
Научная статья

УДК 621.791

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12- 3-13

СОЗДАНИЕ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ (обзор)

Е.А. Ходакова¹, А.В. Свиридов¹, А.А. Скупов¹, А.Ю. Стельникович¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Показана история развития плазменных технологий и отражены значительные достижения ученых из разных стран мира в области плазменной сварки. Приведены основные особенности технологических процессов, в которых источником нагрева является плазма. Показано, что в настоящее время перспективным направлением развития плазменной сварки является комбинированное и гибридное использование двух и более источников нагрева при формировании сварного соединения. Представлено описание оборудования для плазменной сварки.

Ключевые слова: плазменная сварка, плазма, микроплазменная сварка, гибридные процессы, алюминиевые сплавы

Для цитирования: Ходакова Е.А., Свиридов А.В., Скупов А.А., Стельникович А.Ю. Создание неразъемных соединений методом плазменной сварки (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-3-13.

Scientific article

CREATION OF PLASMA WELDING JOINTS (review)

Е.А. Khodakova¹, А.В. Sviridov¹, А.А. Skupov¹, А.Ю. Stelnikovich¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Main achievements of recent years in the field of plasma welding, made by scientists from around the world and the history of the development of plasma technologies showed in the article. Main features of technological processes in which the source of heating is plasma are given. It is shown that at present a promising direction in plasma welding development is the combined and hybrid use of two or more heat sources in the formation of a welded joint. The description of equipment for plasma welding is presented.

Keywords: plasma welding, plasma, microplasma welding, hybrid processes, aluminum alloys

For citation: Khodakova E.A., Sviridov A.V., Skupov A.A., Stelnikovich A.Yu. Creation of plasma welding joints (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-3-13.

Введение

Создание перспективных изделий авиационной и ракетно-космической техники не представляется возможным без успешного решения вопросов, связанных с разработкой материалов и технологий изготовления неразъемных соединений, основной из которых является сварка. Возросшие требования к сварным соединениям по остаточным деформациям, формированию шва и качеству его поверхности, механическим,

антикоррозионным и другим свойствам обуславливают необходимость разработки процессов с использованием высококонцентрированных источников энергии, в частности сжатой дуги [1–6].

Особенностями сварки в авиационной промышленности являются малый объем производства, высокая себестоимость, исключительная надежность и тяжелые условия эксплуатации. Эти факторы зачастую требуют применения концентрированных источников тепла, таких как плазма, лазер и электронный луч, вместо дуги для сварки ответственных конструкций [7].

Преимущества плазменной сварки заключаются в стабильности горения дуги, высокой производительности и низких сварочных деформациях. При этом затраты на сварку невысокие, особенно в сравнении с лазерной и электронно-лучевой технологиями [8].

Экспериментальная оценка тепловой эффективности плазменных процессов проведена многими авторами по результатам калориметрирования [9–14]. Таким образом, при плазменной резке термический КПД процесса составляет 80–85 %, а при плазменном напылении 0,7–0,8 %. Результаты калориметрирования для воздушно-плазменной резки, представленные в работе [15], показали, что 76–81 % энергии идет на нагрев изделия.

Плазменная сварка хорошо зарекомендовала себя для соединения тонких и очень тонких (0,05–1,5 мм) изделий и узлов. Это стало возможным благодаря жесткому контролю тепловложения. Данная технология широко применяется и для сварки изделий средних толщин (3–20 мм) из низкоуглеродистых, низколегированных, высокопрочных и коррозионностойких сталей, никелевых, титановых и алюминиевых сплавов, а также из меди и ее сплавов. Наряду с обычными условиями плазменная сварка используется для соединения металлов под водой и в вакууме [16].

В последние годы достигнут значительный прогресс в повышении стабильности процесса плазменной дуговой сварки, увеличении ее глубины проплавления и качества, что способствует широкому внедрению этого метода вместо традиционных дуговых процессов [17].

Разработаны технологические рекомендации по сварке закрытой сжатой дугой ряда металлов. Создана серия горелок, получивших широкое применение при производстве тонкостенных конструкций, металлорукавов, труб капилляров, а также при сварке неповоротных стыков труб [18].

В данной статье отражены основные достижения исследователей из разных стран мира в области плазменной сварки различных металлов и показана история развития изучаемого технологического процесса для создания неразъемных соединений.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.8. «Технологии сварки плавлением новых конструкционных материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [19].

