

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Бабко Александр Павлович

**РОБОТИЗИРОВАННАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА КОНСТРУКЦИЙ
АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Направление подготовки
15.04.01 – «Машиностроение»

**АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Среднева Татьяна Ивановна
Проверено
25.06.2021 Зачтено Библиотека

Работа выполнена на кафедре «Технология сварочного и металлургического производства» в ФГБОУ ВО «Комсомольском-на-Амуре государственном университете»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор кафедры «Технология сварочного и металлургического производства» ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственного университета»,
Муравьев Василий Илларионович

Рецензент

кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ИМиМ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре
Жилин Сергей Геннадьевич

Защита состоится «24» июня 2021 г. в 9:00 часов на заседании государственной аттестационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: Россия, 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, учебный корпус 2, аудитория 221.

Автореферат разослан 18 июня 2021 г.

Секретарь ГЭК, к.т.н., доцент

Клешнина О.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Титан в современной авиационной промышленности приобрел ведущие позиции, являясь одним из важнейших конструкционных материалов и позволивший перейти авиации в реактивную эру, начавшаяся в начале 1940-х годов, в виду своих значительных преимуществ относительно алюминиевых сплавов и легированных сталей. Среди таких преимуществ можно выделить низкую плотность, высокую температуру плавления, высокую удельную прочность и высокую коррозионную стойкость.

Естественно, за 80-летнюю историю авиации, титан успели применить в различных конструкционных элементах, но активно он прижился в топливных системах, в силовых элементах каркаса, расположенные в непосредственной близости зоны интенсивного нагрева или агрессивной среды. Естественно, как и для любой сборочной единицы, выполняются сборочные операции, среди которых для обеспечения монолитности и герметичности применяются сварочные операции.

Сварка в авиационной промышленности не обладает ведущими позициями, но даже она является важнейшим способом для обеспечения неразъемных соединений, когда изготовление цельной конструкции экономически нецелесообразно или применение болтовых соединений не обеспечивает желаемого результата. В авиационной промышленности крепко закрепилось два способа выполнения сварных швов:

- аргонодуговая автоматическая сварка плавящимся или неплавящимся электродом, требующийся для проведения сварки крупногабаритных и толсто-стенных конструкционных элементов;

- электронно-лучевая сварка, выполняющаяся для малогабаритных, тонкостенных и особоответственных конструкционных элементов или элементов трубопроводных систем.

Однако, у обоих способов существует ряд недостатков, представляющие собой захват обширной зоны материала под влияние термодиформационных изменений (для аргонодуговой сварки) или невозможность выполнения работ в открытой среде, что ведет к ограниченным габаритам сборочной единицы (для электронно-лучевой сварки). Существуют явные проблемы с автоматизацией процесса, встречаемые на базе Комсомольска-на-Амуре авиационного завода имени Ю.А. Гагарина, приводящее к попыткам использования альтернативных решений для минимизации выполнения сварочных процессов.

Однако, существует вид сварки, гипотетически решающий как проблемы аргонодугового, так и электронно-лучевого процесса – лазерная сварка, разработанная ещё в 1950-е годы XX века, но достаточно долгое время не пользовалась спросом в промышленной среде, в виду своих внутренних недостатков, появившиеся в самом начале разработки, а также наличием явной конкуренции с тогда только что созданной электронно-лучевой сваркой. В итоге, только с фактической «перезагрузки» лазерной сварки, с приходом иттербиевого оптоволокна (волоконная лазерная сварка), твердотельных дисков на основе YAG:Yb³⁺ (дисковая лазерная сварка) и диодов накачки (диодная сварка), лазеры начали поэтапно заменять как имеющиеся к тому периоду СО₂-лазеры, получившиеся от-

носительное признание в автомобильной промышленности, так и покорять новые сферы промышленности (микроэлектроника, аэрокосмическая промышленность и другие). Лазерная сварка в текущий момент активно применяется совместно с роботизированными манипуляторами, в виду своей высокой точности, схожей электронно-лучевой сваркой. Вкратце можно выделить главные преимущества и особенности сварки:

- возможность сваривать без присадочного материала;
- проведение работ с обеспечением защиты шва схож с аргодуговым способом;
- чистота проведения работ;
- высокая автоматизация;
- качество сварного шва и ширина ЗТВ практически схожа с габаритами сварного шва при электронно-лучевой сварке;
- возможность сваривать разнородные материалы.

