

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Комарова Ксения Константиновна

**Исследование процесса автоматической импульсной сварки  
соединений трубопроводных систем из нержавеющей стали**

Направление подготовки  
15.04.01 «Машиностроение»

**АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Никитина  
Елена Николаевна  
**Проверено**  
27.06.2023 Зачтено Библиотека

2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» на кафедре «Технология сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева»

**Научный руководитель**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология сварочного и металлургического производства им. В.И. Муравьева»

**Бахматов Павел Вячеславович**

**Научный консультант**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника»

**Фролов Алексей Валерьевич**

**Рецензент**

кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ИМиМ ДВО РАН

**Жилин Сергей Геннадьевич**

Защита диссертации состоится «23»июня 2023 г. в 08:00 часов на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, учебный корпус 2, аудитория 221.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <https://knastu.ru/page/1519> и на кафедре «Технология сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» ФГБОУ ВО «КнАГУ».

Секретарь ГЭК  
к.т.н., доцент

О.Н. Клешнина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современный летательный аппарат (ЛА) включает многочисленные системы и агрегаты, взаимодействующие посредством трубопроводов, особенностями которых являются сложность геометрической формы, малая толщина стенки. Трубопроводные системы летательных аппаратов (ТПС ЛА) должны отвечать требованиям герметичности, прочности, коррозионной стойкости, изготавливаются из титановых, алюминиевых сплавов и нержавеющих сталей, имеют сложную геометрическую конфигурацию и малую толщину стенки 0,5-1,5 мм, достаточную номенклатуру диаметров от 8 до 130 мм.

Достижение требований качества согласно ПИ 1.4.748 и условий чертежа при выполнении ручной АрДЭС ТПС ЛА зависит от множества факторов: квалификации сварщика, выбранной техники сварки, его психоэмоционального состояния. Так в условиях КнААЗа при сварке элементов ТПС ЛА из нержавеющей стали по результатам РГК дорабатывается до 40% впервые предъявленных сварных соединений (причем в ряде случаев неоднократному): разделка дефекта, подварка, рентгенографический контроль. Значительная дефектность процесса сварки трубопроводов приводит к неритмичности производства трубопроводов, что в свою очередь удлиняет циклы сборки самолётов. В сварных соединениях, предъявляемых на рентгенографический контроль, обнаруживаются недопустимые дефекты: попечевые трещины, несплавления и цепочки пор. Данные дефекты возникают даже в случае комиссационной проверки качества подготовки поверхности под сварку (проведение операции травления, шабрения торцов труб, механической зачистки кромок, обезжиривания ацетоном), процесса сварки, производимого с использованием современного сварочного оборудования фирмы Кемпрі производства Финляндии и сварочных материалов, подготовленных в соответствии с технологической документацией.

Таким образом, **актуальность** данной работы определяется необходимостью повышения качества сварных соединений путем разработки технологий и оборудования роботизированной сварки, обеспечивающих возможность применения уникальных сварочных траекторий и параметров режима, способствующих снижению порообразования с достижением равнопрочности сварного соединения с основным металлом.

**Цель работы:** разработка технологии роботизированной аргонодуговой сварки пульсирующей дугой без присадочной проволоки с регулированием давления поддува для повышения эффективности изготовления авиационных тонкостенных элементов трубопроводных систем из нержавеющей стали

Для достижения цели работы поставлены и решены следующие **задачи**:

1 Определить основные технологические факторы, оказывающие влияние на качество сварных соединений ЭТПС ЛА и установить их взаимосвязь.

2 Разработать методику определения необходимого давления поддува и комплекс управления поддувом при сварке;

3 Разработать управляющие программы для роботизированной сварки пульсирующей дугой;

4 Отработать технологические параметры режима сварки в инертных газах пульсирующей дугой без присадочной проволоки стыковых соединений труб из нержавеющей стали, соответствующие геометрическим параметрам ПИ 1.4.748.

**Объект исследования** – технология выполнения сварного соединения.

**Предмет исследования** –стыковые соединения тонкостенных авиационных труб из нержавеющей стали, полученные роботизированной сваркой в среде инертных газов с применением программного управления траекторией перемещения дуги и параметрами режима сварки без подачи сварочной проволоки, отвечающие требованиям нормативной документации.

**Научная новизна:**

1 Установлены технологические факторы (особенности и параметры режима аргонодуговой сварки) оказывающие влияние на дефектность и свойства сварных соединений;

2 Разработан алгоритм процедуры построения требуемой траектории для программы, генерирующей управляющие G-коды режимов работы роботизированной сварочной системы

3 Разработана методика расчета и управления давлением поддува газа во внутрикамерном пространстве трубы для стабилизации геометрических параметров усиления сварочных валиков.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов основывается на использовании поверенного комплекса контрольно-измерительного оборудования для проведения экспериментальных исследований, использованием нормированных методик определения физико-механических свойств и макро- и микроструктурных параметров, а также соответствием полученных результатов экспериментальных данных фундаментальным положениям.

**Практическая значимость работы**

1 Предложены схемы реализации технологического процесса роботизированной сварки ЭТПС ЛА из нержавеющей стали для создания неразъемных соединений с обеспечением требований ПИ 1.4.748-80 и эксплуатационных свойств согласно конструкторской документации.

2 Разработана управляющая программа осцилляции основными параметрами сварки пульсирующей дугой тонкостенных авиационных трубопроводных систем из нержавеющей стали: траектории перемещения дуги и режимами сварки для роботизированной системы

3 Разработано устройство поддува защитного газа во внутреннюю полость трубы с управлением внутрикамерным давлением.

4 Разработаны технологические рекомендации по роботизированной сварке тонкостенных авиационных трубопроводных систем из нержавеющей стали.

5 Применение разработанной робототехнической системы и программного продукта позволяет выбирать траекторию движения дуги, назначать режим сварки в конкретной точке этой траектории, создавать управляющий G-код и проводить автоматическую дуговую сварку тел вращения (труб). Управление осцилляцией, как энергетическими параметрами режима сварки, так и траектории перемещения горелки способствует дозированному вводу тепла и присадочного материала в сварочную ванну, поэтому минимизирует сварочные напряжения, а вместе с ним и деформации в сварном соединении.

