

ПЛАЗМЕННО-ЖИДКОСТНАЯ СВАРКА ЛАТУННЫХ ПЛАСТИН

Д. Ф. Ахунов✉, М. Н. Семенов, А. Р. Мухаметзянов

Казанский государственный энергетический университет,
Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51

✉ 79273521546@mail.ru

В статье рассматривается применение плазменно-жидкостной системы с твердыми и жидкими электродами для сварного соединения пластин из латуни. Цель работы — исследование возможности сварки латунных пластин с применением метода плазменно-жидкостной сварки с твердыми и жидкими электродами.

Продемонстрирована экспериментальная установка для получения сварного соединения, которая в дальнейшем может быть использована для создания промышленных установок плазменной сварки. Приведены используемые методы исследования, такие как сканирующая электронная микроскопия, позволившая исследовать структуру сварного шва, а также проверка на твердость сплава по Виккерсу с помощью микротвердомера. Проведен подробный анализ вольт-амперных характеристик, на основе которого выявлено, что в процесс сварки участвует дуговой разряд.

Представленные результаты экспериментов демонстрируют потенциал данного метода и показывают наиболее оптимальные параметры сварки (напряжение не менее 500 В, ток до 120 А). Полученный сварной шов имел небольшие газовые поры, но структура оставалась как у основного металла. В заключение представлены предложения по развитию метода, такие как применение смеси различных солей и кислот в составе электролита и использование вакуумной камеры, для минимизации окисления металла.

Ключевые слова: плазменно-жидкостная сварка, плазменные системы, методы сварки, электрический пробой, хлорид натрия, латунь, вольт-амперная характеристика

Для цитирования: Ахунов Д. Ф., Семенов М. Н., Мухаметзянов А. Р. Плазменно-жидкостная сварка латунных пластин. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 49–55. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-49-55>. EDN: TEJJYV.



© Ахунов Д. Ф., Семенов М. Н., Мухаметзянов А. Р., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

PLASMA-LIQUID WELDING OF BRASS PLATES

D. F. Akhunov✉, M. N. Semenov, A. R. Mukhametzyanov

Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51, Kazan, 420066, Russia

✉ 79273521546@mail.ru

The article discusses the use of a plasma-liquid system with solid and liquid electrodes for welding plates of brass. The purpose of the research is to study the possibility of welding brass plates using the method of plasma-liquid welding with solid and liquid electrodes.

The authors demonstrate an experimental installation for producing a welded joint, which can later be used to create industrial plasma welding installations. The research methods are presented, such as scanning electron microscopy, which allow analysing the structure of the weld, as well as checking the hardness of the alloy according to Vickers' microhardness tester. Moreover, the authors present a detailed analysis of the voltage features, on the basis of which it is revealed that an arc discharge is involved in the welding process.

The experimental results demonstrate the potential of the method and show the most optimal welding parameters (voltage not less than 500 V, current up to 120 A). The resulting weld has small gas pores, but the structure remains similar to that of the base metal. In conclusion, the authors propose the development options of the method, such as the use of a mixture of various salts and acids in the electrolyte and the use of a vacuum chamber to minimize metal oxidation.

Keywords: plasma-liquid welding, plasma systems, welding methods, electrical breakdown, sodium chloride, brass, volt-ampere features

For citation: Akhunov D. F., Semenov M. N., Mukhametzyanov A. R. Plasma-liquid welding of brass plates. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):49–55. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-49-55>. EDN: TEJJYV. (In Russ.).



© Akhunov D. F., Semenov M. N., Mukhametzyanov A. R., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Латунь марки Л63, обладающая преимущественно содержанием меди 62–65 % и цинка в оставшейся части, благодаря своим уникальным свойствам нашла широкое применение в различных отраслях производства. Материал ценится своей пластичностью, коррозионной стойкостью, электропроводностью, но на сегодняшний день стоит вопрос по улучшению способов сварки и качества сварного шва латунных изделий [1, 2].

С целью преодоления указанных проблем в промышленности применяется ряд различных методов. Наиболее распространёнными являются дуговая сварка вольфрамовым электродом в инертном газе и дуговая сварка плавящимся электродом. Часто в данном методе используются промежуточные присадочные материалы, которые снижают термомеханические напряжения и подавляют образование интерметаллидов. Однако даже при этом сложно избежать дефектов, особенно при сварке толстостенных изделий или при отсутствии строгого контроля теплового режима. Существуют и высокотехнологичные методы: лазерная и электронно-лучевая сварка. Они обеспечивают высокую плотность энергии, узкую зону расплава и минимальное тепловложение, что позволяет обойти проблемы, связанные с высокой теплопроводностью латуни и склонностью к образованию дефектов. Тем не менее эти технологии требуют дорогостоящего оборудования, высокой точности изготовления и сборки деталей и, как правило, проведения процесса в вакууме, что ограничивает их применение в массовом производстве [3].