Обладая такими отличительными особенностями аргодуговой и электронно-лучевой сварки, а также решая их отличительные недостатки, лазерная сварка представляет из себя перспективный способ, но существует явная проблема, представляющая собой достаточно малое количество научных исследований, проводимых для сваривания титана и титановых сплавов с помощью лазерных технологий, а в виду достаточно малой литературной базы, преимущественно описывающая лазеры «первого» поколения, заставляет задуматься о целесообразности внедрения лазерной сварки в производство, даже с учетом всех перспективных преимуществ.

Причиной такого положения сводит также неясность влияние формирования сварного шва в титане и его сплавах, так как титан в виду своих химических свойств обладает особым недостатком, по причине которого даже традиционные методы стараются применяться по минимуму – это химическая активность с окружающей средой и аллотропические переходы, которые приводят к увеличению прочности, но при этом введут к уменьшению пластичности сплава.

Отсутствие явной картины выполнения сварки титана и его сплавов с помощью лазерных технологий, требует выполнение исследований, которые должны сопровождаться непосредственным описанием методики работ, явных проблем и решений, которые встречались при выполнении работ, нахождения зависимостей между входными параметрами сварки, которые в данной случае представляют собой мощность лазера, скорость сварки и фокусное расстояние.

Существующие научные работы выдают общую оценку и формируют вывод о целесообразности лазерной сварки, но существуют такие проблемы как:

- отсутствие проведения сварки для различных титановых сплавов, так как преимущественно научные статьи представлены иностранными сотрудниками, где главенствующим титановым сплавом является Ti6Al4V (аналог ВТ6);
- значительное количество исследовательских работ выполнено на твердотельных лазерах импульсного действия;
- отсутствие какого-либо влияния в научных работах таких параметров как изменение фокусного расстояния или мощность излучения, изменяя лишь скорость выполнения сварки.

По исследовательской работе, предшествующей диссертационной, были достигнуты незначительные успехи, представляющие собой формирование сварных швов с обеспечением защиты корневого шва. В данной же работе представляется окончательно закрепить значения входных параметров, разрешить вопрос с обеспечением защиты лицевой стороны сварного шва и проведения исследовательских работ для следующих сплавов, применяемых в авиационной промышленности – ВТ20, ВТ23 и ОТ4.

Цель работы. Целью настоящей работы является создание системы, а также методики для проведения лазерной сварки титана и титановых сплавов. Определение оптимальных входных параметров и их зависимости. Определения дефектов, которые могут образовываться при сварке лазером, изучение микроструктуры сварного шва, а также проведение испытания для выявления отличий от характеристик основного металла, которые могут дать вывод о целесообразности использования лазера в сварки титановых сплавов, применяемых в авиации.

Научная новизна и практическая значимость работы. В ходе проведенных научно-исследовательских работ, был разработан ряд оснасток, позволивший преобразовать лазерное и роботизированное оборудование в единую сварочную систему с выполнением сварных швов и присутствием минимальных дефектов. Была исследована зависимость входных параметров лазерной сварки и составлены графики оптимальных режимов для проведения сварки на толщинах 0,4 мм, 0,5 мм и 2,0 мм при фокусном расстоянии 235 мм и 250 мм, а также составлены зависимости геометрических параметров от входных параметров лазерной сварки.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Практические особенности роботизированного лазерного сварочного процесса с подтверждением ряда преимуществ и недостатков.
2. Методология сварочного процесса. Проектировка и создание системы для обеспечения выполнения сварных швов при помощи лазера.
3. Определение зависимости входных параметров лазерной сварки: мощность лазера, скорость сварки, фокусное расстояние – на возможность выполнение сварного шва и геометрических параметров.
4. Обеспечение защиты при выполнении лазерного сварочного процесса.
5. Результаты исследований микроструктуры и прочностных свойств сварных швов, выполненных лазерной сваркой, титановых сплавов типа $\alpha+\beta$ -сплавы с преимущественным содержанием α - или β -составляющей.