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач работы, непосредственном участии в процессе проектирования и изготовления специальног о оборудования, проведении исследований, обработке и анализе результатов, формировании выводы, написании статей и заявок на патенты.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы были доложены и обсуждены на I и II Международной научно – практической конференции

«Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению» (г. Комсомольск-на-Амуре, ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021 и 2022 гг.); V и VI Всероссийской национальной научной конференции молодых ученых «Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (г. Комсомольск-на-Амуре, ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022 и 2023 гг.); Конкурсе студенческих научных проектов в области инноваций и технологического творчества в Хабаровском краевом открытом фестивале «Студенческая весна – 2023» (г. Хабаровск, 2023 г.).

Работа выполнена за счёт средств ФГБОУ ВО «КнАГУ» по проекту НИР № ВН001/2020 «Разработка алгоритма и исследование процесса программируемого управления формированием сварочного/наплавочного валика (в том числе и в применении аддитивных технологий) на установке автоматической сварки в защитных газах» (2020 – 2022 гг.).

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка литературы, приложений. Диссертация содержит 94 страницы, 61 рисунок, 28 таблиц; список литературы, состоящий из 76 наименований, 1 приложение.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, объект и предмет, сформулированы цели и задачи работы, используемые методы исследования.

**В первой главе** показаны разновидности криволинейных трубопроводов, описан основной материал, проанализированы системы автоматической сварки ЭТПС ЛА. Приведен расчет калькуляции вероятности возникновения кавитации от величины усиления корневого валика сварного шва на примере топливной системы ЛА.

Одним из конструкционных материалов ТПС RRJ100 являются аустенитные стали: 09Х18Н10Т (системы газо/воздухоподачи) и 12Х18Н10Т (топливная система). В ТПС газо/воздухораспределения материалом патрубков является сталь 09Х18Н10Т, а фланцы, муфты, ниппели, компенсаторы, проставки изготавливаются из стали 12Х18Н10Т. В ТПС топливной системы все элементы из стали 12Х18Н10Т. Традиционным процессом сборки при изготовлении ТПС ЛА является аргонодуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом с присадкой. Категория сварных соединений 1 и 2. Все требования к процедуре сборки ТПС ЛА из нержавеющих сталей сваркой регламентируются ПИ 1.4.748. Аргонодуговая сварка нержавеющих сталей требует надежной газовой защиты, как с лицевой, так и с обратной стороны формирующегося шва.

ТПС имеет в составе трубы, как прямые (рисунок 1, а), так и изогнутые (рисунок 1, б), разноугловые отводы (рисунок 1, в), переходы (рисунок 1, г), а также различные фланцевые оконцовки (рисунок 1 д, е, ж), вставки (рисунок 1, з), компенсаторы (рис 1, и).

С позиции качества сборки (минимизации зазора между соединяемыми кромками) под автоматическую сварку наибольшую трудность вызывают трубные элементы с погибью (рисунок 1 б, в). В случае невозможности обрезки припуска под прямым углом к стенке в поперечном сечении торца трубы образуется эллипс, при сборке которого с прямолинейным участком трубы появляется смещение кромок. Такой эффект в ходе TIG сварки нивелируется сварщиком путем манипулирования горелкой и добавлением присадочной проволоки, а в случае автоматической сварки приведет либо к прожогу или несплавлению кромок, либо к непровару.

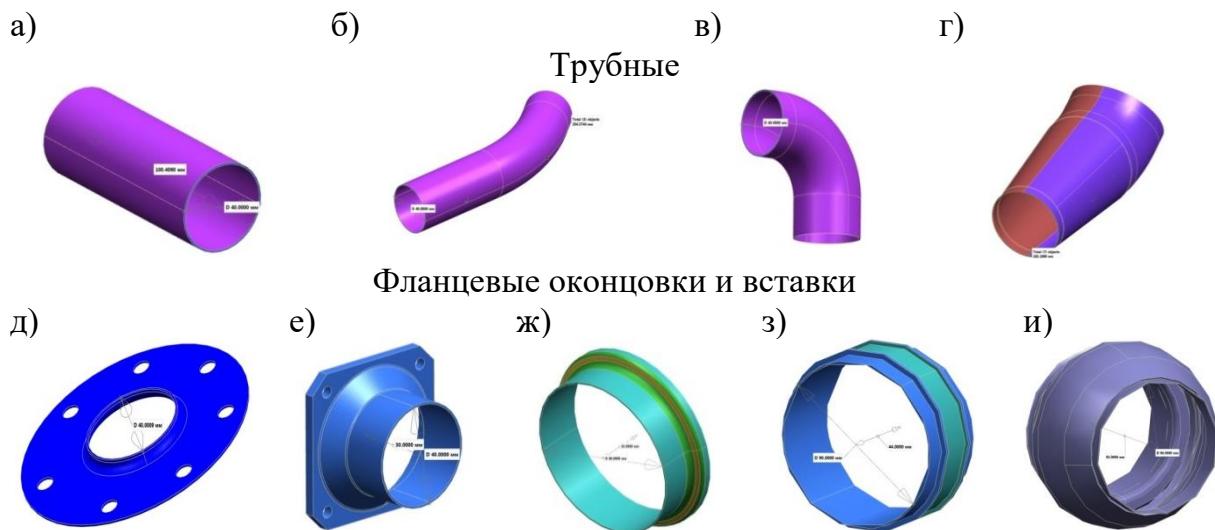


Рисунок 1 – Элементы, входящие в состав ТПС ЛА

Стыковые соединения в ТПС ЛА встречаются во фланцевых соединениях, при соединении трубных элементов между собой, при сборке труб с компенсаторами и вставками (рисунок 2). При орбитальной автоматической сварке головками открытого и закрытого типов такие соединения являются неповоротными. При ручной аргонодуговой сварке деталь вращается, но сварное соединение выполняется сегментами. Наиболее выгодным и рациональным методом формирования шва является безостановочная сварка поворотных стыков в нижнем положении с обязательным поддувом и регулированием давлением защитного газа во внутренней полости трубы.

