

Плазменно-жидкостная сварка тонкостенных алюминиевых изделий для авиационно-космической техники

Э.Р. БЕЛЬГИБАЕВ
(КНИТУ-КАИ, Казань),
М.Н. СЕМЕНОВ,
аспирант
(КГЭУ, Казань),
Р.Р. КАЮМОВ,
канд. техн. наук,
А.Ф. ГАЙСИН,
д-р техн. наук
(КНИТУ-КАИ, Казань)
almaz87@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования плазменно-жидкостной сварки тонкостенных алюминиевых пластин АД0М при атмосферном давлении в конфигурации «металлический катод – электролитический анод» с использованием 10 %-го раствора хлорида натрия. Проведен энергодисперсионный анализ, подтвердивший высокую химическую чистоту металла шва. Исследования микротвердости и микроструктуры выявили размягченную зону шва с более крупным зерном и наличие микропор преимущественно в центральной части зоны плавления, обусловленных особенностями тепломассообмена в электролитической среде. Показано, что получаемые соединения характеризуются высокой химической однородностью и контролируемым градиентом микромеханических свойств, что подтверждает перспективность плазменно-жидкостной сварки для тонкостенных алюминиевых конструкций авиационно-космического назначения.

Плазменно-жидкостная сварка, тонкостенные алюминиевые сплавы, сплав АД0М, газовый разряд с жидким электродом, микроструктура сварного шва, микротвердость, элементный состав, микропористость, авиационно-космическая техника

Алюминиевые сплавы тонкостенных конструкций широко применяются в авиационно-космической технике благодаря высокому удельному модулю, коррозионной стойкости и технологичности [1]. Их сварка осложняется наличием прочной оксидной пленки Al_2O_3 , высокой теплопроводностью, склонностью к порообразованию и деформациям, а также чувствительностью к перегреву и фазовым превращениям [2, 3]. Для панелей обшивки, тонких ребристых элементов, теплообменных блоков и баков-резервуаров эти факторы критичны из-за жестких требований к геометрической стабильности, герметичности и повторяемости свойств шва. Традиционные процессы (аргонодуговая, лазерная, электронно-лучевая сварка, фрикционная сварка с перемешиванием) обеспечивают промышленную применимость, но требуют сложной подготовки и оснастки, строго ограниченного тепловложения и зачистую – инертной или вакуумной среды. На тонких заготовках это повышает риск прожогов, коробления и локальной деградации свойств [4–9].

Плазменно-жидкостная сварка относится к разрядным технологиям с участием жидкого электрода, где энергия разряда и струйная гидродинамика обеспечивают локализованное тепловложение при одновременной активации поверхности. В рассматриваемой системе «электролитический катод – металлический анод», функционирующей при атмосферном давлении, на межфазной границе формируется парогазовая оболочка совместно с областью интенсивной ионизации, при этом замыкание электрического тока осуществляется через жидкую струю на деталь. Для указанного источника тепловой энергии характерны следующие особенности: самоочистка зоны сварки от оксидной пленки, обусловленная электрохимическими и термохимическими эффектами, высокая степень локализации тепловложения с возможностью тонкой импульсной модуляции, а также интеграция функций нагрева, очистки и смачивания без смены инструмента и в отсутствие вакуума. Совокупность перечисленных свойств обуславливает перспективность данного процесса для изготовления тонкостенных изделий из алюминиевых сплавов. Контролируемая гидродинамика струи (расход, давление, состав) определяет конвективный теплоотвод и оказывает влияние на устойчивость формы разряда, что позволяет минимизировать протяженность зоны термического влияния и уровень деформационных искажений [10–14].

Вместе с тем применительно к алюминиевым сплавам сохраняется актуальность нерешенных вопросов, касающихся стандартизации режимов и масштабирования процесса при условии обеспечения гарантированной воспроизводимости результатов. Требуется экспериментально верифицировать области устойчивости разряда на тонкостенных деталях, прояснить роль парогазовой оболочки в дегазации рас-

плава и управлении порообразованием, установить количественные связи «параметры разряда – тепловложение – микроструктура – свойства шва», а также сопоставить ресурсоемкость и технологическую надежность с промышленными альтернативами. Для авиационно-космического машиностроения принципиальны подтвержденные метрики качества: прочность и пластичность при статическом и циклическом нагружении, герметичность и коррозионная стойкость, стабильность геометрии и минимальные деформации, совместимость с последующей отделкой и покрытиями, а также повторяемость на протяженных швах и сложных контурах.