Практическая ценность:

1. Определены зависимости входных параметров при нахождении оптимального режима для лазерной сварки. Составлены графики рассеивания с учетом уравнения регрессии.
2. Произведено изучение полученной структуры сварного шва без участия в сварочном процессе присадочного материала.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и Наука» (2018-2020 гг.), проводившиеся территории ФГБОУ ВО «Комсомольском-на-Амуре государственном университете»

Публикации по теме работы. По теме диссертации опубликованы 3 публикации входящих в РИНЦ в сборниках КНАГУ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения и изложена на 112 страницах машинописного текста, включая 58 рисунков, 19 таблиц и список литературы, содержащий 34 наименования.

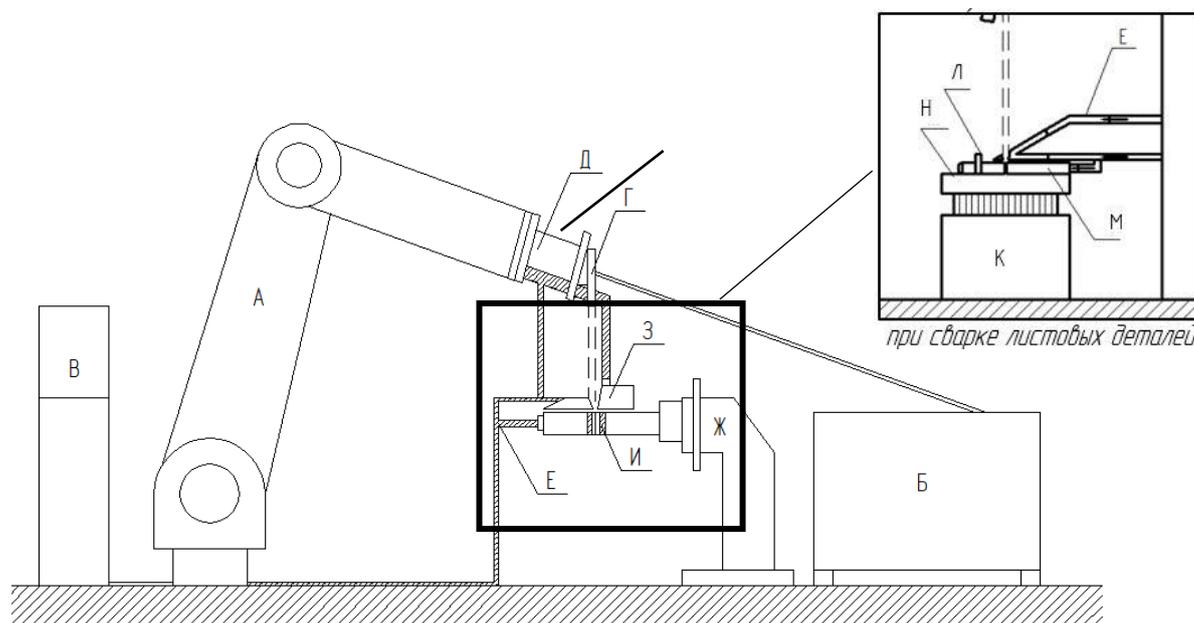
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дан обзор работ в данной области исследования, сформулирована цель диссертации, отражена новизна и практическая значимость, приведены выносимые на защиту основные результаты работы, кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе представлен литературный обзор, заключающийся в описании титанового сплава, его особенностей и преимуществ над алюминиевыми сплавами и легированными сталями.

Рассматривается применение титана и его сплавов в авиационной промышленности, а также применение титана в сварочных процессах с выявлением текущих производственных проблем.

Во второй главе описаны лазерные системы, применяемые для сварки, а также схема и принцип работы волоконного лазера. Представлены преимущества и особенности применения роботизированной системы.



- | | |
|------------------------------|--------------------------------|
| А – автоматизированный робот | З – сопло |
| Б – иттербиевый лазер | И – труба с медными кольцами |
| В – газовые баллоны | К – рабочий стол (поверхность) |
| Г – оптическая головка | Л – прижимная система |
| Д – кронштейн | М – листовая деталь |
| Е – система подачи аргона | Н – медный радиатор |
| Ж – позиционер | |

