{исп.РТК}} = \frac{Q_{\Phi}}{Q_H} \quad (6)$$

Формула расчета номинальной производительности РТК (7) исполнения 2 так же изменяет свой вид. В данном случае, благодаря более сложной конфигурации, параллельно происходят не только время выгрузки и выхода манипулятора в 0, но и так же время разгрузки.

$$Q_H = \frac{t_2}{t_1 + t_2} \quad (7)$$

где  $t_1$  – время загрузки, выгрузки и выхода в 0 манипулятора;

$t_2$  – время работы оборудования.

Фактическая производительность (8):

$$Q_{\Phi} = Q_H - Q_{\text{пер}} \quad (8)$$

Расчет коэффициента РТК в исполнение 2 (10):

$$K_{\text{исп.РТК}} = \frac{Q_{\Phi}}{Q_H} \quad (10)$$

Сравнения произведенных расчетов представлены на рисунках 19 и 20:

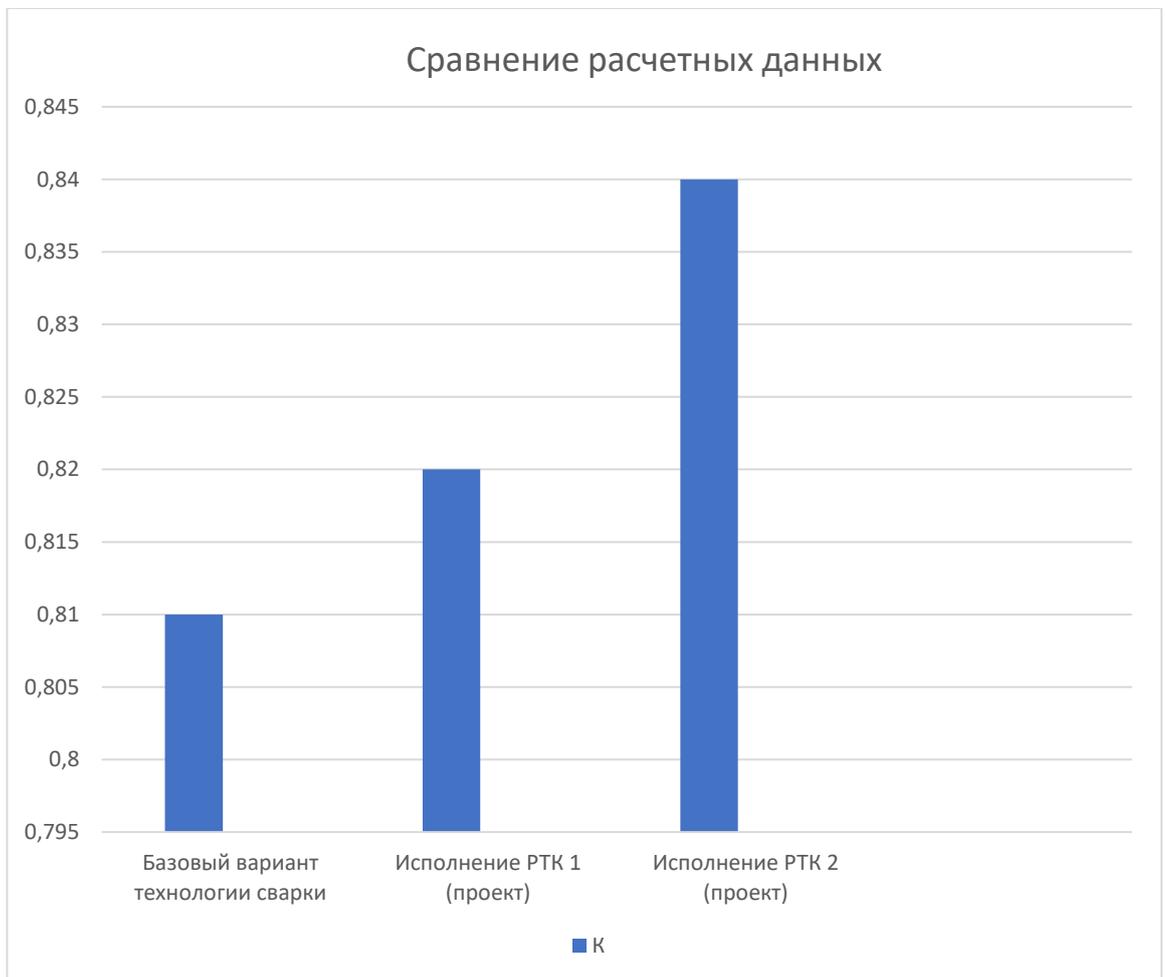


Рисунок 19- Сравнения коэффициента использования РТК

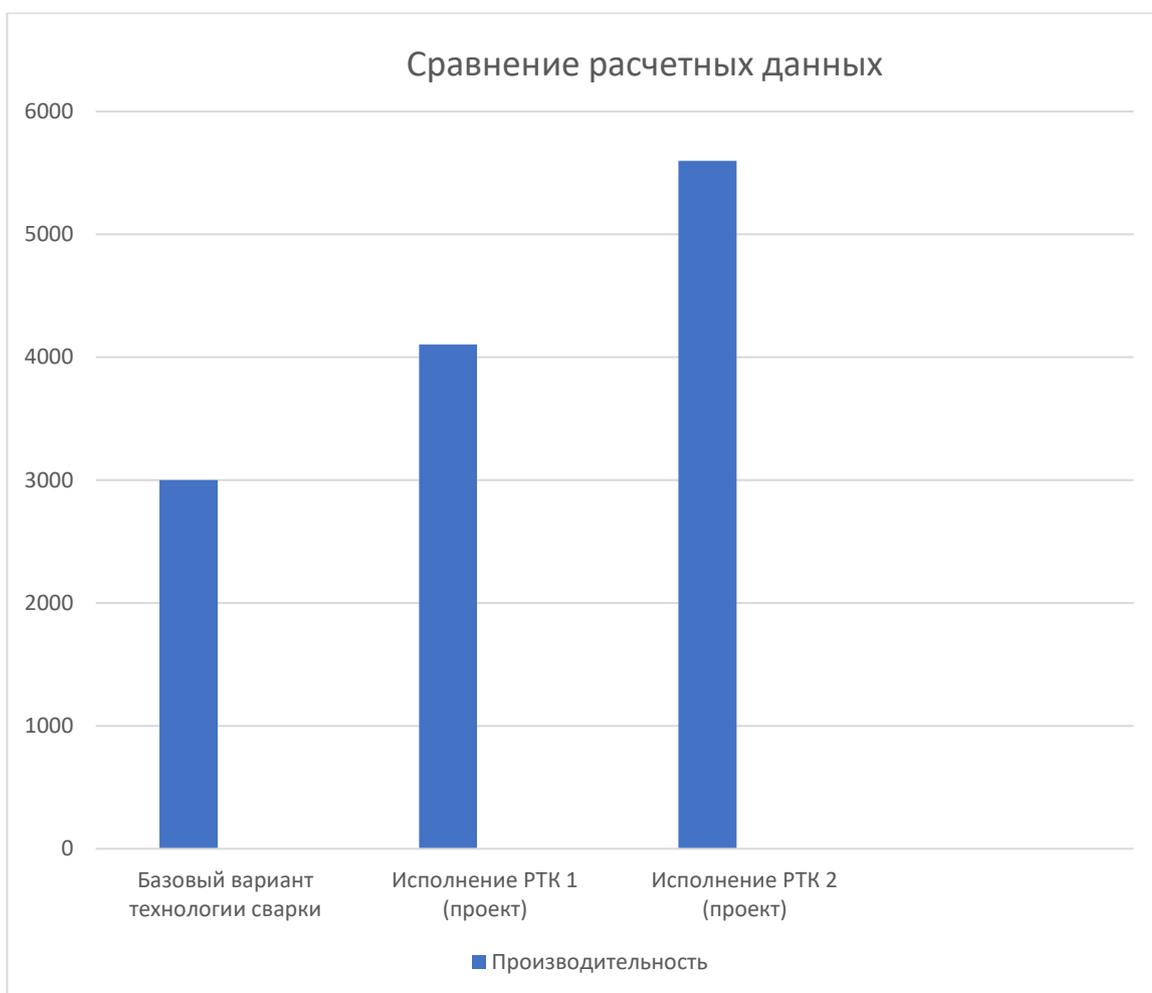


Рисунок 20- Сравнение производительности РТК

Из данного расчета видно, насколько перспективно использование данной оснастки.

### 3.5. Расчет пневмопривода охлаждения

Для обеспечения стабильной работы системы, включающей в себя робот манипулятор и лазерную головку, необходимо рассчитать также системы охлаждения. Отсутствие эффективного теплоотвода может привести не только к термическим деформациям конструктивных элементов, перегреву критических узлов лазерной головки, но и снижению точности позиционирования и преждевременный выход оборудования из строя, что критически важно исключить.

Исходные данные представим в виде таблицы 1:

Таблица 1 – Исходные данные

Параметр	Значение
Тепловая мощность, кВт	2,5
Температура охлаждающей жидкости на входе, °С	20
Допустимая температура на выходе, °С	≤35
Рабочее давление в системе, бар	6
Время срабатывание системы, с	0,5

Далее проведем расчет всех необходимых компонентов.

Требуемый расход теплоносителя рассчитывается по формуле 11:

$$q = \frac{Q}{c \cdot \rho \cdot \Delta T} = \frac{2500}{4180 \cdot 1000 \cdot 15} = 2,4 \text{ л/мин} \quad (11)$$

где  $c$  – теплоемкость воды;

$\rho$  – плотность воды;

$\Delta T$  – перепад температур.

Для выбора диаметра пневмоцилиндра воспользуемся формулой 12:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot P}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 200}{3,14 \cdot 6 \cdot 10^5}} \approx 0,021 \text{ м} = 21 \text{ мм} \quad (12)$$

где  $F$  – требуемое усилие;

$P$  – рабочее давление.

Принимаем стандартный диаметр, равный 25мм.

Производительность компрессора рассчитаем по формуле 13:

$$Q_{\text{возд}} = \frac{V \cdot n \cdot (P_{\text{раб}} + 1)}{1} = 0,5 \cdot 120 \cdot 7 \approx 420 \text{ л/мин} \quad (13)$$

где  $V$  – объем цилиндра;

$n$  – количество циклов в секунду;

$P_{\text{раб}}$  – рабочее давление.

Проведем проверку полученных данных, чтобы удостовериться в работоспособности рассчитанных параметров, так время срабатывания рассчитаем по формуле 14:

$$t = \frac{V}{Q_{\text{возд}}} = \frac{0,5}{7} = 0,07 \text{ с} < 0,5 \text{ с} \quad (14)$$

Условие выполняется

Также проверим теплосъем по формуле 15:

$$Q_{\text{факт}} = q \cdot c \cdot p \cdot \Delta T = 0,00005 \cdot 4180 \cdot 1000 \cdot 15 = 3,1 \text{ кВт} > 2,5 \text{ кВт} \quad (15)$$

Реализация данной системы позволит избежать термических деформаций и обеспечить длительную и бесперебойную работу комплекса лазерной резки.

## 4. Расчет и проектирование оснастки РТК

### 4.1 Оснастка «спутник»

В данной работе рассматривается конструкция автоматически сменного модуля призматической формы, иными словами «спутник». Он позволяет устанавливать заготовки не только на верхней стороне, но и на боковых, что увеличивает возможность его применения и обработку деталей различных форм и размеров в зависимости от его конфигурации. Ведь можно объединить несколько подобных оснасток и получить более сложную, где могут обрабатываться детали больших габаритов.

«Спутник» является универсальным сборным приспособлением, что позволяет быстро его собирать и менять конфигурацию в зависимости от необходимых целей.