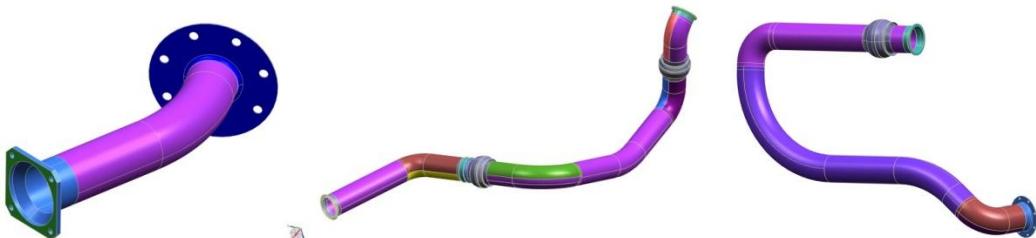


Рисунок 2 – Модели трубопроводных систем

Автоматизация процедуры сварки ТПС ЛА сдерживается функциональными возможностями сварочного оборудования, ограниченной номенклатурой диаметров труб и нестабильностью тепловых процессов, требующих постоянной корректировки параметров режима, усложняющаяся, при сварке неповоротных стыков, изменением пространственного положения источника нагрева. Например, использование сварочных головок открытого типа ограничивается большой установочной базой (60 мм и более), что не всегда возможно в ТПС ЛА. Использование головок закрытого типа ограничивается повышенными требованиями к отклонениям в зазоре и смещению кромок (точности сборки), сложностью управления режимами сварки, возможностью сварки исключительно малых толщин. В связи с вышеизложенным в условиях КнААЗ, сварка ТПС ЛА производится вручную с присадкой, что способствует нивелированию неточности сборки.

Калькулятор в Microsoft Excel позволяет прогнозировать наличие кавитации при известных параметрах движения продукта в технологическом трубопроводе и геометрических параметрах усиления корневого валика. При расчете (рисунок 3), в слоты вводятся параметры потока и геометрии валика, а в результирующей части в

строке «Кавитация» красным выделяется «ЕСТЬ», при наличии кавитации, или зеленым «НЕТ» в случае отсутствия кавитации (рисунок 4).

Рассчитана вероятность возникновения кавитации при следующих данных: трубопровод с внутренним диаметром 48 мм, с продуктом – авиационный бензин Б-92, плотностью  $\rho = 0,75 \text{ г}/\text{см}^3$  и расходом  $Q = 4 \text{ л}/\text{с}$ ;  $P_{xap} = 16 \text{ кг}/\text{см}^2$ ;  $P_{kp} = 40 \text{ кПа}$ . Примем ширину корневого валика  $L_h = 3 \text{ мм}$  и высоту  $Z_h = 0,8 \text{ мм}$  шва. Из рисунка 3 видно, что при таких рабочих параметрах трубопровода и размерах усиления обратного валика шва условия возникновения кавитации выполняются.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2	$P_{xap}, \text{кПа}$	$P_{kp}, \text{кПа}$	$\rho, \text{гр}/\text{см}^3$	$Q, \text{л}/\text{с}$	$d, \text{мм}$	$V_{xap}, \text{см}/\text{с}$	$K$		$L_h, \text{мм}$	$Z_h, \text{мм}$	$K_{kp}$
3	1600	40	0,75	4	48	221,05	0,085		3	0,8	1,171
4											
5									<b>Кавитация</b>	<b>Есть</b>	

Рисунок 3 – Внешний вид интерфейса калькулятора

Приложение позволяет отображать табличные значения расчета вероятности кавитации (рис. 4), где цветом выделены сочетания значений параметров шва, вызывающие (красным) и не вызывающие (зеленым) кавитацию.

M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
														0,0	0,2	0,4	0,6	0,9
0,00	2,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
0,04	2,000	0,968	0,469	0,227	0,110	0,053	0,026	0,012	0,006	0,003	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
0,08	2,000	1,391	0,967	0,673	0,468	0,325	0,226	0,157	0,109	0,076	0,053	0,037	0,026	0,018	0,012	0,008	0,006	
0,13	2,000	1,570	1,232	0,967	0,759	0,596	0,468	0,367	0,288	0,226	0,178	0,139	0,109	0,086	0,067	0,057	0,047	
0,17	2,000	1,668	1,391	1,160	0,967	0,808	0,672	0,568	0,468	0,390	0,325	0,271	0,226	0,189	0,157	0,135	0,115	
0,21	2,000	1,729	1,495	1,293	1,118	0,967	0,836	0,723	0,625	0,541	0,467	0,404	0,350	0,302	0,261	0,221	0,181	
0,25	2,000	1,772	1,570	1,391	1,232	1,091	0,967	0,857	0,759	0,672	0,596	0,528	0,467	0,414	0,367	0,327	0,287	
0,29	2,000	1,803	1,625	1,465	1,320	1,190	1,073	0,967	0,871	0,786	0,708	0,638	0,575	0,519	0,467	0,427	0,387	
0,34	2,000	1,826	1,668	1,523	1,391	1,270	1,159	1,059	0,967	0,883	0,806	0,736	0,672	0,614	0,560	0,514	0,460	
0,38	2,000	1,845	1,702	1,570	1,448	1,335	1,232	1,136	1,048	0,967	0,892	0,823	0,759	0,700	0,646	0,596	0,546	
0,42	2,000	1,860	1,729	1,608	1,495	1,391	1,293	1,202	1,118	1,040	0,967	0,899	0,836	0,777	0,723	0,673	0,623	
0,46	2,000	1,872	1,752	1,640	1,535	1,437	1,345	1,259	1,179	1,103	1,033	0,967	0,905	0,847	0,799	0,749	0,699	
0,51	2,000	1,882	1,772	1,668	1,570	1,477	1,390	1,309	1,232	1,159	1,091	1,027	0,967	0,910	0,856	0,806	0,756	
0,55	2,000	1,891	1,788	1,691	1,599	1,515	1,430	1,355	1,279	1,209	1,143	1,081	1,022	0,967	0,914	0,864	0,814	
0,59	2,000	1,899	1,803	1,711	1,625	1,543	1,465	1,390	1,320	1,253	1,190	1,130	1,073	1,018	0,967	0,917	0,867	
0,63	2,000	1,905	1,815	1,729	1,648	1,570	1,495	1,425	1,357	1,293	1,232	1,174	1,118	1,065	1,015	0,963	0,913	
0,67	2,000	1,911	1,826	1,743	1,668	1,594	1,523	1,455	1,390	1,329	1,270	1,213	1,159	1,108	1,059	1,009	0,959	
0,72	2,000	1,916	1,836	1,759	1,688	1,615	1,547	1,483	1,421	1,361	1,304	1,249	1,197	1,147	1,099	1,049	1,009	
0,76	2,000	1,921	1,845	1,772	1,702	1,634	1,570	1,507	1,448	1,390	1,335	1,283	1,232	1,183	1,136	1,086	1,036	
0,80	2,000	1,925	1,853	1,783	1,716	1,652	1,590	1,530	1,473	1,417	1,354	1,313	1,264	1,216	1,171	1,121	1,071	