Рисунок 1 – Оборудование для проведения лазерного сварочного техпроцесса

Для проведения научных исследований, была создана универсальная схема для проведения лазерно-сварочных работ (рисунок 1), в которой использовались иттербиевый волоконный лазер ЛС-2 с учетом оптической сварочной головки IPG FLW D30 и пультом управления, роботизированный манипулятор KUKA KR60 с учетом пульта управления KUKA KR C4, газовый баллон, а также дополнительная оснастка, проектируемая для задач совместной работы робота и лазера, обеспечения прижима с исключением коробления и обеспечения защиты корневой и лицевой стороны сварного шва, представленная на рисунке 2. По мере проведения исследований с исключением явления нестыковки кромок, коробления и возникновения пароплазменного факела при сварке, было создано 2 вариации подачи газа через лицевую сторону шва и три вариации для фиксации и подачи газа через корневую сторону шва.

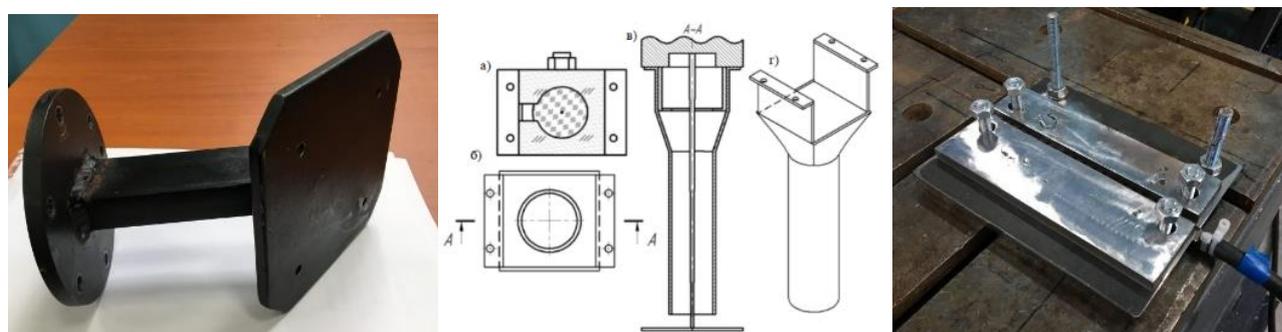


Рисунок 2 – Проектируемая оснастка

По мере проведения работ, был составлен типовой технологический процесс, где отличием лишь стало замена сварочных работ с выбором других входных параметров: мощность лазерного излучения, скорость сварки, фокусное расстояние и подачу защитного газа.

В третьей главе рассматриваются исследовательские наработки, проведенные над титановыми сплавами ВТ20 (толщина 2 мм), ОТ4 (толщина 0,5 мм) и ВТ23 (толщина 0,4 мм).

Таблица 1 – Входные параметры для проведения сварочных работ

S, мм	P, Вт	V _{св} , м/ч	F, мм
2 (ВТ20)	1200-1300	27-29	234-235
	450-500*	27-32*	250
0,4 (ВТ23)	270-350	27-36	234-235
	200-225	27-36	250
0,5 (ОТ4)	225*	90*	250

Примечание: b – толщина; P – выходная мощность; V_{св} – скорость сварки; F – фокусное расстояние
*данные после внедрения системы соосного обдува

В процессе выявления зависимости между скоростью сварки, фокусным расстоянием и мощностью лазерного излучения, была составлена диаграммы зависимостей и уравнения регрессии с выявленными оптимальными режимами,

представленные в таблице 1, где проводились испытания изначально на фокусном расстоянии 235 мм, далее на регламентируемом фокусе 250 мм и с проведением испытаний при использовании оснастки обдува, так как произошло падение параметров в виду исключения пароплазменного факел на 10%.

По мере выполнения исследовательского процесса и подбору входных параметров, были выявлены и обнаружены такие дефекты как неполное сплавление кромок, прожоги и провалы сварных швов.