История развития плазменных технологий

Процесс плазменной дуговой сварки и резки изобретен Робертом М. Гейджем в 1953 г. и запатентован в 1957 г. [20]. Развитие плазменных технологий началось с изучения физических и энергетических характеристик сжатой дуги в инертном газе (аргоне) и определения ее технологических возможностей. В СССР исследования по вопросу плазменной сварки и резки стали проводиться в 1956 г., а интенсивные систематические исследования выполнены в Институте металлургии им. А.А. Байкова под руководством Н.Н. Рыкалина [21].

В 1960-х гг. достигнуты определенные успехи в этом направлении. Исследования малоамперной сжатой дуги в среде аргона, проведенные в Институте электросварки им. Е.О. Патона и Национальном институте авиационных технологий, показали ряд преимуществ применения плазменной сварки для тонколистовых материалов в сравнении с обычной аргоно-дуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом. Замечено, что качество сварных соединений повышается не только из-за увеличения концентрации энергии, но и главным образом благодаря большей стабильности процесса, связанной с исключением блуждания дуги и уменьшением колебаний ее длины. Режим процесса плазменной сварки регулируется за счет изменения величины и вида тока, а также расхода и состава плазмообразующего газа.

В работе [22] представлено сравнение процессов дуговой и плазменной сварки с точки зрения технологических возможностей, экономической эффективности и экологических особенностей. Сделан вывод о возможной перспективе – вытеснении аргоно-дуговой сварки (доля ее использования составляет 40–50 %) плазменными технологиями, которые, по прогнозам, будут широко распространены в нефтеперерабатывающей отрасли для сварки алюминиевых труб.

Сварка закрытой сжатой дугой. Данный способ сварки в непрерывном и импульсном режимах разработан в середине 1960-х гг. в Национальном институте авиационных технологий под руководством А.В. Петрова и внедрен на ряде предприятий СССР [23].

Рассматриваемая технология реализуется в микрокамере из медного сплава или стали, которая охлаждается водой [16].

В статье [24] представлены результаты применения закрытой сжатой дуги для механизированной сварки продольных и кольцевых швов. По сравнению с использованием открытой дуги, стабильность протекания данного процесса сварки и формирования шва выше. Кроме того, при сварке титанового сплава закрытой сжатой дугой отмечается отсутствие газовой пористости.

Плазменная сварка в вакууме полым неплавящимся катодом. В конце 1960-х и начале 1970-х гг. в нашей стране и за рубежом (Япония, США, Франция) исследуются плазмотроны с полым катодом. Процесс проводят в камере при определенном давлении и используют обычно для соединения тугоплавких и химически активных сплавов толщиной от 1 до 20 мм – например, для сварки титановых шаробаллонов.

В 1980-х гг. в Научно-исследовательском институте точного машиностроения разработан комплекс оборудования для сварки термоэмиссионным полым катодом в вакууме узлов из титановых сплавов, включающий головку для сварки, аппаратуру управления данным процессом, системы возбуждения дугового разряда и газоснабжения. Оборудование для сварки термоэмиссионным полым катодом в вакууме монтируется в серийных вакуумных камерах, применяемых на предприятиях для электронно-лучевой сварки (например, установки ЭЛУ-4 или ЭЛУ-5) или дуговой сварки в контролируемой атмосфере. Комплекс предназначен для сварки химически активных сплавов, в том числе титановых сплавов толщиной от 3 до 10 мм [25–29].

Микроплазменная сварка. В начале 1970-х гг. наиболее бурное развитие и широкое промышленное применение в СССР получает технология микроплазменной сварки, разработанная швейцарскими фирмами Secheron и Messer Griesheim в середине 1960-х гг. [30]. Микроплазменная дуга используется для соединения тонкостенных изделий (0,025–0,8 мм). Высокая степень сжатия плазменной струи позволяет уменьшить деформацию изделия и получить узкий сварной шов и малую зону термического влияния [31, 32].

Проводятся исследовательские работы, направленные на оценку эффективности применения технологии микроплазменной сварки для соединения материалов

(аустенитные нержавеющие стали, титановые и жаропрочные никелевые сплавы), используемых в изделиях авиационной техники [33, 34].

В статье [35] представлены примеры использования микроплазменной дуги в процессах сварки, наплавки и переплава. Отмечено, что применение микроплазмы позволяет получать качественные соединения из разноименных материалов. Кроме того, сделан вывод о том, что рассматриваемая технология является альтернативой более трудоемким процессам лазерной и электронно-лучевой сварки.

В 2000-х гг. появились плазмотроны с *пароводяной плазмой*. В плазмотронах с водяной стабилизацией дуга находится внутри водяной трубки, которая, не давая дуговому разряду отклоняться, стабилизирует тем самым его положение в пространстве. При этом часть воды испаряется с внутренней поверхности трубки, превращаясь в пароводяную плазму.