Рисунок 4 – Табличное представление калькуляции

Из рисунка 4 видно, что при ширине валика 3 мм, максимально допустимое значение высоты усиления шва 0,13 мм (по ПИ 1.4. 748 допускается 0...0,5 мм).

**Во второй главе** Разработанное устройство включает следующие элементы: сварочный вращатель, сварочную горелку Kemppi TTC 220 4M, размещаемую на штативе (рис. 5), источник питания сварки Kemppi MinarcTig Evo 200, шкаф управления. Управление осцилляцией осуществляется через программу Mach3 посредством G-кодов, генерирующихся разработанным приложением.

При использовании схемы компоновки, показанной на рисунке 5, установка штатива и вращателя могут осуществляться как в настольном, так и стоечном исполнении (последнее более пригодно для сварки криволинейных труб).



Рисунок 5 – Схема комплектации роботизированной системы для сварки криволинейных тонкостенных трубопроводов

Элементы ТПС ЛА имеют криволинейность и, базируясь для поворота за оконцовки, можно осуществить приварку только этих оконцовок к трубе. Базированию на этом участке способствует, разработанное компактное поворотное устройство и ряд приспособлений для сварки оконцовок (рисунок 6, а), для сварки длинных труб (рисунок 6, б) и для сварки переходов (рисунок 6, в).

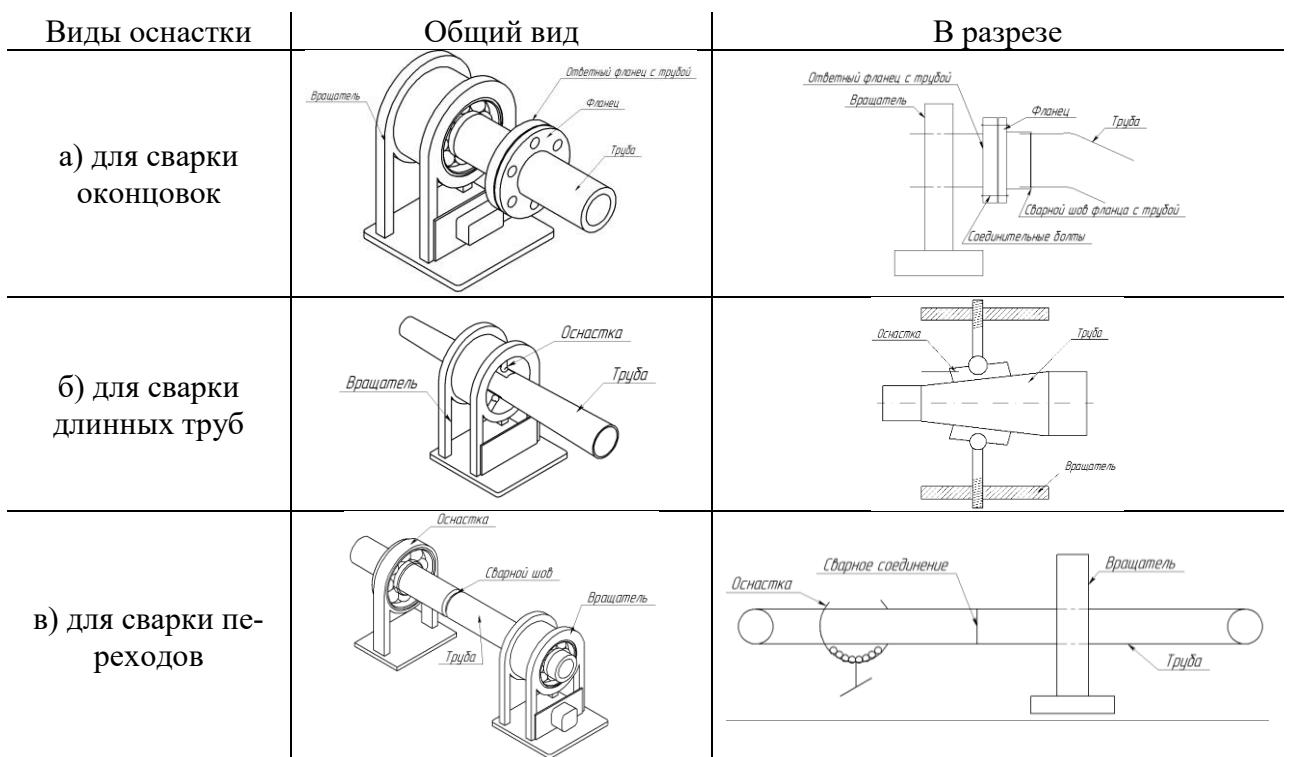


Рисунок 6 – Оснастка для сварки криволинейных ТПС

Реализация работы роботизированного сварочного комплекса в задаче стабилизации геометрических параметров сварного шва трубопроводных систем в условиях поддува защитного газа, подаваемого с постоянным расходом из газового баллона во внутреннее пространство, организуемого защитным устройством, при уменьшении величины зазора формирующимся в ходе заполнения стыка швом посредством стабилизации давления внутри камеры.