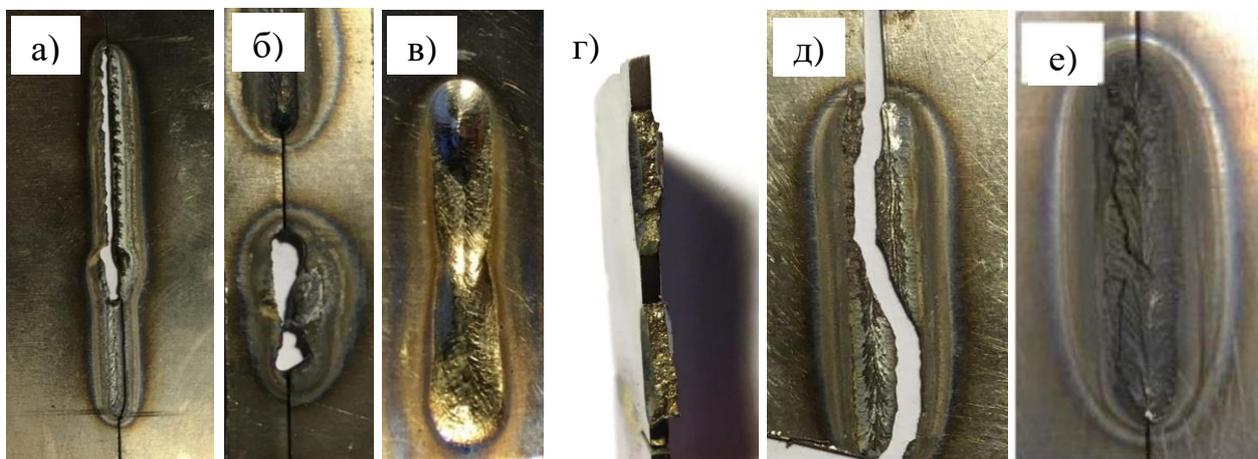


Рисунок 3 – Дефекты сварных швов:

а, б – прожоги сварных швов Б10 и Б6 (ВТ23, толщина 0,4 мм);
в, г – провалы сварных швов В7 и А22 (ВТ20, толщина 2 мм);
д, е – разрушение сварного шва Б15 (ВТ23, толщина 0,4 мм) и
А8 (ВТ20, толщина 2,0 мм) после сварки

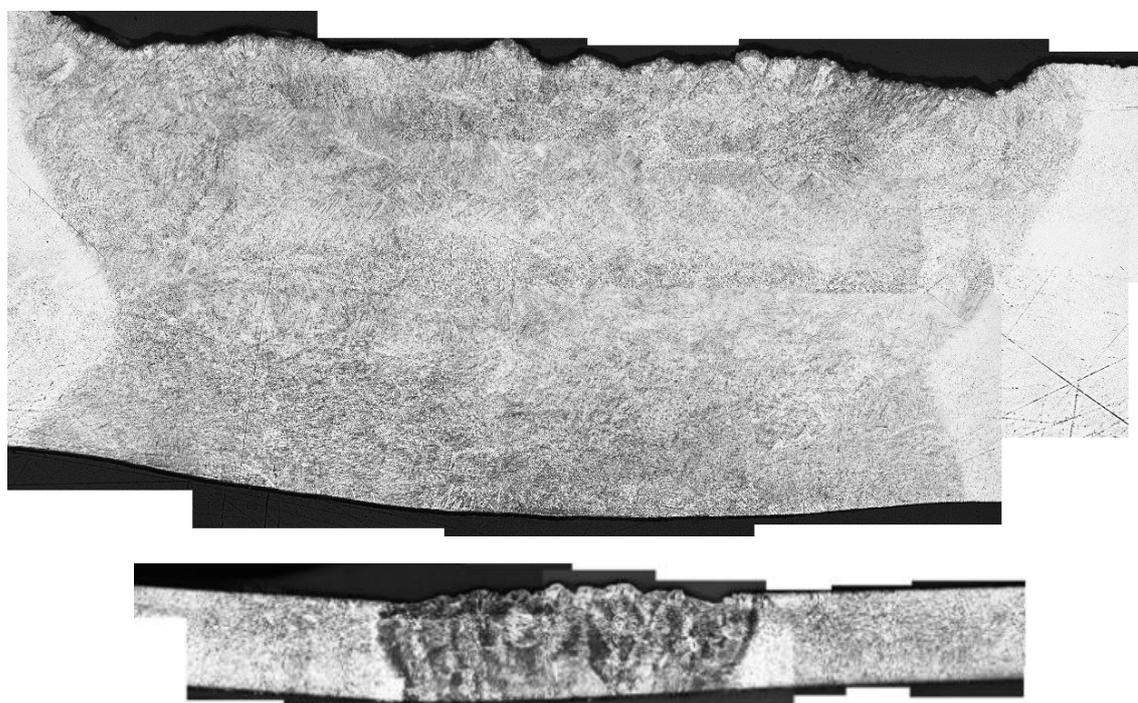


Рисунок 4 – Микроструктура исследуемых образцов:
а – ВТ20 (2 мм); б – ВТ23 (0,4 мм)

Так как проектируемая оснастка на рисунке 2 стала окончательным вариантом, то предшествующие ей сварочные процессы сопровождались такими дефектами как растрескивание, насыщение оксидами или нитридами титана, наличием пор и последующее образование холодных трещин, а также геометрическими отклонениями сварного шва (рисунок 3).