На сегодняшний день появились и новые экспериментальные методы: сварка с помощью электрических разрядов с твердыми и жидкими электродами [4, 5]. Данный вид разрядов нашел применение не только в сварке¹, но и в предварительной очистке свариваемых деталей, а также в способе добычи водорода² [6]. В основе метода находится использование плазмы, генерируемой в электролите, что позволяет достигать высоких температур и обеспечивать качественное соединение различных материалов [7, 8], включая трудно свариваемые сплавы, которые тяжело поддаются сварке другими способами, например, титановые и алюминиевые сплавы [9, 10]. В отличие от традиционных методов сварки, таких как дуговая или лазерная сварка, данный метод позволяет минимизировать тепловое воздей-

ствие на материал, что снижает риск деформаций и улучшает механические свойства сварного шва [11, 12], а также позволяет достичь высокую степень однородности структуры сварного шва, что положительно сказывается на его прочностных характеристиках [13, 14]. Кроме того, в исследованиях [15, 16] рассматриваются вопросы предотвращения образования дефектов, таких как поры и трещины, которые могут возникать при сварке высоколегированных сталей и сплавов [17].

Таким образом, цель работы — исследование возможности сварки латунных пластин с применением метода плазменно-жидкостной сварки с твердыми и жидкими электродами при атмосферном давлении, а также изучение механизма протекания процесса сварки на основе полученных данных токов и напряжения и определение прочностных характеристик сварного соединения, по результатам которых могут быть выявлены дальнейшие этапы по доработке используемой установки.

Экспериментальная установка и результаты

В рамках работы были описаны исследования по сварке изделий из латуни марки Л63, содержащей в своем составе около 63 % меди.

Сварка проводилась на специально разработанной экспериментальной установке, оснащённой газоразрядной камерой (рис. 1). Основу технологического процесса составляет контактный метод, в котором свариваемые детали 2 выполняют роль катода, а электролит 3 — анода. Для обеспечения положительного потенциала в электролите используется нержавеющая пластина 4 из стали «AISI 304» (200×120×1,5 мм). Подготовка установки к проведению эксперимента завершается подачей электрического тока от внешнего источника питания 1, после чего начинается сварка. Температурный режим электролита контролируется с помощью термостатической системы, в состав которой входит циркуляционный охладитель, обеспечивающий поддержание заданной температуры в течение всего процесса. Обновление и равномерное распределение компонентов электролита осуществляется посредством замкнутой системы циркуляции. Для предотвращения накопления механических примесей в электролите установлена система фильтрации, включающая фильтр грубой очистки. Пары электролита удаляются при помощи вытяжной вентиляции. Изменение значения напряжения про-

¹Пат. 2751500 С1 Российская Федерация, МПК В 23 К 9/23, В 23 К 28/02, В 23 К 103/10. Способ электролитно-плазменной сварки цветных металлов и их сплавов / Гайсин Аз. Ф., Гайсин Ал. Ф., Багаутдинова Л. Н. [и др.]. № 2020139509; заявл. 24.05.2024; опублик. 30.10.2024. EDN: HURDES.

²Пат. 2833435 С1 Российская Федерация, МПК С 25F 3/24. Способ электролитно-плазменной обработки поверхности детали из легированной стали / Мингажев А. Д., Крюков Н. К., Астанин В. В. [и др.]. № 2024118540; заявл. 03.07.2024; опублик. 21.01.2025. EDN: LFNGWS.

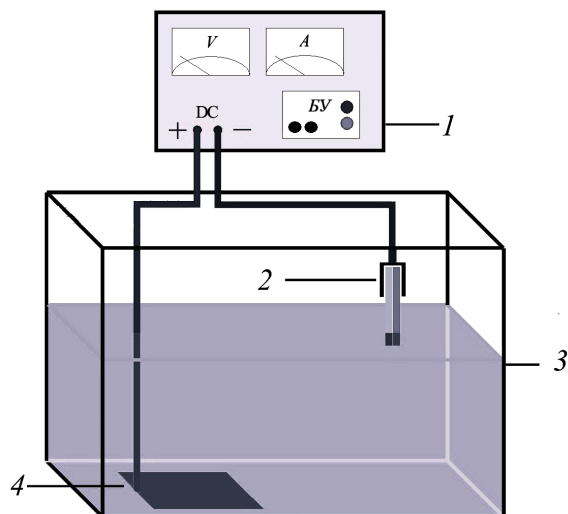


Рис. 1. Схема экспериментальной установки
Fig. 1. Scheme of the experimental setup