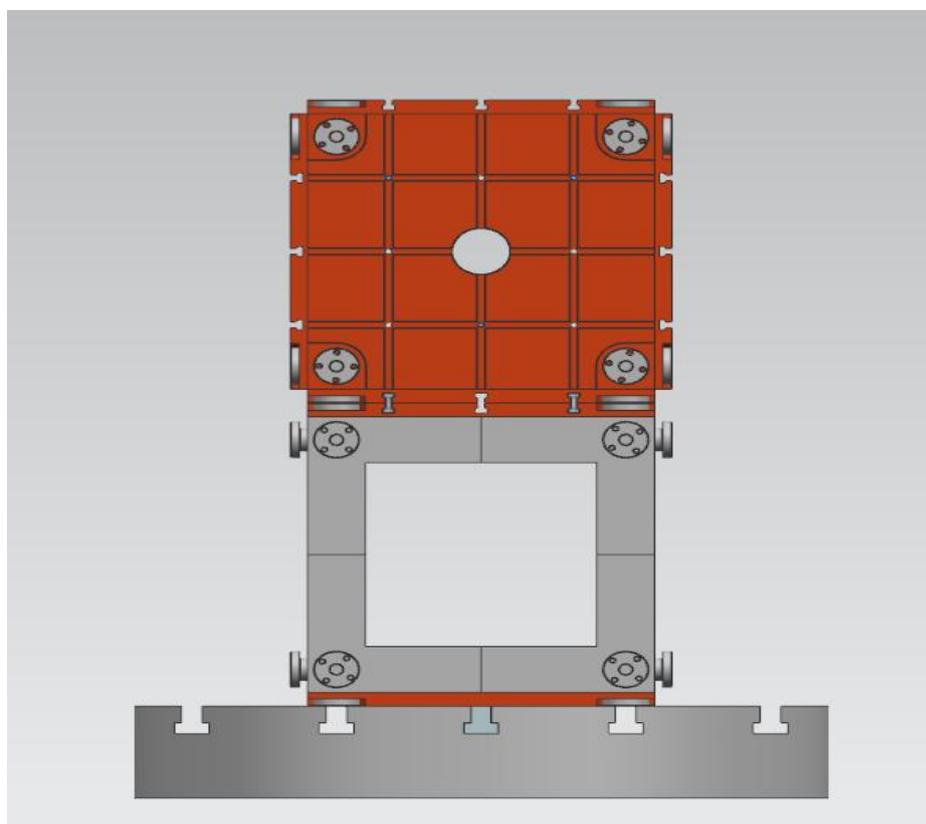


Рисунок 21 – Оснастка «Спутник»

Данная оснастка имеет ресурс в дальнейшем её развитии и модифицирование для облегчения её сборки, изменений и увеличения положительной динамики производительности.

Так, к примеру предлагается использовать двойную (рис.22) или тройную конфигурацию данной системы. Что позволит обрабатывать не только детали больших габаритов, но и несколько деталей меньших размеров параллельно, что порядком увеличит скорость цикла обработки, что было отображено в циклограмме выше, а также в сравнительном расчете производительности.

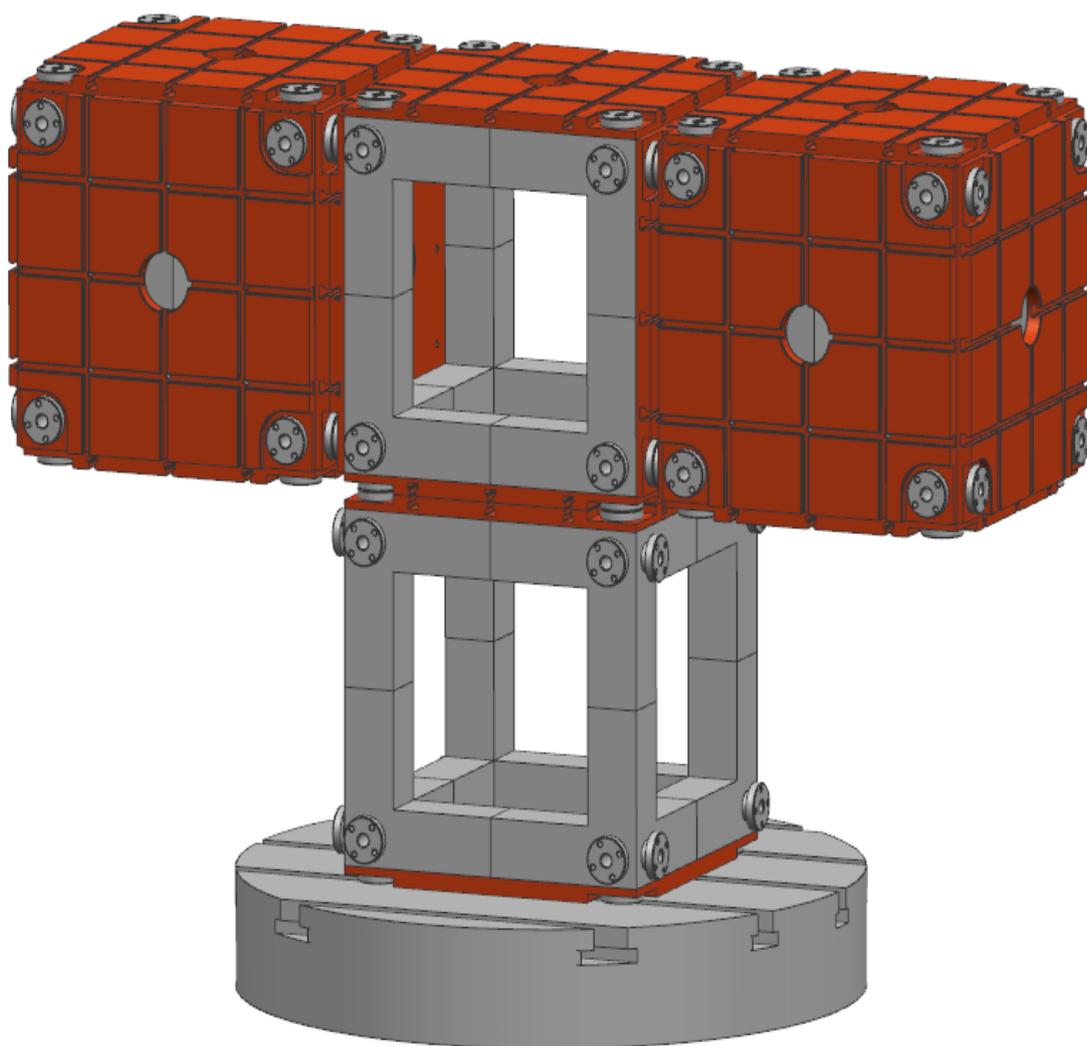


Рисунок 22 – Двойная оснастка «Спутник»

«Многоместное приспособление-спутник имеет сборную раму, состоящую из трехпалых крестовин с выступами. Крестовины соединены между собой устройствами базирования и крепления, расположенными внутри выступов крестовин. Рама, собранная из крестовин, имеет правильную призматическую форму с боковыми гранями, окнами и внутренней полостью, что позволяет устанавливать и закреплять на боковых гранях сменные плиты с обрабатываемыми деталями. Имеются варианты жесткого и плавающего соединения крестовин в раме.» [11, стр 6]

Так же можно отметить, что спутник крепится на поворотном столе, позволяя таким образом применять многокоординатную обработку заготовок, увеличивая тем самым скорость технологического цикла.

Таким образом разрабатываемая оснастка будет иметь не только потенциал в дальнейшем её развитие, но также может иметь преимущества в использовании на современных предприятиях и в данное время.

#### **4.2 РТК в сборке**

В конечном итоге разрабатываемый роботизированный технологический комплекс будет иметь две компоновки (рисунок 23 и 24). Их различие будет составлять в оснастке «спутник». В первом случае она одинарная, во втором же двойная, что помогает автоматизировать процесс и на порядок увеличить производительность. Так как пока на одной из сторон, обращенной к роботу, будут свариваться детали, на второй происходит снятие и закрепление за счет роботов манипуляторов.

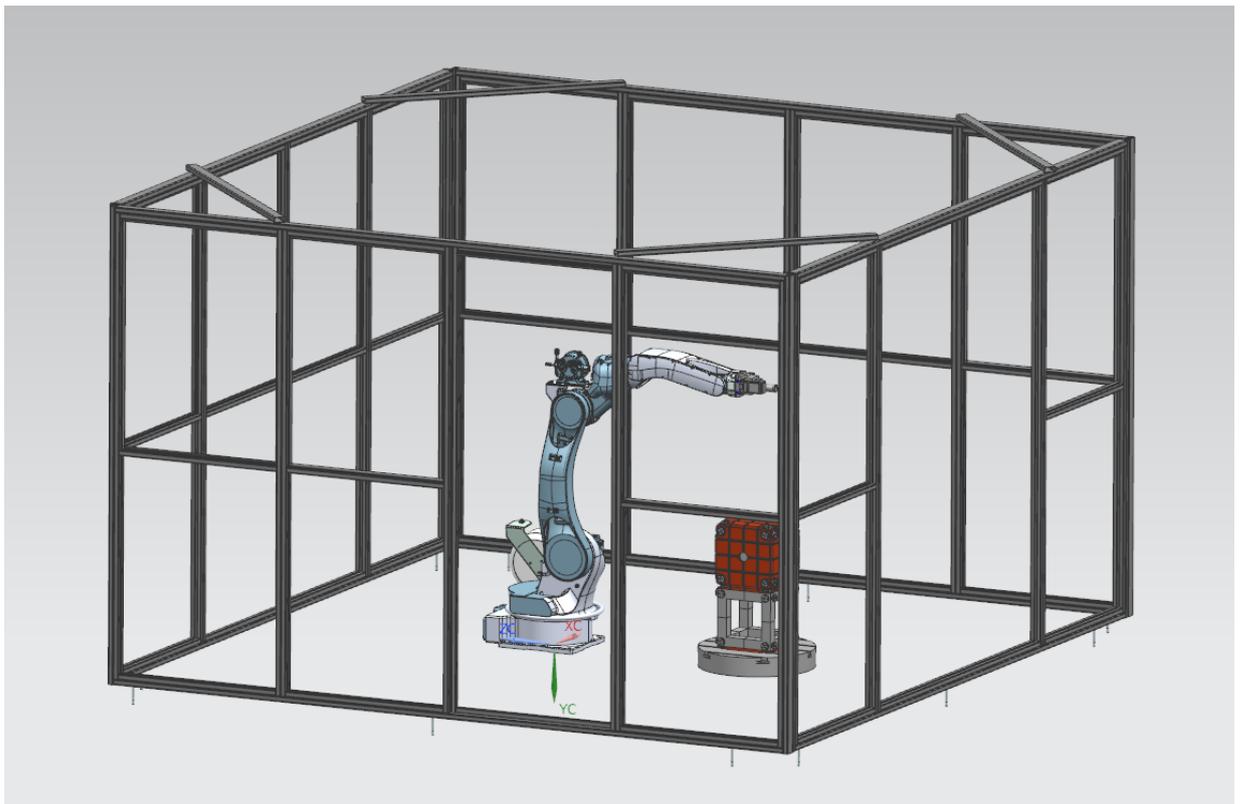


Рисунок 23- РТК исполнение 1

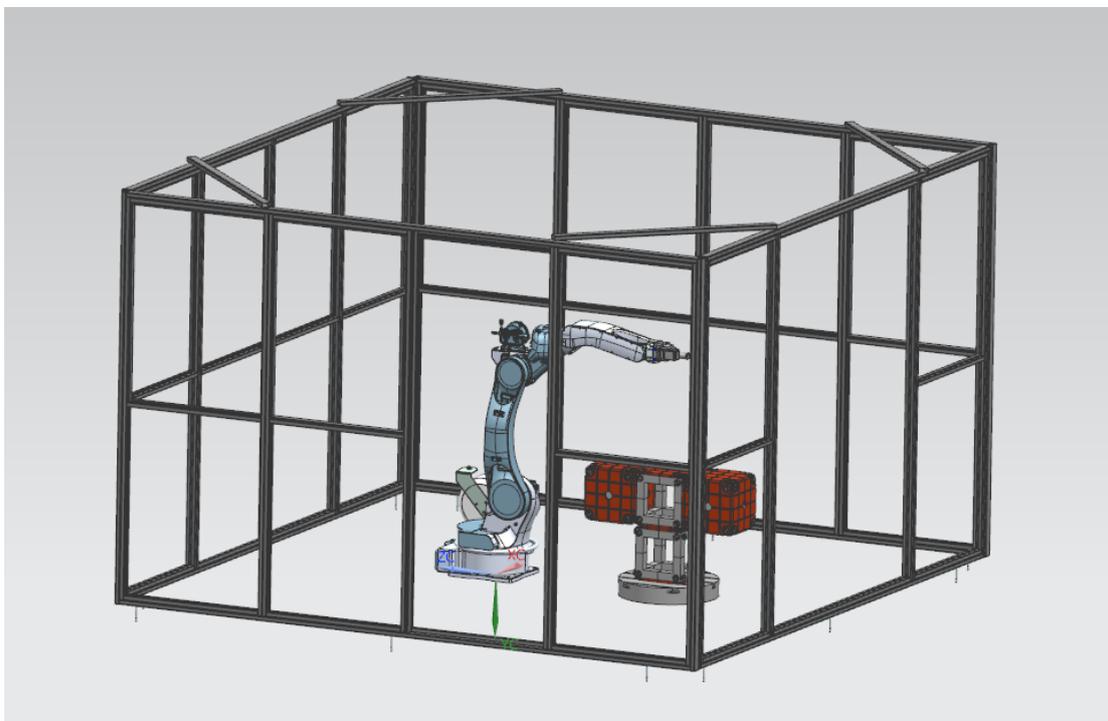


Рисунок 24- РТК исполнение 2

Таким образом, готовый роботизированный технологический комплекс воплощает в себе синтез передовых достижений современного машиностроения, открывающий новые перспективы для промышленных предприятий. Его внедрение не только существенно повышает производственную эффективность, но и создает мощный импульс для развития инновационных технологий в области производственного оснащения.

