

Научная статья
УДК 621.791.016
DOI: 10.34759/vst-2022-3-231-245

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РОБОТИЗИРОВАННОЙ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ДУГОЙ И СРЕДЫ ПОДДУВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Павел Вячеславович Бахматов¹ ✉, Александр Сергеевич Кравченко²

^{1,2}Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
Комсомольск-на-Амуре, Хабаровский край, Россия

¹mim@knastu.ru ✉

²a.kraw4encko2017@yandex.ru

Аннотация. Приведены параметры режима роботизированной аргонодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом элементов тонкостенных трубопроводных систем из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, используемых в конструкциях летательных аппаратов. Целью работы является достижение геометрических параметров сварных соединений С0000 и критериев качества по ПИ 1.4.748 при использовании пульсирующей дуги, различных газовых сред поддува (аргона и азота) без применения присадочной проволоки.

Результаты исследования показали преимущество использования для сварки ответственных конструкций в качестве поддува среды азота. Кроме того показано, что поддуваемый газ может быть дополнительным ресурсом в обеспечении положительной величины усиления наплавляемого валика как с лицевой, так и с обратной стороны однопроходного шва. С этой целью разработано устройство и отработаны режимы поддува для обеспечения стабильности внутрикамерного давления.

Ключевые слова: роботизированная аргонодуговая сварка, пульсирующая дуга, тонкостенный трубопровод, нержавеющая сталь, поддув аргоном и азотом

Финансирование: работа выполнена за счёт средств ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» при поддержке 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»

Для цитирования: Бахматов П.В., Кравченко А.С. Влияние режима роботизированной аргонодуговой сварки пульсирующей дугой и среды поддува на структуру и свойства неразъемных соединений тонкостенных труб из нержавеющей стали авиационного назначения // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 3. С. 231-245. DOI: 10.34759/vst-2022-3-231-245

Original article

MODE EFFECT OF ROBOTIZED ARGON ARC WELDING BY PULSATING ARC AND BLOW MEDIUM ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF PERMANENT JOINTS OF THIN-WALLED PIPES FROM STAINLESS STEEL OF AVIATION PURPOSE

Pavel V. Bakhmatov¹ ✉, Aleksandr S. Kravchenko²

^{1,2}Komsomolsk-on-Amur State University (KnASU),
Komsomolsk-on-Amur, Russia

¹mim@knastu.ru ✉

²a.kraw4encko2017@yandex.ru

Abstract

Efficiency improving of the state-of-the-art techniques of welding aircraft thin-walled pipelines is an urgent task of the modern aviation industry. The main trends are the following: the welding procedure robotics, implementation of welding techniques and technologies with thermal cycle stabilization, and, accordingly, the structure and properties along the entire seam length, costs reduction of materials and electric energy, increase of productivity and quality of final products. The article presents the results of the studies conducted on the effect of the blow medium and pulsating arc while robotized argon arc welding of thin-walled elements of stainless steel piping systems for aircraft by non-melting tungsten electrode without application of the filler wire on the structure and properties of welded butt joints.

Welding was performed on an automatic welding installation for rotating bodies developed at Komsomolsk-on-Amur State University and programmable controlled by Mach3 via G-codes. The installation includes a welding rotator, a Kemppi MinarcTig Evo 200 MPL power supply with a TTC 220 burner, a positioner for the burner transverse movement, a welding wire feeder, a laptop, and a control unit. The G-code was employed for welding, the value of the standby current herewith was 15 A, the maximum current was 35 A, and the pulse duration was being reduced from 1.3 to 1.0 s within 0.1 s decrement. The extent of the first sector is the smallest with the maximum pulse duration, and is meant for stabilizing welding modes and seam geometry. The second and the third sectors are of equal extent, but with different values of pulse duration. The fourth sector is of the greatest extent with the minimum pulse duration.

A pipe from AISI 321 steel of a 50 mm diameter with a wall thickness of 1 mm was employed as blanks. The edges of the welded blanks were trimmed on a lathe prior to the assembly. The butt assembly for welding was performed manually with a gap of 0-0.1 mm on the prism without filler material application.

The developed and manufactured protective device, tightly installed in the internal cavity of the pipes being assembled through the packing rings, which seal the limited space of the butt edges, were employed for the blowing.

Geometric parameters of the obtained welding seams (the height of the reinforcement of the roller front side) were being determined by the MCAx laser scanning and 3D model processing in the Focus 10 Inspection software. Welded samples of thin-walled pipe blanks were tested for static tension and are subjected to microstructural studies and microhardness measurement.

The obtained welded joints meet by the geometric parameters the requirements of regulatory documentation governing the welding procedure of the aircraft pipeline systems. However, the joints obtained with the air atmosphere inside the pipe are characterized by a reduced tensile strength of up to 20% and elongation. Argon and nitrogen application as a blowing is being characterized by the lack of the oxidized layer, and mechanical properties closeness to the basic metal ones. Besides, a possibility for controlling the value of the root and front roller strengthening by the blowing gases pressure appears. The results of the work can be applied in the aircraft industry for both automatic and robotic welding of thin-walled stainless steel pipelines.

Keywords: robotized argon arc welding, pulsating arc, thin-walled pipeline, stainless steel, argon and nitrogen blowing

Funding: the work was performed at the expense of the Federal State Educational Institution of Higher Education “Komsomolsk-na-Amure State University” supported by the Research Effort No. VN001/2020 “Algorithm Developing and Studying Process of Programmed Control of Forming Deposit/Welding Bead (including additive technologies application) at the Installation for Automatic Welding in Protecting Gases”.

For citation: Bakhmatov P.V., Kravchenko A.S. Mode Effect of Robotized Argon Arc Welding by Pulsating Arc and Blow Medium on the Structure and Properties of Permanent Joints of Thin-Walled Pipes from Stainless Steel of Aviation Purpose. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 231-245. DOI: 10.34759/vst-2022-3-231-245

Введение

Летательные аппараты (ЛА) представляют собой совокупность множества систем и оборудования, обеспечивающих функционирование воздушного судна в процессе эксплуатации. Большинство этих устройств связано трубопроводами, требования по прочности и надежности к которым весьма жесткие [1]. Трубопроводы ЛА состоят из ряда элементов, собираемых в единое целое посредством резьбовых, паяных, ниппельных, сварных соединений [2].