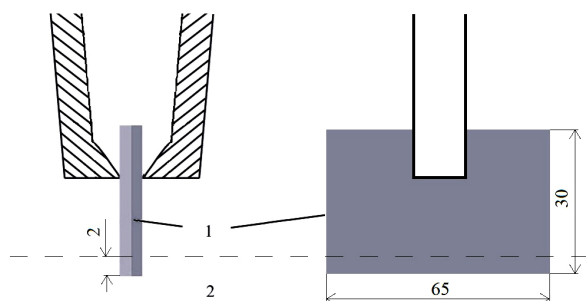


Рис. 2. Схема крепления свариваемых деталей
Fig. 2. Fixing scheme of welded parts

исходит при помощи делителя напряжения, ручка которого выведена на переднюю панель корпуса. На ней же установлен таймер с шагом в 1 секунду, при помощи которого устанавливалось время сварки деталей. Измерение электрических параметров производилось с использованием аналоговых вольтметра и амперметра. В целях обеспечения электробезопасности установка заземлена, все эксперименты проводятся с использованием средств индивидуальной защиты.

Схема крепления свариваемых деталей представлена на рис. 2. Детали 1 представляли собой пластины из латуни размерностью 30×65 мм и толщиной 1 мм. В качестве электролита 2 применялся 5 % раствор хлорида натрия (NaCl), разбавленный в водопроводной воде, при комнатной температуре 23 °. Свариваемые части пластин погружались в электролит на глубину 2 мм.

В процессе эксперимента использовались следующие средства и методы научного исследования:

1. Видеосъемка процессов сварки и показаний аналоговых амперметра и вольтметра производилась с помощью камеры смартфона марки «Huawei Nova 5T» с частотой 30 кадров в секунду при разрешении 1920×1080 пикселей. Телефон устанавливался на штатив на расстоянии 200 мм от зоны горения разряда. Снятые видеоматериалы обрабатывались на компьютере с использованием программного обеспечения «Microsoft Climpchamp».

2. Абразивная резка полученного сварного шва производилась на настольном отрезном стан-

ке с вращающимся шлифовальным алмазным диском «Delta™ AbrasiMet® Abrasive Cutter» фирмы «Buehler», предназначенном для подготовки металлографических образцов.

3. Прецизионная резка образца для получения резов равной толщины с точностью 2 мкм, осуществлялась с использованием высокоточного отрезного станка «IsoMet 5000» фирмы «Buehler».

4. Перед проведением анализа на твердость образцы проходили этап предварительной опрессовки на автоматизированном станке «SimpliMet 3000» фирмы «Buehler» методом горячей запрессовки в термореактивную/термопластичную смолу.

5. Прецизионная обработка образца обеспечивалась при помощи автоматической двухдисковой шлифовально-полировальной машины «Mecatech 264» фирмы «Buehler».

6. Для изучения микротвердости сварного образца применялся микротвердомер «DUH-211S».

7. Для изучения структуры применялся сканирующий электронный микроскоп «AURIGA CrossBeam» фирмы «Carl Zeiss».

8. Измерение напряжения производилось стрелочным индикатором напряжения «Э47 500В (IEK)» класса точности 1,5. Измерение силы тока производилось стрелочным индикатором напряжения «M1001 0-200 А» с классом точности 1,5.

9. Построение характеристики зависимости напряжения и силы тока со временем были проведены при помощи лицензионного программного обеспечения «Microsoft Office Excel». Аппроксимация вольт-амперной характеристики производилась в программном обеспечении «Visual Studio Code» на языке Python с применением библиотек NumPy и Matplotlib.

В целях получения наиболее оптимальных результатов эксперименты по плазменно-жидкостной сварке проводились в трёх различных настройках переменного резистора: на минимальном, среднем и максимальном уровнях сопротивления, что позволило оценить влияние электрических параметров на стабильность процесса и качество соединений.

В конфигурации максимального сопротивления резистора в начальные секунды эксперимента регистрировались процессы, аналогичные электрохимическому электролизу в межэлектродном зазоре, с фиксированным значением тока и повышенным напряжением около 395 В. Далее происходил спонтанный пробой зазора, приводящий к формированию разряда пульсирующего типа. Амплитуда колебаний тока в этом случае составляла 20–40 А, что способствовало нестабильности сварочного процесса: возникали локальные зоны интенсивного расплавления материалов, но общая картина сварки оставалась хаотичной с неоднородным распределением тепла. В результате на латунных пластинах образовывался дефектный шов с визуально заметными пустотами. Длительность такого режима определялась таймером в 5 с, однако из-за неконтролируемого характера разряда процесс не обеспечивал равномерного проплавления.