Водяной пар является экологически чистым, взрывобезопасным безотходным соединением, благоприятно влияющим на санитарно-гигиенические условия труда [36]. Таким образом, пароводяные плазмотроны могут использоваться для плазменной резки, сварки и наплавки, а также в металлургии и плазмохимии [37, 38].

Следует отметить, что особое внимание в СССР и в мире уделялось сварке алюминиевых сплавов. Обширные исследования в этой области проводились в Институте электросварки им. Е.О. Патона. С конца 1960-х гг. и по настоящее время разработаны различные способы плазменно-дуговой сварки [39]:

- переменным синусоидальным током;
- постоянным током обратной полярности (данный способ впервые применен в корпорации Thermal Dynamics Corp.);
- с чередованием полярностей на электроде и плазмообразующем сопле;
- разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой его волны (способ Variable Polarity Plasma Arc Welding (VPPA) зарегистрировала фирма Hobart Brothers Inc.).

В статьях [18] проведен анализ тенденций развития плазменной сварки алюминиевых сплавов. Для расширения технологических возможностей и повышения стабильности процесса осуществляется разработка комбинированных плазменных технологий с использованием нескольких источников питания, подсоединенных к плазмотрону.

Возможность устойчивой работы плазмотрона с двумя дугами прямого действия при сварке током обратной полярности показана в работе [40]. Данный способ позволил в широком диапазоне управлять геометрическими параметрами сварного шва: увеличиваются глубина проплавления металла и зона катодной очистки, отсутствуют дефекты, формирование сварного шва – хорошее.

В статье [41] отмечена эффективность использования способа плазменной сварки в импульсном режиме при обратной полярности с полым катодом для соединения современных высокопрочных алюминиевых сплавов. Сделан вывод, что для повышения качества сварных соединений сплавов системы Al–Cu–Li перспективным является применение программируемой импульсной подачи плазмообразующего газа.

При этом в работе [42] отмечены следующие вехи в развитии плазменных технологий:

- 1973–1975 гг.: изучение параметров и условий стабильного формирования «кинжального» проплавления и его первое практическое применение;
- 1981–1986 гг.: исследование условий существования расплавленной ванны и промышленное применение в производстве сосудов высокого давления, разработка Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства (НАСА) технологии VPPA для сварки алюминиевых сплавов;

- 1998–1999 гг.: дальнейшее изучение формирования «кинжального» проплавления и создание промышленного оборудования для сварки алюминиевых сплавов;
- 2002–2007 гг.: моделирование плазмы и развитие плазменных технологий для расширения области их применения.

Гибридные технологии

В настоящее время перспективным направлением развития технологии плазменной сварки является комбинированное и гибридное использование двух и более источников нагрева при формировании сварного соединения.

Лазерно-плазменная сварка. В статье [43] показаны перспективы применения технологии лазерно-плазменной сварки для тонколистовых материалов (например, из нержавеющей стали). Производительность гибридного способа сварки превышает производительность лазерной в 2–3 раза, а плазменной – до 4 раз.

В работе [44] рассмотрены особенности лазерной, микроплазменной и гибридной лазерно-микроплазменной сварки алюминиевых сплавов. Гибридная лазерно-микроплазменная сварка (в сравнении с микроплазменной) позволяет в 1,5–2 раза уменьшить ширину сварного соединения, для нее характерны стабильность процесса на высоких скоростях сварки и отсутствие разбрызгивания.

Синергетические эффекты при гибридной лазерно-дуговой сварке могут привести к повышению эффективности процесса. Однако особенности взаимодействия источников энергии по-прежнему полностью не изучены. В работе [45], где рассматривается этот вопрос, показано, что рост эффективности процесса можно объяснить резким увеличением проплавляющей способности, тогда как эффективность энергетического взаимодействия увеличивается незначительно. Таким образом, синергетический эффект в основном вызван вторичными механизмами, которые меняют количество энергии внутри заготовки.

В статье [46] выделены преимущества лазерно-плазменной сварки: экономические – заключаются в частичной замене дорогой лазерной мощности на более дешевую плазменную и в возможности отказа от присадочного материала; технологические – связаны с уменьшением сварочных деформаций, снижением требований к подготовке свариваемых кромок, повышением производительности по сравнению с плазменной и лазерной сваркой.

Гибридная плазменно-дуговая сварка плавящимся электродом. Для формирования сварочной ванны одновременно используются сжатая дуга неплавящегося электрода и дуга плавящегося электрода. Этот процесс, позволяющий выполнять сварку толстостенных конструкций, за рубежом получил название Plasma-MIG.