При автоматической аргонодуговой TIG сварке элементов тонкостенных трубопроводных систем (ТПС) из нержавеющей сталей существует возможность формирования швов без использования присадочных материалов, при этом применение импульсного режима сварки стабилизирует ширину шва, а валик выполняется «на весу» без формирующих устройств [3–10].

Нержавеющие стали (12X18H10T, 09X18H10T и т.п.), используемые в конструкциях ТПС ЛА, при нагревании в ходе сварки до температуры плавления, посредством растворимости газов из атмосферы воздуха (особенно кислорода) в титане, хrome, никеле (основных легирующих элементах) сильно окисляются, создавая шлакообразную тугоплавкую корочку на поверхности шва, и требуют оттеснения воздуха из зоны термического влияния [11]. Необходимость организации газовой защиты корневого валика, как средство от образования оксидного слоя, дает дополнительный ресурс управления геометрическими параметрами наплавляемого шва — высотой усиления (вогнутость и выпуклость) — регулированием внутренним давлением поддуваемого газа [12].

Из соображений экономии расхода и эффективности управления внутренним давлением поддуваемого газа целесообразно применение устройств, организующих микрокамеры (имеющие

две заглушки) и ограничивающие пространство, заполняемое газом [13].

Задача регулирования усложняется изменением расхода поддуваемого газа через щель, образованную зазором, закрываемым формирующимся в ходе сварки швом. При этом по мере закрытия зазора возрастает внутреннее давление в камере, а расход защитного газа уменьшается. Нагрев кромок и внутрикамерного пространства также приводит к уменьшению зазора и увеличению скорости потока истекающего из него газа [14].

Чрезмерное давление газа во внутрикамерном пространстве приводит к увеличению усиления (выпуклости) лицевой стороны валика и вогнутости в корневой части валика, вплоть до образования выплеска металла жидкой ванны (свища), а недостаточность давления — к провисанию шва (вогнутость с лицевой стороны и выпуклость с обратной) [15–18].

Согласно ПИ 1.4.748 соединяемые сваркой детали тонкостенных элементов ТПС ЛА собираются без разделки кромки с зазором 0–0,1 мм на прихватки. Предпочтительной операцией для стабильности зазора является торцовка концов труб, с образованием заусенцев, для снятия которых применяют напильник (при вращении трубы), делающий скос кромок. Образующий при торцевании заусенец также может быть дополнительным ресурсом в заполнении сварочной ванны (дает дополнительный объем расплавленного металла сварочной ванны). Показано [19], что простановка прихваток также нуждается в обеспечении поддува, так как последующее наложение сварного шва по окисленным прихваткам приводит к непроварам, несплавлениям, пористости (зачастую наблюдается скопление или цепочки пор) в этих зонах.

Методика экспериментального исследования

Исследовалось влияние поддува защитного газа во внутрикамерную полость, создаваемую защитным устройством, ограничивающим давление поддуваемого газа при автоматической импульсной аргонодуговой однопроходной сварке тонкостенных труб из нержавеющей стали 12Х18Н10Т без присадочной проволоки на дефектность корневой области сварного шва.

Для сравнения выполнены сварные швы без газовой защиты корневого валика (в атмосфере воздуха), с поддувом во внутрикамерную полость аргона и азота.

Для поддува защитного газа — аргона — в сварочную горелку и поддува с необходимым расходом из газового баллона применялся редуктор с двойным ротаметром УЗО/АР40-01. Для поддува азота в поддув и аргона в горелку применяли два редуктора с ротаметрами (по одному на каждый баллон).

В качестве заготовок использовалась труба диаметром 50 мм с толщиной стенки 1 мм. Кромки свариваемых заготовок, для минимизации величины зазора, перед сборкой отторцованы на токарном станке. Сборка стыка под сварку осуществлялась вручную в соответствии с ПИ 1.4.748 с зазором 0—0,1 мм на призме без применения присадочного материала. Расход защитного газа в горелку 5 л/мин, сварочный ток 35А, диаметр

вольфрамового электрода 1,6 мм, угол заточки 20°, расположение относительно оси шва 80—90°.

Сварка проводилась на автоматической установке сварки тел вращения, разработанной на кафедре ТСМП и программно управляемой Mach3 через G-коды. Установка включает в себя сварочный вращатель, источник питания Kemppi MinarcTig Evo 200 MPL с горелкой ТТС 220, позиционер поперечного перемещения горелки, устройство подачи сварочной проволоки, ноутбук, блок управления [20].

Для сварки использовался G-код, успешно зарекомендовавший себя [21, 22] и представленный в виде табл. 1.

Согласно табл. 1 дежурный ток составлял 15 А, максимальный (высокий) ток 35 А, время импульса сокращалось от 1,3 до 1,0 с с диапазоном 0,1 с. Протяженность первого сектора наименьшая (7,9 мм) с максимальным временем импульса и предназначена для стабилизации режимов сварки и геометрии шва. Вторым и третьим секторами имеют равную протяженность (31,7 мм), но разное значение времени импульса. Четвертый сектор имеет наибольшую протяженность с минимальным временем импульса.

На рис. 1 приведена циклограмма сварки пульсирующей дугой с поступательным вращением стыка труб на примере сектора 1. Процесс сварки начинается с длительной паузы по дви-

Таблица 1

Режимы сварки

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

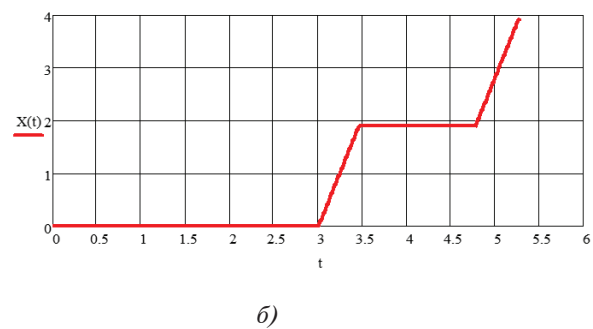
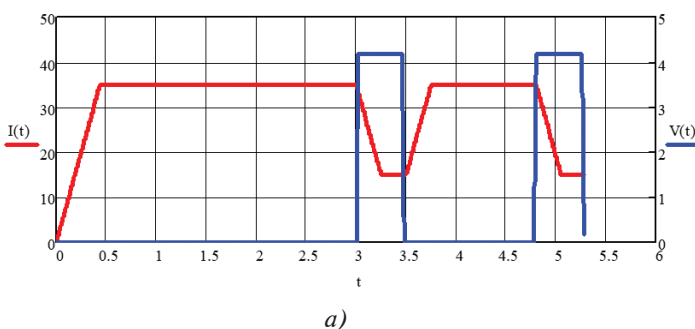


Рис. 1. Циклограмма (а) сварки пульсирующей дугой и характер поступательного вращения (б) стыка труб (сектор 1)

жению (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 (рис. 1,а). После паузы происходит снижение величины тока до 15 А со скоростью 20 А/мин с одновременным началом вращения трубы. С учетом ускорения шагового двигателя и средней скорости 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 (рис. 1,б).