Конфигурация среднего сопротивления резистора продемонстрировала оптимальные условия для проведения сварки. Здесь фиксировался контролируемый подъём напряжения 500 В и выше, за которым следовал стабильный пробой межэлектродного пространства. Разряд проявлялся в импульсном режиме при силе тока 120 А, формируя вокруг свариваемых элементов парогазовую оболочку с интенсивным свечением. Это способствовало

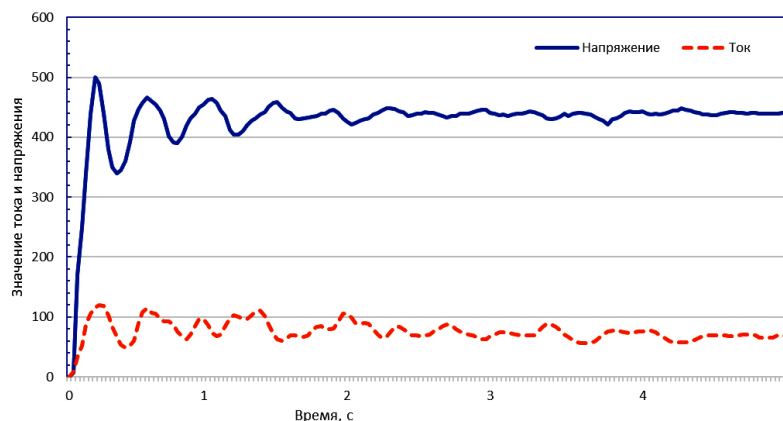


Рис. 3. Зависимость тока и напряжения от времени
Fig. 3. Dependence of current and voltage on time

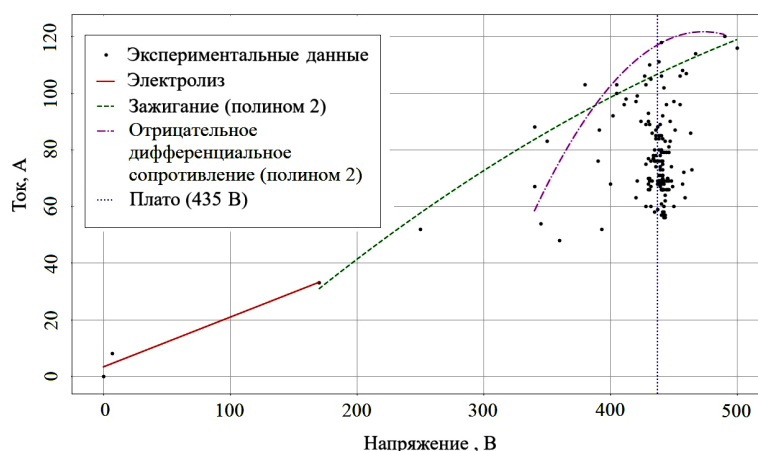


Рис. 4. Аппроксимация вольт-амперной характеристики
Fig. 4. Approximation of the volt-ampere features

равномерному нагреву и плавлению поверхностей без чрезмерных локальных перегревов. Сварка осуществлялась в течение 5 секунд по установленному времени, приводя к формированию качественного шва с минимальными дефектами.

В конфигурации минимального сопротивления резистора параметры электрического поля выходили за пределы оптимальных значений: напряжение достигало не менее 500 В, а пиковое значение тока — 150 А, что вызывало немедленный пробой зазора. Процесс сварки укладывался в 3,5 секунды, однако избыточная энергия приводила к чрезмерному расплавлению материалов вдоль линии контакта пластин. В результате шов формировался с чрезмерной глубиной проплавления, сопровождаемой значительными тепловыми деформациями и риском разрушения структуры. Визуальный контроль готового изделия выявил признаки пережога в прилегающих зонах, что делает этот режим менее предпочтительным для точной сварки, несмотря на высокую скорость соединения. Увеличение времени сварки приводит лишь к ухудшению сварного шва.

Для получения представления о механизмах формирования разрядов рассмотрим зависимость электрического тока и напряжения от времени (рис. 3).

Анализ формы кривых позволяет выделить три отчетливых этапа в процессе сварки. Начальный этап (0—0,25 с) характеризуется стремительным нарастанием как напряжения, так и силы тока, что

знаменует собой начало переходного процесса. Далее происходит пробой межэлектродного промежутка, достигаются пиковые значения: 500 В и выше для напряжения при силе тока 120 А. Время достижения пробоя $\approx 0,25$ с.

