

Научная статья
Original article

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-11-306-44-52

А. Н. Ву Ван, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, В. В. Агеев, М. Ю. Емельяненко

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО И ФАЗОВОГО СОСТАВА ЗОНЫ СОЕДИНЕНИЯ БИМЕТАЛЛА АЛЮМИНИЙ-МЕДЬ, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ ВБЛИЗИ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ СВАРИВАЕМОСТИ

Волгоградский государственный технический университет

Автор, ответственный за переписку: Валентин Олегович Харламов (harlamov_vo@mail.ru)

Аннотация: В работе представлены результаты исследования микроструктуры, фактографии, элементного и фазового состава зоны соединения биметалла алюминий-медь, полученного сваркой взрывом вблизи нижней границы свариваемости (при энергии пластической деформации 0,17 – 0,24 МДж/м²). Показано, что в исследованном диапазоне энергий содержание меди в составе оплавов меняется с 20 до 50 Ат.%, что соответствует твердому раствору на основе соединения CuAl₂ плюс алюминий. Выявлено, что при образовании равнопрочного сварного соединения между медью и алюминием содержание оплавов в изломе снижается от 55 – 63% до 27 – 21% при неизменном линейном содержании оплавов равном 56 – 67%. При этом количество областей алюминия увеличивается с 34 – 36% до 57 – 73%, что говорит о смещении зоны разрушения от оплавов вглубь алюминия с изменением преимущественного характера разрушения с хрупкого на вязкий.

Ключевые слова: Сварка взрывом, зона соединения, оплав, равнопрочность, химический анализ, фактография, излом, характер разрушения

Благодарности: Центру коллективного пользования «Физико-химические методы исследования» ВолгГТУ за проведение исследований на электронном микроскопе FEI Versa 3D

Для цитирования: Ву Ван А. Н., Харламов В. О., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Агеев В. В., Емельяненко М. Ю. Исследование химического и фазового состава зоны соединения биметалла алюминий-медь, полученного сваркой взрывом вблизи нижней границы свариваемости. Известия ВолгГТУ; 2025; 306(11):44–52.
<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-44-52>

A. N. Vu Van, V. O. Kharlamov, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak, V. V. Ageev, M. Yu. Emelyanenko

INVESTIGATION OF THE CHEMICAL AND PHASE COMPOSITION OF THE ALUMINUM-COPPER BIMETAL JUNCTION ZONE OBTAINED BY EXPLOSION WELDING NEAR THE LOWER WELDABILITY LIMIT

Volgograd State Technical University

The author responsible for the correspondence: Valentin Olegovich Kharlamov (harlamov_vo@mail.ru)

Annotation: The paper presents the results of a study of the microstructure, factography, elemental and phase composition of the aluminum-copper bimetal junction zone obtained by explosion welding near the lower limit of weldability (at a plastic deformation energy of 0.17 – 0.24 MJ/m²). It is shown that in the studied energy range, the copper content in the composition of the alloys varies from 20 to 50 Atm.%, which corresponds to a solid solution based on the compound CuAl₂ plus aluminum. It was found that when an equal-strength welded joint is formed between copper and aluminum, the melt content in the fracture decreases from 55 – 63% to 27 – 21% with a constant linear melt content of 56 – 67%. At the same time, the number of aluminum regions increases from 34 – 36% to 57 – 73%, which indicates a shift in the fracture zone from the melts deeper into the aluminum with a change in the predominant fracture pattern from brittle to viscous.

Keywords: Explosion welding, joint zone, melting zone, strength, chemical analysis, fractography, fracture, the nature of destruction

Acknowledgements: Center for Collective use "Physico-chemical Research Methods" of VolgSTU for conducting research on the FEI Versa 3D electron microscope

To cite: Vu Van A. N., Kharlamov V. O., Kuzmin S. V., Lysak V. I., Ageev V. V., Emelyanenko M. Yu. Investigation of the chemical and phase composition of the aluminum-copper bimetal junction zone obtained by explosion welding near the lower weldability limit. Izvestia VSTU; 2025; 306(11):44–52.
<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-44-52>

Введение

Биметалл медь-алюминий предназначен для изготовления из него контактных переходников и токоведущих элементов электротехнического назначения с улучшенным комплексом физико-механических характеристик. Однако, между медью и алюминием возможно образование хрупких интерметаллидов при локальном оплавлении, препятствующих формированию качественного биметалла. Авторами ряда работ [1-5] показано, что качественное сварное соединение при сварке металлов взрывом можно получить, если в зоне соединения реализуется определённый уровень сдвиговых деформаций. Несмотря на многочисленные исследования по выявлению влияния параметров соударения на свариваемость взрывом меди с алюминием, с позиции типа взаимодействия металлов данная проблема практиче-

ски не освещена, что требует проведения исследования химического и фазового состава в зоне соединения биметалла алюминий-медь, полученного сваркой взрывом вблизи нижней границы свариваемости.