Цель работы – экспериментальная оценка применимости плазменно-жидкостной сварки для тонкостенных алюминиевых пластин марки АД0М при атмосферном давлении и формирование карты режимов, обеспечивающих стабильное формирование шва при минимальной зоне термического влияния. Представлены результаты диагностики форм горения и устойчивости разряда в импульсных режимах, спектрального анализа состава плазмы с определением концентрации и температуры электронов и температуры тяжелой компоненты, сопоставления электрогидродинамических параметров с геометрией и морфологией шва и проплава, а также исследования микроструктуры и механических свойств сварных соединений. Полученные данные создают научно-техническую основу для интеграции плазменно-жидкостной сварки в технологические маршруты авиационно-космического машиностроения и служат базой для последующей стандартизации контроля качества и сертификационных испытаний.

Экспериментальное исследование процессов плазменно-жидкостной сварки образцов алюминиевых изделий проводилось на установке с газоразрядной камерой, функциональная схема которой приведена на рис. 1. Здесь: 1 – источник питания; 2 – свариваемые образцы (металлический катод); 3 – ванна с электролитом; 4 – металлическая пластина для подвода положительного потенциала в электролит.

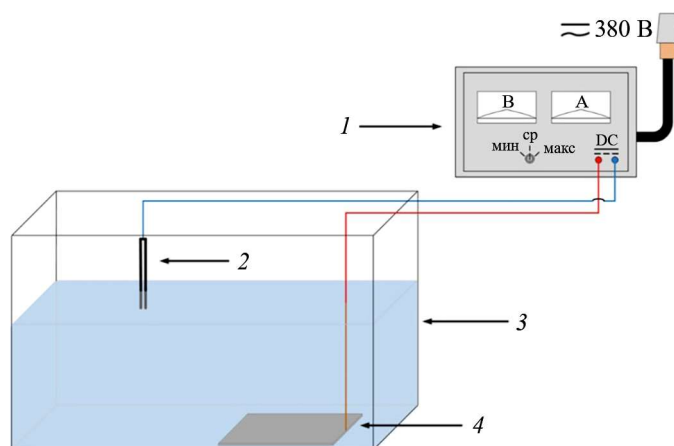


Рис. 1

В качестве источника электропитания использовался регулируемый выпрямитель с выходной мощностью до 10 кВт и максимальным выходным напряжением 500 В. Свариваемые образцы, изготовленные из алюминиевого сплава марки АД0М, выполняли функцию металлического катода, в то время как электролитическая ванна служила анодом. Подведение положительного потенциала к электролиту осуществлялось через пластину из нержавеющей стали AISI 304 с размерами 200×120×1,5 мм. Данная пластина размещалась внутри электрохимической ячейки в положении, обеспечивающем устойчивое замыкание электрической цепи и равномерное распределение тока в зоне соединения.

В качестве катодного материала использовались пластины АД0М – деформируемый алюминий высокой чистоты (содержание примесей не более 0,2 %, массовая доля алюминия порядка 99,7 %). Такая металлобаза обеспечивает воспроизводимые условия для изучения плавления, кристаллизации и формирования шва на тонких заготовках. В качестве электролита применялся 10 %-й водный раствор натрия хлорида на технической воде. Перед сваркой проводилась стандартная подготовка поверхности: механическое шлифование и зачистка, удаление загрязнений и оксидной пленки, обезжиривание органическим

растворителем. Эти операции минимизировали влияние поверхностных дефектов на формирование корня шва и стабильность разряда.

Сварка осуществлялась в конфигурации «металлический катод – электролитический анод». Образцы фиксировались внахлест, после чего на ванну подавалось положительное напряжение, а на пластины – отрицательный потенциал. Текущие значения напряжения и тока контролировались по панели индикаторов и дублировались на управляющем компьютере. Регулировка осуществлялась по току и напряжению с возможностью оперативной корректировки для поддержания устойчивого горения разряда. Продолжительность каждого технологического прохода фиксировалась с помощью секундомера с дискретностью отсчета 1 с, что обеспечивало высокую воспроизводимость заданных режимов.