Второй этап (0,25—2,25 с) отражает стабилизацию режима сварки, отличающийся выраженными колебаниями тока и напряжения, где значения тока падали до 53 А, напряжения — до 340 В соответственно. По мере приближения к завершению этого этапа амплитуда колебаний уменьшается, и график постепенно приобретает линейную форму. При этом высокие значения силы тока наблюдаются при низких значениях напряжения и наоборот. Данный этап продолжался приблизительно 2 с после момента пробоя.

Последним этапом является переход к устойчивому режиму сварки, где изменения становятся минимальными. Напряжение и ток демонстрируют лишь небольшие колебания со средними значениями 435 В и 85 А соответственно. В течение этого периода наблюдается устойчивое горение дуги без каких-либо существенных возмущений. В конце данного этапа процесс сварки завершается, происходит автоматическое отключение оборудования. Именно третий этап является основным рабочим интервалом, в течение которого происходит непрерывный нагрев пластин из электротехнической стали. Длительность этого этапа составляет приблизительно 3 с.

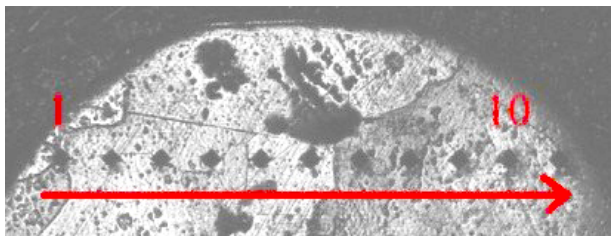


Рис. 5. Линия измерения микротвердости по Виккерсу
Fig. 5. Line of the Vickers microhardness measurement

Таблица 1. Значения микротвердости сварного шва
Table 1. Microhardness values of the weld

Точка	HV	Точка	HV
1	113,76	6	149,88
2	114,39	7	137,65
3	126,81	8	124,72
4	129,12	9	118,41
5	136,36	10	113,06

Далее была проведена аппроксимация вольт-амперной характеристики на основе экспериментальных данных. Из анализа полученных графиков (рис. 4) следует, что кривая вольт-амперной характеристики состоит из нескольких характерных участков, каждый из которых соответствует определенной физической стадии разрядного процесса.

В начальной области наблюдается линейный участок, типичный для процесса электролиза, — здесь ток обусловлен ионной проводимостью электролита, а рост напряжения пропорционален увеличению тока в соответствии с законом Ома.

Следующий линейный участок сопровождается более резким возрастанием тока, что приводит к зажиганию разряда.

Далее наблюдается переход в нелинейную область, аппроксимированную полиномом второго порядка. Эта часть кривой соответствует падению напряжения до 480 В, сопровождающегося повышением тока до максимальных 120 А. Данное явление соответствует формированию зоны отрицательного дифференциального сопротивления. В этой области характерно обратное поведение: при уменьшении напряжения наблюдается рост тока, что свидетельствует о быстрой ионизации газовой фазы и формировании проводящего канала. Такое поведение типично для перехода от тлеющего разряда к дуговому.

Дальнейшее падение напряжения приводит к падению значений тока до 50 А.

Завершающий участок вольт-амперной характеристики представляет собой почти горизонтальное «плато» с усредненным напряжением около 435 В, при котором ток стабилизируется в диапазоне ~80–90 А. Именно в этом режиме осуществляется основной процесс сварки, характеризующийся устойчивым горением разряда и интенсивным тепловыделением в межэлектродном промежутке.

На основании совокупности полученных данных можно сделать вывод, что наблюдаемый разряд представляет собой дуговой разряд в парогазовом пузыре, формирующемся над поверхностью электролита под действием локального нагрева. Этапу дугового горения предшествует кратковременный тлеющий разряд на стадии инициации, обеспечи-

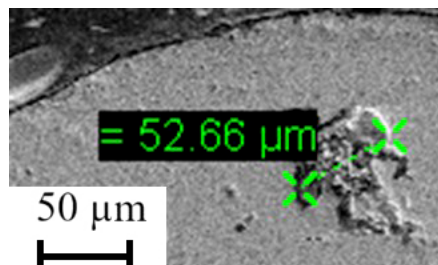


Рис. 6. Максимальная из пустот в сварном соединении
Fig. 6. Maximum of the voids in the welded joint

вающий первоначальную ионизацию межэлектродного зазора.

Основной ток в устойчивом режиме протекает через плазменный канал, образованный ионизированными парами электролита и газов. Резкий рост тока при относительно стабильном напряжении обусловлен активной термоэлектронной эмиссией с поверхности катода, а также термической ионизацией газовой среды в условиях высокой температуры плазмы (до нескольких тысяч кельвинов). Эти процессы обеспечивают высокую электропроводность канала и устойчивость дуги, что является ключевым условием для качественного формирования сварного соединения.