Особую значимость приобретает способность таких комплексов интегрировать в единую систему различные инновационные решения. Это создает уникальные возможности для оптимизации всего производственного цикла и разработки принципиально новых подходов к организации технологических процессов.

Важно отметить, что внедрение подобных комплексов стимулирует развитие смежных областей промышленности, создавая спрос на современные материалы, датчики, системы автоматизации и другие высокотехнологичные компоненты.

## 5. Расчет параметров и режимов лазерной сварки

Лазерная сварка -это процесс соединения металлических материалов с использованием высокоэнергетического лазерного луча. Лазерный луч в данном технологическом процессе генерируется источником и направляется на резак стационарного или ручного типа, из которого уже попадает на деталь.

Методы лазерной сварки могут быть разделены на несколько методов:

– кондуктивная сварка, в котором используется самая низкая мощность лазерного потока в сравнение с остальными, данный метод подходит для сварки тонких деталей;

– сварка с глубоким проплавлением (лазерная сварка с перемещающейся порой), подходящая для более толстых материалов, также в данном методе используется лазер высокой мощности для создания широкой и глубокой зоны нагрева

– точечная лазерная сварка, подходящая для деталей сложной конфигурации;

– лазерная сварка швов, с помощью которого получается добиться длинного непрерывного шва;

– гибридная лазерная сварка, которая совмещает в себе и другие виды сварки, к примеру, MIG и TIG;

– сканирующая лазерная сварка, в которой, благодаря использованию роботизированных комплексов с оптическими сканерами, представляется возможность высокоскоростной обработки сложноконтурных соединений в 3D пространстве.

Некоторые виды лазерной сварки представлены на рисунке 24:

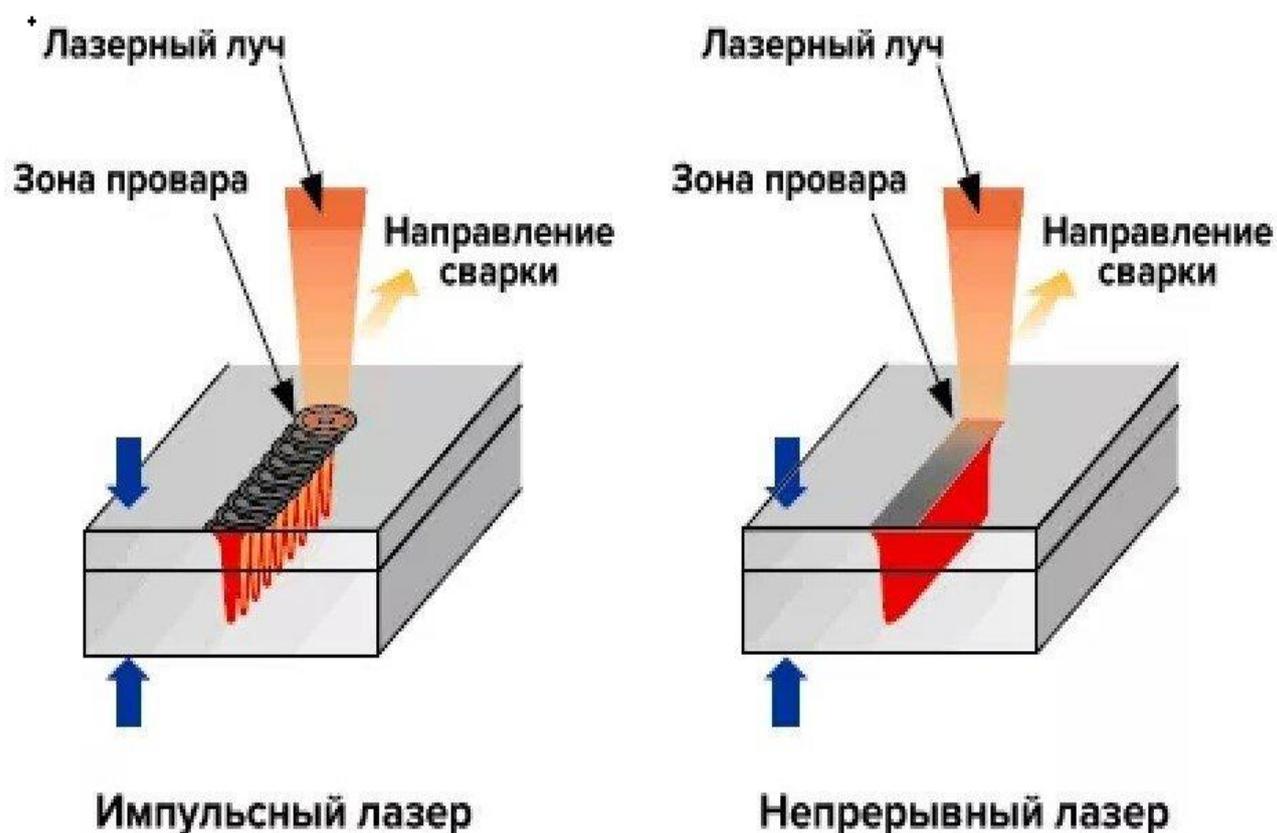


Рисунок 24- Импульсная и непрерывная лазерные сварки

Сварка с глубоким проплавлением является наиболее применяемой. Лазерная излучение в этом методе остро фокусируется, получая за счет этого высокую плотность мощности на поверхности детали [22]. В месте, где плотность мощности самая высокая, иными слова центр рабочего пятна, материал испаряется, образуя глухую пору в ванне расплава, которая поддерживается давлением испаряемого металла, не давая наружному металлу затечь внутрь, поддерживая тем самым пору в течение всего процесса сварки. Сварные швы же при данном процессе характеризуются большой глубиной и остротой формы.

## 5.1 Основные параметры режимов сварки и их расчет

Среди основных параметров, влияющих на качество, прочность и однородность сварных швов можно выделить:

- продолжительность и энергия импульса;
- частота импульсов;
- диаметр светового пучка;
- расстояние от наименьшего сечения сфокусированного луча до поверхности материала;
- скорость сварки, которую можно повысить за счет повышения частоты импульсов либо применения непрерывных режимов [21].

Оптимальная мощность лазера определяется по формуле 16:

$$P = \frac{k \cdot S \cdot v}{\eta} = \frac{50 \cdot 0,7 \cdot 66,7}{0,8} \approx 2,9 \text{ кВт} \quad (16)$$

где  $k$  – удельная энергия сварки;

$S$  – площадь сечения шва;

$v$  – скорость сварки;

$\eta$  – КПД системы.

Принимаем рабочую мощность для нашего случая равную 3 кВт.

Диаметр рабочего пятна на поверхности рассчитаем по формуле 17:

$$d = 2 \sqrt{\frac{P}{\pi \cdot I}} = 2 \sqrt{\frac{3000}{3,14 \cdot 5 \cdot 10^6}} \approx 0,28 \text{ мм} \quad (17)$$

где  $I$  – плотность мощности;

Фокусное расстояние линзы (18):

$$f = \frac{d \cdot F}{2 \cdot \lambda \cdot M^2} = \frac{0,28 \cdot 1,5}{2 \cdot 1,07 \cdot 1,1^2} \approx 0,18 \text{ мм} \quad (18)$$

где  $F$  – удельная энергия сварки;

$\lambda$  – площадь сечения шва;

$M$  – скорость сварки.

При данных, полученных путем расчета, составим таблицу 2 с оптимальными режимами сварки:

Таблица 2 – Оптимальные режимы сварки

Параметр	Значение	Допуск
Мощность лазера, КВт	3,0	$\pm 0,2$
Скорость сварки, м/мин	4,0	$\pm 0,5$
Диаметр пятна, мм	0,3	$\pm 0,05$
Фокусное расстояние, мм	0,2	$\pm 0,05$
Защитный газ (Ar), л/мин	15	$\pm 2$
Смещение фокуса, мм	+0,5	$\pm 0,1$

Полученные параметры будут обеспечивать стабильное качество сварных соединений при минимальных тепловых деформациях. Для различных видов стали и толщины материала требуется корректировка режимов с использованной выше представленной методики расчетах [35].

Благодаря рассчитанным параметрам также были составлены две карты наладки, представленные в приложение А.

## **6. Разработка циклограммы работы робота манипулятора с лазерной головкой**

Циклограмма представляет собой детальное описание последовательности операций, выполняемых роботом манипулятором, оснащенным лазерной головкой, в течение одного полного рабочего цикла. Она включает временные параметры, синхронизацию с другими системами и контрольные точки для обеспечения технологического процесса.

Также циклограмма позволяет:

- уточнить требования к промышленным роботам, технологическому оборудованию, средствам загрузки и вспомогательному оснащению;
- правильно распределить функции между роботами, технологическим оборудованием и средствами оснащения;
- разработать аппаратную часть системы управления и программное обеспечение задач управления;
- оптимизировать режим работы РТК.

Циклограмма содержит в себе несколько фаз. К примеру, подготовительная фаза, фаза загрузки, подготовка к сварке, фаза сварки, завершающая фаза, а также фаза выгрузки. Рассмотрим каждую из них ниже.

Во время подготовительной фазы (0-2 секунды) происходит инициализация всех систем комплекса. Робот-манипулятор занимает исходное положение, одновременно выполняются следующие проверки:

- диагностика состояния лазерного источника;
- контроль давления защитного газа;
- проверка уровня охлаждающей жидкости.

Система управления проводит самодиагностику и калибровку датчиков позиционирования.

На следующем этапе, а именно фаза загрузки (2-4 секунды) робот перемещается в зоне загрузки, где с помощью захватного устройства фиксирует заготовку. Особое внимание уделяется контролю надежности

фиксации, для которого используются датчики давления и контактные сенсоры. После успешного захвата робот транспортирует деталь в рабочую зону, осуществляя точное позиционирование.

Далее идет подготовка к сварке (4-4,5 секунды). Этот этап кратковременный, но критически важный. Он включает в себя:

- плавный прогрев лазера до 30% номинальной мощности;
- точное позиционирование начальной точки шва;
- активацию системы подачи защитного газа;
- проверку всех параметров перед началом основного процесса.

И уже дальше идет фаза сварки (4,5-12 секунд). Во время неё лазер выходит на рабочие параметры, манипулятор движется по запрограммированной траектории. Также идет постоянный контроль качества шва через систему технического зрения и регулируется мощность в реальном времени в зависимости от термической картины.

На завершающей фазе (12-14 секунд) постепенно идет снижение мощности лазера, отключается подача защитного газа. Манипулятор плавно отводится из зоны сварки. И после производится контроль качества сварного шва.