Материалы и методы исследования

В опытах использовались листы меди толщиной 2,5 мм и алюминия толщиной 4 мм марок М1 и АД1 соответственно (таблица). Для сварки взрывом меди с алюминием применялась классическая плоскопараллельная схема соударения двух пластин (рис. 1). Режимы сварки в опытах обеспечивали пересечение нижней границы свариваемости за счет изменения угла соударения γ от $8,95^\circ$ до $12,5^\circ$ при постоянной скорости точки контакта $V_k = D = 1750$ м/с (рис. 2) [7] при этом энергия пластических деформаций W_2 изменялась в диапазоне значений от 0,12 до 0,24 МДж/м².

Характеристики используемых материалов

Марка	Химический состав, мас.%										σ_b , МПа
	Fe	Ni	S	As	Pb	Zn	Cu	Al	Mn	Ti	
М1	до 0,005	до 0,002	до 0,004	до 0,002	до 0,005	до 0,004	≥ 99.9	–	–	–	220
АД1	–	–	–	–	–	до 0,1	до 0,05	≥ 99	до 0,05	до 0,05	90

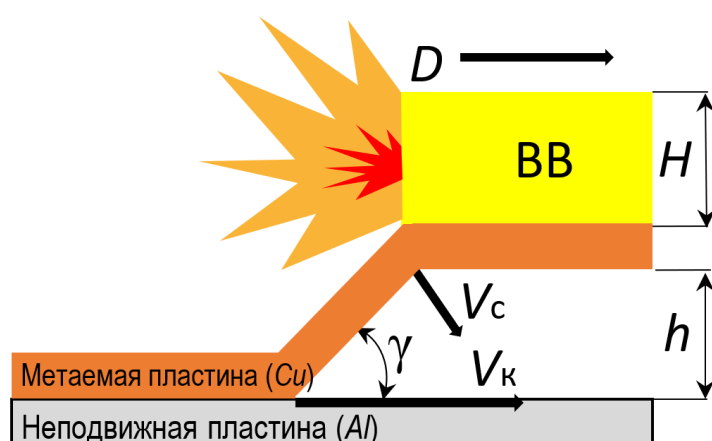


Рис. 1. Схема соударения пластин при сварке взрывом:

ВВ – взрывчатое вещество (аммонит 6 ЖВ+песок); D – скорость детонации; V_k – скорость точки контакта; V_c – скорость соударения; γ – угол соударения; H – высота заряда; h – высота зазора

Скорость детонации взрывчатого вещества D контролировалась электроконтактным методом [9] с помощью прибора для измерения микросекундных интервалов времени КТБ «Интервал». В качестве взрывчатого вещества использовалась смесь аммонита 6ЖВ с кварцевым песком в соотношении 50/50.

Механические испытания сваренных взрывом биметаллов проводили на отрыв слоев образцов - выдавок [8] согласно ОСТ 5.9311-78 на разрывной машине Р-20 (рис. 3, а). Заготовки под образцы вырезались из центра полученных пластин, количество вырезанных элементов на одну пластину композита составляет 4 штуки, из которых

один используется для подготовки микрошлифа, а оставшиеся три для подготовки образцов для механических испытаний на отрыв слоёв (рис. 3, б).

Микроструктура и характер разрушения зоны соединения образцов после механических испытаний исследованы на растровом электронном микроскопе *Versa 3D, FEI*, Чехия, с применением детектора обратно-отраженных электронов (CBS), позволяющем получать изображение с высоким контрастом по атомному номеру элемента Z (Cu – 29, Al – 13) при низкой чувствительности к рельефу образца. Таким образом области электронной фотографии, соответствующие чистой меди, будут ярко белого цвета, алю-