Для поддува использовали спроектированное и изготовленное на кафедре ТСМП защитное устройство (рис. 2,б), состоящее из двух резьбовых шпилек М10х1,75, 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 гайки, 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 (рис. 2,а,в), имеющие двухстеночное исполнение, плотно входят во внутреннюю полость каждой трубной заготовки, герметизируют ограниченное пространство стыкуемых торцов труб.

Общая схема компоновки системы поддува защитного газа приведена на рис. 3 и состоит из баллона защитного газа 1, редуктора с двумя ротаметрами 2, газовой магистрали 3. В газовую магистраль встроены воздушный компенсационный шарик 4 для визуального контроля давления по

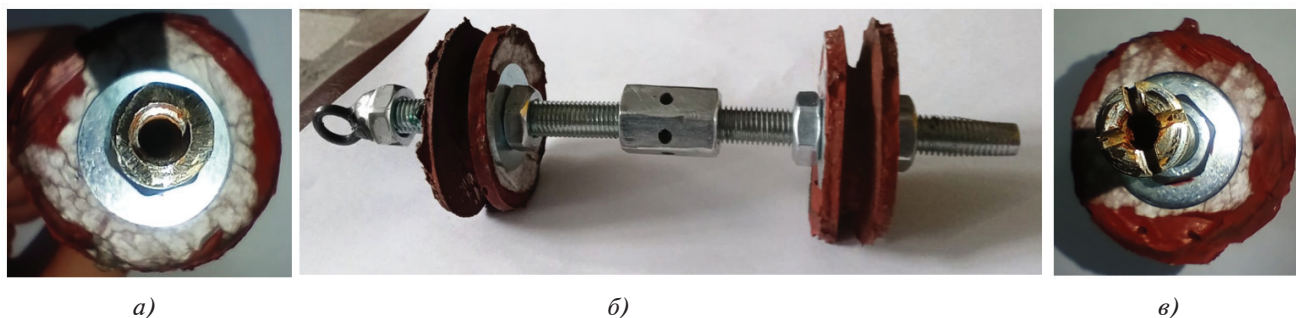


Рис. 2. Защитное устройство для поддува

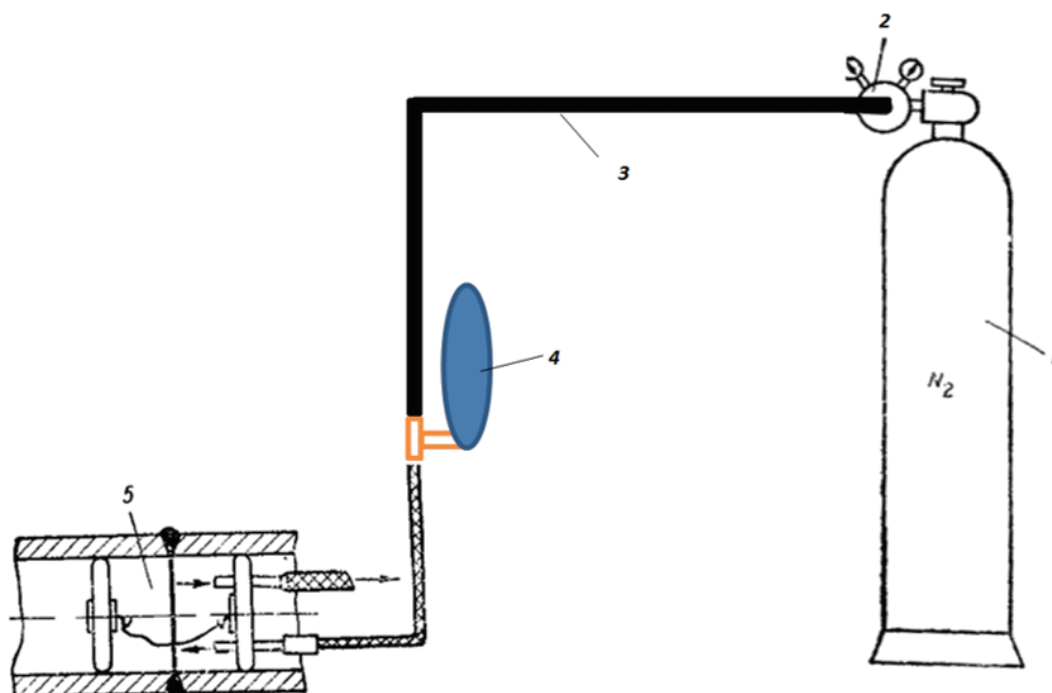


Рис. 3. Общая схема компоновки системы поддува:

1 — баллон защитного газа (аргон, азот); 2 — редуктор с ротаметрами; 3 — газовая магистраль; 4 — шарик компенсационный; 5 — внутрикамерное пространство

изменению объема. Кроме этой функции, шарик может быть применен как сигнализатор прохода защитного газа (например, для продувки камеры перед началом сварки), наличия газа во внутрикамерном пространстве 5. Регулирование внутрикамерным давлением происходило, при наблюдении за размерностью лицевого валика и наполняемостью компенсационного валика, путем снижения расхода защитного газа ротаметром вручную.

Геометрические параметры полученных сварных швов (высота усиления лицевой стороны валика) определялись лазерным сканированием MСАх и обработкой 3D-модели в программе Focus 10 Inspection (красная линия – теоретический наружный контур трубы, синяя линия – контур поверхности лицевой стороны шва, полученный по результатам сканирования).