Далее идет фаза выгрузки (14-16 секунд). И после неё система готова к новому рабочему циклу, где повторяется каждая перечисленная фаза.

В общем виде циклограмма работы РТК комплекса лазерной сварки представлена на рисунке 26.

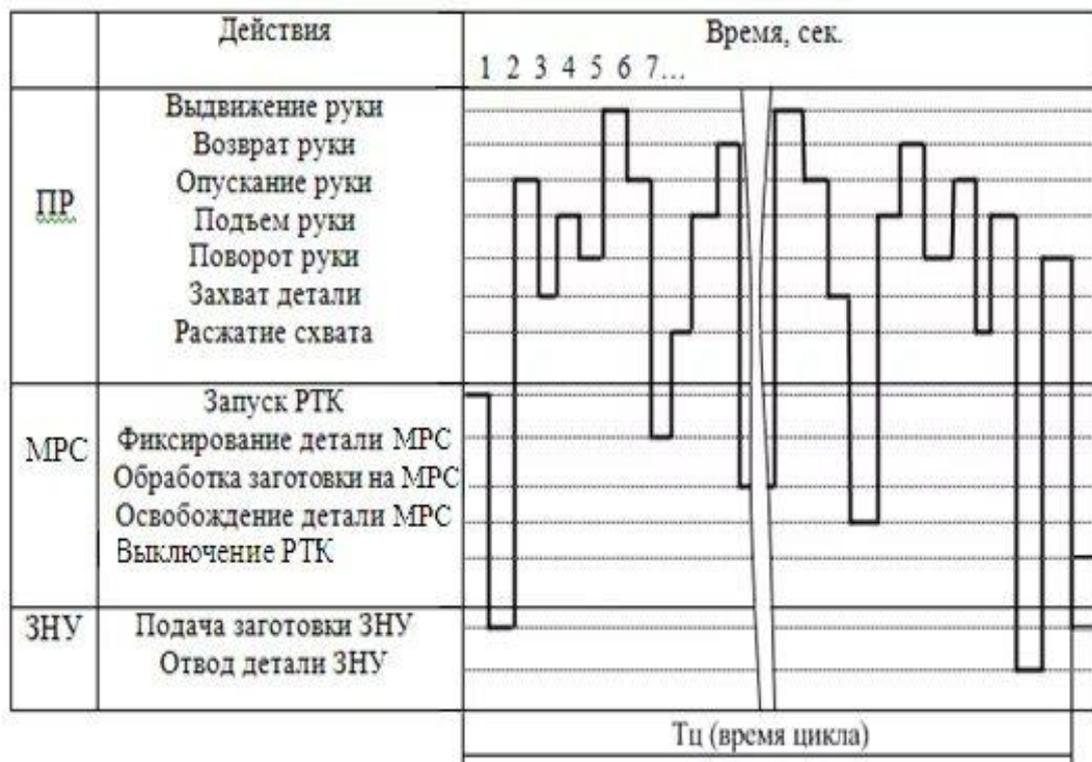


Рисунок 26– Циклограмма работы РТК

Для различных типов сварки параметры циклограммы могут корректироваться с сохранением общей структуры последовательности операций.

## **7. Безопасность и экологичность технического объекта**

На производственном объекте помимо производительности и качества продукции ключевыми моментами так же являются безопасность и экологичность технологии. Факторы, которые могут нанести вред человеку и окружающей среде, считаются вредными и опасными, поэтому необходимо создавать системы, обеспечивающие безопасность окружающей среды и условий труда. Среди таких целей можно назвать - снижение к минимуму ущерба от аварийности, заболеваний, травм, и удержание в допустимых пределах с условием соблюдения всех технологических работ.

### **7.1 Воздействие объекта на производственную сферу и окружающую среду**

В данной работе рассматривается разработка роботизированного технологического комплекса лазерной сварки и улучшение базовых параметров по сравнению с базовым вариантом сварки. К РТК лазерной сварки предъявляются общие требования безопасности:

- соответствие ГОСТ Р 60.2.0.1-2022 (безопасность роботов и робототехнических устройств);
- соблюдение ГОСТ Р 60825-1 (безопасность лазерных изделий);
- обеспечение защиты персонала в соответствии с ТР ТС 020/2011 (безопасность низковольтного оборудования) и ТР ТС 020/2011 (электромагнитная совместимость).

Так же стоит учесть требования по защите от лазерного излучения:

- класс лазера должен соответствовать ГОСТ Р 60825-1 (при этом класс 4 требуется полного экранирования);
- защитные кожухи и лазерно-безопасные ограждения с блокировками;
- аварийное отключение лазера при нарушении защитного барьера;
- сигнализация (световая и звуковая) перед включением лазера.

В работе рассматривается внедрение РТК лазерной сварки вместо базовых РТК сварки. В данном разделе будет рассмотрен процесс лазерной сварки с точки зрения безопасности и экологичности. Так же будет проведена оценка влияния проектируемого комплекса на здоровье человека, находящегося в непосредственной близости к нему, а также будут предложены варианты уменьшения или полного устранения негативных факторов за счет современных средств защиты.

Дуговая сварка представляет собой выраженную угрозу в плане термического воздействия – разбрызгивание расплавленного металла и высокая температура в рабочей зоне существенно увеличивают риски ожогов и пожароопасность. Интенсивное ультрафиолетовое излучение дуги может вызывать электроофтальмию даже при кратковременном незащищенном наблюдении за процессом. Характерные для этого метода выделения содержат значительные объемы сварочного аэрозоля с включениями марганца, хрома и других токсичных элементов, что создает повышенную нагрузку на систему дыхания оператора. В сравнение с этим лазерная сварка, осуществляемая с помощью роботизированных комплексов, характеризуется более локализованным тепловым воздействием, что снижает риск масштабного перегрева окружающих поверхностей и уменьшает вероятность возгорания. Однако процесс сопровождается образованием ультрадисперсных металлических аэрозолей, которые глубже проникают в дыхательную систему по сравнению с более крупными частицами, образующимися при дуговой сварке.

В плане защиты окружающей среды лазерная сварка оказывается предпочтительнее благодаря меньшему энергопотреблению и сокращенному объему выделяемых вредных веществ. Однако она требует более сложных и дорогостоящих систем фильтрации воздуха. В тоже время дуговая сварка производит больше отходов в виде шлака и использованных электродов.

Рассмотрение вредных факторов при лазерной сварке с использованием РТК представлено в таблице 3:

Таблица 3 – Вредные факторы и возможные негативные последствия

Факторы	Последствия
прямое или отраженное излучение (ИК, видимое, УФ-диапазон)	ожоги сетчатки глаза: термическое повреждение кожи: риск возгорания при попадании луча на горючие материалы
токсичные аэрозоли и газы	загрязнения окружающей среды, начиная от человека, работающего непосредственно у оборудования, заканчивая выбросами в атмосферу
шум и вибрации при обработке	повышенная нагрузка на почву, вред человеку, находящемуся в непосредственной близости с оборудованием, негативное влияние на микроорганизмы, находящиеся в почве
травмоопасное оборудование	Негативное влияние на здоровье человека

Рассмотренные факторы в таблице 1 требуют анализа для разработки эффективных мер по их устранению в рамках технологического процесса. Для достижения этой цели необходимо комплексное внедрение современных средств защиты и организационных решений, направленных на создание безопасной производственной среды.

## 7.2 Средства и методы снижения негативного воздействия объекта

РТК лазерной сварки является объектом повышенной опасности. Проработка мероприятий и технических решений, позволяющих компенсировать воздействие на окружающую среду и человека, будет возможно проработать после выделения основных факторов. Рассмотрим их ниже:

- прямое или отраженное излучение (ИК, видимое, УФ-диапазон);
- токсичные аэрозоли и газы;
- шум и вибрации при обработке;
- травмоопасное оборудование.

Приведенные выше факторы необходимо проанализировать на предмет минимизации влияния их на организм человека, а также на окружающую среду.

Такой фактор, как излучение, необходимо рассматривать как объект, влияющий на здоровье человека. Таким образом, необходимо выявить его источник. В рассматриваемом случае им является лазерная головка, которая создает луч, от которого и исходит излучение. Данный инструмент располагается в рабочей зоне и прикреплен к манипулятору.

Так же излучение необходимо рассматривать с точки зрения пожарной безопасности, так как при попадание на горючие вещества, есть риск возникновения пожара. В этом случае стоит обеспечить в быстром доступе минимальный набор инструментов пожаротушения, а также снабдить цех централизованной системой пожаротушения, в том числе убрать все легковоспламеняющиеся предметы из рабочей зоны, чтобы свести к минимуму риск возникновения пожара.

С целью предотвращения ситуаций, повышающих уровень риска, создается инструкция по охране труда для каждой профессии, участвующей на данном техническом объекте. Исходя из этого, для обеспечения отсутствия влияния данного фактора на здоровье человека – требуется изолировать рабочую зону станка от оператора с помощью ограждения с светонепроницаемыми щитами, которые уменьшат воздействие данного фактора также и на остальных рабочих.

Следующим негативным фактором являются токсичные аэрозоли и газы, которые возникают при технологическом процессе лазерной сварки. Так как металл в рабочей зоне очень сильно нагревается, возможно их образование. В данном случае автоматическая смена заготовки скажется положительно на здоровье оператора, так как необходимость работы в загрязненной аэрозолями и газами зоне будет сведена к минимуму. Так же стоит учесть использование систем вытяжки и фильтрации воздуха, чтобы в том числе снизить вредный фактор.

Факторы вибраций и шума исключаются за счет современных методов гашения вибраций, таких как гидропор оборудования. Так же стоит использовать средства индивидуальной защиты. Данные факторы в современном машиностроении сведены к минимуму благодаря новых технологиям, таким образом рассмотрение его не требует дополнительного внимания.

Так же присутствует такой фактор, как травматизм при выполнении операций. Рассматриваемое негативное воздействие практически полностью исключено за счет ограждения зоны РТК лазерной сварки, так как оператору нет необходимости находиться в рабочей зоне за счет автоматизации всех процессов, выполняемых в современном машиностроении роботами, а сама сварка происходит с использованием систем ЧПУ.

Но, несмотря на современность всех систем, необходимо использовать средства индивидуальной защиты для операторов. Дополнительно необходимо разработать мероприятия по контролю за соблюдением надлежащего использования операторами средств индивидуальной защиты. К способам изоляции оператора от рабочей зоны оборудования относят:

- защитное ограждение (рисунок 1), выполненное из стандартного профиля, а в свободные места устанавливаются светонепроницаемые щиты;
- датчики, которые в случае появления человека в рабочей зоне, мгновенно прерывают энергоснабжение и экстренно останавливают подвижные части оборудования.