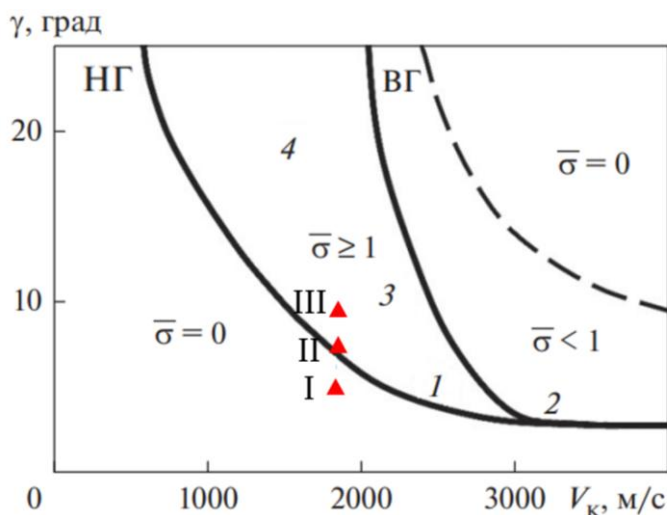


Рис. 2. Область свариваемости меди с алюминием при сварке взрывом [7]:
НГ – нижняя граница, ВГ – верхняя граница. Римскими цифрами обозначены режимы сварки, использованные в опытах

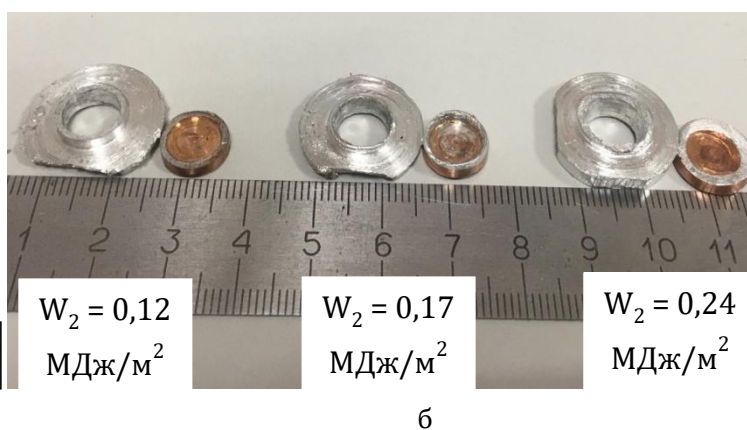
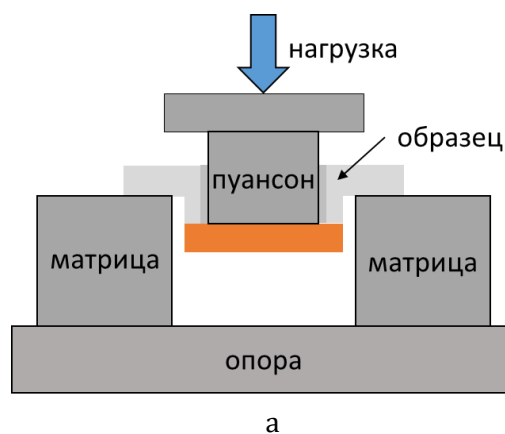


Рис. 3. Схема проведения механических испытаний на отрыв слоёв биметалла (а) и внешний вид образцов-выдавок после разрушения (б)

минию – темного, а оплавом - серого цвета. Содержание элементов и их распределение поперек границы соединения получены с помощью системы энерго-дисперсионного анализа Oxford AZtecLive Expert с детектором Ultim Max 65. Стехиометрию интерме-

таллидных соединений уточняли с помощью рентгеноструктурного фазового анализа на дифрактометре D8 Advance (Bruker, Германия). Идентификацию фаз осуществляли в программном обеспечении к дифрактометру Diffrac.EVA (version 4.2.1) с использованием