Сварные образцы трубных тонкостенных заготовок испытаны на статическое растяжение на машине испытательной INSTRON 3382 и подвержены микроструктурным исследованиям на микроскопе Nikon MA200. С этой целью из каждого сварного образца вырезаны несколько образцов и промаркированы следующим образом (табл. 2)

НМV-2Т. Сила нагрузки составляла 1.96 Н (200 кгс), время приложения нагрузки 10 с, шаг измерения 0,5 мм. Измерения микротвердости велись по центральной плоскости поперечного сечения образцов следующим образом: первоначально измерения проводили по линиям сплавления с последующим измерением в направлении основного металла, далее измерялась микротвердость в металле шва.

Результаты исследований и их обсуждение

При простановке прихваток формирование сварочной ванны оказалось несостоятельным до тех пор, пока не образовалось отверстие (свищ) протяженностью 3 мм и шириной 1,5 мм (рис. 3). После этого остальные прихватки осуществлялись беспрепятственно. Причиной несостоятельности формирования сварочной ванны стали: высокая скорость истечения аргона из зазора, выдувание расплавленного металла кромок и его подтекание на поверхность стенки трубы.

На поверхности прихваток наблюдались усачные раковины диаметром 0,1–0,2 мм, как с лицевой, так и с обратной стороны. Причинами их образования являются высокая скорость охлаждения, интенсифицируемая истечением арго-

Таблица 2

Принятая маркировка образцов

Образец	Микроструктурный анализ			Статическое растяжение		
	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4
1	1.2.1	1.3.1	1.4.1	1.2.2	1.3.2	1.4.2
2	2.2.1	2.3.1	-	2.2.2	2.3.2	-
3	3.2.1	3.3.1	3.4.1	3.2.2	3.3.2	3.4.2

Для проведения механических испытаний изготовлено восемь образцов из трех секторов (первый сектор не взят во внимание по причине недостаточной протяженности) по длине сварных соединений. В образце 2 сектор 4 был недодварен, поэтому образец 2.4.2 не изготовлен. Вырезанные образцы отвечают требованиям ГОСТ 6996 тип XII. Пробоподготовку для микроструктурного анализа проводили с помощью шлифовально-полировального станка Buehler AutoMet 250 с последующим травлением в растворе глицерина, соляной и азотной кислоты в соотношении 4/4/3 180 с.

Микротвердость образцов 2.1, 3.1, 4.1 измеряли с помощью микротвердомера Shimadzu

на из малого зазора, и недостаточность жидкой фазы при образовании кристаллитов от линии сплавления к центру прихваточной точки (рис. 4, а). С обратной стороны продуктов окисления и цветов побежалости вокруг сформированной прихватки не наблюдалось (рис. 4, б), что характеризует достаточность защиты.

Характер оплавленных кромок прожженного отверстия (расплавленный металл вытеснен наружу трубы) свидетельствует о чрезмерном давлении защитного газа в поддуве, а размер отверстия — о необходимом диаметре компенсационного отверстия (4,5 мм²) для всех ранее установленных параметров расхода и геометрии свариваемых заготовок.

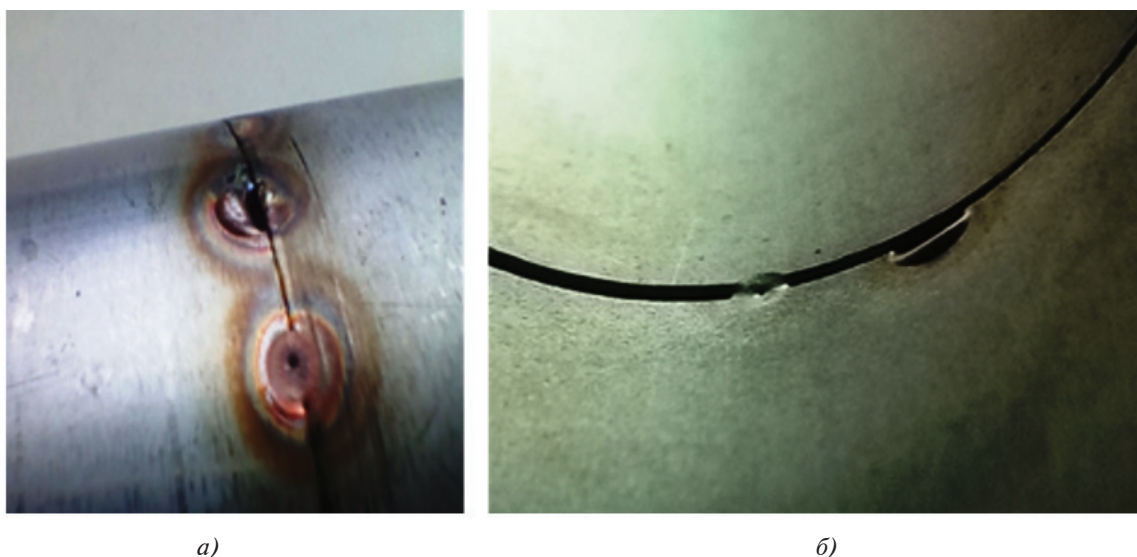


Рис. 4. Свищ, образованный при простановке точечной прихватки с избыточным давлением в поддуве

Для повышения эффективности устройство было оперативно доработано: в резьбовой шпильке, противостоящей входу защитного газа, просверлено отверстие диаметром 3 мм. После этой операции все заготовки собраны без вышеописанных проблем.

В ходе эксперимента по разным причинам не удалось получить плотные швы по всей длине образца: например, в образце 1 (сварка в атмосфере воздуха) при сборке на точечные прихватки (сборка с поддувом защитного газа) в результате подачи избыточного давления произошли выплеск металла и образование свища диаметром 2 мм (рис. 5). Решение варить по свищу привело к образованию прожога протяженностью 12 мм, который самоперекрылся со стабилизацией параметра шва без дополнительных мероприятий (корректировка режима, подача проволоки и т.п.).

При сварке образца 2 произошло прилипание (примерзание) вольфрамового электрода к сварочной ванне по причине недопустимого уменьшения дугового зазора. Принято решение не доваривать образец, оставив 30 мм незакрытого стыка.

При сварке образца 3 шов получился полно-размерный, но в замковой части произошла остановка вращения с сохранением в течение продолжительного времени горения дуги, в результате чего образовалась бобышка.