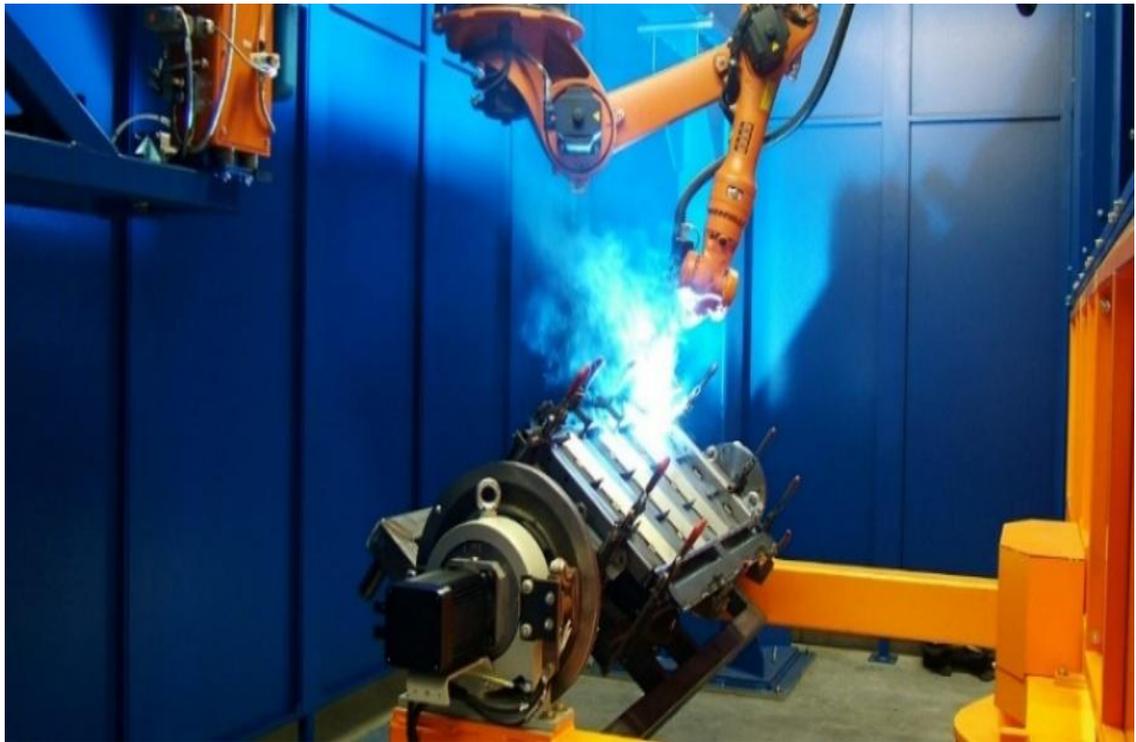


Рисунок 1 – Светонепроницаемые щиты в РТК лазерной сварки

Комплекс вышеперечисленных мер поможет исключить травматизм. В таблице 4 кратко представлены мероприятия, направленные на обеспечение минимизации последствий негативного влияния производственных факторов в первую очередь на здоровье человека, а также позволяющих минимизировать или полностью исключить их влияние на окружающую среду.

Таблица 4 – Мероприятия по снижению влияния негативных производственных факторов на здоровье человека и окружающую среду

Производственный фактор	Мероприятия и технические средства для минимизации влияния
прямое или отраженное излучение (ИК, видимое, УФ-диапазон)	корректировка режимов обработки, закрытая рабочая зона оборудования, оснащение цехов системой пожаротушения, наличие в быстром доступе средств пожаротушения, обучение персонала работе со средствами пожаротушения

#### Продолжение таблицы 4

токсичные аэрозоли и газы	применение системы вытяжки в паре с системой фильтрации,
шум и вибрации при обработке	применение гидроопор оборудования
травмоопасное оборудование	применение различного рода систем, изолирующих оператора от зон повышенной опасности, соблюдения оператором правильности применения средств индивидуальной защиты, контроль за соблюдением применения средств индивидуальной защиты, контроль за соблюдением техники безопасности

Предложенные в таблице 3 решения формируют целостную систему защиты, которая минимизирует риски для здоровья операторов и предотвращает негативное воздействие на экосистему при выполнении операций лазерной сварки. Внедрение этих мер способствует созданию безопасной и экологически ответственной производственной системы.

### **7.3 Эффективность от внедрения средств и методов защиты**

При внедрении технологических решений и модернизации производственных процессов приоритетным аспектом всегда должна оставаться эффективность производственного цикла в целом. Особую значимость приобретает комплексный подход к вопросам безопасности, который необходимо закладывать уже на стадии проектирования нового оборудования. Практика показывает, что объективная оценка результативности технологических новшеств требует продолжительного периода эксплуатационных наблюдений, в то время как на этапе внедрения первостепенное значение имеет тщательный анализ возможных рисков и потенциальных негативных последствий.

Особое внимание при разработке новых устройств необходимо уделять вопросам безопасности на этапе проектирования. Оценка реального эффекта от внедрения новых технологий требует длительного периода наблюдений,

тогда как на начальной стадии следует сосредоточиться на анализе потенциальных рисков.

В рассматриваемом случае, при замене дуговой сварки на лазерной, можно прогнозировать значительные преимущества. С экологической точки зрения переход на РТК лазерной сварки позволяет уменьшить количество негативных факторов, влияющих как на окружающую среду, так и на здоровье человека. Важно отметить, что сам процесс лазерной сварки экологически безопаснее, так как лазерные системы более энергоэффективны, что существенно снижает углеродный след производства, так же лазерная сварка генерирует в 3-5 раз меньше сварочного аэрозоля и почти не образует шлаковых отходов, в том числе лазерная сварка исключает такие отходы, как отработанные электроды, окалина, что сокращает объем утилизируемых материалов.

## Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы были успешно решены все поставленные задачи и достигнута основная цель. Проведенная работа включала несколько взаимосвязанных этапов, каждый из которых внес существенный вклад в конечный результат.

На первом этапе был проведен теоретический анализ и литературный обзор современных РТК лазерной сварки, включая анализ конструкций лазерных головок и оснастки для рассматриваемых комплексов. Особое внимание уделялось выявлению преимуществ и недостатков различных технических решений, что позволило выбрать оптимальные варианты, исходя из заданных требований.

На этапе разработки технических решений были разработаны два варианта РТК лазерной сварки, отличающиеся конфигурацией и функциональными возможностями. В первом исполнении использовалась оснастка «спутник», закрепленная на поворотном столе, во втором случае была представлена более сложная конфигурация «спутника», показывающая его возможности к более сложным конфигурациям и более высокой в следствие производительности. Для обоих вариантов были разработаны 3D-модели.

Проведен сравнительный анализ производительности, показывающий преимущество разработанных вариантов роботизированных технологических комплексов. Также были выполнены расчеты пневмопривода охлаждения и режим лазерной сварки для корректной работы всей системы, в целом.

Практическая значимость выполненной работы отражается в существенном повышении производительности, упрощению процесса переналадки и обеспечению стабильности качества соединений в разработанных вариантах РТК.

## Список используемых источников

1. Андреев А.А. Патент № RU 2 443 533 C1 – Стол поворотный. Открытое акционерное общество "Завод им. В.А. Дегтярева", 2012
2. Андреев М.Д., Андреева Ю.В. Классификация роботов-манипуляторов// Юный ученый. 2022. № 2. С. 48-51. URL: <https://moluch.ru/young/archive/54/2771/> (дата обращения: 10.05.2025).
3. Ахрамеева Е.В., Акименко Т.А., Кузнецова Т.Р. Промышленный робот как объект управления// Транспортное машиностроение. 2023. №12. С.583-584. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-583-584
4. Батюшков В.В. Патент № RU 112520 U1 - Волоконный лазер. Открытое Акционерное Общество "Пеленг", 2012.
5. Батюшков В.В. Патент № RU 185969 U1 - Твердотельный лазер. Открытое Акционерное Общество "Пеленг", 2018.
6. Бахман В.А., Королева А.Н., Царегородцев Е.Л. Обзор видов и анализ современного состояния рынка промышленных роботов-манипуляторов// Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №2. С.1-7. DOI: 10.23670/IRJ.2023.128.26
7. Бурлачук А.М. Определение положения манипулятора с непрерывным изгибом секций с помощью системы технического зрения // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024 DOI:10.24412/2500-1000-2024-5-1-193-198
8. Василенко И.В., Ведякова А.О. Исследование алгоритмов траекторного управления роботом манипулятором// Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2022.Т.18. №1. С.62-71. DOI: 10.25559/SITITO.18.202201.62-71
9. Виды датчиков - [Электронный ресурс] - URL: <http://roboticslib.ru/books/item/f00/s00/z0000005/st046.shtml> 22.05.24 (Дата обращения: 22.05.2024)

10. Датчик автофокуса - [Электронный ресурс] - URL: <https://laserstore.ru/blog/lazernyy-standok-s-avtofokusom/> (Дата обращения: 22.05.2024)
11. Датчик высоты - [Электронный ресурс] - URL: <https://senfeng.ru/blog/equipment/ustroystvo-lazernoy-golovy-dlya-rezki-metalla/> (Дата обращения: 22.05.2024)
12. Дутов А.И., Кулешов А.А., Новоселов Н.А. Патент №2124790 - Газовый лазер. Советско-британское совместное предприятие "ВА Инструментс", 1999
13. Есенгельдиев, Н. С. Анализ методов повышения эффективности и качества лазерной сварки // Молодой ученый. 2021. № 23. С. 32-34. URL: <https://moluch.ru/archive/365/82086/> (дата обращения: 20.05.2025)
14. Жиленков А.А., Саенко А.А., Йе Хтун. Возможности и ограничения современных манипуляционных роботов в решении прикладных задач// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. №4. С.86-91. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-1-86-91
15. Илюшин И.Э., Кожевников М.М., Господ А.В. Алгоритм оптимизации роботизированного технологического комплекса для лазерной резки// Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2023. №1. С.8-16. DOI: 10.52928/2070-1624-2023-1-8-16
16. Ложкин В.А. Применение систем компьютерного зрения с промышленными роботами// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. №1. С.343-344. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-1-343-344
17. Людмирский Ю.Г., Солтовец М.В., Грицына А.Н. Принципы организационно-технологического проектирования роботизированных сварочных комплексов// Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2007. №10. С.12-18. DOI: 10.30987/2782-5957-2022-10-12-18

18. Магдин А.Г., Дюсегалиев Р.М., Припадчев А.Д., Горбунов А.А. Гибридизация лазерной сварки// Транспортное машиностроение. 2022. №10. С.12-18. DOI: 10.30987/2782-5957-2022-10-12-18
19. Макарчук Н.В., Макарчук А.В., Старцев В.Н. Моделирование формирования первичной макроструктуры сварного шва при лазерной сварке// Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2022. №2. С.281-295. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-281-295
20. Мостовской М.В., Слепцов В.В., Куликова Н.Н. Повышение надежности информационно-измерительной и управляющей системы электропривода лазерных установок// Надежность и качество сложных систем. 2023. №1. С.62-71. DOI: 10.21685/2307-4205-2023-1-8
21. Новиков В.Г. Анализ и расчет параметров процесса лазерной сварки металлических листов с учетом их физико-технических особенностей// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. №10. С.520-523. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-10-520-523
22. Новиков В.Г. К вопросу о применении и расчете процессов лазерной сварки металлических изделий// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. №3. С.312-315. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-3-312-315
23. Новиков В.Г. Сравнение программного обеспечения для моделирования процессов сварочного производства// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. №1. С.131-132. DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-131-132
24. Огин П.А., Левашкин Д.Г. Реализация энергоэффективных технологий на современных станках с чпу путем применения автоматически сменных модулей на примере лазерной обработки// Вектор науки ТГУ. 2016. №2. С.40-45. DOI: 10.18323/2073-5073-2016-2-40-45
25. Опарин Е.С., Дзус М.А., Давыдов Н.Н., Хорьков К.С. Автоматический поиск стыка листовых материалов на основе оптических

изображений для непрерывной лазерной сварки// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. №7. С.338-339. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-338-339

26. Паньков А.С., Жуков Л.О., Пономарев Р.С. Измерение ключевых характеристик линзованного оптического волокна// Фотон-экспресс. 2023. №6. С.494-495. DOI: 10.24412/2308-6920-2023-6-494-495

27. Роботы манипуляторы - [Электронный ресурс] - URL: <https://studizba.com/lectures/fizika/teoriya-mehanizmov-mashin/19753-manipulyacionnyye-roboty.html> (Дата обращения: 28.12.2024)

28. Робот манипулятор: промышленное аппаратное обеспечение, какие виды, типы и основные элементы - [Электронный ресурс] - URL: <https://top3dshop.ru/blog/manipulator-robots-features-and-applications.html> (Дата обращения: 12.01.2025)

29. Ультразвуковой датчик - [Электронный ресурс] - URL: <https://powercoup.by/stati-po-elektromontazhu/ultrazvukovoy-datchik> (Дата обращения: 23.05.2024)

30. Царев А.М., Левашкин Д.Г. Патент № RU 2 258 593 С2 - Многоместное приспособление-спутник. 2005

31. AliYeva Y.N.K, AgiL TofiK Oglu Mammadli, Direct and inverse kinematics of manipulator robots// Endless light in science. 2023