Для поддува использовали защитное устройство (рисунок 7), состоящее из двух резьбовых шпилек M10x1,75, одна из которых имеет сквозное внутреннее отверстие диаметром 3 мм для прохода защитного газа и торцевые насечки для выхода газа при плотном соединении шпилек посредством удлиненной гайкой, на каждой грани которой также имеется отверстие диаметром 3 мм. Устройство располагается во внутренней полости собираемых труб, таким образом, чтобы стык находился под выходными отверстиями фиксирующей гайки. Уплотнительные кольца, имеющие двухстеночное исполнение, плотно входят во внутреннюю полость каждой трубной заготовки, герметизируют ограниченное пространство стыкуемых торцов труб.



Рисунок 7 – Образец защитного устройства

Общая схема компоновки системы поддува защитного газа приведена на рисунке 8. В газовую магистраль встроен воздушный компенсационный шарик (4) для визуального контроля давления по изменению объема. Кроме этой функции шарик может быть применен как сигнализатор прохода защитного газа (например, для продувки камеры перед началом сварки), наличия газа во внутrikамерном пространстве (5). Регулирование внутrikамерным давлением происходило наблюдением за размерностью лицевого валика и наполняемости компенсационного валика путем снижения расхода защитного газа ротаметром вручную.



Рисунок 8 – Общая схема компоновки системы поддува

Для регулирования делением поддува ООО «Эльточприбор» (г. Москва) спроектировало экспериментальный прибор - электронный регулятор давления газа РДЭ-22 (рисунок 9). РДЭ 22 представляет собой моноблок, оснащенный интегрированными в корпус прибора элементами: пьезоэлектрическим датчиком (средство измерения); цифровой платой (измерение и ПИД-регулирование, а также совместимость с другими устройствами по цифровому и аналоговому интерфейсам); электромагнитным клапаном (обеспечение плавной и быстрой регулировки давления). Следует подчеркнуть, что РДЭ 22 может быть подключен по двум схемам:

«до себя» и «после себя» (рисунок 9), при этом в первом случае, поток газа, поступающий в датчик давления, близок к ламинарному. Т.е. скачки давления отсутствуют. Это позволяет использовать практически любые датчики давления. В регуляторе давления «после себя» поток газа на входе в датчик турбулентный, и, чтобы сгладить изменение давления, датчики снабжают защитой от бросков давления. Выбрана схема «до себя», при которой сварной шов продувается защитным газом даже после окончания сварки, способствуя равномерности скорости охлаждения.

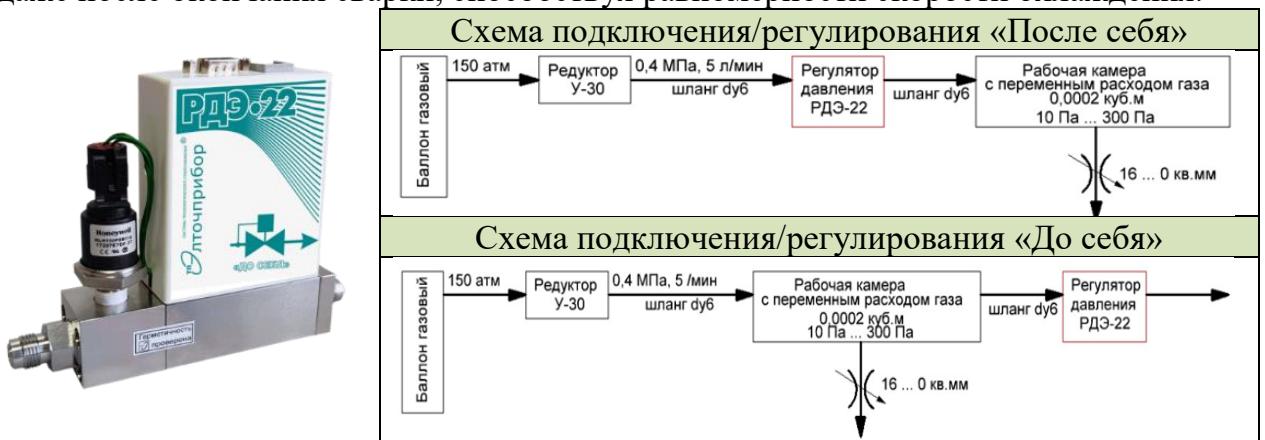


Рисунок 9 – Электронный регулятор давления газа РДЭ-22 и схемы его подключения в систему регулирования внутрикамерным давлением

Объем сварочной ванны рассчитывается из схемы и по формуле (рисунок 10).

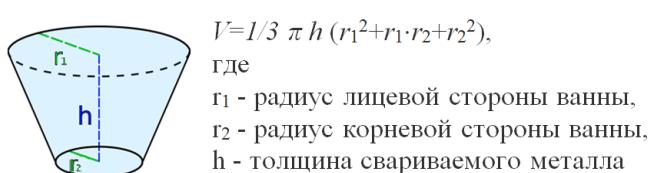


Рисунок 10 – Схема расчета объема усеченного конуса (сварочной ванны)

Пример расчета:

Толщина свариваемой трубы 1 мм (0,1 см). Величины диаметров лицевой и корневой части шва 5 и 3 мм, 0,5 и 0,3 см, соответственно. Плотность нержавеющей стали 12Х18Н10Т при температуре ликвидус ( $1459^{\circ}\text{C}$ ) составляет 6,96 г/см<sup>3</sup>. Коэффициент поверхностного натяжения при температуре  $1600^{\circ}\text{C}$ , составляет 1,611 Н/м.