Далее было проведено измерение твердости сплава по Виккерсу по 10 точкам (рис. 5) вдоль сварного шва. Расстояние между точками составляло 150 мкм. Результаты сведены в табл. 1.

Также в качестве референсного было определено среднее значение твердости латуни до сварки, полученное по трем точкам у каждой из пластин, составившее 107,61 HV. Как следует из данных в табл. 1 микротвердость в зоне сварного шва превышает твердость основного металла, но наблюдается четкая закономерность — с приближением к краям образца значение твердости постепенно снижается. Максимальная твердость получилась 149,88 HV в точке 6 в центральной части соединения. Среднее значение микротвердости по всем измеренным точкам составило 126,42 HV, что на ~15 % выше, чем у исходного материала.

Анализ изображений с микроскопа показал, что сварной шов имеет округлую форму и содержит отдельные пустоты. Наибольшая из выявленных полостей (рис. 6) достигает размера 52,66 мкм. Более того, в структуре шва наблюдаются мелкие поры диаметром до 6 мкм, образование которых, вероятно, связано с выделением газов в процессе горения электрического разряда. В целом микроструктура сварного соединения схожа со структурой исходных свариваемых материалов, но четкой границы раздела между зоной шва и основным металлом не выявлено, что может свидетельствовать о хорошей взаимной диффузии компонентов и однородности полученного соединения.

Заключение

Исследование по свариванию с помощью метода плазменно-жидкостной сварки пластин латуни позволило сделать следующие выводы:

1. Из анализа вольт-амперной характеристики выявлено, что процесс сопровождался устойчивым дуговым разрядом. Изменения напряжения и тока во времени были взаимосвязаны, но происходили

не синхронно. Эксперимент характеризовался тремя этапами: начальный — резкое возрастание тока и напряжения с последующим пробоем; переходный — стабилизация режима сварки; рабочий — устойчивое горение разряда. Сама сварка происходит на последнем этапе при средних значениях напряжения и тока 435 В и 85 А соответственно.

2. Показатели микротвердости шва имеют неравномерное распределение. На краях соединения показатели находятся на значении более 113 HV, тогда как в центральной зоне шва твердость достигает 149,88 HV. Среднее значение твердости соединения 126,416 HV превышает среднее значение из начальных пластин 107,61 HV.

3. Макро- и микроструктурный анализ выявил наличие газовых пор в объеме шва, максимальный размер которых достигал 53 мкм. Несмотря на это, микроструктура сварной зоны сохраняет полное соответствие структуре основного металла — признаков рекристаллизации, фазовых превращений или образования вторичных фаз не обнаружено. Это указывает на то, что тепловложение оставалось в пределах, не вызывающих существенных структурных изменений в латуни.

4. Полученные результаты могут применяться для дальнейшего изучения данного метода сварки. В частности, они могут быть использованы при построении математических моделей тепломассопереноса, формировании шва и эволюции механических свойств. Дальнейшее развитие метода предполагает эксперименты с подбором состава электролита, таких как смеси из нескольких солей или кислот для получения лучшего качества сварного соединения. Также рассматривается возможность усовершенствования экспериментальной установки для возможности проведения экспериментов в вакууме, что позволит минимизировать окисление и газонасыщение металла шва.

Следовательно, метод плазменно-жидкостной сварки демонстрирует потенциал для соединения медных сплавов, требуя при этом дальнейшей оптимизации технологических параметров для достижения промышленно приемлемого качества сварных швов.

Финансирование / Funding

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-19-00453).

The research was supported by the Russian Science Foundation (Agreement No. 14-19-00453).

Список источников / References

1. Певзнер М. З., Грачёв С. П., Иванов-Польский К. В. [и др.]. О качестве высокочастотной сварки латунных труб // Механическое оборудование металлургических заводов. 2018. № 2 (11). С. 22–31. EDN: AIWRHQ.

Pevzner M. Z., Grachev S. P., Ivanov-Polsky K. V. [et al.]. Quality of high-frequency welding of brass pipes. *Mekhanicheskoye Oborudovaniye Metallurgicheskikh Zavodov*. 2018;2(11):22–31. EDN: AIWRHQ. (In Russ.).

2. Малахов А. Ю., Сайков И. В., Денисов И. В. Особенности границы соединения биметалла латунь-инвар, полученного сваркой взрывом // Деформация и разрушение материалов. 2021. № 1. С. 19–23. <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2021-1-19-23>. EDN: DSUDOR.

Malakhov A. Yu., Saikov I. V., Denisov I. V. Features of the boundary of the brass-invar bimetal compound obtained by explosion welding. *Deformation and Destruction of Materials*.