Среди явных проблем, сохранившихся в ходе всех текущих испытаний – сохранение микропор в сварном шве, которые при этом, согласно ПИ 1.4.1898 – 2003 допускаются, если габаритные размеры и расстояние между порообразованиями соблюдено.

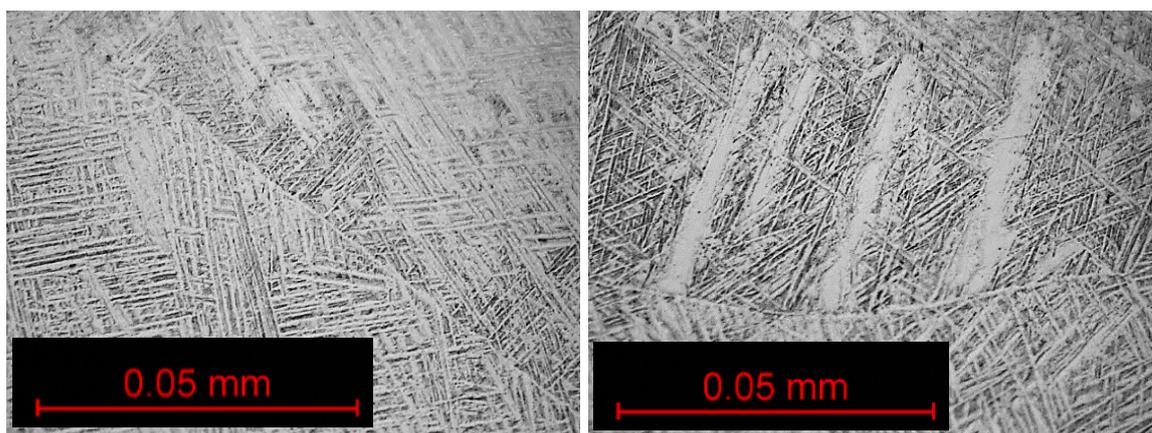


Рисунок 5 – Микроструктура сварного шва образца VT20 (2 мм) (1000х)

Также была исследована микроструктура сварных швов на материале VT20 и VT23 (рисунок 4), где были определены наличие в сварном шве VT20 пластинчатая (игольчатая) структура (рисунок 5), подобная структуре мартенсита закаленной легированной стали, а также в сварном шве VT23 наличие бимодальной мелкозернистой структуры (рисунок 6), понижающие пластичные свойства и повышающие прочностные свойства сварного шва.

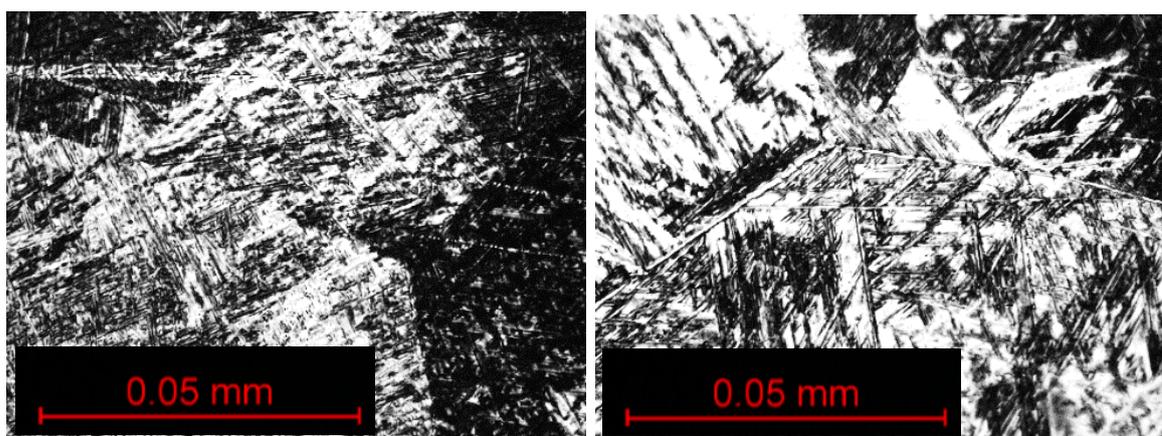


Рисунок 6 – Микроструктура сварного шва образца VT23 (0,4 мм) (1000х)

