

На правах рукописи



Муругов Дмитрий Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СВАРКИ АЛЮМИНИЯ
И СПЛАВА АМЦ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ДУГУ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С
ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМОЙ ИМПУЛЬСОВ**

2.5.8. Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Волгоград – 2026

Работа выполнена на кафедре «Оборудование и технология сварочного производства» Волгоградского государственного технического университета.

Научный руководитель доктор технических наук, доцент
САВИНОВ Александр Васильевич

Официальные оппоненты: **ЕЛЬЦОВ Валерий Валентинович**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», кафедра «Сварка обработка, материалов давлением и родственные процессы», заведующий;

ЗЕРНИН Евгений Александрович
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», кафедра «Сварка судовых конструкций», заведующий.

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону).

Защита состоится «08» октября 2026 г. в 12⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.2.282.02, созданного на базе Волгоградского государственного технического университета, по адресу: 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28, зал заседаний ученого совета (ауд. 209).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградского государственного технического университета и на сайте [www.vstu.ru](https://www.vstu.ru/upload/iblock/342/342fec649f57efc2d5ff329524e158e2.pdf) по ссылке <https://www.vstu.ru/upload/iblock/342/342fec649f57efc2d5ff329524e158e2.pdf>

Автореферат диссертации разослан «15» июля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Хаустов Святослав Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современные тенденции развития машиностроения обуславливают необходимость внедрения высокопроизводительных технологий дуговой сварки неплавящимся электродом. Алюминиевые сплавы по объемам применения в качестве конструкционных материалов занимают второе место после сплавов на основе железа, причем область их применения неуклонно расширяется. Это объясняется как доступностью этих материалов, так и уникальным комплексом свойств (низкая плотность $\sim 2,7 \text{ г/см}^3$, относительно высокий предел прочности, коррозионная стойкость), обуславливающим предпочтительное применение алюминия и его сплавов в аэрокосмической технике, автомобилестроении, судостроении, химическом аппаратостроении, строительстве и других отраслях.

Исследованию свойств дуги с неплавящимся электродом посвящены работы Паршина С.Г., Порицкого П.В., Лысака В.И., Полесского О.А., Казакова Ю.В., Потапова А.Н., Ковалева И.М., Григоренко В.В., Савинова А.В., Ельцова В.В., Зернина Е.А., Советкина Д.Э., Косовича В.А., Чудина А.А., Бадьянова Б.Н., Ленивкина В.Я., Полетаева Ю.В., Loureiro A. R., Sarrafi R., Kumar N., Sanbao L., Watanabe T., Chao C., Xie W., Xiaoyu C., Sun Q. и других ученых.

Основная причина, ограничивающая применение аргонодуговой сварки неплавящимся электродом для толстолистовых изделий, связана с невысокой производительностью, обусловленной относительно низкой тепловой эффективностью дуги и нарушением формирования швов (образование подрезов, пор, наплывов, кратеров и др.) на высоких значениях силы тока и скорости сварки. Образование данных дефектов значительно снижает механические характеристики сварных соединений и, как следствие, приводит к преждевременному выходу конструкции из строя. При этом чувствительность процесса сварки к образованию дефектов проплавления (непровары, прожоги), вызываемых, например, случайными изменениями параметров режима сварки на геометрию шва, возрастает с увеличением скорости перемещения дуги.

Одним из существующих способов повышения производительности сварки является применение активирующих флюсов и галоидосодержащих газов (Паршин С.Г., Бадьянов Б.Н., Loureiro A. R.), обеспечивающих сжатие дуги и, как следствие, повышение концентрации вводимой энергии. Однако применение активирующих флюсов значительно влияет на стойкость рабочего участка электрода и малоэффективно при значениях сварочного тока свыше 270 А ввиду того, что флюс переходит в состояние пара и удаляется из сварочной зоны, не оказывая влияния на дугу.

Автор выражает глубокую благодарность акад. РАН Лысаку В.И. и чл.-корр. РАН Кузьмину С.В. за участие в формировании направления и методологической подготовке исследований, а также помощи при анализе и обсуждении полученных результатов.

Согласно исследованиям (Sanbao L., Chao C., Xie W., Xiaoyu C., Чудина А.А.) при воздействии высокочастотных волн на дугу происходит ее сжатие, что повышает концентрацию тепловой энергии в зоне сварки, вследствие чего увеличивается площадь проплавления, а также происходит измельчение микроструктуры благодаря эффекту кавитации, создающим новые центры кристаллизации. Однако данные о механизме взаимодействия плазмы и высокочастотных волн в литературе отсутствуют, также как и систематизированные данные о взаимосвязях процессов, происходящих в дуге переменного тока от параметров горения дуги и УЗ колебаний.

Таким образом, с целью повышения производительности и качества сварных соединений при сварке неплавящимся электродом необходимо комплексное изучение воздействия параметров ультразвуковых колебаний и разнополярных импульсов тока прямоугольной формы на свойства дуги, глубину проплавления, качество катодной очистки, а также на микроструктуру и механические свойства сварных швов алюминиевых сплавов.

Актуальность диссертационной работы также подтверждается ее выполнением в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (проект № FZUS-2026-0003 на основании Соглашения № 075-03-2026-526 от 16.01.2026), гранта РНФ №23-13-00354 в 2023-2025 гг., а также гранта на фундаментальные и прикладные научные исследования, выполняемые молодыми учеными ВолгГТУ по программе «Приоритет-2030» по проекту №15/631-24. Автор (в составе коллектива) удостоен серебряной медали имени А.Ф. Дэвиса Американского сварочного общества (AWS) за лучшую статью (Влияние ультразвуковых колебаний на электрофизические свойства дуги с неплавящимся электродом) в номинации «Проектирование сварочных процессов, машин и оборудования», опубликованную в 2025 г. в журнале AWS Welding Journal.

Целью работы является повышение производительности и качества сварки неплавящимся электродом на переменном токе алюминия и сплава АМц на основе исследования взаимосвязей параметров ультразвуковых колебаний и разнополярных импульсов тока прямоугольной формы, энергетических и электрофизических характеристик дуги и ее термосилового воздействия на свариваемый материал.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**:

1. Определить влияние сфокусированного ультразвукового поля на изменение формы дуги с неплавящимся электродом.
2. Исследовать влияние мощности и положения сфокусированных ультразвуковых колебаний на электрофизические и энергетические характеристики дугового разряда.
3. Выявить зависимость термосилового воздействия дуги на сварочную ванну от интенсивности высокочастотных акустических волн.
4. Определить влияние ультразвуковых колебаний на технологические свойства дуги переменного тока с ПФИ (величина катодной очистки, проплавляющая способность, структура и свойства сварных соединений).