В работах [47–50] приведены результаты исследования процесса гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов системы Al–Mg. Такой способ позволяет снизить массу используемой сварочной проволоки на 13 %, погонную энергию – на 20–40 %, остаточные деформации – на 25–40 % (по сравнению с импульсной дуговой сваркой плавящимся электродом). При этом прочностные характеристики повышаются. Кроме того, использование гибридного способа способствует повышению скорости сварки и, следовательно, ее производительности.

Оборудование для плазменной сварки

Плазменные установки состоят из плазмотрона (плазменной горелки), источника питания, механизма подачи присадочной проволоки, механизма перемещения плазмотрона, блока управления процессом, газового оборудования и системы охлаждения [51].

Плазмотрон включает два основных узла – электродный и сопловой. По типу рабочего процесса все многочисленные схемы плазмотронов можно разделить на три группы:

- плазмотроны с вихревой стабилизацией дуги;
- плазмотроны с магнитной стабилизацией дуги;
- плазмотроны со стабилизацией дуги стенками канала [52].

Для сварки используют плазмотроны с двумя основными схемами действия:

- плазмотроны прямого действия, в которых одним из электродов является обрабатываемый материал. Такой источник нагрева получил название сжатой дуги;
- плазмотроны косвенного действия, в которых активные пятна дуги находятся на вольфрамовом электроде и внутренней или боковой поверхностях сопла. Значение внутреннего КПД таких горелок (при больших расходах газа) достигает 50–70 %. В плазмотронах с дугой косвенного действия источник нагрева получил название плазменной струи [53]. Он применяется для обработки неэлектропроводных материалов (при металлизации).

Источник питания должен иметь падающую (крутопадающую, вертикальную) внешнюю вольт-амперную характеристику и повышенное напряжение холостого хода (60–80 В).

Заключение

Анализ передового отечественного и зарубежного опыта в области плазменной сварки показал, что исследования в данном направлении активно ведутся во многих странах мира с момента изобретения данной технологии. Существует огромное разнообразие технологических вариантов использования плазменного источника нагрева, позволяющего соединять практически все металлические материалы в широком диапазоне толщин во многих отраслях промышленности. В настоящее время наиболее перспективным направлением развития технологии плазменной сварки является комбинированное и гибридное использование двух и более источников нагрева.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
2. Kablov E.N., Lukin V.I., Antipov V.V. et al. Efficiency of Using Filler Materials in Laser Welding of High-Strength Aluminium-Lithium Alloys // *Welding International*. 2017. Vol. 31. No. 9. P. 717–721.
3. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Тр. Всерос. науч.-практ. конф. «Сварка и безопасность». Якутск: ИФТПС СО РАН, 2012. С. 21–30.
4. Свиридов А.В., Скупов А.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Голев Е.В. Особенности создания неразъемных соединений из синтезированного материала марки ЭП648 // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.05.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-17-29.
5. Пантелеев М.Д., Бакрадзе М.М., Скупов А.А., Щербаков А.В., Белозор В.Е. Технологические особенности сварки плавлением алюминиевого сплава В-1579 // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 11–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-11-17.
6. Фомин В.М., Маликов А.Г., Оришич А.М., Антипов В.В., Клочков Г.Г., Скупов А.А. Влияние термической обработки на структуру сварных соединений листов из сплава В-1469 системы Al–Cu–Li, полученных лазерной сваркой // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 9–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-9-18.
7. Prasad K.S., Rao C.S., Rao D.N. Advances in Plasma Arc Welding: a review // *Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2012. Vol. 4. No. 1. P. 35–59.
8. Liu Z., Zhao Q., Li D. Study of hollow cathode penetrating arc welding technology // *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. Vol. 123. Is. 3. P. 382–384.
9. Эсибян Э.М. Воздушно-плазменная резка // *Автоматическая сварка*. 2000. № 12. С. 6–18.