Необходимо найти максимальное давление внутреннего поддува защитного газа для подъема сварочной ванны с гарантией усиления лицевого валика.

$$P=F/S = 4 \cdot (m \cdot g + 4\sigma\pi R)/\pi D^2 = 0,03 \cdot 4 / 3,14 \cdot 3^2 = 4246 \text{ (Н/мм}^2\text{)}$$

Как показал расчет, достаточно давления защитного газа 4,2 кПа (0,04 атм) для выдува расплавленной ванны из зоны сварки. В реальных условиях организация поддува осуществляется через газовый баллон посредством редуктора, снабженного расходомером (л/мин). Рабочее давление редуктора (например, У-30/АР-40-01-2Р) 0,6 МПа, а предохранительный клапан сбрасывает при его превышении значения давления 0,8 МПа, что гарантирует выдув, а внутрикамерное давление защитного газа должно быть значительно меньше 4,2 кПа для поддержания расплавленной ванны от провисания внутрь трубы.

**В третьей главе** представлены результаты апробации работы устройства. Исследовано влияние технологии автоматической сварки на геометрию, структуру и свойства сварных соединений тонкостенного трубопровода из нержавеющей стали.

Отработка режимов автоматической импульсной TIG сварки выполнялась на трубных заготовках Ø50 x 1 мм из материала 12Х18Н10Т. Сборка проводилась по требованиям ПИ 1.4.748 применительно к сварному соединению С00000 (стыковое без разделки кромок). Сварка осуществлялась в один проход, без подачи присадочного материала, с поддувом аргона во внутреннюю полость трубной детали с расходом 4 л/мин при этом свободные торцы закрыты фольгированным скотчем. Расход аргона в горелку 6 л/мин. Вольфрамовый электрод диаметром 2 мм располагался к изделию под углом 90°. Положение горелки – нижнее.

Периметр стыка разбит на 4 сектора для наложения валиков с различными значениями импульсного воздействия, задающимися управляющей программой через G-коды.

Режимы импульсной сварки приведены в таблице 1. Полученные валики имеют стабильные характеристики по ширине с лицевой и обратной стороны шва, глубине проплавления.

Таблица 1 – Режимы сварки

Сектор	Ток, А	Шаг, мм	Время импульса высокого тока, с	Скорость перемещения, мм/мин
1	54/15	4	1	250
2	45/15	2	1	
3	35/15	2	1	
4	35/15	2	2	

Примечание: в числителе максимальная сила тока в импульсе, в знаменателе – ток дежурной дуги

Внешний вид лицевой стороны неразъемного соединения и результаты измерения ширины шва, с помощью штангенциркуля ГОСТ 166–89 представлены на рисунке 11.



Рисунок 11 – Внешний вид и ширина неразъемных соединений

Для оценки структуры и свойств сварных соединений тонкостенного трубопровода получено сварное соединение на режимах сектора 4 (сварного шва, удовлетворяющего требованиям ПИ 1.4.748). С учетом теплового влияния от действия дуги по мере заполнения валика решено периметр шва также разделить на 4 неравных по длине сектора с уменьшением времени импульса высокого тока, тем самым увеличивая скорость сварки от начала к концу шва.

Измерение высот лицевой и корневой части наплавленного валика проводили по 3D модели, полученной при помощи мобильного измерительного манипулятора MCAX Nikon Metrology с лазерным сканером MMDx/MMC, путем ее обработки в программе Focus 10 Inspection. Для этого модель была рассечена

плоскостью по линии стыка, являющейся центром каждого валика с максимумом величины высот. Полученный фактический профиль (рисунок 12, б красный) был ограничен теоретическим контуром трубы (рисунок 12, б синий). Размеры высот определялись как отклонения от теоретического контура трубы (таблица 2).

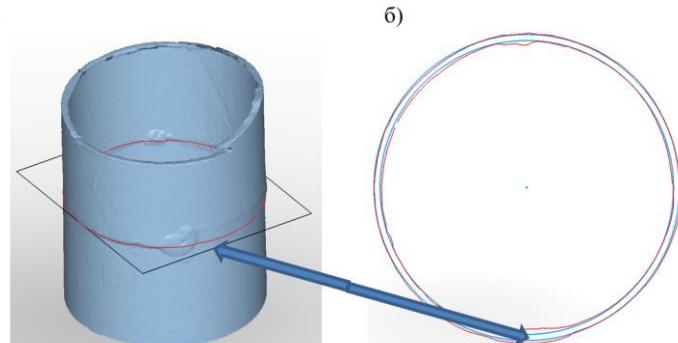


Рисунок 12 – Результат сканирования в программе Focus 10 Inspection  
а – сечение 3D модели плоскостьюю, б – вид поперечного сечения

Таблица 2 – Размеры высот валика с лицевой и корневой стороны

Сторона шва	Сектор 4			Сектор 3			Сектор 2			Сектор 1		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
лицевая, мм	0	0	0,54	0	0,28	0,1	0	-0,3	0	0	0,3	0,43
корневая, мм	0,31	0	0,35	0,41	0	0	0,38	0,53	0,47	0,44	0	-0,46

Управляющая программа, содержащая G-код, записана в виде традиционных для технологических карт режимах сварки, приведённых в таблице 3.

Таблица 3 – Режимы сварки

	Сектор	Ток, А	Протяженность, мм	Время импульса высокого тока, с	Скорость перемещения, мм/мин	
					1	250
35/15	1	35/15	7,9	1,3		250
	2		31,7	1,2		
	3		31,7	1,1		
	4		58,6	1,0		

На рисунке 13 приведена циклограмма сварки пульсирующей дугой с поступательным вращением стыка труб на примере сектора 1 из которой видно, что процесс сварки начинается с длительной паузы по движению (3 с), в процессе которой происходит поджиг дуги, нарастание силы тока до максимума, организация сварочной ванны со стабильными параметрами по величине проплавления и ширине шва (рисунок 13, а).