Для безопасности и электромагнитной совместимости все токоведущие элементы и корпус установки были заземлены. Для стабилизации теплового режима применялся циркуляционный охладитель рефрижераторного типа, поддерживающий температуру электролита в заданных пределах. Раствор циркулировал по замкнутому контуру с фильтром грубой очистки, а удаление паров и продуктов разряда обеспечивалось стационарной вытяжной вентиляцией. Номинальные параметры экспериментов: напряжение $U = 0,1 \div 0,5$ кВ; давление $p = 10^5$ Па (атмосферное); удельная электропроводность электролита $\sigma = 0,10 \div 0,12 \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$; температура электролита $T = 24$ °С.

Для решения поставленных в работе задач применялись различные методы диагностики.

Регистрация динамики разряда и видимых плазменных структур выполнялась высокоскоростной видеосъемкой камерой Casio EX-F1 со скоростями 600 и 1200 кадр/с. Камера устанавливалась на штатив на расстоянии около 300 мм от зоны разряда. Передача и обработка данных осуществлялись на персональном компьютере с использованием программного обеспечения HX Link и Movavi Video Editor 14 Plus, что позволяло синхронизировать визуальные события с электрическими сигналами. Электрические колебания и пульсации тока и напряжения фиксировались цифровыми осциллографами GDS-806S и GOS-6030. Для привязки к оптическим событиям применялся фотодиодный датчик излучения разряда, подключенный к тем же каналам регистрации. Такой подход обеспечивал идентификацию моментов зажигания, переходов между формами горения и корреляцию импульсных особенностей с морфологией шва.

Эмиссионно-спектральный анализ излучения плазмы проводился на оптоволоконном спектрометре PLASUS EC 150201 MC. Излучение собиралось коллиматором с расстояния 100–200 мм в спектральном диапазоне 195...1105 нм. Калибровка аппаратной функции выполнялась по стандартной лампе СИРШ-6-100, эффективная аппаратная ширина составляла $\Delta\lambda_g \approx 1$ нм. Сопоставление экспериментальных спектров с базой данных линий осуществлялось по каталогу NIST. Колебательные и вращательные температуры тяжелой компоненты оценивались подбором расчетных спектров в программных пакетах LIFBASE и SPECAIR 2.2.0.0, а электронно-температурные и концентрационные параметры – по профилям водородных и атомарных линий с учетом аппаратного уширения.

Для металлографического анализа из области соединения вырезались фрагменты, по которым изготавливались поперечные шлифы (рис. 2). Образцы запрессовывались в токопроводящий полимер на установке Buehler Simplot 3000. Шлифовка выполнялась абразивами P600, P1200, P2500, полировка – алмазными суспензиями с размером частиц 6, 3, 1 мкм. Финишное травление проводилось реактивом Келлера (2,5 мл азотной кислоты, 1,5 мл соляной кислоты, 1 мл фтороводородной кислоты на 95 мл дистиллированной воды), что позволяло выявлять границы зерен, зоны термического влияния и литейные участки шва.

Микроструктура исследовалась на инвертированном оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer Z1m в режиме светлого поля с увеличением $\times 5, 10, 50$; дополнительно выполнялся анализ элементного состава и распределения примесей на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss Auriga Crossbeam с энергодисперсионным рентгеновским анализатором INCA X-Max (энергетическое разрешение – 127 эВ). Такой комплекс методов обеспечивал сопоставление электрогидродинамических параметров разряда с геометрией проплава и морфологией шва, а также с микрохимическими и фазовыми особенностями зон соединения.

Измерение микротвердости сварного соединения проводилось методом Виккерса (HV) с использованием автоматизированного твердомера Tukon 1102.

На рис. 2 представлены осциллограммы напряжения $U(t)$ и тока $I(t)$ при плазменно-жидкостной сварке пластин из сплава АД0М при длительности одного прохода порядка 2 с.