10. Михайлов Б.И. Электродуговые генераторы пароводяной плазмы // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9. № 4. С. 597–612.
11. Васильев К.В. Особенности плазменно-дуговой резки в азотно-кислородных смесях (обзор) // Автоматическая сварка. 2000. № 12. С. 21–25.
12. Патон Б.Е., Гвоздецкий В.С., Дудко Д.А. и др. Микроплазменная сварка. Киев: Наукова думка, 1979. 248 с.
13. Нефедов Б.Б., Лялякин В.П. Развитие плазменной сварки и наплавки за рубежом // Сварочное производство. 1998. № 3. С. 21–27.
14. Переpletчиков Е.Ф. Плазменная наплавка // Сварщик. 2000. № 2. С. 8–11.
15. Балановский А.Е. Плазменные технологии в промышленности: состояние и перспективы // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 6. С. 9–14.
16. Сварка. Резка. Контроль: справочник в 2 т. / под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышева. М.: Машиностроение, 2004. Т. 1. 624 с.
17. Sahoo A., Tripathy S. Development in plasma arc welding process: a review // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 41. Part 2. P. 363–368.
18. Овчинников В.В., Дриц А.М., Расопчин Р.Н., Гуреева М.А. Современные тенденции развития технологии плазменной сварки алюминиевых сплавов // Машиностроение и инженерное образование. 2016. № 3 (48). С. 10–23.
19. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
20. Arc torch and process: pat. US 2806124A; filed 26.07.55; publ. 10.09.57.
21. Рыкалин Н.Н., Кулагин И.Д., Николаев А.В. Тепловые характеристики взаимодействия плазменной струи с нагреваемым телом // Автоматическая сварка. 1963. № 6. С. 3–13.
22. Мустаев З.Р., Сараев Р.С., Шихамиров Р.А. Аргодуговая и плазменная технологии сварки: технико-технологический анализ и экономическая оценка // Сб. тр. конф. «Исследование инновационного потенциала общества и формирование направлений его стратегического развития». Курск: ЮЗГУ, 2016. С. 172–176.
23. Петров А.В., Славин Г.А., Вербицкий В.Г. Исследование тепловой эффективности процесса сварки сжатой дугой тонколистового материала // Сварочное производство. 1967. № 2. С. 6–8.
24. Матюшкин Б.А., Денисов В.И., Толкачев А.А., Чавдаров А.В., Лялякин В.П. Плазменная сварка закрытой сжатой дугой // Сварочное производство. 2016. № 4. С. 37–39.
25. Бараев А.В., Ильинский А.М., Кулик В.И., Неровный В.М. Оборудование и технологии сварки термоэмиссионным полым катодом в вакууме // Сварочное производство. 2017. № 5. С. 37–41.
26. Способ импульсной дуговой сварки полым катодом в вакууме: а. с. SU 1365513 A1; заявл. 06.08.85; опубл. 20.06.05.
27. Неровный В.М. Повышение эффективности и ресурса работы полого катода для сварки в вакууме // Сварка и диагностика. 2011. № 1. С. 6–12.
28. Baraev A.V., P'inskii A.M., Kulik V.I., Nerovnyi V.M. Equipment and technology for welding with a thermoemission hollow cathode in vacuum // Welding International. 2018. No. 32 (10). P. 667–671.
29. Анисимов Ю.А., Медовар Б.И., Патон Б.Е. и др. Сварка в СССР. М.: Наука, 1981. Т. 1: Развитие сварочной техники и науки о сварке. Технологические процессы, сварочные материалы и оборудование. 624 с.
30. Micro-Plasma-Lichtbogenschweissverfahren für die Verbindung sehr dünner Bleche // Schweisstechnik/Soudure. 1965. No. 12. P. 455–458.
31. Sharma A., Chaturvedi R., Saraswat M., Kalra R. Weld reliability characteristics of AISI 304L steels welded with MPAW (Micro Plasma Arc Welding) // Materials Today: Proceedings. 2022. No. 60. P. 1966–1972.
32. Szustaa J., Tüzünb N., Karakaş Ö. Monotonic mechanical properties of titanium grade 5 (6Al–4V) welds made by microplasma // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2019. No. 100. P. 27–38.