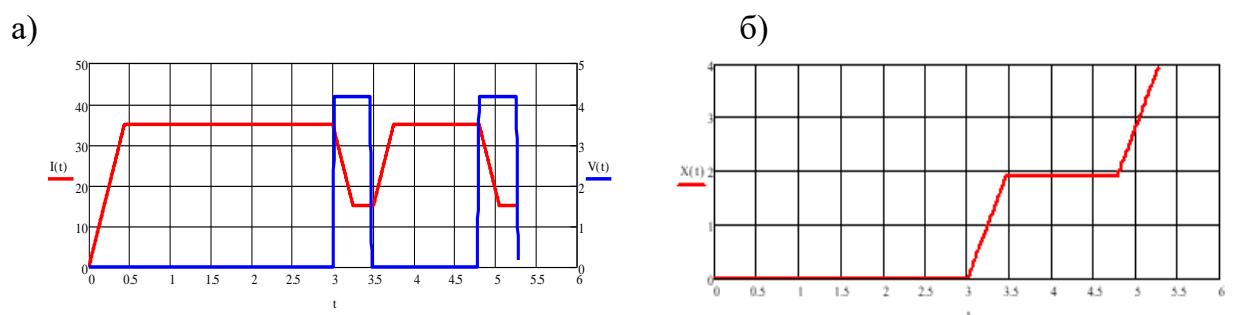


Рисунок 13– Циклограмма (а) сварки пульсирующей дугой и характер поступательного вращения (б) стыка труб (сектор 1)

После паузы происходит снижение величины тока до 15А со скоростью 20 А/мин с одновременным началом вращения трубы. Учитывая ускорение шагового двигателя и среднюю скорость 250 мм/мин этот этап составляет 0,5 с. Далее осуществляется пауза по движению, нарастание тока до сварочного за установленное программой время – 1,3 с (рисунок 13, б).

Разрушение сварных образцов при испытании на статическое растяжение происходит по околосшовной зоне вблизи с линией сплавления. Предел прочности образца №1 при одноосном растяжении составляет 88% от прочности основного металла №2 = 87%, №3 = 105%, №4 = 78%.

Для макроструктурных изображений всех образцов характерна вогнутость лицевого валика шва и выпуклость корневого, что свидетельствует о провисании сварочной ванны под действием сил тяжести и физического давления сварочной дуги.

Распределение микротвердости во всех образцах имеет идентичный характер с тенденцией некоторого снижения показателей в металле шва (до 20 единиц) относительно основного металла.

По результатам фрактографии: излом каждого образца имеет ячеистый рельеф, свидетельствующий о вязком характере разрушения.

При исследовании влияния среды поддува и управления внутrikамерным давлением защитного газа на геометрические параметры, структуру и свойства неразъемных соединений авиационных тонкостенных труб из нержавеющей стали выполнили сварные швы без газовой защиты корневого валика (в атмосфере воздуха), с поддувом во внутrikамерную полость аргона и азота на тех же режимах сварки. Для поддува защитного газа – аргона в сварочную горелку и поддув с необходимым расходом из газового баллона применялся редуктор с двойным ротаметром. Для подачи азота в поддув и аргона в горелку применяли два редуктора с ротаметрами (по одному на каждый баллон).

При получении сварных образцов определена динамика изменения расхода газа, с целью стабилизации высоты усиления лицевой и обратной стороны шва (рисунок 14). С момента поджига дуги в секторе 1 устанавливается расход газа в поддув 5 л/мин и постоянно уменьшается таким образом, чтобы в конце сектора 2 расход составлял 4 л/мин, в конце сектора 3 – 3 л/мин, при завершении сварки 1 л/мин.

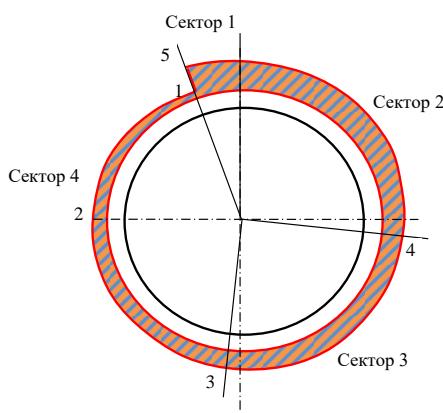


Рисунок 14 – Эпюра изменения расхода защитного газа в поддув (л/мин) при формировании сварного шва

В отношении геометрических параметров сварных швов отмечается следующее (таблица 4): все 3 образца имеют стабильную ширину шва, не

превышающую 7 мм, согласно ПИ 1.4.748. Высота усиления лицевой стороны шва образца №1 отрицательная (наблюдается вогнутость) и составляет -0,3...0,4 мм. Высота усиления образцов 2 и 3 положительная (наблюдается выпуклость) 0,2...0,3 мм, что соответствует требованиям ПИ 1.4.748.

Таблица 4 – Полученные результаты

Номер образца	Атмосфера поддува	Лицевая сторона		
1	Воздух			
2	Аргон			
3	Азот			

Разрушение всех образцов произошло по линии сплавления. Причиной такого явления может служить ослабление шва переходом структурной составляющей. Наименьший предел прочности выявлен у образца, при сварке которого в корневой части (во внутренней полости трубы) присутствовала атмосфера воздуха, на 17% большее значение имеет образец с поддувом аргона и на 25% большее значение у образца НС при поддуве азотом.