5. Разработать пути и средства повышения производительности и качества формирования сварных швов при сварке на переменном токе неплавящимся электродом алюминия и его сплавов с воздействием ультразвуковых колебаний.

Научная новизна работы заключается в установлении взаимосвязей параметров ультразвуковых колебаний и разнополярных импульсов прямоугольной формы с электрофизическими и энергетическими характеристиками дуги переменного тока, геометрией и качеством формирования сварного шва при сварке неплавящимся электродом алюминия и сплава АМц.

Впервые обнаружена зона разрежения в анодной приэлектродной области дуги при воздействии ультразвуковых колебаний на неё и соответствующее падение напряжения в этой области на 0,5-0,8 В, что приводит к снижению температуры рабочего участка неплавящегося электрода. Это позволяет увеличить стойкость электрода на 20% и повысить производительность сварки наряду с высоким качеством катодной очистки окисной пленки на поверхности алюминия.

Выявлено, что применение ультразвуковых колебаний мощностью 20-140 Вт при сварке на высоких значениях тока ($I_{св.} \geq 300\text{А}$) и скорости ($V_{св.} \geq 20$ м/ч) стабилизирует положение активного пятна дуги на поверхности алюминия, препятствуя ее отклонению от оси электрода, что способствует улучшению качества формирования шва на малых значениях длительности импульсов обратной полярности в периоде переменного тока ($\tau_{обр}/T \leq 0,15$).

Показано, что воздействие на дугу ультразвуковых колебаний приводит к ее сжатию и повышению пространственной устойчивости, что увеличивает эффективный коэффициент полезного действия η_i при сварке неплавящимся электродом на переменном токе с прямоугольной формой импульсов на 5-12%, способствуя росту глубины проплавления при сварке алюминия и сплава АМц в 1,3-1,5 раза.

Теоретическая значимость. Получены результаты о взаимосвязи параметров горения дуги и ультразвуковых колебаний с электрофизическими и энергетическими характеристиками дуги, формированием, структурой, и механическими свойствами сварных соединений алюминия и его сплавов. Расширены представления о механизмах влияния высокочастотных волн на формирование швов, стойкость неплавящегося электрода и эффективный КПД сварки. Обоснованы теоретические подходы к управлению качеством сварных соединений за счёт регулирования параметров сварки и УЗК.

Практическая значимость результатов исследования. На уровне изобретения разработан способ сварки неплавящимся электродом алюминия и его сплавов на переменном токе с импульсами прямоугольной формы, обеспечивающий высокую производительность процесса (пат. РФ №2817683).

На основе результатов исследований разработаны технологические рекомендации по сварке неплавящимся электродом на переменном токе алюминиевых сплавов в аргоне с воздействием на дугу ультразвуковых

колебаний, позволяющие повысить производительность процесса и качество получаемых сварных соединений.

Разработанная технология сварки неплавящимся электродом с воздействием ультразвуковых колебаний была апробирована в условиях предприятия ООО ПТП «Поршень» при производстве дыхательных клапанов систем очистки и вентиляции воздуха из сплава АМц, что позволило увеличить производительность на 40%.

Методология и методы исследования. Изучение силового воздействия дуги и ультразвуковых колебаний выполнялись на специальном стенде. Основу измерительной системы составили аналитические весы ВСЛ-60, обеспечивающие точность измерений до 0.0001 г. Цифровую фото- и видеосъемку сварочной дуги проводили с помощью высокоскоростных камер Nikon J1 с частотой 1/400 и 1/1400 кадров в секунду и Contrastech iSpeedy50MT13M-SE с частотой до 1/50000 кадров в секунду. Осциллографирование напряжения переменного тока выполняли с помощью прибора FNIRSI 1014D. Измерение амплитуды ультразвуковых колебаний производили с использованием лазерного доплеровского вибрметра VibroFlex. Исследование полученных образцов проводили с использованием оптической (оптический микроскоп Carl Zeiss Axiovert 40 MAT) и электронной (сканирующий электронный микроскоп Versa 3D DualBeam) микроскопии.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методики проведения исследований.
2. Результаты исследований воздействия ультразвуковых колебаний на форму дуги с неплавящимся электродом.
3. Результаты исследований электрофизических и энергетических свойств дугового разряда, а также его термосилового воздействия на расплавленный металл сварочной ванны.
4. Результаты исследований технологических свойств дуги переменного тока.
5. Технологические рекомендации по сварке неплавящимся электродом в аргоне с воздействием на дугу ультразвуковых колебаний.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается:

- применением апробированных средств измерений и методов математической обработки данных;
- согласованностью полученных результатов с современными научными представлениями.

Основные результаты диссертационного исследования были представлены на международных и всероссийских конференциях: «Сварка и диагностика» имени академика РАН Н.П. Алёшина (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва – 2024, 2026), XXVI научно-практическая конференция «Трубы-2025» (РусНИТИ, Челябинск), «Новые материалы и технологии в машиностроении» (Брянск – 2021, 2022, 2023), «Актуальные вопросы науки и образования» (Москва, 2024), «Достижения науки и технологий-ДНиТ-11-2023» (Красноярск, 2023), «Экспериментальные и теоретические исследования в современной

науке» (Новосибирск, 2022), «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2021), «Технические и естественные науки» (Санкт-Петербург, 2020), а также на XXVI, XXVII, XXVIII и XXIX (II премия) XXX региональных конференциях молодых исследователей Волгоградской области, ежегодных внутривузовских конференциях ВолгГТУ (2021-2026 гг.), XIII и XIV (III премия) научно-технических конференциях ОАО «Волгограднефтемаш» (2023, 2024) и научных семинарах кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ВолгГТУ, г. Волгоград.