32. Dolgii Y.F., Chupin I.A. Optimal control of manipulator// Endless light in science. 2023

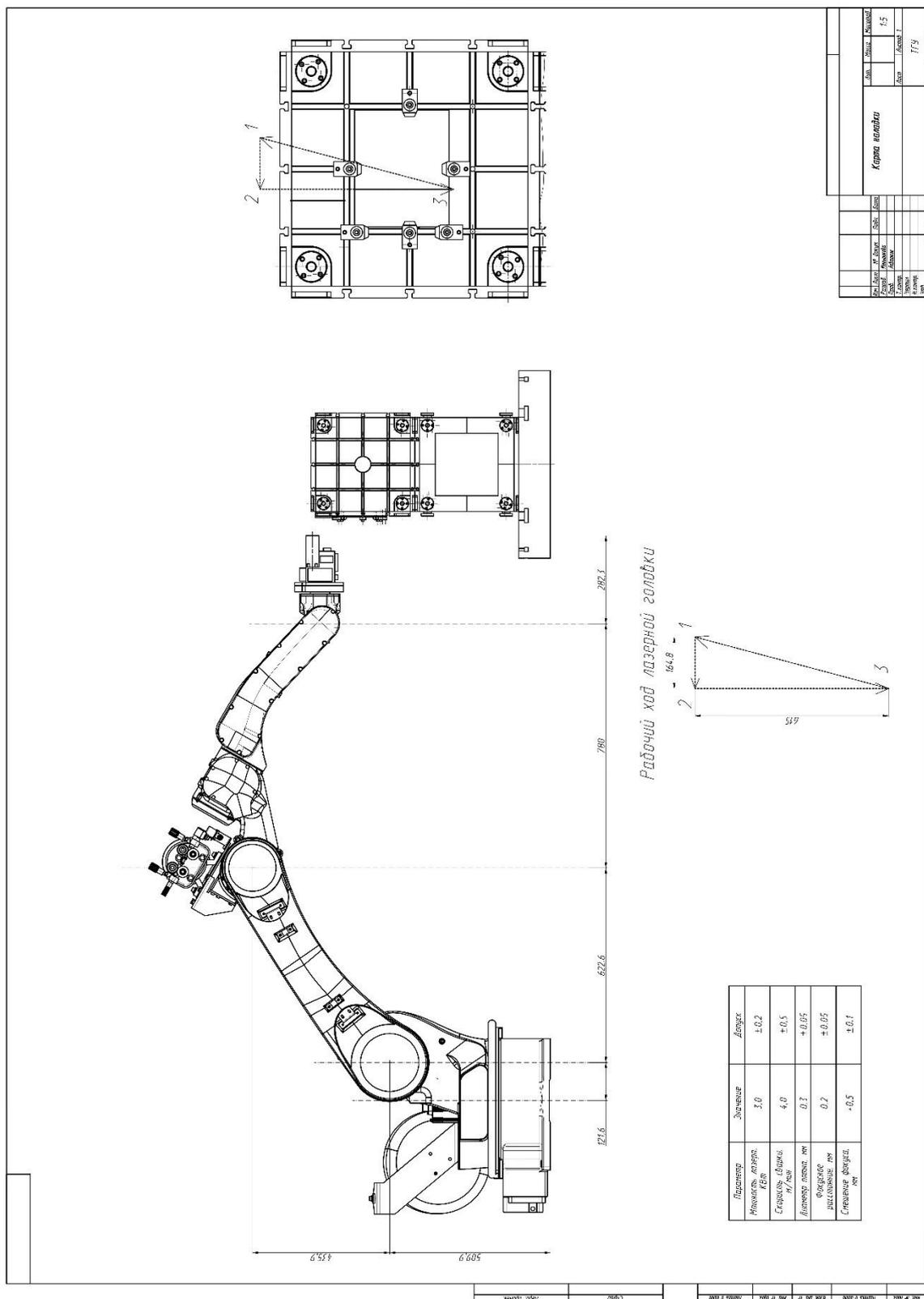
33. Fatemeh Habibkhah, Mehrdad Moallem, Application of machine learning for seam profile identification in robotic welding, Machine Learning with Applications, 2025

34. Mohammadhossein Norouzian, Mahan Khakpour, Marko Orosnjak, Atal Anil Kumar, Slawomir Kedziora. Prediction of weld quality in laser welding of hardmetal and steel using high-speed imaging and machine learning methods// Journal of Advanced Joining Processes. 2025

35. Dominik Walther, Leander Schmidt, Timo R ath, Klaus Schricker, Jean Pierre Bergmann, Kai-Uwe Sattler, Patrick M ader, Deep learning-driven active sheet positioning using linear actuators in laser beam butt welding of thin steel sheets// Journal of Advanced Joining Processes. 2025



Продолжение приложения А  
**Карта наладки для РТК исполнение 1**





Приложение Б

Публикация

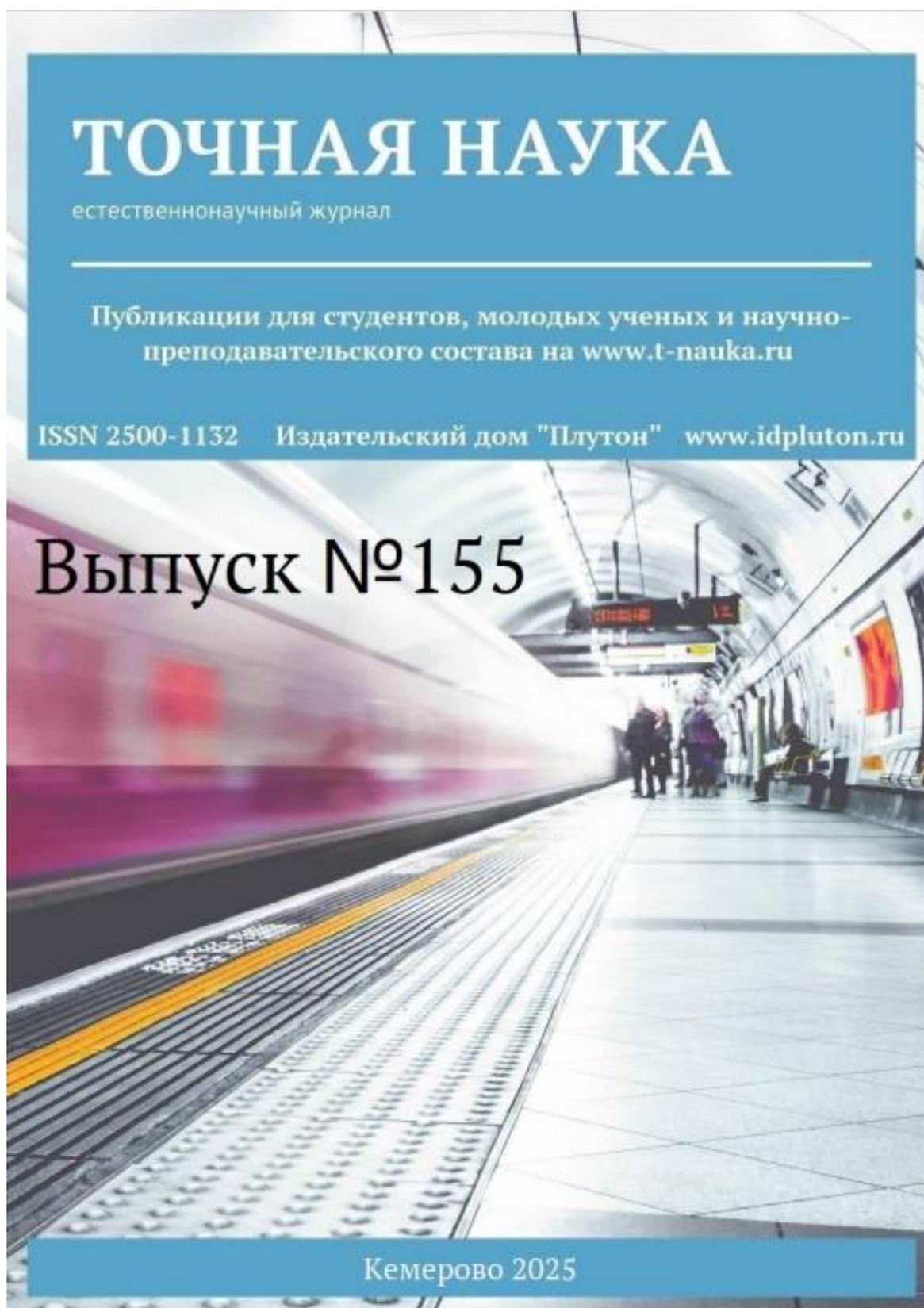


Рисунок Б.1– Первая страница публикации

## Продолжение приложения Б

Естественнонаучный журнал «Точная наука»

[www.t-nauka.ru](http://www.t-nauka.ru)

### Содержание

1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УТЕПЛЕНИЯ ФУНДАМЕНТОВ В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ .....	2
<b>Ершова Е.С., Преснов О.М.</b>	
2. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ: ИНСТРУМЕНТ ИЛИ УГРОЗА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ .....	5
<b>Сагдатов Т.А., Аюпова А.Р.</b>	
3. КАРДИНГ: МЕТОДЫ, ПРИЧИНЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И МЕРЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ.....	8
<b>Гриневский Д.С., Аюпова А.Р.</b>	
4. КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ ОПОВЕЩЕНИЯ: КАК НЕ ОСТАТЬСЯ БЕЗЗАЩИТНЫМ ПЕРЕД ЛИЦОМ УГРОЗЫ.....	11
<b>Губайдуллина Д.А., Аюпова А.Р.</b>	
5. МЕТОДИКА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ РИСКОВ.....	14
<b>Трухина И.С.</b>	
6. УКРЕПЛЕНИЕ ГРУНТОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МОСТОВ.....	17
<b>Савченко О.О., Преснов О.М.</b>	
7. УСИЛЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДОРОЖНЫХ НАСЫПЕЙ .....	21
<b>Купчевский Я.Д., Преснов О.М.</b>	
8. ТРАНСПОРТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТРАНСПОРТИРОВКА ХЛОПКА ВОДНЫМ ТРАНСПОРТОМ.....	24
<b>Кириичников Д.А., Семендяев Н.Р., Кржеминский П.К.</b>	
9. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В СЛОЖНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ .....	28
<b>Полякова О.А., Преснов О.М.</b>	
10. ОРАКУЛЫ: ИХ ПРОБЛЕМЫ И УЯЗВИМОСТИ.....	31
<b>Полякова О.А., Преснов О.М.</b>	
11. ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ УЯЗВИМОСТИ КАНАЛОВ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНО-УДАРНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	34
<b>Шулепов Д.А.</b>	
12. ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВА W-Ni.....	37
<b>Сабиров А.К.</b>	
13. ПОЛИГРАФИЧЕСКИЕ ОТХОДЫ: АНАЛИЗ ПРАКТИК УТИЛИЗАЦИИ И ПОТЕНЦИАЛ ВТОРИЧНОГО ДИЗАЙНА.....	39
<b>Казиева А.Б., Базарбаева С.М.</b>	
14. ОБУЧЕНИЕ СПОСОБАМ ЗАЩИТЫ ОТ ОПАСНОСТЕЙ РАБОТНИКОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ С ПОМОЩЬЮ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ .....	44
<b>Мадонов Д.С.</b>	
15. ОТКЛИК ИИ НА ПРОЕКТ ПОКЛЮЧЕНИЯ К ЭНЕРГИИ КОСМОСА.....	49
<b>Ломашевич С.А.</b>	
16. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ.....	56
<b>Меньшикова У.Д., Левашкин Д.Г.</b>	

## Продолжение приложения Б

Естественнонаучный журнал «Точная наука»

[www.t-nauka.ru](http://www.t-nauka.ru)

**Меньшикова У.Д.**  
**Menshikova U.D.**

Тольяттинский государственный университет  
E-mail: [white.fox.2018@yandex.ru](mailto:white.fox.2018@yandex.ru),

**Левашкин Д.Г.**  
**Levashkin D.G.**

Тольяттинский государственный университет  
E-mail: [denis.levden@yandex.ru](mailto:denis.levden@yandex.ru))

УДК 621.791.725

### РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

#### DEVELOPMENT OF A ROBOTIC LASER WELDING TECHNOLOGY COMPLEX

**Аннотация.** В настоящее время из-за необходимости повышения производительности, улучшения качества выпускаемой продукции и снижения трудозатрат наблюдается увеличение внимания к автоматизации процессов сварки, одним из способов которой является использование роботизированных технологических комплексов (РТК). Представленная статья посвящена разработке, а также внедрению РТК лазерной сварки, который помогает оптимизировать процессы сварки в машиностроении.