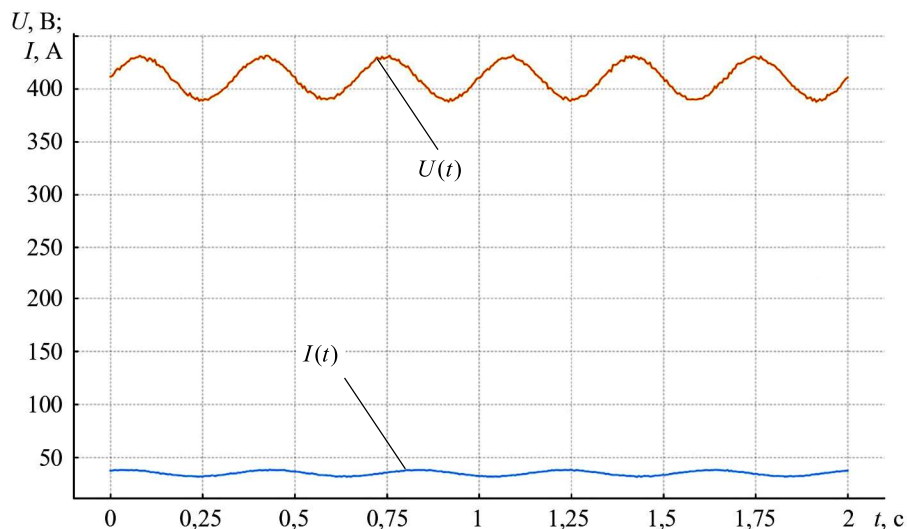


Рис. 2

В рабочем режиме напряжение между металлическим катодом (свариваемые изделия) и электролитическим анодом находится в диапазоне 370...450 В, а сварочный ток – в пределах 30...40 А. На протяжении всего времени осуществления технологического прохода электрический разряд демонстрирует устойчивый характер: флуктуации временных зависимостей напряжения $U(t)$ и тока $I(t)$ имеют квазипериодическую природу и не сопровождаются значительными провалами или срывами процесса горения. Наличие медленных и быстрых пульсаций связано с динамикой парогазовой оболочки и колебаниями струи электролита, однако средний уровень параметров остается в пределах заданного технологического окна. Это обеспечивает воспроизводимый энерговод в приповерхностную зону тонкостенного алюминия без перехода в режимы разбрызгивания или погасания разряда.

Соответствующая временная зависимость мгновенной мощности, рассчитанная на основе осциллограмм напряжения и тока, приведена на рис. 3.

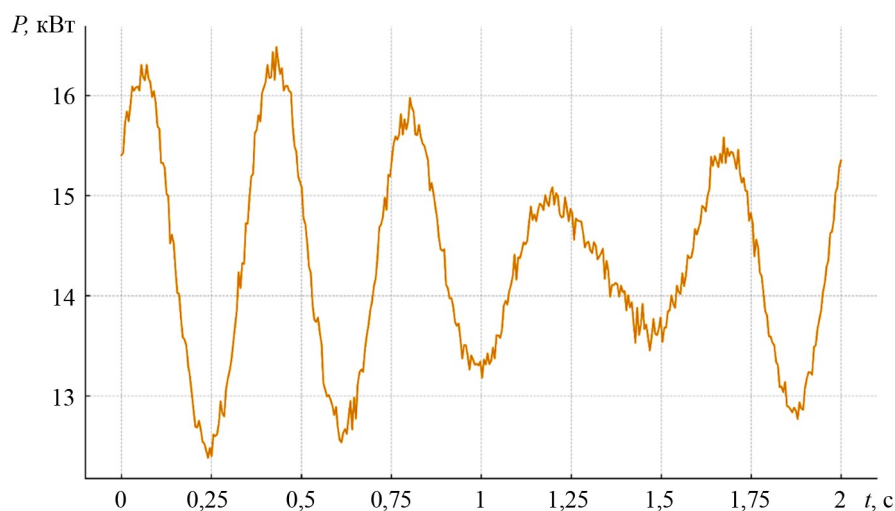


Рис. 3

Мощность в разрядном промежутке составляет в среднем величину порядка 10–15 кВт с пульсациями, обусловленными совместным влиянием флуктуаций напряжения, тока и состояния парогазовой

оболочки. При наличии колебаний $P(t)$ разряд не переходит в неустойчивые режимы с длительными провалами мощности, что важно для сварки тонкостенных изделий, чувствительных к перегреву и прожогам. Сочетание мгновенного энерговода с интенсивным конвективным отводом тепла со стороны электролита обуславливает локальный характер тепловложения и ограниченную протяженность зоны термического влияния. Данное обстоятельство находится в полном соответствии с наблюдаемой микроструктурой и профилями микротвердости.