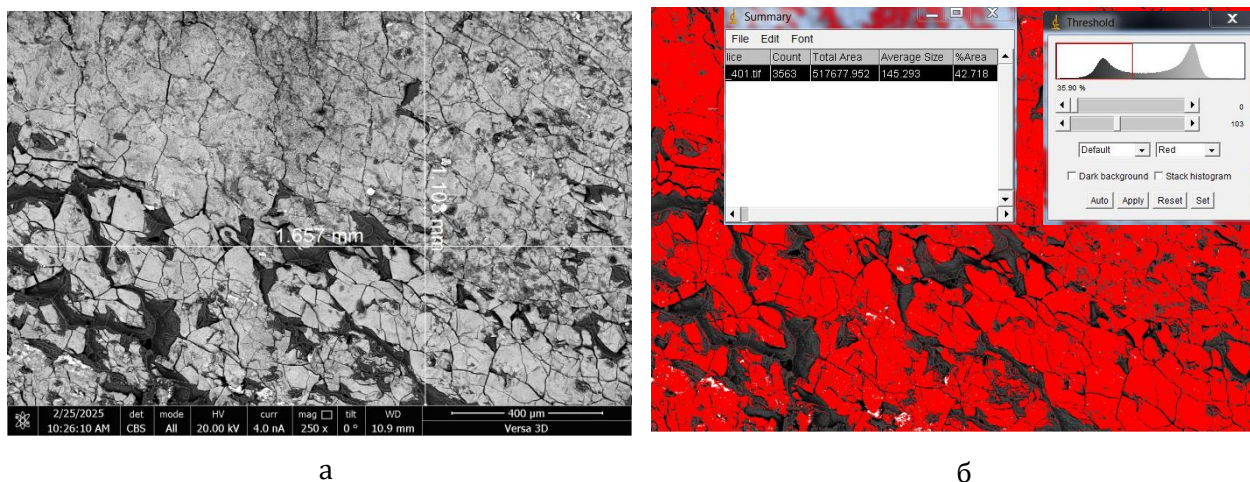


Рис. 4. Методика определения содержания компонентов в зоне разрушения:

а – фрактография зоны соединения после механических испытаний;
б – результат обработки электронного изображения с помощью инструмента *Threshold* в программе *ImageJ* v1.52

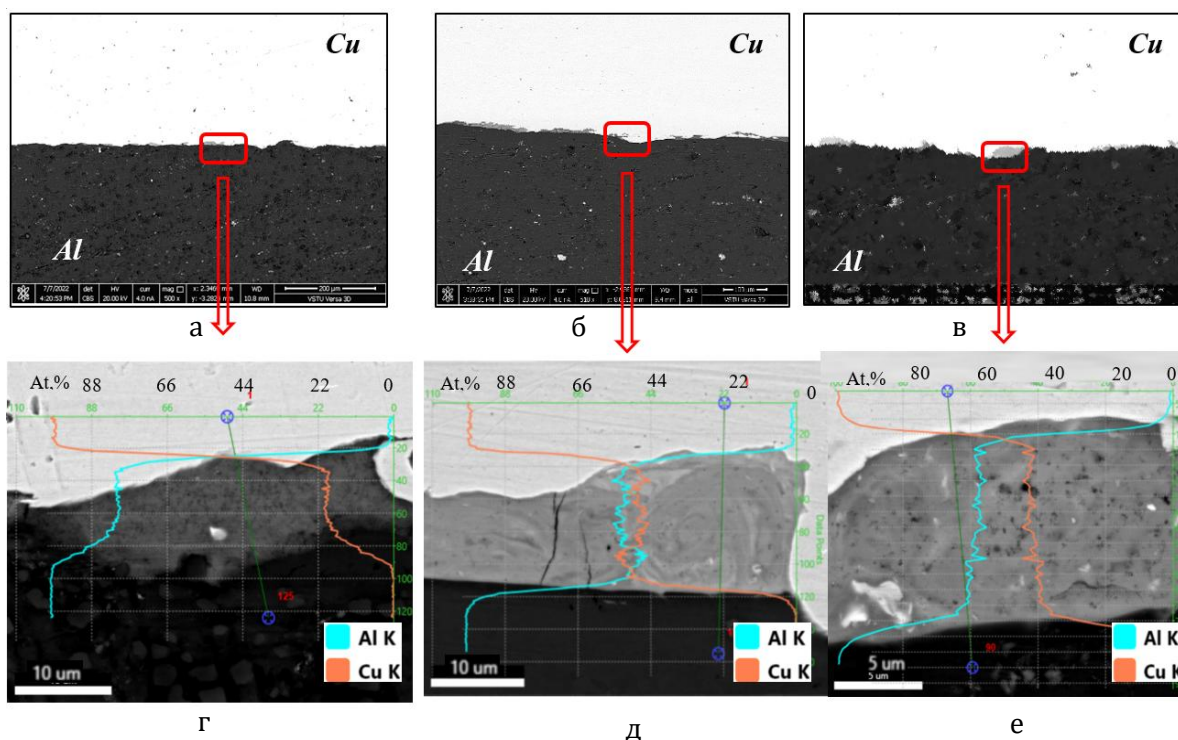


Рис. 5. Микроструктура и распределение элементов внутри оплавов в зоне соединения биметалла Cu-Al, полученного вблизи нижней границы свариваемости взрывом при энергиях W_2 (МДж/м²) 0,12 (а, г); 0,17 (б, д); 0,24 (в, е)

лицензионной базы данных Powder Diffraction File-2 (The International Center for Diffraction Data). Процентное содержание компонентов (алюминий, медь, оплав) в зоне соединения разрушенных при механических испытаниях образцов определяли на медной и алюминиевых сторонах выдавок по разнице контраста как отношение площади включений (рис. 4, а) к общей площади электронного изображения с помощью инструмента *Threshold* программы *ImageJ* v1.52 (рис. 4, б).