33. Baruah M., Prasad S.B., Tudu N. et al. Experimental investigation of Inconel welded joints formed by pulsed micro plasma welding // *Materials Today: Proceedings*. 2020. No. 33. P. 5751–5756.
34. Golanski D., Chmielewski T., Skowronska B., Rochalski D. Advanced Applications of Micro-plasma Welding // *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*. 2018. No. 5. P. 53–63.
35. Михайлов Б.И. Пароводяная плазма – оптимальнейшая среда для многих плазменных технологий // *Вестник ВСГУТУ*. 2013. № 6 (45). С. 77–82.
36. Пароводяной плазмотрон: пат. 2263564С1 Рос. Федерация; заявл. 22.03.04; опубл. 10.11.05.
37. Пароводяной плазмотрон: пат. 2268558С2 Рос. Федерация; заявл. 02.02.04; опубл. 20.01.06.
38. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянковский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб.: Политех. ун-т, 2013. 406 с.
39. Щицын Ю.Д., Гилев И.А., Белинин Д.С., Неулыбин С.Д., Баженов А.М. Плазменная сварка алюминиевых сплавов при работе двухдугового плазмотрона на токе обратной полярности // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2015. Т. 17. № 3. С. 61–70.
40. Овчинников В.В., Растопчин Р.Н. Плазменная сварка высокопрочных алюминиевых сплавов // *Научные технологии в машиностроении*. 2020. № 7 (109). С. 3–11.
41. Prasad K.S., Rao C.S., Rao D.N. Advances in Plasma Arc Welding: a review // *Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2012. Vol. 4. No. 1. P. 35–59.
42. Кривцун И.В., Бушма А.И., Хаскин В.Ю. Гибридная лазерно-плазменная сварка нержавеющей стали // *Автоматическая сварка*. 2013. № 3 (719). С. 48–52.
43. Шелягин В.Д., Оришич А.М., Хаскин В.Ю. и др. Технологические особенности лазерной, микроплазменной и гибридной лазерно-микроплазменной сварки алюминиевых сплавов // *Автоматическая сварка*. 2014. № 5. С. 35–41.
44. Hipp D., Mahrle A., Beyer E. et al. Thermal Efficiency Analysis for Laser-Assisted Plasma Arc Welding of AISI 304 Stainless Steel // *Materials*. 2019. No. 12. P. 1–14.
45. Бушма А.И. Современное состояние гибридной лазерноплазменной сварки (обзор) // *Автоматическая сварка*. 2015. № 8 (744). С. 20–27.
46. Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А. и др. Исследование технологических особенностей гибридной плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов // *Sciences of Europe*. 2016. No. 6-2 (6). P. 45–51.
47. Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А. и др. Особенности формирования швов при гибридной плазменно-дуговой сварке алюминиевых сплавов // *American Scientific Journal*. 2016. No. 5. P. 36–43.
48. Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А. и др. Изучение порообразования при гибридной плазменно-дуговой сварке алюминиевых сплавов // *Восточно-Европейский научный журнал*. 2016. Т. 12. № 16. С. 104–110.
49. Бабич А.А., Коржик В.Н., Хаскин В.Ю. и др. Исследование напряженно-деформированного состояния симметричных стыковых сварных соединений при автоматической гибридной сварке PLASMA-MIG // *Colloquium-journal*. 2020. No. 17-2 (69). P. 33–40.
50. Гринюк А.А., Коржик В.Н., Шевченко В.Е. и др. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов // *Автоматическая сварка*. 2015. № 11. С. 39–50.
51. Сварка в машиностроении: справочник в 4 т. М.: Машиностроение, 1978. Т. 1. 504 с.
52. Коротеев А.С., Миронов В.М., Свирчук Ю.С. Плазмтроны: конструкции, характеристики, расчет. М.: Машиностроение, 1993. 296 с.
53. Колганов Л.А. Сварочное производство: учеб. пособие. Ростов н/Д: Феникс, 2002. 512 с.

References

1. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
2. Kablov E.N., Lukin V.I., Antipov V.V. et al. Efficiency of Using Filler Materials in Laser Welding of High-Strength Aluminium-Lithium Alloys. *Welding International*, 2017, vol. 31, no. 9, pp. 717–721.