Дальнейшие исследования микроструктуры показали о наличие 8 микропор в сварном шве VT20 толщиной 2 мм, расположенные в различных зонах. Также из-за отсутствия качественной защиты лицевой стороны шва – нарушена

структура внешней поверхности. Явных геометрических отклонений в виде провала шва обнаружено не было. Зона, прошедшее аллотропическое изменение представлено в виде X-образной формы. Связано это прежде всего с точность светового пучка, попавшее в стенки стыкуемых элементов (наличие зазора 0,1 мм) с последующим теплоотводом до ближайших поверхностей. Дальнейшее изучение сплава на микротвердость по Виккерсу (рисунок 7) показали рост твердости по отношению к основному металлу на 22-24%, что схоже с многие научными работами, связанные с лазерной сваркой титана и допускаются при сварке аргонодуговой или электронно-лучевой сваркой, согласно ПИ 1.4.1898 – 2003.

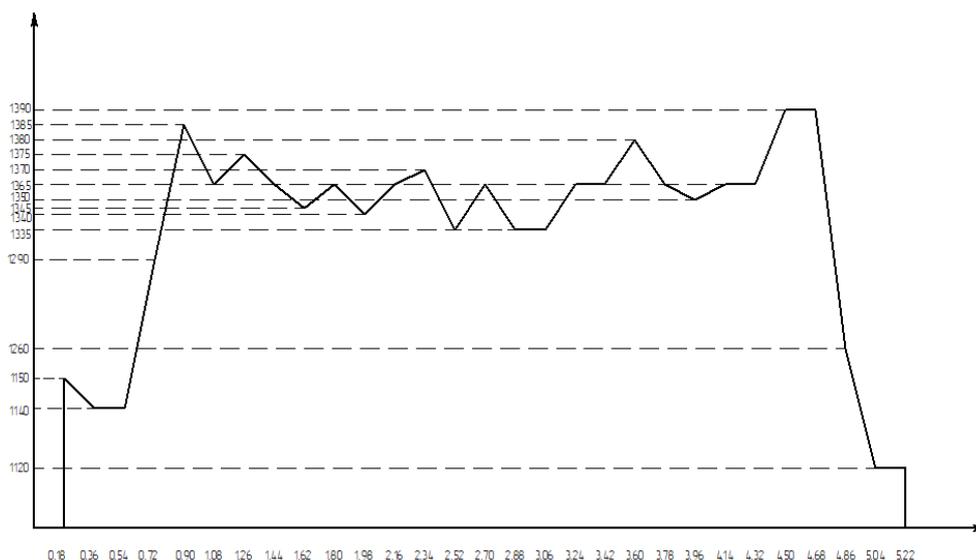


Рисунок 7 – Микротвердость лицевой стороны шва BT20 (2 мм)