Личный вклад автора. Все результаты, приведенные в диссертации, получены либо самим автором, либо в соавторстве при его непосредственном участии, что отражено в опубликованных работах. Автору принадлежит получение, анализ и обобщение материалов, на базе которых обоснованы научные положения и выводы по результатам диссертационной работы.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 60 печатных работ, среди которых 2 статьи, индексируемая в базах Scopus и Web of Science, 12 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 8 статей в журналах RSCI, а также 3 патента РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 119 наименований, и приложения. Основная часть работы содержит 147 страниц машинописного текста, 94 рисунка, 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертационного исследования и его научная новизна, показана практическая значимость полученных результатов и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ научно-технической литературы, рассмотрены способы увеличения производительности сварки неплавящимся электродом, выявлены проблемы сварки алюминиевых сплавов. Согласно исследованиям процессов аргодуговой сварки неплавящимся электродом существенное влияние на качество формирования сварного шва оказывает силовое воздействие и пространственная устойчивости дуги. Показано, что при воздействии мощного акустического поля, формируемого плоским излучателем, происходит повышение давления дуги и, в результате, увеличение глубины проплавления. На основе проведенного литературного обзора сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе приведены методики исследования силового воздействия дуги, измерения амплитуды УЗ колебаний, определение формы и строения дуги переменного тока, а также методы исследований влияния УЗК на физические и энергетические свойства дуги с прямоугольной формой импульсов (ПФИ).

В третьей главе показаны результаты исследования влияния ультразвуковых колебаний на форму дуги, а также на электрофизические и энергетические характеристики дугового разряда.

Интенсивность ультразвука, излучаемого пьезоэлектрическим преобразователем, обычно невелика, поэтому, если в некотором ограниченном объеме требуется получить ультразвук более высоких интенсивностей, его фокусируют, используя излучатели с плосковогнутой излучающей поверхностью. Возможность фокусирования ультразвука в небольшой по размерам фокальной области создает условия для локального высокоэнергетического воздействия на определенные участки без каких-либо существенных влияний на окружающие элементы. Благодаря фокусированию ультразвука можно сформировать заданные характеристики направленности ультразвуковых колебаний и управлять ими. Как показывают результаты экспериментов, наибольшая амплитуда и интенсивность ультразвуковых колебаний при частоте 20,8 кГц наблюдается при мощности $P_{УЗК} = 20$ Вт, а на частотах 22,8 и 25,2 кГц – при 60 Вт (рис. 1). По-видимому, для данных геометрических параметров фокусирующей линзы, применяемой в исследованиях, на этих режимах происходит выход УЗК на резонансный режим работы.

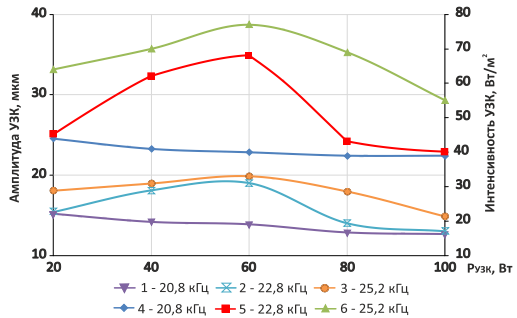


Рис. 1. Влияние мощности и частоты ультразвуковых колебаний на их амплитуду и интенсивность: 1-3 - амплитуда УЗК; 4-6 - интенсивность УЗК

При частоте ультразвуковых колебаний 25,2 кГц интенсивность УЗК выше, однако, как показали исследования, глубина проплавления по сравнению с $F_{УЗК}=22,8$ кГц при этом практически не изменяется. Кроме того, при данной частоте наблюдались перегрев линзы и нестабильная её работа, поэтому для данной конструкции ультразвукового преобразователя оптимальной является частота 22,8 кГц.

Измерение напряжения прямой и обратной полярности дуги с воздействием УЗК и без него при изменении силы сварочного тока и длительности обратной полярности показало, что при всех режимах сварки дуга с УЗК имеет большие значения напряжения на прямой $U_{пр}$ и обратной $U_{обр}$ полярности, а также действительного напряжения на дуге $U_{д.}$, что говорит об увеличении ее тепловой мощности по сравнению с дугой без УЗК.

Вольт-амперные характеристики дуги переменного тока с ПФИ имеют в исследованном диапазоне токов возрастающий характер; при любом значении I_{θ} при воздействии ультразвука напряжения ($U_{пр}$, $U_{обр}$, $U_{д.}$) повышаются на 1 ... 2 В.

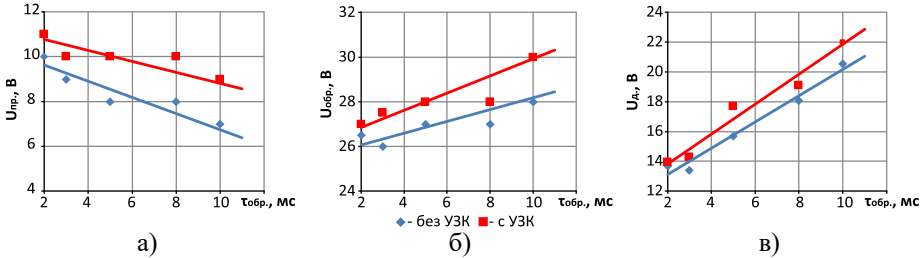


Рис. 2. Влияние длительности импульсов тока обратной полярности на напряжение дуги с ПФИ: а) напряжение в импульсах прямой полярности; б) напряжение в импульсах обратной полярности; в) действительное напряжение на дуге ($F_{\text{УЗК}} = 22,8$ кГц; $P_{\text{УЗК}} = 60$ Вт; $I_{\text{св.}} = 150$ А; $f = 50$ Гц; $L_{\text{д.}} = 3$ мм; $d_{\text{эл.}} = 4$ мм)

Напряжение дуги ПФИ зависит не только от величины тока, но и от длительности импульсов обратной полярности $\tau_{\text{обр}}$ (при неизменной частоте): с ростом $\tau_{\text{обр}}$ напряжение $U_{\text{д}}$ и, в меньшей мере, $U_{\text{обр}}$ увеличивается, а $U_{\text{пр}}$ — уменьшается, с воздействием ультразвуковых колебаний значения напряжения $U_{\text{пр}}$, $U_{\text{обр}}$ и $U_{\text{д}}$ при всех значениях $\tau_{\text{обр}}$ больше на 1...2 В, чем у дуги без УЗК (рис. 2).