На рис. 4 показана вольт-амперная характеристика разрядной системы «металлический катод – электролитический анод».

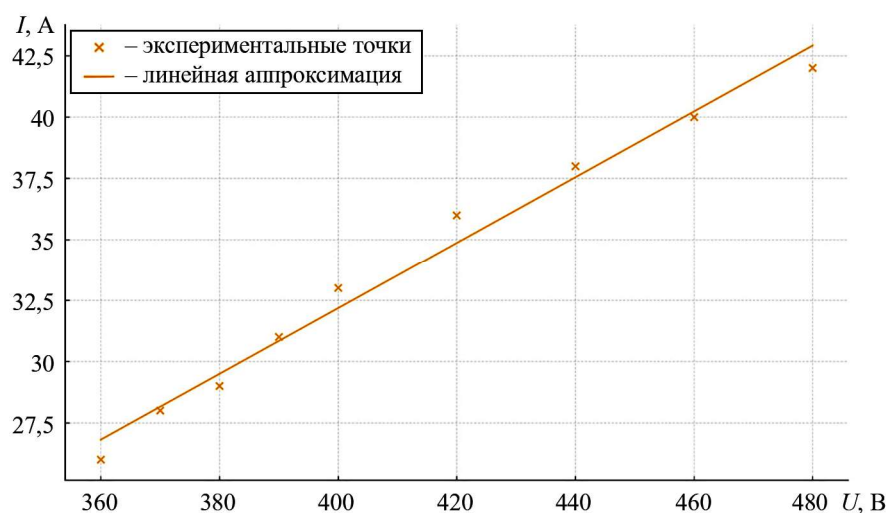


Рис. 4

Исследовался элементный состав сварного шва образца. Для оценки однородности химического состава по сечению сварного соединения было получено десять точечных спектров с шагом 100 мкм. На основании обобщенных аналитических данных установлено, что усредненная массовая доля алюминия составляет примерно 99,85 %, железа – около 0,15 %. Значения стандартного отклонения для алюминия не превышают 0,10 %, для железа – 0,09 %. Интервал варьирования содержания компонентов характеризуется следующими значениями: для алюминия – 99,75–99,95 %, для железа – 0,05–0,24 %.

Анализ показал, что металл шва в сварных соединениях из пластин АД0М характеризуется высоким содержанием алюминия (порядка 99,8–99,9 %) и минимальным количеством железа (около 0,1–0,2 %), что в целом согласуется с химическим составом исходного материала и нормативами для деформируемых алюминиевых сплавов высокой чистоты. Наличие железа в металле шва, по-видимому, обусловлено контактным взаимодействием с конструктивными элементами установки, в первую очередь с нержавеющей пластиной-анодом AISI 304, а также возможным остаточным содержанием примесей в электролите. Колебания содержания железа в интервале 0,05...0,24 % указывают на локальную неоднородность распределения этого элемента и типичны для процессов погружной и разрядной сварки, в которых интенсивная конвекция жидкости и плазмы может способствовать перераспределению примесей. При этом высокая доля алюминия и низкий уровень железа свидетельствуют о том, что в зоне сварного шва практически сохраняется химическая идентичность исходного металла, а взаимодействие с электролитом и элементами разрядной системы не приводит к существенной диффузии посторонних компонентов. Минимальные колебания концентрации алюминия (стандартное отклонение порядка 0,10 %) подтверждают однородность химического состава по поперечному сечению шва, что является благоприятным фактором для формирования стабильных механических и эксплуатационных характеристик соединения. Таким образом, процесс плазменно-жидкостной сварки способствует минимальному внедрению посторонних элементов и формированию швов с высокой химической чистотой. Выявленные локальные вариации содержания железа, обусловленные особенностями электролитической среды и конструкцией узла, не ока-

зывают заметного влияния на металлургическую однородность соединения и могут рассматриваться как второстепенные с точки зрения прочности и коррозионной стойкости.

Микротвердость сварного шва измеряли с помощью подачи на индентор нагрузки 100 г (HV 0,1), время выдержки под нагрузкой составляло 10 с, что обеспечивало хорошую воспроизводимость результатов и достаточную чувствительность к локальным изменениям механических свойств. Для оценки распределения микротвердости по поперечному сечению сварного соединения выполнялся четырнадцатиточечный замер по траектории 1 (рис. 5), проходящей через металл шва, зоны термического влияния и основной металл.