3. Kablov E.N., Lukin V.I., Ospennikova O.G. Welding and soldering in the aerospace industry. *All-Rus. scientific-practical conf. «Welding and Safety»*. Yakutsk: IFTPS SO RAN, 2012, pp. 21–30.
4. Sviridov A.V., Skupov A.A., Afanasev-Khodykin A.N., Golev E.V. Special aspects of manufacturing of fixed joints from synthesized material EP648. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 18, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-17-29.
5. Panteleev M.D., Bakradze M.M., Skupov A.A., Scherbakov A.V., Belozor V.E. Technological features of fusion welding of aluminum alloy V-1579. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 11–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-11-17.
6. Fomin V.M., Malikov A.G., Orishich A.M., Antipov V.V., Klochkov G.G., Skupov A.A. Heat treatment effect on structure of joint weld sheets from V-1469 alloy of Al–Cu–Li system manufactured by laser welding. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 9–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-9-18.
7. Prasad K.S., Rao C.S., Rao D.N. Advances in Plasma Arc Welding: a review. *Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 35–59.
8. Liu Z., Zhao Q., Li D. Study of hollow cathode penetrating arc welding technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 123, is. 3, pp. 382–384.
9. Esibyan E.M. Air-plasma cutting. *Avtomaticheskaya svarka*, 2000, no. 12, pp. 6–18.
10. Mikhailov B.I. Electric arc generators of steam-water plasma. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2002, vol. 9, no. 4, pp. 597–612.
11. Vasiliev K.V. Features of plasma-arc cutting in nitrogen-oxygen mixtures (review). *Avtomaticheskaya svarka*, 2000, no. 12, pp. 21–25.
12. Paton B.E., Gvozdetsky B.C., Dudko D.A. et al. *Microplasma welding*. Kyiv: Naukova dumka, 1979, 248 p.
13. Nefedov B.B., Lyalyakin V.P. Development of plasma welding and surfacing abroad. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1998, no. 3, pp. 21–27.
14. Perepletchikov E.F. Plasma surfacing. *Svarshchik*, 2000, no. 2, pp. 8–11.
15. Balanovsky A.E. Plasma technologies in industry: current state and prospects. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii*, 2007, no. 6, pp. 9–14.
16. *Welding. Cutting. Control: a reference book in 2 vols*. Ed. N.P. Aleshin, G.G. Chernyshev. Moscow: Mashinostroyeniye, 2004, vol. 1, 624 p.
17. Sahoo A., Tripathy S. Development in plasma arc welding process: a review. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 41, part 2, pp. 363–368.
18. Ovchinnikov V.V., Drita A.M., Rastopchin R.N., Gureeva M.A. Modern trends in the development of technology for plasma welding of aluminum alloys. *Mashinostroyeniye i inzhenernoye obrazovanie*, 2016, no. 3 (48), pp. 10–23.
19. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
20. *Arc torch and process*: pat. US 2806124A; filed 26.07.55; publ. 10.09.57.
21. Rykalin N.N., Kulagin I.D., Nikolaev A.V. Thermal characteristics of the interaction of a plasma jet with a heated body. *Avtomaticheskaya svarka*, 1963, no. 6, pp. 3–13.
22. Mustaev Z.R., Saraev R.S., Shikhamirov R.A. Argon-arc and plasma welding technologies: technical and technological analysis and economic assessment. *Paper of conf. "Research of the innovative potential of society and the formation of directions for its strategic development"*. Kursk: SWGU, 2016, pp. 172–176.
23. Petrov A.V., Slavin G.A., Verbitsky V.G. Investigation of the thermal efficiency of the process of welding with a compressed arc of thin sheet material. *Svarochnoye proizvodstvo*, 1967, no. 2, pp. 6–8.
24. Matyushkin B.A., Denisov V.I., Tolkachev A.A., Chavdarov A.V., Lyalyakin V.P. Plasma welding with a closed compressed arc. *Svarochnoye proizvodstvo*, 2016, no. 4, pp. 37–39.