2021;1:19–23. <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2021-1-19-23>. EDN: DSUDOR. (In Russ.).

3. Коротеев А. О., Фетисова Е. А., Коротеева А. А., Клименкова А. В. Механические характеристики наплавленного металла при дуговой сварке высокопрочных сталей с модификацией защитной газовой среды газообразным флюсом SF₆ // Вестник Белорусско-Российского университета. 2025. № 1 (86). С. 23–31. <https://doi.org/10.24412/2077-8481-2025-1-23-31>. EDN: HBIXYW.

Koroteev A. O., Fetisova E. A., Koroteeva A. A., Klimenkova A. V. Mechanical characteristics of deposited metal in arc welding of high-strength steels with modification of shielding gas environment by SF₆ gaseous flux. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta*. 2025;1(86):23–31. <https://doi.org/10.24412/2077-8481-2025-1-23-31>. EDN: HBIXYW. (In Russ.).

4. Басыров Р. Ш., Багаутдинова Л. Н., Гайсин Ф. М. [и др.]. Моделирование электрофизических процессов в системе электролит–металлический электрод // Теплофизика высоких температур. 2025. Т. 63, № 1. С. 11–15. <https://doi.org/10.7868/s3034610x25010022>. EDN: UEYOYE.

Basyrov R. Sh., Bagautdinova L. N., Gaysin F. M. [et al.]. Modelirovaniye elektrofizicheskikh protsessov v sisteme elektrolit–metallicheskiy elektrod. *High Temperature*. 2025;63(1):11–15. <https://doi.org/10.7868/s3034610x25010022>. EDN: UEYOYE. (In Russ.).

5. Багаутдинова Л. Н., Бельгибаев Э. Р., Гайсин Ал. Ф. [и др.]. Электрические разряды в электролитно-пузырьковой среде раствора сульфата аммония в водопроводной воде при атмосферном давлении // Теплофизика высоких температур. 2024. Т. 62, № 3. С. 474–476. <https://doi.org/10.31857/S0040364424030162>. EDN: DIDQAZ.

Bagautdinova L. N., Bel'gibayev E. R., Gaysin Al. F. [et al.]. Elektricheskiye razryady v elektrolitno-puzыр'kovoy srede rastvora sul'fata ammoniya v vodoprovodnoy vode pri atmosfernom davlenii. *High Temperature*. 2024;62(3):474–476. <https://doi.org/10.31857/S0040364424030162>. EDN: DIDQAZ. (In Russ.).

6. Гайсин А. Ф., Гайсин Ф. М., Багаутдинова Л. Н. [и др.]. Плазменно-электролитные разряды в газожидкостной среде для получения водорода // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23, № 2. С. 27–35. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-2-27-35>. EDN: SHARHP.

Gaysin A. F., Gaysin F. M., Bagautdinova L. N. [et al.]. Plasma-electrolyte discharges in a gas-liquid medium for the production of hydrogen. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2021;23(2):27–35. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-2-27-35>. EDN: SHARHP. (In Russ.).

7. Cai B., Fu J., Zhao Y. [et al.]. Effect of Alternating Magnetic Field on Arc Plasma Characteristics and Droplet Transfer during Narrow Gap Laser-MIG Hybrid Welding. *Metals*. 2021;11(11):1712. <https://doi.org/10.3390/met11111712>.

8. Huang A., Zhang J., Gao C. [et al.]. Effects of groove constraint space on plasma characteristics during Laser-MIG hybrid welding of Titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019;48:137–144. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.004>.

9. Semenov M. N., Belgibaev E. R., Kayumov R. R. [et al.]. Plasma-Liquid Welding of Copper Products. *High Energy Chemistry*. 2024;58(S3):S400–S403. <https://doi.org/10.1134/S0018143924701236>.

10. Ha M. H., Do H. T., Vu D. [et al.]. The Experimental Research on Plasma Welding of SUS 304 Stainless Steel Thin Plates. *Advances in Engineering Research and Application*. 2022;602:942–951. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22200-9_100.

11. Hong X., Huang B., Li T. [et al.]. Optimization of plasma arc welding process parameters of SAF 2507/316L dissimilar steel based on response surface method. *Welding in the World*. 2023;67:2493–2509. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3020034/v1>.

12. Zhubaev A. K., Rakhmetolla G. A., Sagynova A. O. [et al.]. Study of Phase Formation in Bilayered Three Component System. *High Energy Chemistry*. 2024;58(S3):S475–S477. <https://doi.org/10.1134/S0018143924701406>.

13. Akhmadullina L. I., Gaisin Az. F., Gaisin Al. F. [et al.]. Electrolyte-plasma product treatment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1588(1):012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1588/1/012012>.