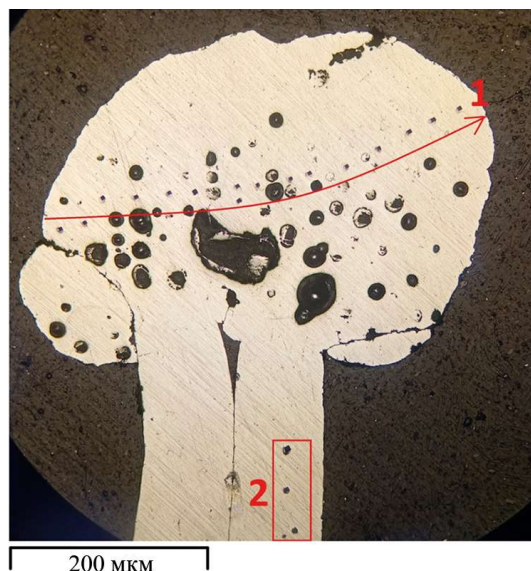


Рис. 5

Такой подход позволил проследить изменение твердости от центральной части шва к исходному материалу и зафиксировать локальные флуктуации, связанные с неоднородностью микроструктуры.

В целях верификации полученных результатов были выполнены дополнительные измерения в исходном материале за пределами зоны сварки (рис. 5, область 2). Это позволило количественно оценить влияние термического цикла плазменно-жидкостной сварки на микротвердость алюминиевых пластин.

Приведем результаты измерений микротвердости по траектории 1 (поверхность сварного шва): отверстие № 1 – HV = 29,1; отверстие № 2 – HV = 28,2; отверстие № 3 – HV = 30,0; отверстие № 4 – HV = 31,5; отверстие № 5 – HV = 31,4; отверстие № 6 – HV = 33,4; отверстие № 7 – HV = 32,5; отверстие № 8 – HV = 32,0; отверстие № 9 – HV = 31,9; отверстие № 10 – HV = 30,9; отверстие № 11 – HV = 30,0; отверстие № 12 – HV = 29,7; отверстие № 13 – HV = 30,0; отверстие № 14 – HV = 28,7.

Приведем результаты измерений микротвердости по траектории 2 (основной металл): отверстие № 1 – HV = 39,9; отверстие № 2 – HV = 37,4; отверстие № 3 – HV = 38,2.

Согласно полученным данным микротвердость в зоне сварного шва заметно ниже, чем в исходном материале. Такое снижение твердости является прямым следствием интенсивного локального нагрева и последующего охлаждения при плазменно-жидкостной сварке, приводящих к частичной рекристаллизации и перестройке микроструктуры. В центральной части шва формируется зона с более крупным зерном и уменьшенной плотностью дислокаций, что и обуславливает понижение твердости по сравнению с исходным алюминием.

По мере удаления от оси шва к зонам термического влияния и далее к основному металлу значения микротвердости постепенно возрастают, что связано с уменьшением степени термического воздействия и частичным сохранением исходной мелкозернистой структуры. Наблюдаемые флуктуации твердости вдоль траектории измерений отражают локальные различия в условиях кристаллизации и распределении остаточных напряжений. Для плазменно-жидкостной сварки, протекающей в электролитической среде

при участии плазменного разряда и интенсивного тепломассообмена, такие вариации являются ожидаемыми, поскольку скорость охлаждения и распределение теплового потока могут существенно меняться на малых расстояниях.

В качестве дополнительного фактора, влияющего на распределение микротвердости, следует рассматривать локальную диффузию примесных элементов, а также микроскопические вариации структуры, обусловленные контактным взаимодействием металла с электролитом и особенностями формирования дугового разряда. Эти локальные структурно-механические особенности в совокупности определяют эксплуатационную надежность соединения, включая его сопротивление зарождению и развитию трещин при внешнем нагружении.

Проведенные измерения микротвердости позволяют не только количественно оценить влияние плазменно-жидкостной сварки на механические свойства материала, но и выявить пространственные закономерности распределения твердости по сечению соединения. Выявленный градиент от размягченной зоны шва к более твердому основному металлу согласуется с наблюдаемыми микроструктурными изменениями и может быть использован при оптимизации режимов сварки с целью повышения прочности и однородности шва.