При получении сварных образцов определена динамика изменения расхода газа с целью стабилизации высоты усиления лицевой и обратной стороны шва (рис. 5). С момента поджига

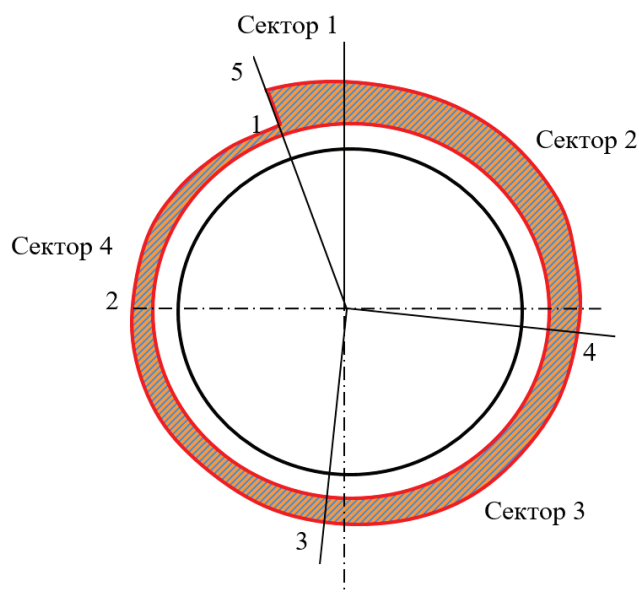


Рис. 5. Эпюра изменения расхода защитного газа в поддув (л/мин) при формировании сварного шва

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.

Полученные сварные образцы представлены в табл. 3, там же показаны геометрические параметры сварных швов (высота усиления лицевой стороны валика), определенных лазерным сканированием.

В отношении геометрических параметров сварных швов отмечается следующее: все три образца имеют стабильную ширину шва, не превышающую 7 мм, согласно ПИ 1.4.748.

Таблица 3

Внешний вид полученных образцов и геометрические параметры швов

Номер образца	Атмосфера поддува	Лицевая сторона			Корневая сторона	Геометрические параметры шва		
1	Воздух							
2	Аргон							
3	Азот							

Примечания: Режимы сварки для всех образцов идентичные и соответствуют G-коду управляющей программы. Поддув аргона и азота осуществлялся через защитное устройство с расходом 5 л/мин.

Геометрические параметры шва определены лазерным сканированием MСAХ и обработкой 3D-модели в программе Focus 10 Inspection.

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.

Высота усиления корневого валика образца 1 положительная 0,3—0,5 мм, но поверхность шва и зоны термического влияния (ЗТВ) имеют шламообразный слой черного цвета ввиду сильного окисления расплавленного металла шва в атмосфере воздуха. Также стабильное положительное усиление корневого валика 0,1—0,2 мм по всей длине шва наблюдается и в образце 2. Этому соответствуют условие незаконченности шва и сброс избыточного давления через незакрытый стык. Поверхность корневого валика гладкая, серого цвета, что говорит о достаточной защите аргоном.

Образец 3 в последней трети длины шва имеет вогнутость, характеризующуюся повышением внутрикамерного давления при закрытии зазора формирующимся валиком и ростом температуры поддуваемого газа и ЗТВ. Поверхность металла шва и ЗТВ внутреннего валика шва, защищаемого в поддуве азотом золотистая, зеркально — гладкая по всей протяженности.

Результаты механических испытаний представлены в табл. 4, из которой видно, что разрушение всех образцов произошло по линии сплавления. Причиной такого явления может быть ослабление шва переходом структурной составляющей.

Среднее значение предела прочности для сварных образцов 1, 2 и 3 составляет 451,5; 529,1 и 566,4 МПа. Таким образом, наименьший предел прочности 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 сварного соединения при поддуве азотом. Предел прочности испытанных сварных образцов по сравнению с пределом прочности основного металла (по результатам натурных испытаний $\sigma_b = 570$ МПа) составляет — 20%, 7% и 0,6% от среднего значения образцов 1, 2 и 3 соответственно.

Среднее значение относительного удлинения у образцов 1, 2 и 3 соответственно 21; 21,2 и 26,8%. При поддуве аргоном относительное удлинение возрастает незначительно, а при использовании азота — на 5%.

Таким образом, по результатам проведенных механических испытаний установлено, что применение азота в качестве защитного газа в поддув при аргонодуговой сварке неплавящимся вольфрамовым электродом без присадки тонкостенных труб из нержавеющей стали способствует достижению прочностных свойств основного металла с сохранением пластичности — даже по линии сплавления.

Распределение микротвердости в поперечном сечении сварных образцов (рис. 6) показало, что характерным является: общее снижение микротвердости в металле шва до 140 от 180 HV основного металла, сохранение этого значения в области линии сплавления и зоны крупного зерна и резкое возрастание в зоне среднего зерна. 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 рис. 7 представлена типичная микроструктура поперечного сечения сварных образцов, полученных при помощи пульсирующей дуги на примере образца 2.3.1. Характерным для всех образцов является мелкозернистая структура 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 составляющих — 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.

Образование зоны крупного зерна объясняется длительным пребыванием металла, прилегающего к линии сплавления при высокой температуре, и связано с непрерывным действием сварочной дуги. Дендритная структура от линии сплавления и в центр шва свойственна быстрой скорости охлаждения расплавленного металла и может быть объяснена недостаточной теплопроводностью свариваемых заготовок. Мелкозернистость структуры центральной области металла шва объясняется отпускным действием дежурной дуги в период перемещения сварочной горелки, а ее недостаточная протяженность — сжиманием дуги в этот период.

Таблица 4

Результаты механических испытаний сварных образцов

Образец	Модуль, МПа	Условный предел текучести, МПа	Предел пропорциональности, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Диаграмма растяжения	Фото образца	
							до испытания	после испытания
1.2.2	58297	169,5	59,0	465,5	25,4			
1.3.2	66048	164,4	67,1	491,3	21,6			
1.4.2	60222	171,1	62,4	397,8	16,0			
2.2.2	81145	230,6	129,2	560,2	24,0			
2.3.2	79599	217,2	115,1	498,0	18,5			
3.2.2	77566	161,5	101,7	556,7	22,9			
3.3.2	78574	182,3	99,2	592,5	30,7			
3.4.2	82400	208,3	131,5	550,0	27,0			