Воздействие ультразвуковых колебаний на дугу приводит к уменьшению размеров активных пятен с 2,0 до 1,7 мм (у электрода) и с 3,3 до 2,0 мм (на изделии) при силе тока 100 А, а ее пространственная устойчивость повышается. Однако дальнейшее увеличение мощности ультразвуковых колебаний $P_{\text{УЗК}} \geq 140$ Вт приводит к тому, что происходит отклонение дуги от оси электрода, и блуждание её активного пятна на поверхности изделия (рис. 3), что служит причиной появления дефектов формирования шва.

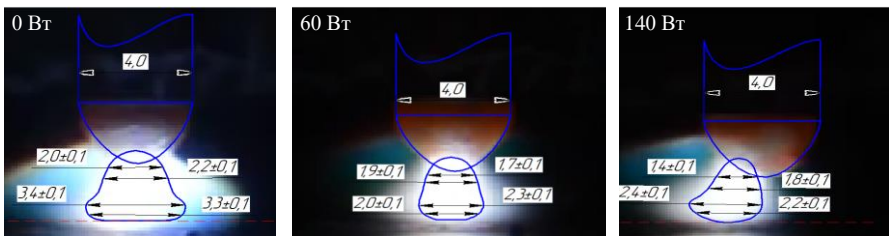


Рис. 3. Форма дуги переменного тока в импульсе прямой полярности: $F_{\text{УЗК}} = 22,8$ кГц; $I_{\text{св.}} = 100$ А; $\tau_{\text{обр.}} = 3$ мс; $f = 50$ Гц; $L_{\text{д.}} = 3$ мм; расход газа 18-20 л/мин

Проведенный анализ изменения формы дуги переменного тока при воздействии ультразвука показал, что дуга с УЗК более яркая, и можно предположить, что происходит увеличение скорости движения заряженных частиц, повышение температуры дуги и плотности частиц на единицу объема, приводящее к росту напряжения и, как следствие, увеличению её термосилового воздействия на сварочную ванну.

Из полученных результатов съемки профиля дуги видно, что в момент смены полярности наблюдаются светящиеся активные пятна на электроде и изделии. В то же время столб дуги почти незаметен вследствие малого излучения. Дуга с ультразвуком сжимается и имеет более стабильное положение в пространстве (рис. 4). При этом наблюдается улучшение катодной очистки поверхности сварного шва, когда дуга по своим характеристикам близка к дуге постоянного тока прямой полярности, также увеличивается глубина проплавления на 30-40%. С увеличением $\tau_{обр.}$ ширина катодной очистки увеличивается, однако глубина проплавления падает.

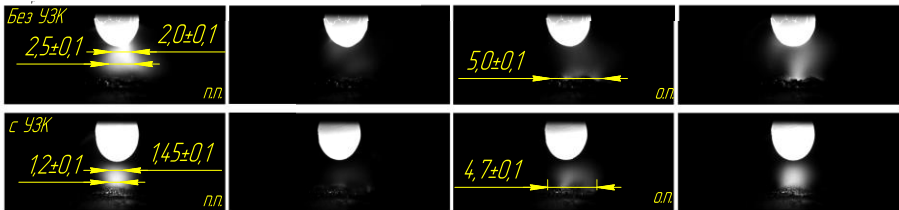


Рис. 4. Форма дуги переменного тока в период прямой (п.п.) и обратной полярности (о.п.): $F_{узк.} = 22,8$ кГц; $P_{узк.} = 60$ Вт; $I_{св.} = 100$ А; $\tau_{обр.} = 18$ мс; $f = 50$ Гц

Было обнаружено, что при воздействии ультразвуковых колебаний в анодной области дуги снижается яркость, что говорит о более низкой температуре и давлении в данной области, в то время как для областей сжатия ультразвуковой волны характерны яркие области дуги с более высокими давлением и температурой.

Эффективность нагрева дугой ПФИ при сварке алюминия оценивали эффективным КПД η_u , термическим КПД η_t и полным КПД η_{np} . Для их определения был выполнен ряд экспериментов.

С увеличением $\tau_{обр.}$ эффективный КПД снижался (рис. 5, б), поскольку большое количество энергии при этом передается электроду. Полученные значения эффективного КПД дуги находились в диапазоне 0,4÷0,6. При всех значениях $\tau_{обр.}$ эффективный КПД η_u у дуги с воздействием ультразвуковых колебаний увеличивался на 5 ... 12%, чем без них.

Значительно снижается термический КПД сварки с увеличением длительности импульсов тока обратной полярности, что связано с уменьшением площади проплавления. В то же время, у дуги с воздействием ультразвука значения термического КПД увеличиваются на 5 ... 15% (в зависимости от длительности импульсов тока обратной полярности), чем в случае его отсутствия.

Полный тепловой КПД, характеризующий полную эффективность процесса проплавления металла дугой, находится в диапазоне 0,08 ... 0,45. При $\tau_{обр.} = 2$ мс (при $f = 50$ Гц), что близко к дуге постоянного тока прямой полярности, получены наибольшие значения $\eta_{np} = 0,38$ без УЗК. Следовательно, такая часть от эффективной тепловой мощности, вводимой дугой в изделие затрачивается на

проплавление изделия. Остальная же часть тепловой мощности (62 %) представляет потери на перегрев металла в зоне проплавления и подогрев основного металла вне этой зоны. При тех же параметрах горения дуги с воздействием ультразвуковых колебаний полный КПД составляет 0,45, что свидетельствует о снижении потерь тепловой мощности дуги.

Существенно снижается полный КПД $\eta_{np.}=0,08$ при $\tau_{обр.}=8$ мс, что близко к дуге синусоидального переменного тока; большая часть тепла уходит на электрод, и лишь малая часть вводится в изделие. По этой причине при сварке толстолистовых изделий необходимо задавать параметр с минимальными значениями $\tau_{обр.}/T=0,1 \dots 0,2$.

Наравне с параметрами горения дуги параметры ультразвуковых колебаний имеют существенную практическую значимость - их изучение открывает возможности для оптимизации сварочного процесса, увеличения производительности и повышения качества сварных соединений. На рис. 5 представлены графики зависимости эффективного КПД от мощности ультразвука (а) и длительности импульсов тока обратной полярности (б). При мощности ультразвука $P_{узк}=60$ Вт достигается наибольшее значение эффективного КПД, а дальнейшее увеличение электрической мощности приводит к снижению энергетических характеристик процесса - это обусловлено, во первых, снижением эффективности воздействия высокочастотного поля при мощности от 60 до 120 Вт, а во вторых, нарушением пространственной устойчивости дуги при $P_{узк}>140$ Вт, когда наблюдается блуждание активного пятна по поверхности изделия, что приводит к нарушению формирования сварного шва. В результате происходит значительное увеличение напряжения на дуге, а также возрастают потери тепла, что существенно снижает значение эффективного КПД дуги.