Исследование микроструктуры сварного соединения выполнялось на инвертированном оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer Z1m. Наблюдения проводились в режиме светлого поля с использованием объективов с увеличением $\times 5$, 10, 50, что обеспечило возможность как обзорной оценки макроструктуры соединения, так и детального анализа локальных микроструктурных изменений. На первом этапе изучалась поверхность шлифа до травления (см. рис. 5), что позволило выявить пористость, макронеоднородности и возможные дефекты в зоне шва. Установлено, что в сечении сварного шва присутствуют микропоры различного диаметра, преимущественно в центральной части зоны плавления. Их появление связано с газовыделением при взаимодействии расплавленного алюминия с электролитом и последующим захватом газовых пузырьков в процессе кристаллизации металла.

После травления реактивом Келлера (рис. 6) детально проанализирована микроструктура соединения. Выявлены отчетливые границы зерен и их распределение по различным зонам, выделены участки плавления и термического влияния с оценкой их ширины, а также обнаружены отдельные фазовые включения, характерные для алюминия высокой чистоты. Установлено, что в зоне шва зерна заметно крупнее и менее упорядочены по сравнению с основным металлом, тогда как в зоне термического влияния наблюдается переходная структура с градиентом размеров зерна и степени их разориентации. Распределение фазовых включений носит локальный характер и коррелирует с областями интенсивного теплового воздействия.

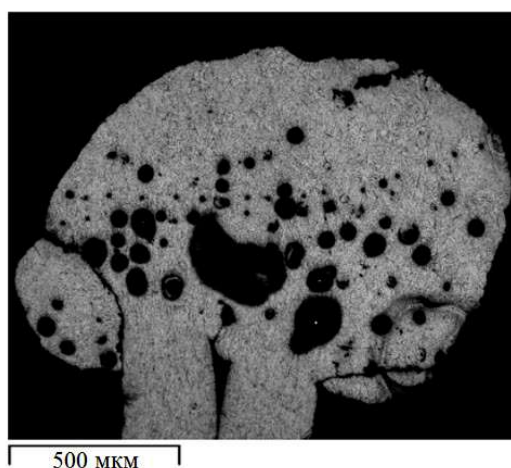


Рис. 6

Микроструктурный анализ подтвердил наличие микропористости различного масштаба в центральной части шва и структурной неоднородностью в пределах зоны плавления и зоны термического

влияния. Эти особенности обусловлены совокупностью интенсивного локального нагрева, высокой скорости охлаждения и неравномерного тепломассообмена в электролитической среде, что приводит к частичной рекристаллизации, изменению плотности дислокаций и формированию участков с различными механическими характеристиками. Выявленные поры и структурные градиенты непосредственно влияют на прочность, пластичность и долговечность сварного соединения, а также на его поведение при циклическом нагружении и коррозионных воздействиях.

Комплексное рассмотрение данных показывает, что плазменно-жидкостная сварка тонкостенных алюминиевых пластин АД0М обеспечивает формирование швов с высокой химической чистотой и приемлемой структурной однородностью, при этом в зоне шва формируется локальное размягчение и микропористость, обусловленные специфическим термомеханическим циклом и газовой составляющей процесса. Учет этих факторов при выборе режимов сварки и конфигурации узла позволяет целенаправленно управлять качеством соединения и адаптировать технологию к требованиям авиационно-космического машиностроения по прочности, герметичности и коррозионной стойкости.

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что при сварке тонкостенных пластин АД0М в диапазоне $U = 370 \div 450$ В и $I = 30 \div 40$ А обеспечивается устойчивое горение разряда и стабильный энерговод без прожогов и с ограниченной зоной термического влияния. Вольтамперная характеристика разрядной системы в этом интервале близка к линейной и задает технологическое окно режимов, пригодных для получения качественного проплава тонкостенных изделий.