Количественное содержание оплавов вдоль линии соединения определяли линейным методом при обработке в той же программе электронных фотографий, полученных на микрошлифах.

Полученные результаты и их обсуждение

Исследование микроструктуры показало, что зона соединения меди с алюминием в исследованном диапазоне низких энергий является безволновой (рис 5, а – в). Однако несмотря на крайне малые энергозатраты,

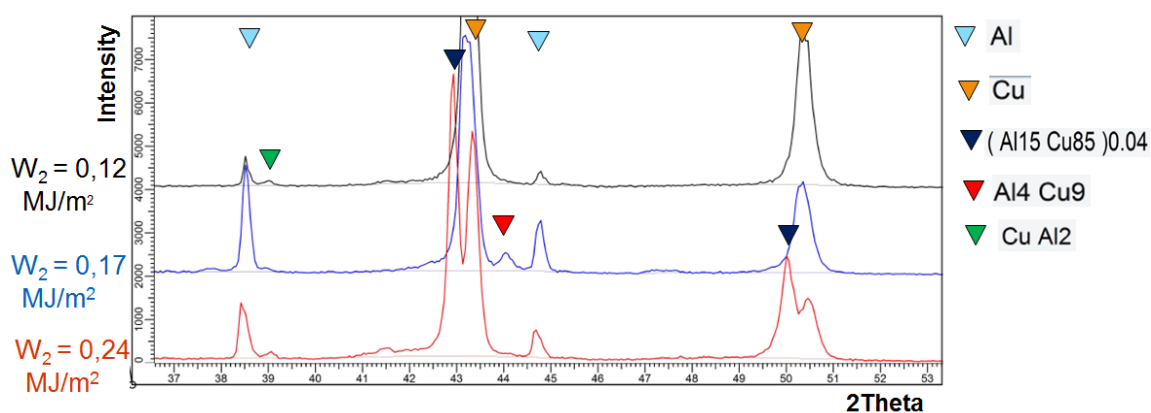


Рис. 6. Влияние энергии пластических деформаций на фазовый состав в зоне соединения сваренных взрывом образцов биметалла медь-алюминий вблизи нижней границы свариваемости

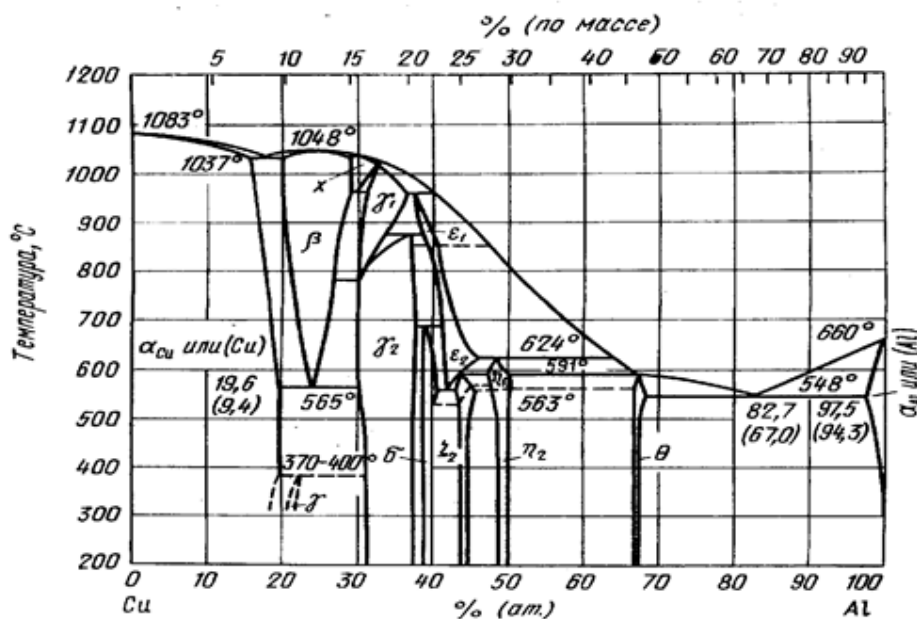


Рис. 7. Диаграмма состояния алюминий-медь [10]

в образце, полученном на режиме ниже нижней границы свариваемости ($0,12 \text{ МДж/м}^2$) обнаружены оплавы в количестве 15 %, имеющие мелкодисперсное двухфазное строение (рис. 5, г).