По результатам экспериментов установлено, что оптимальная мощность ультразвуковых колебаний составляет 60 Вт. При данном значении получено наибольшее значение глубины проплавления, а термический КПД составил $\eta_t=0,7$, что свидетельствует о том, что 70% эффективной тепловой мощности $q_{и.}$ вводимой дугой в изделие, расходуется на проплавление, что на 10% больше, чем при обычной сварке неплавящимся электродом.

Обобщая изложенные результаты, можно заметить, что с точки зрения эффективности нагрева свариваемого металла следует выбирать режим с минимальными значениями $\tau_{обр.}$, которым соответствуют максимальные значения $\eta_{и.}$

Несмотря на снижение эффективного КПД сварки при увеличении силы тока, глубина проплавления в большей степени определяется термическим КПД. Поэтому для повышения производительности целесообразно использовать максимально допустимые значения сварочного тока. При сварке с ультразвуковыми колебаниями эффективный КПД возрастает за счёт более высокой концентрации теплового потока, вводимого дугой в изделие.

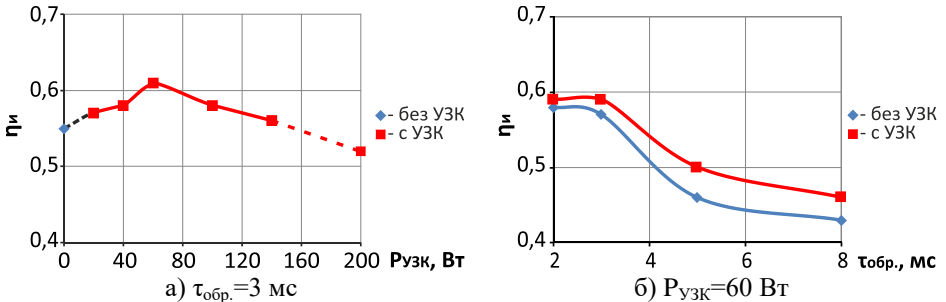


Рис. 5. Влияние мощности УЗК (а) и длительности импульсов тока обратной полярности (б) на эффективный КПД сварки: $F_{\text{УЗК}}=22,8$ кГц; $I_{\text{св.}}=150$ А; $f=50$ Гц; $L=3$ мм

При воздействии ультразвуковых колебаний происходит контрагирование дугового разряда, что приводит к повышению концентрации заряженных частиц и увеличению напряжения на дуге, распределению источника тепла по пятну меньшей площади и, в итоге, к повышению удельного теплового потока в изделии

Изменение частоты переменного тока дуги с ПФИ незначительно влияет на её энергетические характеристики: наблюдаются лишь незначительные отклонения величин $\eta_{\text{д}}$ и $\eta_{\text{пр}}$ от средних значений. Что касается эффективного КПД $\eta_{\text{д}}$, то во всем диапазоне изменений частоты (от 20 до 100 Гц) его величина составила $0,55 \div 0,58$ (при $I_{\text{св.}}=150$ А). Значительно увеличиваются энергетические характеристики дуги с воздействием ультразвуковых колебаний, эффективный КПД повышается до $0,6 \div 0,65$, что на 9-12% больше, чем при сварке без УЗК.

Таким образом, с воздействием ультразвука процесс сварки более эффективный за счет концентрации теплового потока дуги в изделии. Оптимальным параметром является соотношение $\tau_{\text{обр.}}/T=0,1-0,15$, при котором дуга с ПФИ близка к дуге постоянного тока прямой полярности и количество вводимого тепла в пластину больше по сравнению с дугой переменного тока синусоидальной формы, что позволяет получить шов с наибольшим проплавлением.

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния ультразвуковых колебаний на технологические свойства дуги переменного тока, на основе которых сделаны рекомендации по сварке алюминия и сплава АМц.

Известно, что проплавляющая способность дуги определяется не только тепловыми характеристиками, но и силовым воздействием на сварочную ванну. По этой причине при рассмотрении технологических характеристик дуги определенным интересом представляет величина силового воздействия на сварочную ванну и зависимость ее от параметров горения дуги и ультразвуковых колебаний. Силовым воздействием дуги на расплавленный металл сварочной ванны можно управлять, изменяя не только

вид защитного газа, конструкцию рабочего участка электрода, но и воздействуя на дугу сфокусированными ультразвуковыми колебаниями различной мощности, что приводит к значительному изменению давления дуги на жидкий металл сварочной ванны.

Установлено, что при мощности ультразвуковых колебаний $P_{УЗК} \sim 20$ Вт, давление p достигает значения $29,3 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$, а увеличение мощности приводит практически к линейному росту давления и достигает максимального значения $38,5 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$ при 100 Вт. Ранее было установлено, что наибольшая интенсивность УЗК получена при мощности ультразвука 60 Вт, по этой причине в большинстве экспериментов устанавливалось данное значение $P_{УЗК}$. Увеличение мощности ультразвуковых колебаний с 20 до 100 Вт приводит к повышению давления высокочастотных волн на $\sim 20\%$.

Измерение силового воздействия дуги показало, что при силе тока 30 А F_d на поверхность пластины без ультразвука $\approx 2 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$. Существенно повышается значение силового действия дуги ($37,4 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$) при силе тока 300 А. Данное значение было максимальным для выбранного диаметра электрода, поэтому дальнейшее увеличение тока не дало бы точных значений.

При $I_{св.} = 30$ А при воздействии ультразвуковых колебаний давление значительно увеличилось до $29,8 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$, а при $I_{св.} = 300$ А увеличивается в ~ 2 раза $66,8 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$.

Следует отметить, что на проплавляющую способность дуги ПФИ влияет соотношение длительностей импульсов $\tau_{пр.}$ и $\tau_{обр.}$. Так, при весьма малых значениях $\tau_{обр.}$ отмечается как высокая стойкость электродов, так и хорошая проплавляющая способность дуги. Однако в большинстве случаев режимы $\tau_{обр.} \leq 0,10$ неприемлемы по причине низкого качества катодной очистки свариваемой поверхности.