Прежде чем приступить к самой разработке необходимо провести комплексную оценку эффективности применения РТК. Это и является основной задачей исследования. Также уделяется внимание применению современных технологий, используемых в лазерной сварке, и выбору лазерного источника, системы управления и оснастки.

Значимость данного исследования заключается в возможности замены ранее используемых процессов сварки на новые технологии, что в свою очередь приведет к повышению качества продукции и снижению себестоимости за счет использования точных алгоритмов обработки. Внедрение РТК в производственные процессы также способствует улучшению условий труда за счет повышения безопасности и оптимизации рабочего времени, а также сокращает риск человеческого фактора.

Исследование предлагает современное решение проблемы автоматизации в машиностроительном производстве, а также показывает её актуальность. Все это подчеркивает необходимость как изучения, так и дальнейшей разработки эффективных решений в области лазерной сварки.

**Abstract.** Currently, due to the need to increase productivity, improve the quality of products and reduce labor costs, there is an increase in attention to automation of welding processes, one of the ways of which is the use of robotic technological complexes (RTCs). The presented article is devoted to the development and implementation of RTC laser welding, which helps optimize welding processes in mechanical engineering.

Before proceeding with the development itself, it is necessary to conduct a comprehensive assessment of the effectiveness of the RTC application. This is the main objective of the study. Attention is also paid to the application of modern technologies used in laser welding and the choice of a laser source, control system and accessories.

The significance of this study lies in the possibility of replacing previously used welding processes with new technologies, which in turn will lead to improved product quality and lower costs through the use of precise processing algorithms. The introduction of RTC into production processes also contributes to improving working conditions by increasing safety and optimizing working hours, as well as reducing the risk of the human factor.

The study offers a modern solution to the problem of automation in machine-building production, and also shows its relevance. All this highlights the need for both the study and further development of effective solutions in the field of laser welding.

**Ключевые слова:** робот манипулятор, лазерная головка, сварка, РТК.

**Keywords:** robot arm, laser head, welding, RTC

**Введение.** РТК лазерной сварки является системой, содержащей в себе промышленные роботы и автоматизированное оборудование, которые позволяют выполнять различные технологические операции. В данном случае рассматривается вариант с лазерной сваркой, поэтому в данной системе основными элементами комплекса являются робот манипулятор и лазерная головка, которые являются единой системой, благодаря которой получается выполнять высококачественную сварку деталей из различных материалов.

Так как робот манипулятор имеет кинематическую систему с высокой степенью свободы, он имеет широкий диапазон движений. Это помогает ему обрабатывать детали различной геометрической формы, сохраняя при этом точность и качество выполняемой технологической операции. Так же благодаря современным серводвигателям и датчикам обеспечивается высокая скорость передвижений манипулятора и возможность запрограммировать необходимую траекторию вне зависимости от её сложности.

Лазерная головка же является основным элементом рассматриваемого РТК. Она создается высококонцентрированный когерентный луч света, который используется не только для сварки, но и для резки металла. Данное устройство состоит из множества частей, среди которых есть линзы, сопло, фиксирующие устройства и так далее. Благодаря фокусирующему модулю имеется возможность настройки мощности лазерного луча в зависимости от толщины обрабатываемого материала. Датчики, заложенные в лазерной головке, позволяют осуществлять автоматическую коррекцию параметров сварки во время процесса обработки, таким образом повышая качество соединений и уменьшая процент возможных дефектов.

Соединение лазерной головки с роботом манипулятором происходит через переходную пластину, далее идет настройка и объединение компонентов в единую систему, где все работает четко по ранее написанной специалистом программе.

Одним из ключевых преимуществ РТК является возможность использования его для различных задач. Так, к примеру, рассматриваемый комплекс может быть использован не только для лазерной сварки, но также для резки листового металла. Это увеличивает его функциональность и делает универсальным решением для различных задач в условиях промышленного производства.

Так же комплекс может быть дополнен и другими автоматизированными системами такими, как загрузка и разгрузка деталей, диагностика процесса сварки и так далее.

Приведенные выше характеристики делают роботизированные технологические комплексы данного типа современным решением для автоматизации процессов в производственных линиях. Благодаря ним можно получить увеличение эффективности технологических процессов и снижение себестоимости готовой продукции.

**Методы.** В данной работе применялись теоретические методы исследования. Был произведен анализ не только существующих ранее систем РТК, но также видов оснастки для выполнения операций лазерной сварки. Так же был выполнен расчет РТК с оснасткой, которая применяется на производствах на данный момент, а также РТК с оснасткой «спутник» (рис.1), предлагаемым в данном исследовании.

## Продолжение приложения Б

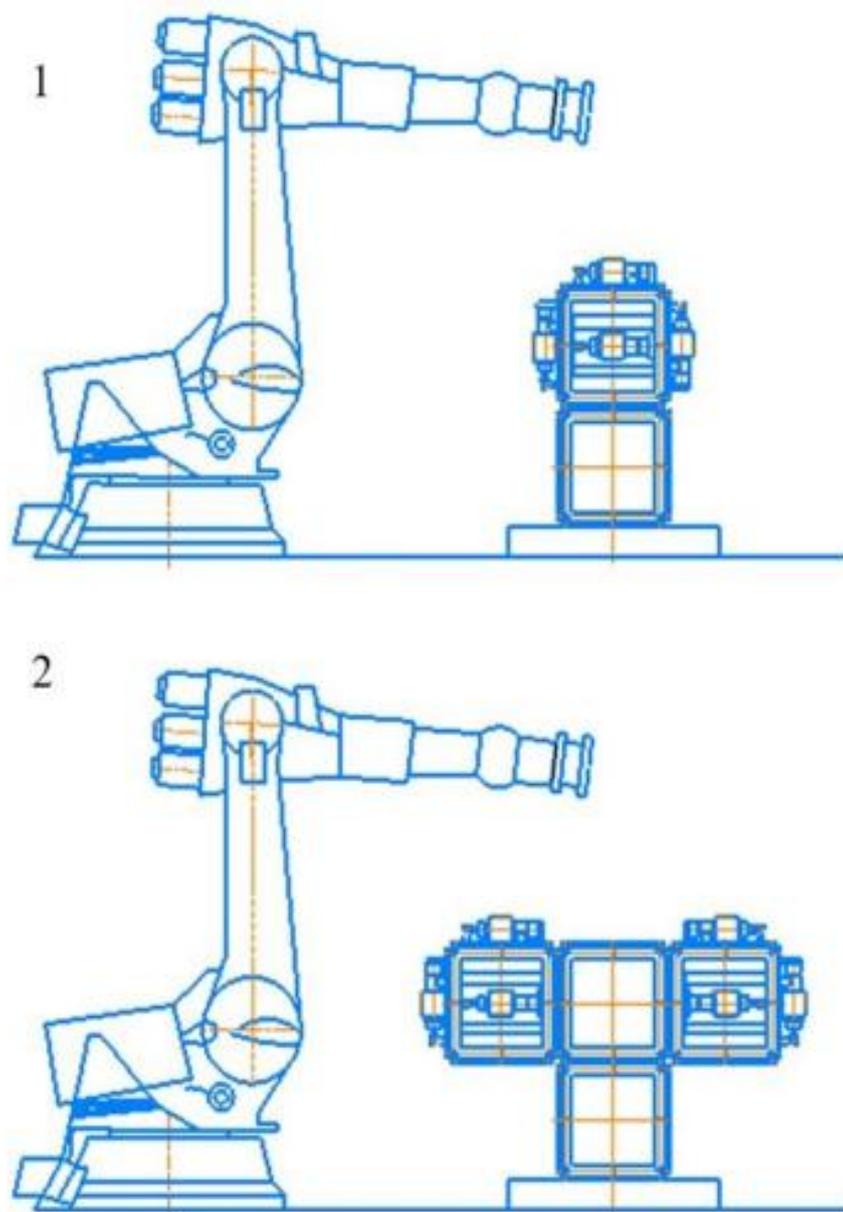
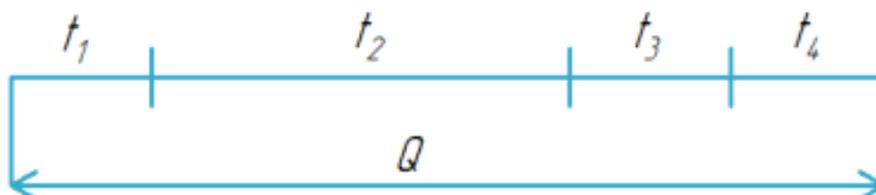


Рисунок 1- РТК: исполнение 1, исполнение 2

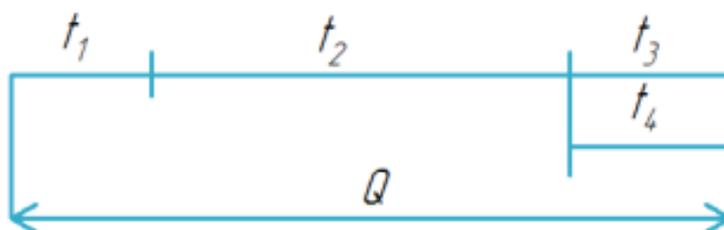
Расчет производится по данным схемы производительности, представленных на рисунке 2:

## Продолжение приложения Б

### *Базовый вариант технологии сварки*



### *Исполнение РТК 1 (проект)*



### *Исполнение РТК 2 (проект)*

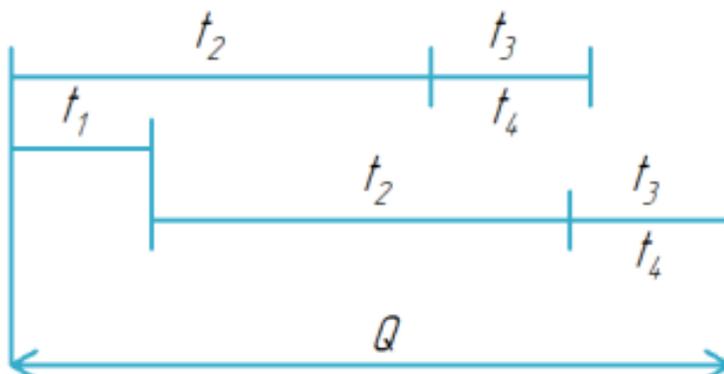


Рисунок 2- Схема производительности процесса сварки

Номинальная производительность рассчитывается по формуле 1:

$$Q_H = \frac{t_2}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} \quad (1)$$

где  $t_1$  – время загрузки;  
 $t_2$  – время работы оборудования;  
 $t_3$  – время выгрузки;  
 $t_4$  – время выхода в 0 манипулятора;  
 Фактическая производительность (2):

## Продолжение приложения Б

Естественнонаучный журнал «Точная наука»

[www.t-nauka.ru](http://www.t-nauka.ru)

$$Q_{\Phi} = Q_H - Q_{\text{пер}} \quad (2)$$

где  $Q_{\text{пер}} = \frac{t_{\text{пер}}}{t_p}$ ,  $t_{\text{пер}}$  – время переналадки оборудования

Возможности повышения производительности РТК и уровень эксплуатации комплексно оцениваются коэффициентом использования. Для базового варианта данный расчет будет выглядеть следующим образом (3):

$$K_{\text{исп.РТК}} = \frac{Q_{\Phi}}{Q_H} \quad (3)$$

Так как, благодаря оснастке, время выгрузки и выхода манипулятора в 0 происходят одновременно, расчет номинальной производительности производится по формуле 4:

$$Q_H = \frac{t_2}{t_1 + t_2 + t_3} \quad (4)$$

где  $t_1$  – время загрузки;  
 $t_2$  – время работы оборудования;  
 $t_3$  – время выгрузки и выхода манипулятора в 0.