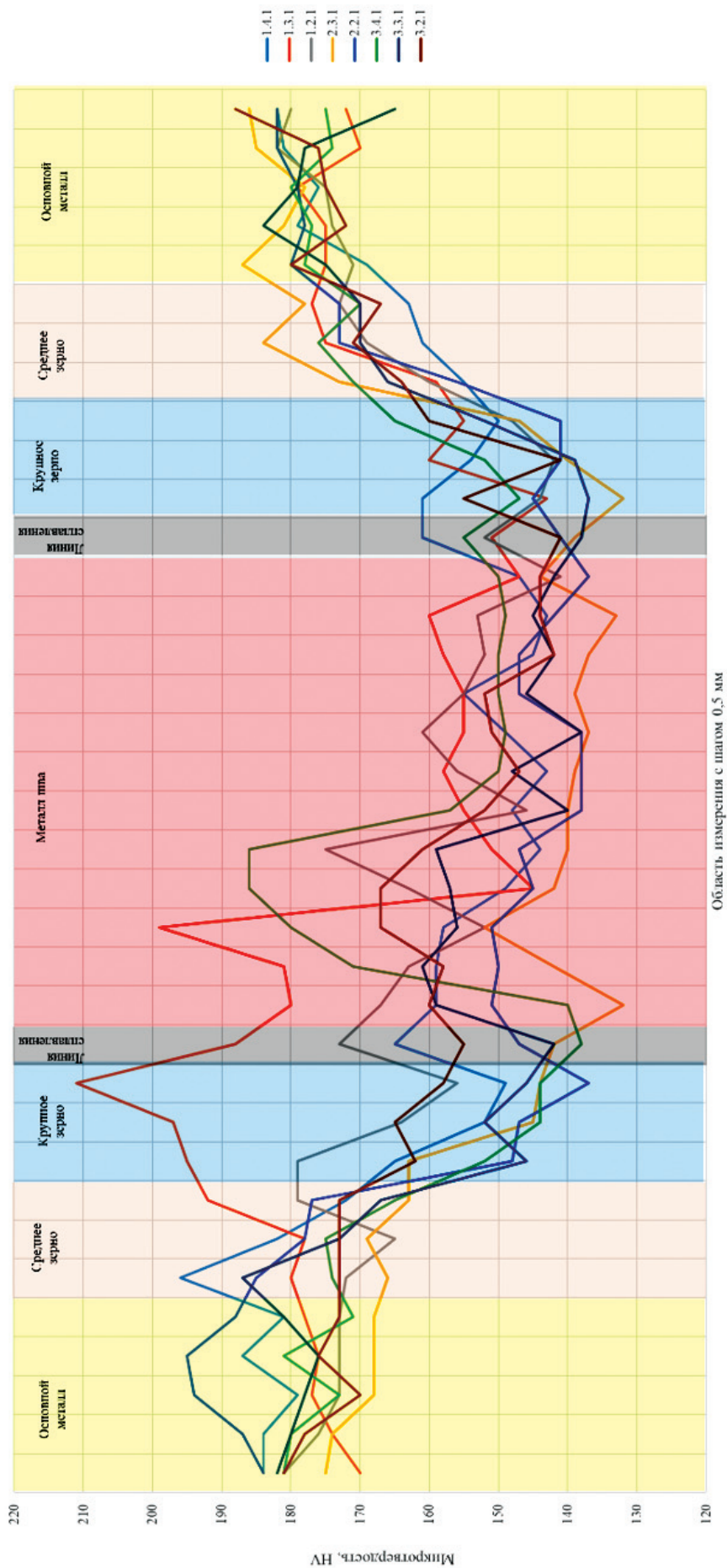


Рис. 6. Распределение микротвердости в поперечных сечениях сварных образцов

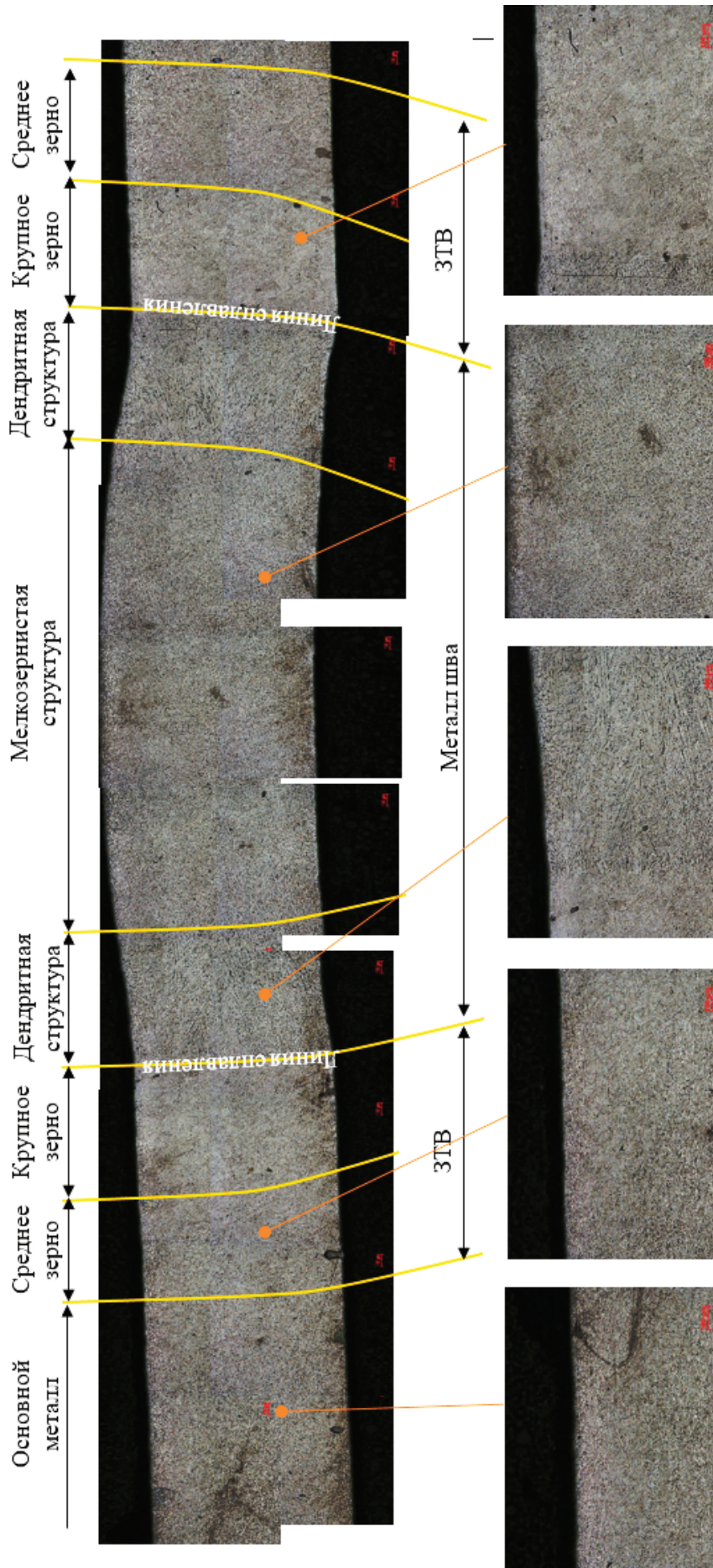


Рис. 7. Микроструктура поперечного сечения сварного образца 2.3.1

Таким образом, совместный анализ микро-структуры, распределения микротвердости и характера излома сварных образцов объясняет разрушение образцов вблизи от линии сплавления направленностью дендритной структуры перпендикулярно центральной оси шва и наличием крупнозернистой структуры с минимальным значением микротвердости с последующим резким возрастанием микротвердости в зоне среднего зерна.

Выводы

Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом пульсирующей дугой без применения присадки – наиболее подходящий способ сварки тонкостенных трубных заготовок авиационного назначения, позволяющий получать необходимые механические свойства и геометрические параметры сварных швов с применением поддува защитного газа.

Устройство, создающее внутреннее давление поддуваемого газа путем его протекания по внутрикамерному пространству, подает нужное количество газа для обеспечения антиоксидной защиты, но без регулирования геометрии.

В ходе апробации устройств с регулированием внутрикамерного давления установлено, что оптимальным расходом газа в момент начала сварки трубы диаметром 50 мм, при расстоянии между заглушками 100 мм, является 5 л/мин. В последующем расход следует **плавно** уменьшать пропорционально скорости заполнения зазора до значений 1–1,2 л/мин (в случае истекания газа через отверстие в устройстве), либо до 0 л/мин в случае надежной герметизации внутрикамерного пространства заглушками и сохранения давления защитного газа при полном уплотнении шва.

Применение в качестве поддува аргона и азота гарантирует отсутствие окисленного слоя обратной стороны шва, позволяет достигнуть значений предела прочности, близких к основному металлу, со снижением на 7 и 0,6% соответственно, а сварка с атмосферой воздуха – на 20%. При поддуве аргоном относительное удлинение возрастает незначительно, а при использовании азота – на 5%.

Список источников

1. *Лебедев А.В., Баранников А.А., Гришин М.В.* и др. Проблемы производства трубопроводов в современном авиастроении // В мире научных открытий. 2014. № 4(52). С. 71-81.

2. *Пекарш А.И., Тарасов Ю.М., Марьин Б.Н.* и др. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов. — М.: Аграф-пресс, 2006. — 304 с.