Измерение силового действия дуги при различной $\tau_{обр.}$ показало, что при $\tau_{обр.} = 2$ мс давление на поверхность пластины составляет $11,6 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$, а при

воздействии ультразвука оно увеличивается ~ 3 раза.

При $\tau_{обр.} = 10$ мс силовое воздействие составило $8,6 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$, при воздействии ультразвуковых колебаний оно увеличилось до $25,22 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$, (рис. 6).

По графику видно, что с увеличением $\tau_{обр.}$ происходит уменьшение давления дуги на сварочную ванну, что является одной из причин снижения

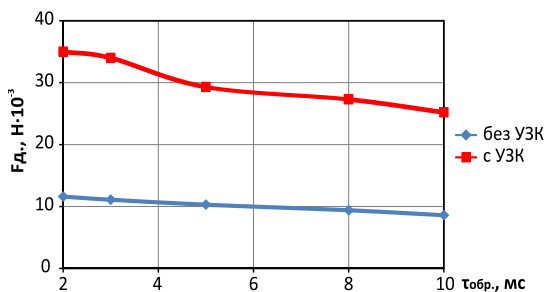


Рис. 6. Влияние УЗК на силовое воздействие дуги при различной длительности импульсов тока обратной полярности: $F_{УЗК} = 22,8 \text{ кГц}$; $I_{св.} = 150 \text{ А}$; $P_{УЗК} = 60 \text{ Вт}$; $f = 50 \text{ Гц}$; $l_k = 3 \text{ мм}$; $d_k = 4 \text{ мм}$

глубины проплавления при сварке алюминия и его сплавов с ростом длительности импульсов тока обратной полярности, причем при воздействии УЗК уменьшение F_d с повышением $\tau_{обр.}$ более значительно, чем без них.

Когда изделие является катодом, происходит разрушение тугоплавкой оксидной пленки Al_2O_3 положительными ионами плазмы дуги. Без воздействия УЗК требуемое качество катодной очистки наблюдается при относительной длительности импульсов тока обратной полярности $\tau_{пр.}/(\tau_{пр.}+\tau_{обр.})$ не менее 0,15. При $\tau_{обр.}=2$ мс (частота переменного тока $f=50$ Гц) качество катодной очистки оказывается неудовлетворительным: на отдельных участках шва и околошовной зоны наблюдается сажистый налет и фрагменты оксидной пленки. Применение ультразвуковых колебаний способствует дополнительному механическому воздействию на окисную пленку, в результате чего даже при малых длительностях обратной полярности в периоде переменного тока качество очистки оксидной пленки остается хорошим. Во всех случаях ширина зоны катодной очистки V_k превышает ширину проплавлений.

Как известно, в случае сварки неплавящимся электродом на постоянном токе прямой полярности сталей уже при силе тока 300 А и скорости сварки 25 м/ч образуется нарушение формирования шва и появляются дефекты в виде подрезов, бугров, раковин и т.д. Это является следствием чрезмерного силового воздействия дуги непосредственно под осью электрода, а также отставания активного пятна на изделии и, как следствие, отклонения дуги в хвостовую часть ванны.

На основе предположений, что дуга переменного тока с минимальными длительностями обратной полярности по своим свойствам приближена к дуге постоянного тока прямой полярности, были проведены эксперименты по наблюдению за формированием шва. Как видно из рис. 8, на высоких значениях тока (300 А) и скорости сварки (25 м/ч) при небольшой длительности $\tau_{обр.}$ (3 мс) без применения УЗК наблюдается нарушение формирования шва. Воздействие на дугу ультразвуковых колебаний мощностью 20-100 способствует стабилизации активного пятна на поверхности алюминиевого сплава, отсутствию отклонения дуги от оси электрода и, в итоге, качественному формированию шва. Однако дальнейшее увеличение мощности ультразвуковых колебаний $P_{УЗК} \geq 140$ Вт приводит к тому, что происходит отклонение дуги от оси электрода, и блуждание её активного пятна на поверхности изделия, что служит причиной появления дефектов (рис. 7).

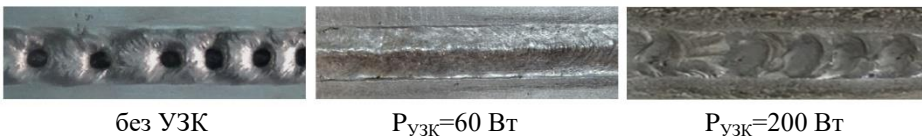


Рис. 7. Влияние ультразвуковых колебаний на формирование шва:
 $I_{св}=300\text{А}; f=50$ Гц; $V_{св.}=25$ м/ч; $F_{УЗК}=22,8$ кГц; $\tau_{обр.}=3$ мс; материал – АМц

Было обнаружено, что при $F_{УЗК}=20,8$ кГц максимальная глубина проплавления наблюдается при $P_{УЗК} = 20$ Вт, с увеличением мощности УЗК до 100 Вт она снижается практически в 2 раза, а ширина шва уменьшилась на 16%. На частотах УЗК 22,8 и 25,2 кГц наибольшая проплавляющая способность дуги зафиксирована на мощности 60 Вт и составила 2,38 и 2,35 мм, соответственно, что на 15-25 % больше, чем при $P_{УЗК}=100$ Вт.

Необходимо отметить, что параметры проплавлений, выполненных с воздействием на дугу ультразвуковых колебаний, значительно превосходят таковые без применения УЗК на любых режимах (в случае применения резонансных частот глубина проплавления повышается в 2,4 раза, ширина – до 1,5 раз).

На основе приведенных выше исследований произведена сварка пластин из алюминиевого сплава АМц толщиной 4 мм обычной сваркой с воздействием ультразвуковых колебаний и без них. Разделка кромок С2 по ГОСТ 14806-80, для УЗК сварка выполнялась за два прохода, в то время как с воздействием ультразвуковых колебаний сварку возможно выполнить за один проход (без присадочного материала).

В ходе проведения экспериментов было обнаружено, что с воздействием ультразвуковых колебаний в момент обратной полярности у электрода образуется зона разрежения и соответствующее падение напряжения в этой области на 0,5-0,8 В, что приводит к снижению температуры рабочего участка неплавящегося электрода. Это позволяет увеличить стойкость электрода на 20% и повысить производительность. По-видимому, снижение значения напряжения в области разрежения связано с уменьшением плотности заряженных частиц (при неизменном токе это соответствует уменьшению омического падения напряжения $U=I \cdot R$, где R растёт из-за снижения плотности заряженных носителей), что в итоге снижает температуру рабочего участка электрода.