При повышении энергии W_2 с $0,12$ до $0,17$ и $0,24 \text{ МДж/м}^2$ содержание оплавов скачкообразно увеличивается до 56 и 57 % соответственно (рис. 8), а соотношения элементов в оплавах Al/Cu изменяется от 80/20 до 50/50 At.% (рис. 5, г – е).

Сопоставление результатов элементного

участки прихватившегося алюминия, что указывает на то, что отрыв в основном произошел по межфазной границе, на которой не возникло условий для создания прочного соединения между свариваемыми металлами. Отсутствие оплавов в изломе говорит о том, что они находятся внутри участков прихватившегося алюминия на границе с медью.

Повышение энергии W_2 до $0,17 \text{ МДж/м}^2$ приводит к росту содержания оплавов вдоль линии соединения до 56% и увеличению со-

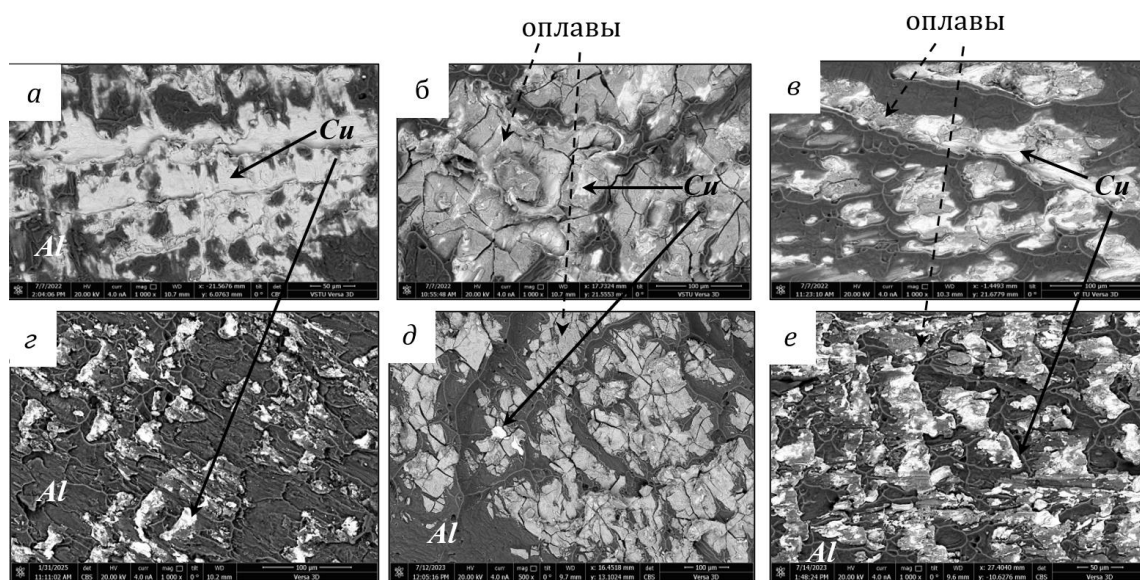


Рис. 8. Микроструктура образцов биметалла $Cu-Al$ при энергиях W_2 [МДж/м²] $0,12$ (а); $0,17$ (б); $0,24$ (в) и соответствующая им фрактография зоны соединения со стороны меди (а, б, в) и со стороны алюминия (г, д, е)

(рис. 5, г.) и рентгеноструктурного анализов (рис. 6) с известной диаграммой состояния алюминий-медь (рис. 7) позволяет предположить, что при сварке взрывом на режиме ниже нижней границы свариваемости образуются участки локального оплавления, имеющие фазы $(Al)+\theta$ (твёрдый раствор на основе соединения $CuAl_2$) и состав близкий к эвтектическому с температурой плавления 548°C .

Однако механические испытания на отрыв слоев показали, что энергии пластической деформации равной $0,12 \text{ МДж/м}^2$ недостаточно для образования прочного соединения. В изломе (рис. 8, г, ж) наблюдаются гладкая поверхность меди и отдельные

удержания меди в некоторых из них (рис. 5, д) до значений, соответствующих η -фазе (на основе соединения $AlCu$). Однако механические свойства на отрыв слоев соединения достигают значений равноправности. На поверхности разрушенного образца –выдавki (рис. 8, б, д) обнаружены обширные области оплавленного металла, покрытые сеткой трещин и малые островки чистой гладкой меди. Участки приварившегося алюминия, в отличие от образца № I полученного на режиме ниже нижней границы свариваемости, теперь имеют характерный вид вязкого разрушения при близком процентном содержании по площади излома (рис. 9). Это свидетельствует о том, что основная область раз-

рушение теперь проходит по оплавам и имеет хрупкий характер.