3. Производственная инструкция ПИ — 1.4.748-80. Дуговая сварка трубопроводов из нержавеющей сталей в среде инертных газов. — М.: НИАТ, 1983. — 59 с.
4. *Кривцов В.С., Павленко В.Н., Воронько В.В., Воробьев Ю.А., Шостак И.В.* Комплексный подход к роботизации сборочных процессов в самолетостроении на основе нечеткой логики // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 3. С. 32-39.
5. *Дюргеров Н.Г., Сагиров Д.Х.* Определение свойств дуги при импульсных процессах сварки // Сварочное производство. 2004. № 4. С. 14-18.
6. *Лобанов Л.М., Лебедев В.А., Максимов С.Ю.* Новые возможности механизированной дуговой точечной сварки с применением импульсных воздействий // Автоматическая сварка. 2012. № 5(709). С. 17-22.
7. *Новиков О.М., Радько Э.П., Иванов Е.Н.* Разработка новой технологии дуговой сварки в защитных газах на основе применения пульсации газовых потоков и потенциалов ионизации // Сварщик — профессионал. 2006. № 6. С. 10-13.
8. *Рыжов Р.Н.* Влияние импульсных электромагнитных воздействий на формирование и кристаллизацию швов // Автоматическая сварка. 2007. № 2. С. 56-58.
9. *Сараев Ю.Н.* Адаптивные импульсно-дуговые методы механизированной сварки при строительстве магистральных трубопроводов // Сварочное производство. 2002. № 1. С. 4-11.
10. *Тазетдинов Р.Г., Новиков О.М., Персидский А.С.* и др. Дуговая сварка в защитных газах с попеременной импульсной подачей разнородных газов // Сварочное производство. 2012. № 1. С. 38-42.
11. *Пирог В.П., Кондратьев И.А., Носенко Л.Ф., Сухов А.А.* Измерение параметров защитной атмосферы в сварочной камере аргонно-дуговой сварки металлов // Приборы. 2018. № 4(214). С. 14-17.
12. *Крампит Н.Ю., Буракова Е.М., Крампит М.А.* Краткий обзор способов управления процессом дуговой сварки в среде защитных газов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12069>
13. *Mann S., Glebke R., Kunze I.* et al. Study on weld seam geometry control for connected gas metal arc welding systems // 17th International Conference on Ubiquitous Robots (22-26 June 2020; Kyoto, Japan). 2020, pp. 373-379. DOI: 10.1109/UR49135.2020.9144839
14. *Button B.L., Grogan A.F., Chivers T.C., Manning P.T.* Gas Flow Through Cracks // Journal of Fluids Engineering. 1978. Vol. 100. No. 4, pp. 453-458. DOI: 10.1115/1.3448707