25. Baraev A.V., Ilyinsky A.M., Kulik V.I., Nerovny V.M. Equipment and technologies for welding with a thermionic hollow cathode in vacuum. *Svarochnoye proizvodstvo*, 2017, no. 5, pp. 37–41.
26. *The method of pulsed arc welding with a hollow cathode in a vacuum*: certificate of authorship SU 1365513 A1; filed 06.08.85; publ. 20.06.05.
27. Irrovny V.M. Improving the efficiency and service life of the hollow cathode for welding in vacuum. *Svarka i diagnostika*, 2011, no. 1, pp. 6–12.
28. Baraev A.V., Il'inskii A.M., Kulik V.I., Nerovnyi V.M. Equipment and technology for welding with a thermoemission hollow cathode in vacuum. *Welding International*, 2018, no. 32 (10), pp. 667–671.
29. Anisimov Yu.A., Medovar B.I., Paton B.E. et al. *Welding in the USSR*. Moscow: Nauka, 1981, vol. 1: Development of welding technology and the science of welding. Technological processes, welding materials and equipment, 624 p.
30. Micro-Plasma-Lichtbogenschweißverfahren für die Verbindung sehr dünner Bleche. *Schweißtechnik/Soudure*, 1965, no. 12, pp. 455–458.
31. Sharma A., Chaturvedi R., Saraswat M., Kalra R. Weld reliability characteristics of AISI 304L steels welded with MPAW (Micro Plasma Arc Welding). *Materials Today: Proceedings*, 2022, no. 60, pp. 1966–1972.
32. Szustaa J., Tüzünb N., Karakaş Ö. Monotonic mechanical properties of titanium grade 5 (6Al–4V) welds made by microplasma. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2019, no. 100, pp. 27–38.
33. Baruah M., Prasad S.B., Tudu N. et al. Experimental investigation of Inconel welded joints formed by pulsed micro plasma welding. *Materials Today: Proceedings*, 2020, no. 33, pp. 5751–5756.
34. Golanski D., Chmielewski T., Skowronska B., Rochalski D. Advanced Applications of Microplasma Welding. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 2018, no. 5, pp. 53–63.
35. Mikhailov B.I. Steam-water plasma is the most optimal environment for many plasma technologies. *Vestnik VSGUTU*, 2013, no. 6 (45), pp. 77–82.
36. *Steam-water plasma torch*: pat. 2263564C1 Rus. Federation; filed 22.03.04; publ. 10.11.05.
37. *Steam-water plasma torch*: pat. 2268558C2 Rus. Federation; filed 02.02.04; publ. 20.01.06.
38. Sosnin N.A., Ermakov S.A., Topolyansky P.A. *Plasma technologies. Guide for engineers*. St. Petersburg: Polytech. Univ., 2013, 406 p.
39. Shchitsyn Yu.D., Gilev I.A., Belinin D.S., Neulybin S.D., Bazhenov A.M. Plasma welding of aluminum alloys during the operation of a two-arc plasma torch on a current of reverse polarity. *Vestnik PNIPU. Mashinostroyeniye, materialovedeniye*, 2015, vol. 17, no. 3, pp. 61–70.
40. Ovchinnikov V.V., Rastopchin R.N. Plasma welding of high-strength aluminum alloys. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii*, 2020, no. 7 (109), pp. 3–11.
41. Prasad K.S., Rao C.S., Rao D.N. Advances in Plasma Arc Welding: a review. *Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 35–59.
42. Krivtsun I.V., Bushma A.I., Khaskin V.Yu. Hybrid laser-plasma welding of stainless steels. *Avtomaticheskaya svarka*, 2013, no. 3 (719), pp. 48–52.
43. Shelyagin V.D., Orishich A.M., Khaskin V.Yu. Technological features of laser, microplasma and hybrid laser-microplasma welding of aluminum alloys. *Avtomaticheskaya svarka*, 2014, no. 5, pp. 35–41.
44. Hipp D., Mahrle A., Beyer E. et al. Thermal Efficiency Analysis for Laser-Assisted Plasma Arc Welding of AISI 304 Stainless Steel. *Materials*, 2019, no. 12, pp. 1–14.
45. Bushma A.I. Modern state of hybrid laser-plasma welding (review). *Avtomaticheskaya svarka*, 2015, no. 8 (744), pp. 20–27.
46. Korzhik V.N., Khaskin V.Yu., Grinyuk A.A. et al. Investigation of the technological features of hybrid plasma-arc welding of aluminum alloys. *Sciences of Europe*, 2016, no. 6-2 (6), pp. 45–51.
47. Korzhik V.N., Khaskin V.Yu., Grinyuk A.A. et al. Features of the formation of welds in hybrid plasma-arc welding of aluminum alloys. *American Scientific Journal*, 2016, no. 5, pp. 36–43.
48. Korzhik V.N., Khaskin V.Yu., Grinyuk A.A. et al. Study of pore formation in hybrid plasma-arc welding of aluminum alloys. *Vostochno-Evropeyskiy nauchnyy zhurnal*, 2016, vol. 12, no. 16, pp. 104–110.

49. Babich A.A., Korzhik V.N., Khaskin V.Yu. et al. Investigation of the stress-strain state of symmetrical butt welded joints in automatic hybrid welding PLASMA-MIG. *Colloquium-journal*, 2020, no. 17-2 (69), pp. 33–40.
50. Grinyuk A.A., Korzhik V.N., Shevchenko V.E. et al. Main trends in the development of plasma-arc welding of aluminum alloys. *Avtomaticheskaya svarka*, 2015, no. 11, pp. 39–50.
51. *Welding in mechanical engineering: a reference book in 4 vols.* Moscow: Mashinostroenie, 1978, vol. 1, 504 p.
52. Koroteev A.S., Mironov V.M., Svirchuk Yu.S. *Plasmatrons: designs, characteristics, calculation.* Moscow: Mashinostroenie, 1993, 296 p.
53. Kolganov L.A. *Welding production: textbook.* Rostov-on-Don: Phoenix, 2002, 512 p.

Информация об авторах

Ходакова Елизавета Александровна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Свиридов Александр Владимирович, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Скупов Алексей Алексеевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Стельникович Анфиса Юрьевна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Elizaveta A. Khodakova, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander V. Sviridov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey A. Skupov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anfisa Yu. Stelnikovich, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 30.06.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 24.08.2022.

The article was submitted 30.06.2022; approved and accepted for publication after reviewing 24.08.2022.