При параметрах сварки взрывом, соответствующих энергии W_2 равной 0,24 МДж/м² происходит вовлечение в процессы совместной пластической деформации более глубоких слоев соударяемых металлов [7] при неизменном линейном содержании оплавов (57%). Содержание элементов Al/Cu равно 60/40 At.% (рис. 5, е) соответствует двухфазной области диаграммы $\eta+\theta$. При механических испытаниях соединение также оказалось равнопрочным (рис. 9). В изломе (рис. 8, в, е) теперь преобладают участки вязкого разрушения по алюминию (до 73%). Внутри видимых участков оплавленного металла отсутствуют трещины, а их количество снизилось с 55-63% до 21-27%.

Выводы

При сварке взрывом меди с алюминием в диапазоне энергии пластической деформации 0,17 - 0,24 МДж/м² концентрация меди в

составе оплавов меняется с 20 до 50 At.% при фазовом составе соответствующему твердому раствору на основе соединения $CuAl_2$ плюс алюминий. При достижении равнопрочности вблизи нижней границы свариваемости разрушение в основном проходит по оплавам (55-63 %) и имеет хрупкий характер с сеткой трещин, доля вязкого разрушения по алюминию составляет 34-36 %. Повышение энергии пластических деформаций W_2 от 0,17 до 0,24 МДж/м² приводит к снижению содержания оплавов в изломе до 21-27%, а доля вязкого разрушения по алюминию возрастает до 57-73%. Отсутствие изменения линейного содержания оплавов в микроструктуре при двукратном снижении содержания оплавов в изломе свидетельствует о смещении зоны разрушения образцов биметалла вглубь алюминия и изменении преимущественного характера излома с хрупкого на вязкий.