14. Hong X., Huang B., Li T. [et al.]. Effects of Welding Speed and Welding Current on the Residual Stress and Deformation of SAF 2507/316L Dissimilar Plasma Arc Welding. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2024; 33(24):13745–13763.

15. Лукьянова Н. А., Мельников П. В., Грибков О. И. Влияние отпуска на структуру и свойства сварных соединений низколегированных высокопрочных сталей, выполненных ручной аргодуговой сваркой // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022. № 10 (808). С. 69–74. <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.10.69-74>. EDN: ZBKUIT.

Luk'yanova N. A., Melnikov P. V., Gribkov O. I. Effect of tempering on the structure and properties of welded joints of low-alloy high-strength steels formed by gas tungsten arc welding. *Metallvedeniye i Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2022;10(808):69–74. <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.10.69-74>. EDN: ZBKUIT. (In Russ.).

16. Овчинников В. В., Растопчин Р. Н. Плазменная сварка высокопрочных алюминиевых сплавов // *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2020. № 7 (109). С. 3–11. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-7-3-11>. EDN: UTFUBB.

Ovchinnikov V. V., Rastopchin R. N. Plasma welding of high-strength aluminum alloys. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2020;7(109):3–11. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-7-3-11>. EDN: UTFUBB. (In Russ.).

17. Бельгибаев Э. Р., Семенов М. Н., Каюмов Р. Р. [и др.]. Плазменно-жидкостная сварка изделия из электротехнической стали // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2024. № 7 (829). С. 62–68. <https://doi.org/10.30906/mitom-2024-7-62-68>. EDN: DUKXOY.

Belgibaev E. R., Semenov M. N., Kayumov R. R. [et al.]. Plasma-liquid welding of electrical steel plates. *Metallvedeniye i Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2024;7(829):62–68. <https://doi.org/10.30906/mitom-2024-7-62-68>. EDN: DUKXOY. (In Russ.).

Вклад авторов:

Д. Ф. Ахунов. Постановка цели и задач исследования, анализ состояния вопроса, обработка экспериментальных данных, расчет аппроксимации вольт-амперной характеристики, формулирование выводов, подготовка текста статьи.

М. Н. Семенов. Разработка экспериментальной установки, разработка методов исследования, анализ экспериментальных данных токов и напряжений.

А. Р. Мухаметзянов. Литературный поиск по теме исследования, снятие и анализ экспериментальных данных структуры и твердости сварного шва, подготовка рисунков и таблиц.

Authors' contribution:

Denis F. Akhunov. Setting research goal and objectives, analysing the status of the problem, processing experimental data, calculating the approximation of the voltamper features, formulating conclusions and preparing the text of the article.

Maxim N. Semenov. Development of an experimental setup and research methods, analysis of experimental current and voltage data.

Aydar R. Mukhametzyanov. Literature analysis, analysis of experimental data on the structure and hardness of the weld, preparing images and tables.

Информация об авторах:

АХУНОВ Денис Фирдависович, аспирант кафедры «Физика» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань.

SPIN-код: 5107-4467

AuthorID (РИНЦ): 1264015

ResearcherID: JOJ-7789-2023

e-mail: 79273521546@mail.ru

СЕМЕНОВ Максим Николаевич, аспирант кафедры «Физика» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань.

SPIN-код: 8738-8276

AuthorID (РИНЦ): 1219846

e-mail: maxim.snt@inbox.ru

МУХАМЕТЗЯНОВ Айдар Раисович, аспирант кафедры «Физика» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань.

SPIN-код: 9915-7304

AuthorID (РИНЦ): 1219847

e-mail: aydar-999@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025; одобрена после рецензирования 11.02.2026; принята к публикации 12.05.2026.

Information about the authors:

AKHUNOV Denis Firdavisovich, Postgraduate of the Physics Department, Kazan State Power Engineering University, Kazan.

SPIN-code: 5107-4467

AuthorID (RSCI): 1264015

ResearcherID: JOJ-7789-2023

e-mail: 79273521546@mail.ru

SEME NOV Maxim Nikolaevich, Postgraduate of the Physics Department, Kazan State Power Engineering University, Kazan.

SPIN-code: 8738-8276

AuthorID (RSCI): 1219846

e-mail: maxim.snt@inbox.ru

MUKHAMETZYANOV Aydar Raisovich, Postgraduate of the Physics Department, Kazan State Power Engineering University, Kazan.

SPIN-code: 9915-7304

AuthorID (RSCI): 1219847

e-mail: aydar-999@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 01.12.2025; approved after reviewing 11.02.2026; accepted for publication 12.05.2026.