При $\tau_{обр.}=18$ мс, что близко к дуге постоянного тока обратной полярности, без воздействия ультразвуковых колебаний происходит практически моментальное нарушение геометрии рабочего участка за 6-8 с. (рис. 8), стабильность горения дуги существенно ухудшается и, в результате, происходит оплавление рабочего участка неплавящегося электрода с последующим его отрывом.

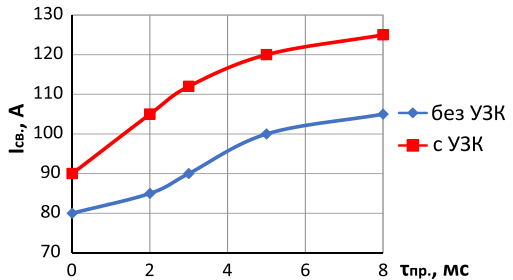


Рис. 8. Критический ток работы неплавящегося электрода: $F_{УЗК}=22,8$ кГц; $P_{УЗК}=60$ Вт, $d_e=4$ мм

При тех же самых параметрах с воздействием УЗК наблюдается противоположная картина: стабильность дуги значительно улучшается, рабочий участок сохраняет свою форму (рис. 9).

При воздействии ультразвуковых колебаний непосредственно на столб дуги обратной полярности в ее анодной области наблюдается зона разрежения, которая снижает температуру рабочего участка неплавящегося электрода, увеличивая его стойкость, что позволяет повысить производительность сварки наряду с высоким качеством катодной очистки окисной пленки на поверхности алюминия.

По результатам исследований разработаны технологические рекомендации по сварке неплавящимся электродом с воздействием ультразвуковых колебаний, определены оптимальные значения параметров ультразвуковых колебаний; определены длительности импульсов тока прямой и обратной полярности, позволяющие обеспечить требуемые глубину проплавления и качество катодной очистки, что позволяет существенно увеличить производительность процесса сварки и повысить качество сварных соединений.

Сравнительный анализ поверхностей показывает, что сварка с УЗК обеспечивает наибольшую глубину проплавления по сравнению с технологией без УЗК во всём исследованном диапазоне параметров сварки. Построенные поверхности позволяют существенно упростить выбор рациональных режимов сварки, которые обеспечивают требуемое качество формирования сварного шва и высокую производительность (рис. 10).

Полученные результаты исследований легли в основу разработки технологии сварки дыхательных клапанов систем очистки и вентиляции воздуха из сплава АМц в условиях предприятия ООО ПТП «Поршень».

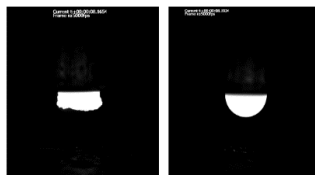


Рис. 9. Внешний вид рабочего участка электрода: $F_{УЗК}=22,8$ кГц; $P_{УЗК}=60$ Вт, $I_{св.}=100$ А, $\tau_{обр.}=18$ мс;

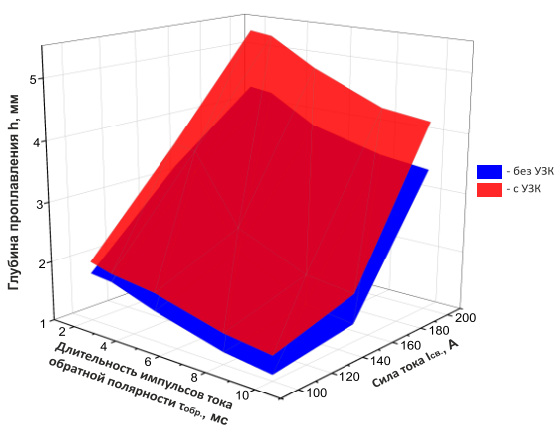


Рис. 10. Глубина проплавления в зависимости от длительности импульсов тока обратной полярности и силы тока: $F_{УЗК}=22,8$ кГц; $P_{УЗК}=60$ Вт, $f=50$ Гц; $V_{св.}=20$ м/ч

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в диссертационной работе комплекс исследований позволил сформулировать основные выводы:

1. Установлено, что вольт-амперные характеристики дуги переменного тока с прямоугольной формой импульсов имеют в исследованном диапазоне токов возрастающий характер: с ростом тока дуги $I_{св.}$ напряжение в импульсах прямой полярности $U_{пр}$, обратной полярности $U_{обр}$ и действительное напряжение на дуге U_d увеличиваются. С ростом $\tau_{обр}$ напряжения U_d и $U_{обр}$ повышаются, а $U_{пр}$ – уменьшается; с воздействием ультразвуковых колебаний значения напряжения $U_{пр}$, $U_{обр}$ и U_d больше на 1÷3 В, чем без них при любых значениях тока и $\tau_{обр}$, что говорит об увеличении тепловой мощности дуги.

2. С воздействием ультразвуковых колебаний дуга сжимается на 30-50%, что приводит к повышению плотности тока. Однако, с ростом силы тока эффективность влияния ультразвука незначительно снижается из-за увеличения тепловой мощности дуги. Показано, что при значениях $P_{УЗК}$ от 20 до 120 Вт дуга сжимается без нарушения её пространственной устойчивости. При мощности ультразвука более 140 Вт происходит ее отклонение от оси электрода, что приводит к нарушению формирования швов.

3. Показано, что воздействие на дугу ультразвуковых колебаний приводит к ее сжатию и повышению пространственной устойчивости, что увеличивает эффективный коэффициент полезного действия η_n при сварке неплавящимся электродом на переменном токе с прямоугольной формой импульсов на 5-12%, способствуя росту глубины проплавления при сварке алюминия и сплава АМц в 1,3-1,5 раза.

4. Установлено, что совместное действие сварочной дуги и ультразвуковых колебаний приводит к увеличению силового воздействия дуги на поверхность сварочной ванны в ~3-5 раза, что существенным образом влияет на форму и размеры шва. Параметры проплавлений, выполненных с воздействием на дугу ультразвуковых колебаний, значительно превосходят таковые без применения УЗК на любых режимах (в случае применения резонансных частот глубина проплавления повышается в 2,4 раза, ширина – до 1,5 раз).