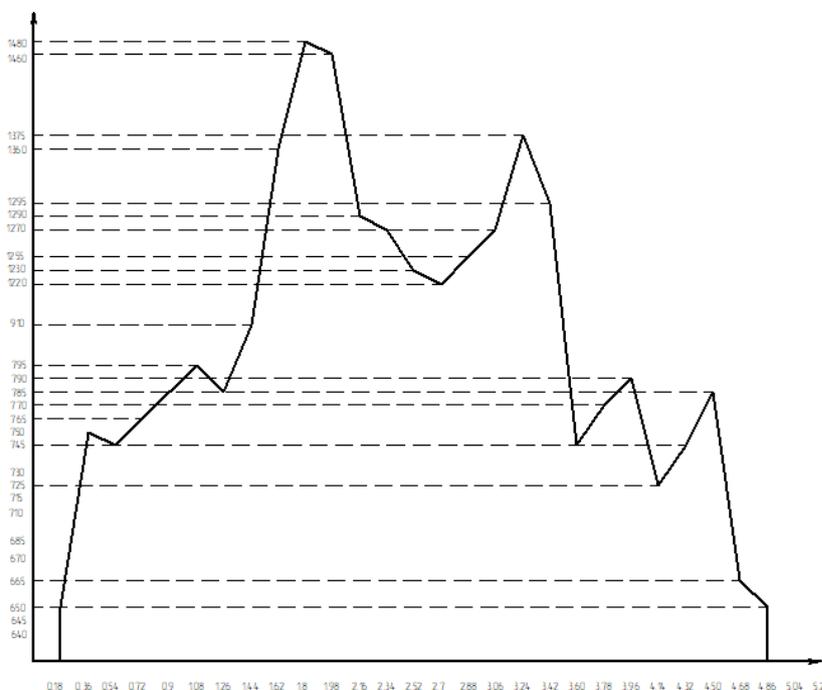


Рисунок 8 – Микротвердость лицевой стороны шва BT23 (0,4 мм)

У образцов BT23 пор обнаружено не было, но при этом было выявлено наличие излишнего количества β -составляющей в структуре, сопровождающее

повышением твердости шва по отношению к основному металлу на 90-110% (рисунк 8), требующее проведение дальнейших работ для снижения присутствия β -составляющей или же значительного роста твердости в виду термического упрочнения приемлемый для высоколегированных титановых сплавов.

Проведение исследований на разрыв на образцах ОТ4 (0,5 мм) показал неудовлетворительные результаты по отношению к основному металлу. Разрыв сварных образцов произошел по стыку с достижением предельной прочности в 50% от основного металла. Хрупкий характер разрушения. Причиной тому стали:

- отсутствие выполнения работ по термообработке для снятия в сварном шве внутренних напряжений;
- возможное расхождение стыков друг относительно друга на 0,05-0,08 мм.

Таблица 2 – Прочностные показатели исследуемых образцов ОТ4 (0,5 мм)

Тип	Предел прочности, МПа	Удлинение, %	Сужение, %
Основной металл	571,2*	7,1	8,1
Сварной шов	380	0,7	0,6

Примечание: *Значение прочности отличается от справочной (700 МПа), так как при испытаниях началось скольжение – отсутствие губок для тонкостенных образцов

Предполагаемым решением существующей проблемы представляется проведение дальнейших исследований образцов, прошедших термическую обработку с последующим сравнением их прочностных характеристик.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Составлен типовой технологический процесс и методика проведения исследований через созданную универсальную роботизированную лазерную систему, составленная в рамках нормативных документов, схожая с технологическим процессом аргодуговой сварки, отличимая лишь применением лазера и отсутствием какого-либо присадочного материала, позволяющая уменьшить материальные затраты и повышающая автоматизацию работ;

2. Проблема обеспечения защиты сварного шва привело к созданию целых различных систем на основе особенностей сплава, исключаящие коробление тонкостенных деталей и возникновения пароплазменного факела;

3. В процессе сварки были обнаружены дефекты в виде пор, холодных трещин и цветов побежалости неудовлетворительной расцветки, связанный прежде всего с плохой защитой при сварочном процессе. Также были встречены проблемы с геометрией шва, образование усадок, провалов, прожогов и неполное проплавление, связанное с неправильным выбором входных параметров;

4. Определенная микроструктура в титанах с количественным содержанием β -составляющей меньше 0,6 представляет собой пластинчатое строение, схожей с мартенситным строением стали и обладающее повышенной твердости

на 20-25% выше от основного металла. В противном случае, структура представляет из себя бимодальное строение и повышение твердости на 90-110% от основного металла и требует дальнейшего исследования для снижения показателей;

5. Проблемы нестыковки для листовых металлов ниже 0,5 мм при работе не были окончательно решены и нуждаются в дальнейшей модернизации оснастки. Также не представилось возможным на основе имеющихся параметров провести сварку трубопроводных элементов, в виду отсутствия оснастки для позиционирования детали в пространстве, тогда так схема проведения была составлена. Также требует дальнейшего исследования образцы после проведения термообработки для определения насколько возможно понизить твердость, упрочнить структуру и сохранить при этом пластичность.