15. Chang Y.-L., Liu M.-J., Lu L., Gao F. Effect of current pulse frequency on arc pressure of TIG welding // *Journal of Shenyang University of Technology*. 2015. Vol. 37. No. 5, pp. 500-504. DOI: 10.7688/j.issn.1000-1646.2015.05.04
16. Пестунов В.А., Самсонович С.Л., Чубиков В.Н. Экспериментальные исследования опытного образца самостабилизатора давления // *Вестник Московского авиационного института*. 2011. Т. 18. № 3. С. 185.
17. Momii T., Iwao T., Yumoto M. Contribution for Heat Transfer and Heat Flux to Anode Affected by Rise Current Transition Time in Pulsed Arc // *IEEE Transactions on Power and Energy*. 2013. Vol. 133. No. 5, pp. 409-416. DOI: 10.1541/ieejpes.133.409
18. Lambang F., Tamjidillah M. Analisis variasi aliran gas pelindung dan bentuk kampuh pada proses las gmaw terhadap kekerasan dan struktur mikro baja ASTM A36 // *Kinematika*. 2020. Vol. 5. No. 1, pp. 51-66. DOI: 10.20527/sjmekinematika.v5i1.137
19. Bhattacharya T., Bandyopadhyay A., Pal P.K. An Investigation on Temperature Distribution and Cooling Rate of ERW Pipes during TIG Welding // *Journal for Manufacturing Science and Production*. 2014. Vol. 14. No. 4, pp. 219-231. DOI: 10.1515/jmsp-2014-0015
20. Фролов А.В. Установка автоматической сварки элементов судовых трубопроводов // *Морские интеллектуальные технологии*. 2021. Т. 2. № 2-2(52). С. 91-96. DOI: 10.37220/МИТ.2021.52.2.057
21. Комарова К.К., Старничук Е.П., Кравченко А.С., Бахматов П.В. Влияние режимов сварки на геометрические параметры сварного шва, выполненного роботизированным комплексом // *Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Сб. V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных (11—15 апреля 2022; Комсомольск-на-Амуре; Россия): В 4-х ч. Ч. 2. Комсомольск-на-Амуре, 2022. С. 33-35.*
22. Бахматов П.В., Фролов А.В., Кравченко А.С. Исследование влияния техники манипулирования рабочим торцом электрода при TIG сварке на качество формирования шва // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2021. № 3(51). С. 90-94. DOI: 10.17084/20764359-2021-51-90

References

1. Lebedev A.V., Barannikov A.A., Grishin M.V. et al. *V mire nauchnykh otkrytii*, 2014, no. 4(52), pp. 71-81.
2. Pekarsh A.I., Tarasov Yu.M., Mar'in B.N. et al. *Sovremennye tekhnologii agregatno-sborochnogo proizvodstva samoletov* (Modern technologies of aggregate assembly production of aircraft), Moscow, Agraf-press, 2006, 304 p.
3. *Proizvodstvennaya instruktsiya PI - I.4.748-80. Dugovaya svarka truboprovodov iz nerzhavayushchikh staley v srede inertnykh gazov* (Production instruction PI - I.4.748-80. Arc welding of stainless steel pipelines in an inert gas environment), Moscow, NIAT, 1983, 59 p.
4. Krivtsov V.S., Pavlenko V.N., Voronko V.V., Vorobjev Y.A., Shostak I.V. Complex approach to robotic automation of assembly processes in aircraft manufacturing based on fuzzy logic. *Aerospace MAI Journal*, 2013, vol. 20, no. 3, pp. 32-39.
5. Dyurgerov N.G., Sagirov D.X. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2004, no. 4, pp. 14-18.
6. Lobanov L.M., Lebedev V.A., Maksimov S.Yu. *Avtomaticheskaya svarka*, 2012, no. 5(709), pp. 17-22.
7. Novikov O.M., Rad'ko E.P., Ivanov E.N. *Svarshchik – professional*, 2006, no. 6, pp. 10-13.
8. Ryzhov R.N. *Avtomaticheskaya svarka*, 2007, no. 2, pp. 56-58.
9. Saraev Yu.N. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2002, no. 1, pp. 4-11.
10. Tazetdinov R.G., Novikov O.M., Persidskii A.S. et al. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2012, no. 1, pp. 38-42.
11. Pirog V.P., Kondrat'ev I.A., Nosenko L.F., Sukhov A.A. *Pribory*, 2018, no. 4(214), pp. 14-17.
12. Krampit N.Yu., Burakova E.M., Krampit M.A. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, no. 1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12069>
13. Mann S., Glebke R., Kunze I. et al. Study on weld seam geometry control for connected gas metal arc welding systems. *17th International Conference on Ubiquitous Robots (22-26 June 2020; Kyoto, Japan)*. 2020, pp. 373-379. DOI: 10.1109/UR49135.2020.9144839
14. Button B.L., Grogan A.F., Chivers T.C., Manning P.T. Gas Flow Through Cracks. *Journal of Fluids Engineering*, 1978, vol. 100, no. 4, pp. 453-458. DOI: 10.1115/1.3448707
15. Chang Y.-L., Liu M.-J., Lu L., Gao F. Effect of current pulse frequency on arc pressure of TIG welding. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2015, vol. 37, no. 5, pp. 500-504. DOI: 10.7688/j.issn.1000-1646.2015.05.04
16. Pestunov V.A., Samsonovich S.L., Tchubikov V.N. Experimental research of a pressure stabilizer prototype. *Aerospace MAI Journal*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 185-192.
17. Momii T., Iwao T., Yumoto M. Contribution for Heat Transfer and Heat Flux to Anode Affected by Rise Current Transition Time in Pulsed Arc. *IEEE Transactions on Power and Energy*, 2013, vol. 133, no. 5, pp. 409-416. DOI: 10.1541/ieejpes.133.409
18. Lambang F., Tamjidillah M. Analisis variasi aliran gas pelindung dan bentuk kampuh pada proses las gmaw terhadap kekerasan dan struktur mikro baja ASTM A36. *Kinematika*, 2020, vol. 5, no. 1, pp. 51-66. DOI: 10.20527/sjmekinematika.v5i1.137

19. Bhattacharya T., Bandyopadhyay A., Pal P.K. An Investigation on Temperature Distribution and Cooling Rate of ERW Pipes during TIG Welding. *Journal for Manufacturing Science and Production*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 219-231. DOI: 10.1515/jmsp-2014-0015
20. Frolov A.V. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2021, vol. 2, no. 2-2(52), pp. 91-96. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.057
21. Komarova K.K., Starnichuk E.P., Kravchenko A.S., Bakhmatov P.V. *Materialy V Vserossiiskoi natsional'noi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh "Molodezh' i nauka: aktual'nye problemy fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy" (11–15 April 2022; Komsomolsk-na-Amure; Russia)*. 2022. Part 2, pp. 33-35.
22. Bakhmatov P.V., Frolov A.V., Kravchenko A.S. *Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 3(51), pp. 90-94. DOI: 10.17084/20764359-2021-51-90

Статья поступила в редакцию 11.07.2022; одобрена после рецензирования 29.08.2022; принята к публикации 29.08.2022.

The article was submitted on 11.07.2022; approved after reviewing on 29.08.2022; accepted for publication on 29.08.2022.