5. Применение ультразвуковых колебаний способствует дополнительному механическому воздействию на окисную пленку на поверхности алюминия, в результате чего даже при малых длительностях обратной полярности в периоде переменного тока (менее 15%) качество очистки окисной пленки остается хорошим.

6. Выявлено, что применение ультразвуковых колебаний мощностью 20-140 Вт при сварке на высоких значениях тока ($\geq 300A$) и скорости (≥ 20 м/ч) стабилизирует положение активного пятна дуги на поверхности алюминия, препятствуя ее отклонению от оси электрода, что способствует

улучшению качества формирования шва на малых значениях длительности импульсов обратной полярности в периоде переменного тока ($\tau_{обр}/T \leq 0,15$).

7. Установлено, что при воздействии ультразвуковых колебаний непосредственно на столб дуги обратной полярности наблюдается увеличение стойкости электрода на 20%, что обусловлено появлением в ее анодной области зоны разрежения, которая снижает падение напряжения в ней на 0,5-0,8 В и уменьшает температуру рабочего участка неплавящегося электрода. Это позволяет повысить производительность сварки наряду с высоким качеством катодной очистки окисной пленки на поверхности алюминия.

8. На основе результатов исследований разработаны технологические рекомендации по сварке неплавящимся электродом на переменном токе алюминиевых сплавов в аргоне с воздействием на дугу ультразвуковых колебаний, позволяющие повысить производительность процесса и качество получаемых сварных соединений.

9. Разработанная технология сварки неплавящимся электродом с воздействием ультразвуковых колебаний была апробирована в условиях предприятия ООО ПТП «Поршень» при производстве дыхательных клапанов систем очистки и вентиляции воздуха из сплава АМц, что позволило увеличить производительность на 40%.

Основные положения диссертационного исследования опубликованы в 60 работах, наиболее значимые из которых приведены ниже:

Статьи из перечня ВАК при Минобрнауки РФ:

1. Энергетические характеристики дуги с воздействием ультразвуковых колебаний / Д.А. Муругов, А.В. Савинов, А.А. Чудин, В.И. Лысак, О.А. Полесский, П.П. Красиков, С.А. Ганцев, В.П. Бутков // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2026. - № 2 (309). - С. 53-59. - DOI: 10.35211/1990-5297-2026-2-309-53-59.

2. Влияние ультразвуковых колебаний на силовое воздействие дуги переменного тока / Д.А. Муругов, А.В. Савинов, А.А. Чудин, В.И. Лысак, О.А. Полесский, П.П. Красиков, В.П. Бутков, С.А. Ганцев // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2025. - № 10 (305). - С. 56-61.

3. Влияние ультразвуковых колебаний на силовое воздействие и проплавляющую способность дуги постоянного тока с неплавящимся электродом / В.И. Лысак, А.А. Чудин, А.В. Савинов, О.А. Полесский, П.П. Красиков, Д.А. Муругов // Сварка и диагностика. - 2025. - № 4. - С. 29-33.

4. Влияние ультразвуковых колебаний на форму и строение столба дуги переменного тока / В.И. Лысак, Д.А. Муругов, А.В. Савинов, А.А. Чудин, О.А. Полесский, С.К. Елсуков // Сварка и диагностика. - 2025. - № 1. - С. 27-30.

5. Применение ультразвуковых колебаний при дуговой сварке в защитных газах (обзор) / В.И. Лысак, Д.А. Муругов, А.В. Савинов, А.А. Чудин, О.А. Полесский, П.П. Красиков // Сварка и диагностика. – 2025. - № 6. - С. 35-39.

6. Влияние ультразвуковых колебаний на проплавляющую способность дуги переменного тока / В.И. Лысак, Д.А. Муругов, А.В. Савинов, А.А. Чудин, О.А. Полесский, П.П. Красиков // Сварка и диагностика. – 2024. - № 4. - С. 13-16. - DOI: 10.52177/2071-5234.

7. Энергетические характеристики дуги с воздействием ультразвуковых колебаний / Д.А. Муругов, А.В. Савинов, А.А. Чудин, В.И. Лысак, О.А. Полесский, П.П. Красиков, С.А. Ганцев, В.П. Бутков // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2026. - № 2 (309). - С. 53-59. - DOI: 10.35211/1990-5297-2026-2-309-53-59.

8. Влияние ультразвуковых колебаний на силовое воздействие дуги переменного тока / Д.А. Муругов, А.В. Савинов, А.А. Чудин, В.И. Лысак, О.А. Полесский, П.П. Красиков, В.П. Бутков, С.А. Ганцев // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2025. - № 10 (305). – С. 56-61. – DOI: 10.35211/1990-5297-2025-10-305-56-61.

9. Влияние сфокусированных ультразвуковых колебаний на проплавляющую способность дуги переменного тока / Д.А. Муругов, А.В. Савинов, А.А. Чудин, В.И. Лысак, О.А. Полесский, П.П. Красиков // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2024. – № 6 (289). – С. 71-75. - DOI: 10.35211/1990-5297-2024-6-289-71-75.

Статьи, индексируемые в реферативных базах Scopus и Web of Science:

10. Influence of Ultrasonic Vibration on the Electrophysical Properties of an Arc with a Nonconsumable Electrode / А.В. Савинов, А.А. Чудин, О.А. Полесский, В.И. Лысак, П.П. Красиков, Д.А. Муругов // Welding Journal. - 2025. - Vol. May. - P. 154-s-163-s. - DOI: <https://doi.org/10.29391/2025.104.012>.

11. Influence of ultrasonic vibration on the static characteristics of an arc with a non-consumable electrode / А.В. Савинов, А.А. Чудин, О.А. Полесский, В.И. Лысак, П.П. Красиков, Д.А. Муругов // China Welding. - 2025. - Vol. 34 (3). - 10 с.

Остальные публикации:

12. Пат. 2817683 Российская Федерация, МПК В23К 9/167, В23К 103/10 Способ сварки неплавящимся электродом алюминия и его сплавов / Д.А. Муругов, А.В. Савинов, А.А. Чудин, О.А. Полесский, П.П. Красиков, В.И. Лысак; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. - 2024.

Подписано в печать _07.2026 Заказ № Тираж 90 экз. Печ. л. 1,0
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Отпечатано в типографии Издательства
Волгоградского государственного технического университета
400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корпус 7.