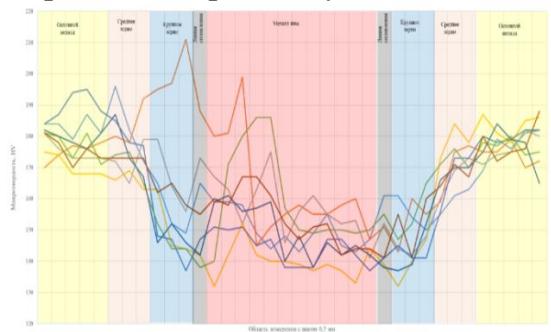


Рисунок 15 – Микротвердость в поперечных сечениях образцов

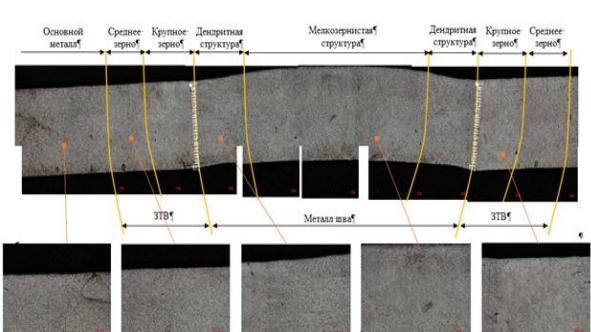


Рисунок 16 – Микроструктура поперечного сечения сварного образца 2.3.1

Распределение микротвердости поперечном сечении сварных образцов показано на рисунке 15. Наиболее стабильное распределение микротвердости в металле шва наблюдается в сварном соединении, выполненном с поддувом аргоном. Для образцов при сварке с поддувом азота и без газовой защиты корня шва наблюдается одностороннее увеличение микротвердости металла шва до значений основного металла.

На рисунке 16 представлена типичная микроструктура поперечного сечения сварных образцов. Характерным для всех образцов является мелкозернистая струк-

тура центральной части металла шва с размером зерна 20...30 мкм, соответствующим основному металлу. В металле шва слева и справа от линий сплавления и в центр наблюдается дендритная структура, протяженностью 0,7...0,9 мм. Зона термического влияния разделяется на две составляющие – зона крупного зерна 60...150 мкм протяженностью 1,5...2 мм и зона среднего зерна 40...80 мкм той же протяженности, плавно переходящая в мелкозернистую структуру основного металла.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

1. Проведенный анализ базового технологического процесса позволил определить основные факторы, влияющие на структуру и свойства неразъемных соединений, получаемых сваркой при сборке ЭТПС ЛА из нержавеющих сталей. По причине пористости дорабатывается более 40% из общего количества произведенных НС. Основной причиной порообразования при ручной аргонодуговой сварке, при секторальном формировании валика, является необходимость прерывания дугового разряда для поворота детали и возобновления сварки по окисленным участкам шва.

2. Эмпирическим путем подобраны режимы сварки пульсирующей дугой при применении которых получено сварное соединение, по геометрическим параметрам удовлетворяющее требованиям ПИ 1.4.748. Режимы сварки сочетают импульс перемещения и тока:  $I = 35/15$  А,  $t_{имп.} = 1$  с,  $v_{перемещ.} = 250$  мм/мин, при этом минимальное значение тока соответствует перемещению стыка, а максимальный – периоду паузы. Такое сочетание позволяет осуществлять дозированное введение энергии и формировать точечную сварочную ванну при максимальном значении сварки, а при минимальном производить локальную термообработку этой точки и предварительный подогрев места следующей..

3. Спроектирована оснастка для вращения при сварке криволинейных трубопроводов, учитывая сложную конфигурацию и оконцовки трубопровода.

4. Определена динамика изменения расхода газа в условии уменьшения длины стыка при формировании сварного шва и повышения внутреннего давления поддува. В начале сварки расход газа составляет 5 л/мин и постоянно уменьшается – в завершении сварки 1 л/мин. Такое изменение давления предотвращает выплеск расплавленного металла из точечной ванны, а так же стабилизирует геометрические параметры шва (препятствует образованию вогнутости и выпуклости валика).

5. Произведен расчет необходимого внутrikамерного давления поддува с целью реализации его регулирования посредством регулятора давления газа РДЭ22 программируемого управления. Установлен диапазон рабочих давлений: 10-300 Па, позволяющий выбрать датчик давления.

## **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

1. Научная работа (проект) «Разработка оборудования и технологии роботизированной сварки тонкостенных элементов трубопроводных систем летательных аппаратов» **Комарова К.К.**, Кравченко А.С. Конкурс студенческих научных проектов в области инноваций и технического творчества Фестиваля «Студенческая весна - 2023»

### **Полученные патенты:**

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «WeldCNC» № 2023611244. Опубл. 18.01.2023 // Фролов А.В., Бахматов П.В, Кравченко А.С., Григорьев В.В., **Комарова К.К.**

### ***Публикации в прочих изданиях:***

3. Инструкция управляющего программного обеспечения weld CNC для трубошварочного аппарата многопроходной автоматической сварки / Е. П. Старничук, **К. К. Комарова**, А. С. Кравченко, П. В. Бахматов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 83-85.
4. Влияние режимов сварки на геометрические параметры сварного шва, выполненного роботизированным комплексом / **К. К. Комарова**, Е. П. Старничук, А. С. Кравченко, П. В. Бахматов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 33-35.
5. **Комарова, К. К.** Аддитивная наплавка / К. К. Комарова, П. В. Бахматов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: Материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля 2022 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 375-378. – DOI 10.17084/978-5-7765-1502-6-2022-375.
6. **Комарова, К. К.** Автоматическая импульсная аргонодуговая сварка тонкостенных труб из нержавеющей стали / К. К. Комарова, А. С. Кравченко, П. В. Бахматов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 14–18 ноября 2022 года / Редколлегия: А.В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 129-132.
7. Фролов, А. В. Программирование перемещения сварочной горелки при автоматизированной сварке / А. В. Фролов, **К. К. Комарова** // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 14–18 ноября 2022 года / Редколлегия: А.В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 173-177.
- 8 **Комарова, К. К.** Отработка режимов автоматической аргонодуговой сварки трубопроводных систем с импульсной подачей присадочного материала / К. К. Комарова, П. В. Бахматов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 4-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 12–16 апреля 2021 года. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. – С. 65-68.
9. Система импульсной подачи проволоки в зону действия дуги при аргонодуговой сварке / П.В. Бахматов, А.В. Фролов, А.С. Кравченко, **К.К. Комарова** // сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции «International Conference on Aviation Engineering» («Современные авиационные технологии») 3 – 7 июля 2023 г. – ИРНИТУ, Иркутск