Показано, что металл шва практически сохраняет химический состав исходного материала, а содержание примесного железа остается на уровне десятых долей процента. Микроструктурный и микротвердостный анализ установил наличие размягченной зоны сварного соединения, характеризующейся крупнозернистой структурой и локальной микропористостью в центральной области, при этом наблюдается постепенное увеличение твердости по направлению к основному металлу.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации режимов плазменно-жидкостной сварки с целью снижения пористости и повышения надежности сварных соединений тонкостенных алюминиевых конструкций авиационно-космической техники.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного Фонда и Академии наук Республики Татарстан по проекту № 25-29-20147.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брилёв В.В. Особенности сварки алюминия // Вестник магистратуры. 2019. № 1-2 (88). С. 76–77.
2. Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В., Советкин Д.Э. Требования к точности параметров дуговой сварки стыкового шва на алюминиевом сплаве // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2021. № 3. С. 66–74.
3. Chludzinski M. et al. Investigation of the Effects of Gas Metal Arc Welding and Friction Stir Welding Hybrid Process on AA6082-T6 and AA5083-H111 Aluminum Alloys // Metals. 2025. Vol. 15. № 9. Article № 1005.
4. Исаев С.Л., Баранов Д.А., Муратов В.С. Механические свойства и структура сварного шва сплава ЭП-718, полученного электронно-лучевой сваркой // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2025. № 1 (51). С. 51–62.
5. Ma G. et al. Effect and Mechanism Analysis of Process Parameters and Penetration State on Pore Defects of 1060/2A12 Dissimilar Aluminum Alloy Electron Beam Welding Joints // Materials. 2025. Vol. 18. Article № 3477.
6. Маликов А.Г. и др. Лазерная сварка разнородных материалов на основе термически упрочняемых алюминиевых сплавов // Прикладная механика и техническая физика. 2021. № 5 (369). С. 161–171.
7. Горюнов А.И., Нюхляев О.А., Гильмутдинов А.Х. Лазерная сварка труб из стали 09Г2С // Вестник Югорского государственного университета. 2024. № 1. С. 35–45.
8. Ханин В.В., Круглов П.В. Оценка технологических возможностей сварки патрубков в днища изделий ракетно-космической техники фрикционной сваркой // Изв. вузов. Машиностроение. 2012. № 7. С. 67–71.
9. Людмирский Ю.Г., Котлышев Р.Р. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов в строительстве // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2010. № 3. С. 15–22.

10. Каюмов Р.Р. и др. Электрический разряд между металлическим катодом и жидким неметаллическим анодом // Физика плазмы. 2024. № 1. С. 102–109.
11. Гайсин А.Ф. и др. Плазменно-электролитные разряды в газожидкостной среде для получения водорода // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2021. № 2. С. 27–35.
12. Петряков С.Ю. и др. Разряд постоянного тока между металлическим анодом и жидким неметаллическим катодом // Прикладная механика и техническая физика. 2022. № 5 (375). С. 20–32.
13. Желтухин В.С., Гайсин А.Ф., Петряков С.Ю. Механизм пробоя высокочастотного разряда со струйными электролитическими электродами // Письма в Журнал технической физики. 2022. № 17. С. 24–27.
14. Бельгибаев Э.Р. и др. Плазменно-жидкостная сварка пластин из электротехнической стали // Металловедение и термическая обработка металлов. 2024. № 7(829). С. 62–68.

Поступила в редакцию 25.11.25

После доработки 27.11.25

Принята к публикации 1.12.25

Plasma–Liquid Welding of Thin-Walled Aluminum Components for Aerospace Applications

E.R. BEL'GIBAEV¹, M.N. SEMENOV², R.R. KAYUMOV¹, AND A.F. GAISIN¹

¹ Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

² Kazan State Power Engineering University, Kazan

The paper presents the results of an experimental study of plasma–liquid welding of thin-walled AD0M aluminum plates at atmospheric pressure in a “metallic cathode – electrolytic anode” configuration using a 10 wt.% NaCl aqueous solution. The energy-dispersive X-ray spectroscopy confirmed the high chemical purity of the weld metal. Microhardness and microstructural examinations revealed a softened weld zone with coarser grains and the presence of micropores predominantly in the central part of the fusion zone, which are caused by the specifics of heat and mass transfer in the electrolytic environment. The resulting joints are characterized by high chemical homogeneity and a controlled gradient of micromechanical properties, which confirms the promise of plasma–liquid welding for thin-walled aluminum structures in aerospace engineering.

Plasma–liquid welding, thin-walled aluminum alloys, AD0M alloy, gas discharge with a liquid electrode, weld microstructure, microhardness, elemental composition, microporosity, aerospace engineering