Фактическая производительность РТК исполнения 1 (5):

$$Q_{\Phi} = Q_H - Q_{\text{пер}} \quad (5)$$

Коэффициент для РТК в исполнение 1 (6):

$$K_{\text{исп.РТК}} = \frac{Q_{\Phi}}{Q_H} \quad (6)$$

Номинальная производительность РТК исполнения 2 так же изменяет свой вид, благодаря оптимизации процесса (7):

$$Q_H = \frac{t_2}{t_1 + t_2} \quad (7)$$

где  $t_1$  – время загрузки, выгрузки и выхода в 0 манипулятора;  
 $t_2$  – время работы оборудования.

Фактическая производительность (8):

$$Q_{\Phi} = Q_H - Q_{\text{пер}} \quad (8)$$

Расчет коэффициента РТК в исполнение 2 (10):

$$K_{\text{исп.РТК}} = \frac{Q_{\Phi}}{Q_H} \quad (10)$$

Сравнения произведенных расчетов представлены на рисунках 3 и 4:

## Продолжение приложения Б

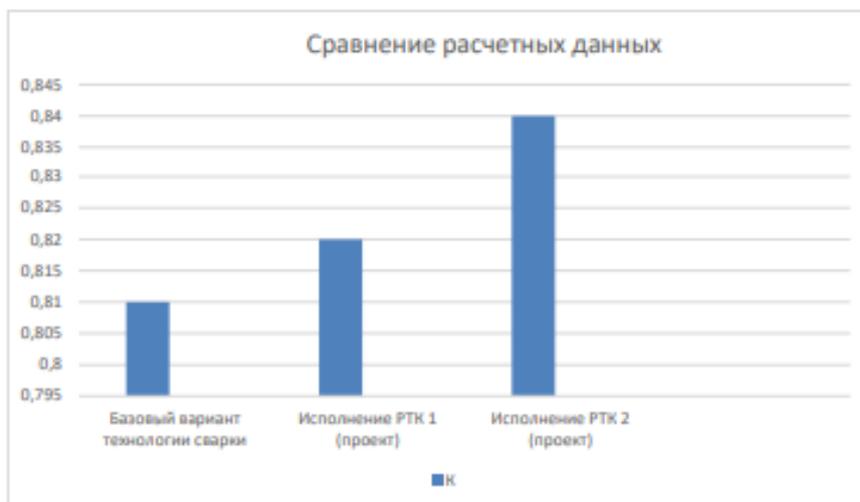


Рисунок 3- Сравнения коэффициента использования РТК



Рисунок 4- Сравнение производительности РТК

Исходя из данного расчета виден потенциал предлагаемой оснастки в РТК лазерной сварки. В дальнейшем развитие «спутника» можно будет применять его различные вариации, которые ускорят производительность еще больше.

**Результаты.** В рамках разработки РТК используется ряд современных технологий и оборудования, которые обеспечивают необходимые качество и автоматизацию различных процессов. Так, например, источником лазерного излучения выбран оптоволоконный лазер, который предлагает ряд преимуществ по сравнению с другими видами таких устройств такими, как газовые или твердотельные.

Выбранный тип лазерной головки отличается высокой мощностью, точностью, экономичностью и простотой в обслуживании. Высокая скорость работы позволяют на порядок ускорить время процесса. Так же возможно соединение разнородных материалов и сплавов, которые либо сложно, либо и вовсе невозможно обработать традиционными методами сварки. А низкий термического воздействия на околошовную зону снижает риски возникновения внутренних напряжений и искажений структуры металла.

Также следует выделить оснастку, используемую в рассматриваемом проекте. В РТК

## Продолжение приложения Б

используются различные её виды, которые помогают правильно фиксировать деталь в процессе сварки. В данном случае же применяется «спутник» (рис.5), который обеспечивает точное позиционирование деталей, а также возможность обработки заготовок различных сложности и размеров благодаря своей конструкции.

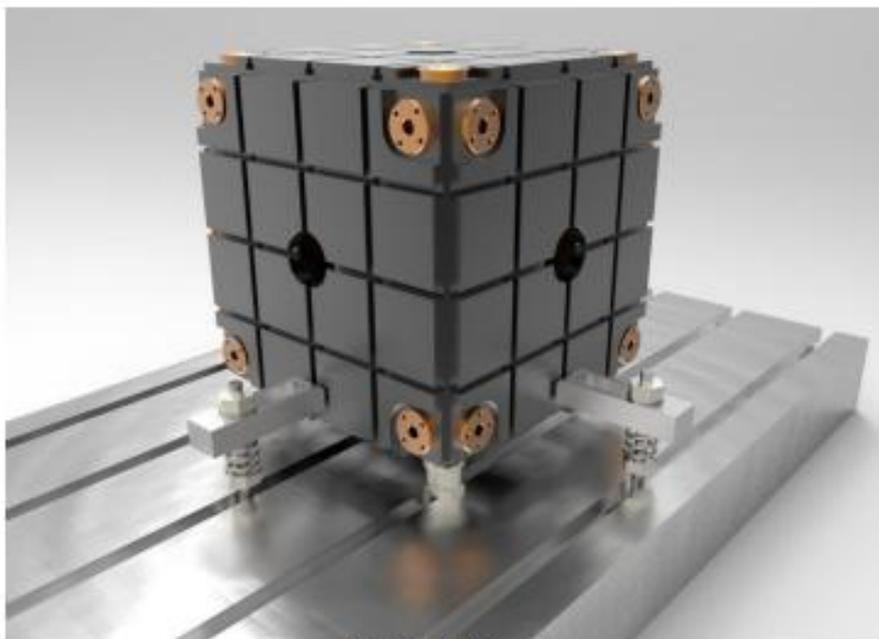


Рисунок 5- Спутник

Современные системы управления же помогают обеспечить качество работы РТК и возможность регулирования параметров лазерного потока, скорости перемещения манипулятора и прочих характеристик в реальном времени. Все эти условия позволяют получить высокую точность и стабильность процесса сварки. Внедрение многочисленных технологий и оборудования в единую систему позволяет наладить гибкое и высокопроизводительное производство, делая РТК лазерной сварки востребованным решением в промышленных условиях и помогая достичь конкурентоспособности.

**Обеуждение.** Благодаря значительным преимуществам по сравнению с обычными методами сварки РТК стали востребованы в современном машиностроении.

Одним из самых важных преимуществ является высокая скорость выполнения сварочных операций. Как показывает практика и исследования, скорость лазерной сварки с использованием данных комплексов может достигать 10-50 м/мин, что на порядок превышает скорость той же аргонной сварки. Это позволяет сокращать время выполнения операции и приводит к увеличению объема выпускаемой продукции без необходимости увеличения численности рабочих и эксплуатационных затрат.

Также следует отметить, что данные системы меньше подвержены дефектам, связанными с перегревом и структурными изменениями в металле, что делает соединения более прочными и стойкими к внешним нагрузкам.

Важным моментом является возможность соединения РТК с другими автоматизированными системами на производстве, что помогает создать более гибкую производственную линию. Например, можно адаптировать систему к различным видам материалов и конструкций вне зависимости от их сложности, что значительно расширяет область применения и увеличивает эффективность такого решения. Все это делает РТК универсальным инструментом, способным справляться с широким спектром задач в рамках одного производства.

Кроме того, использование роботизированных технических комплексов снижает экологические риски и улучшает условия труда, так как благодаря автоматизации сварочных процессов уменьшается

## Продолжение приложения Б

выделение вредных веществ, которые могут неблагоприятно влиять на здоровье рабочих. А также автоматизация позволяет сократить количество аварийных ситуаций, связанных с человеческим фактором, повышая общую безопасность на рабочем месте.

**Выводы.** В результате проведенного исследования, в котором освящается разработка и внедрение РТК лазерной сварки, были получены результаты, помогающие понять необходимость и эффективность новых технологий. Основные выводы, полученные в ходе проекта, можно резюмировать следующим образом.

Во-первых, оптоволоконный лазер позволит увеличить не только скорость сварки, но и наладить автоматизированный процесс выполнения сварки даже разнородных материалов. Благодаря такому типу лазера получится значительно сократить рабочее время и повысить общую производительность процессов, что является ключевым фактором в условиях конкурентного производства.

Во-вторых, качество сварных соединений будет значительно выше благодаря меньшему уровню дефектов, что достигается благодаря высокой точности и адаптивному управлению лазерного потока.

В-третьих, было получено увеличение производительности благодаря использованию оснастки «спутник», в зависимости от конфигурации которой можно обрабатывать несколько деталей без простоя оборудования на время загрузки и выгрузки деталей.

В-четвертых, внедрение и использование РТК способствует улучшению условий труда, минимизируется физическое участие человека в процессе сварки, что повышает безопасность производимой операции.

Учитывая вышеприведенные пункты, можно заключить, что разработанный РТК имеет высокий потенциал для применения в различных производственных условиях. Совершенствование процессов и адаптация новых технологических решений откроет новые возможности для автоматизированного производства, сделав его более гибким и конкурентноспособным на глобальном рынке.

Таким образом, исследование подтверждает значимость внедрения роботизированных технологических комплексов в промышленности, а также указывает на их потенциал для дальнейшего развития.

### **Библиографический список:**

1. Автоматизированные комплексы механической обработки валов с использованием промышленных роботов, метод. рекомендации, ЭНИМС, М.: НИИмаш, 1983, 64 с. 1
2. Комплексная автоматизация производства, Волкович Л. И. и др., М.: Машиностроение, 1983, 2269 с., ил. 1
3. Диагностирование оборудования гибкого автоматизированного производства, Нахапетян В. Г., М.: Наука, 1985. 1
4. Гибкое автоматизированное производство, В. Д. Азбель и др., Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1983, 376 с. 1
5. Промышленные роботы. Некоторые проблемы внедрения, Елисеев С. В. и др., Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 1982, 362 с., ил. 1
6. Проектирование механосборочных цехов, Мельников Г. Н., М.: Машиностроение, 1990. 1
7. Создание и внедрение роботизированных технологических комплексов на машиностроительных предприятиях, Чинаев П. И. и др., Киев: УкрНИИНТИ, 1982, 52 с. 1
8. Баранов М. С., Вошинский М. Л., Гейнрихе И. Н. Лазерная сварка металлов. М.: Машиностроение, 1971. 3
9. Григорьянц А. Г., Фромм В. А. Оптимизация характеристик сфокусированного лазерного луча для сварки. Троицк: ПРЕПРИНТ НИЦТЛ #5, 1984. 3
10. Кокора А. Н. Сварка в машиностроении. Справочник. Т. 2. М.: Машиностроение, 1978. 5
11. Крылов К. И. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. М.: Машиностроение, 1978. 5
12. Магдин А. Г., Дюсегалиев Р. М., Припадчев А. Д., Горбунов А. А. Гибридизация лазерной сварки // Транспортное машиностроение. 2022. № 10. С. 12–18. 4

## Продолжение приложения Б

Естественнонаучный журнал «Точная наука»

[www.t-nauka.ru](http://www.t-nauka.ru)

13. Рэди Дж. Промышленные применения лазеров. М.: МИР, 1981. 15
14. Сухов А. Г., Малыш М. М., Шанчуров С. М. Применение лазерных технологий при изготовлении теплообменного оборудования / «Сварочное производство». 2018. № 1. С. 34–38. 1
15. Бурдаков С. Ф. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов. — М.: Высшая школа, 1986. — 264 с.. 1
16. Гонсалес Р. Робототехника / Р. Гонсалес, К. Фу, К. Ли. — М.: Мир, 1989. — 620 с.. 12
17. Зенкевич С. Л. Основы управления манипуляционными роботами / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко. — Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — 480 с.. 12
18. Зубов Д. В. Современные проблемы управления технологическими манипуляторами в промышленности / Д. В. Зубов, М. Т. Х. Эраки. — Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-29): сборник трудов XXIX Международной научной конференции, 2016. — Т. 3. — с. 233–236. 2
19. Канаев Е. М. Конструкции промышленных роботов / Е. М. Канаев, Ю. Г. Козырев, Б. И. Черпаков и др. — Москва: Высш. шк., 1987. — 95 с.. 2
20. Козырев Ю. Г. Промышленные роботы: Справочник. — М.: Машиностроение, 1983. — 374 с.. 3
21. П.А. Огин, С.И. Ярьсько, К.С. Осипов, Д.Г. Левашкин Автоматически сменные модули для станков с ЧПУ при реализации лазерной обработки. 2016. с 102-104