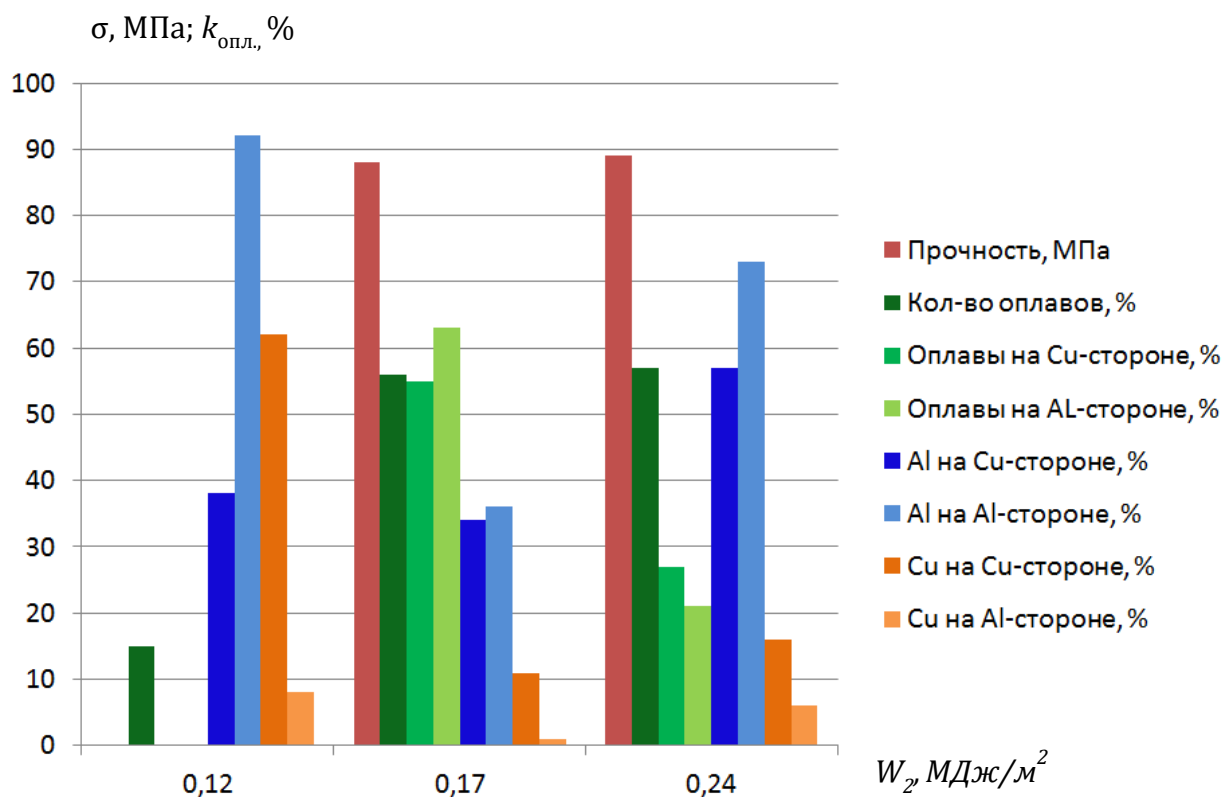


Рис. 9. Влияние энергии пластических деформаций на прочность и содержание оплавов вдоль линии соединения и по площади излома сваренных взрывом образцов биметалла медь-алюминий вблизи нижней границы свариваемости

Библиографический список

1. Энергосберегающие композиционные элементы токоподводящих узлов силовых электрических цепей / Е. А. Чугунов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Энергетик. – 2001. – №9. – С. 13-14.
2. Новые биметаллические переходные элементы для силовых электрических цепей / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин, Ю. Г. Долгий, П. В. Берсенев, С. Я. Ихелис, Е. А. Чугунов, Б. А. Лемякин // Энергетик. – 1995. – №4. – С. 7-10.
3. Новые конструкции токоподводящего узла катодной секции электролизера алюминия / А. П. Пеев, Ю. Г. Долгий, Лысак В. И., С. В. Кузьмин, Е. А. Чугунов, М. П. Кононов // Цветные металлы. – 2002. – №8. – С. 51-54.
4. Техничко-экономическая эффективность применения новых конструкций композиционных токоподводов электролизера алюминия / А. П. Пеев, Ю. Г. Долгий, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, В. И. Кузьмин, А. Н. Кривенцов, А. А. Каравайный // Вестник машиностроения. – 2004. – №6. – С. 77-80.
5. Физические основы и области практического применения сварки металлов взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин, А. Н. Кривенцов, В. И. Кузьмин // Наука производству. – 2005. – №1. – С. 17-21.
6. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2009616788 от 7 дек. 2009 г. РФ Программное обеспечение расчёта параметров взаимодействия разнородных металлов при импульсном нагружении (сварка взрывом) / С.В. Хаустов, В.И. Лысак, С.В. Кузьмин; ВолгГТУ. – 2009.
7. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – Москва : Издательство "Машиностроение-1", 2005. – 544 с.
8. Кузьмин, В. И. Методики испытаний сваренных взрывом композиционных материалов : учебное пособие / В. И. Кузьмин, С. В. Кузьмин, А. П. Пеев ; В. И. Кузьмин, С. В. Кузьмин, А. П. Пеев ; М-во образования и науки Российской Федерации, Волгоградский гос. технический ун-т. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2011. – 65 с.
9. Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, В. П. Челышев, Б.И. Шехтер. – 2-е издание, переработанное. – Москва: Главная редакция физико-математической литературы Издательства «Наука», 1975. – 704 с.
10. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник : в 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. Т. 1. – Москва : Машиностроение, 1996. – 991 с.

Информация об авторах

Алексей Нгианович Ву Ван – аспирант кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0009-0000-2343-8281>

e-mail: avuvan@mail.ru

Валентин Олегович Харламов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», ведущий инженер Центра коллективного пользования «Физико-химические методы исследования» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0002-5039-4592>

e-mail: harlamov_vo@mail.ru

Сергей Викторович Кузьмин – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, первый проректор ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>

e-mail: weld@vstu.ru

Владимир Ильич Лысак – академик РАН, доктор технических наук, профессор, научный руководитель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Виктор Витальевич Агеев – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

e-mail: frosttboll_1337@bk.ru

Максим Юрьевич Емельяненко – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

e-mail: maksemelyanenko123@gmail.com

Information about the authors

Alexey N. Wu Wang is a postgraduate student at the Department of Welding Equipment and Technology, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0009-0000-2343-8281>

e-mail: avuvan@mail.ru

Valentin O. Kharlamov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding Equipment and Technology, Senior Engineer at the Center for Collective Use of Physico-Chemical Research Methods, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0002-5039-4592>

e-mail: harlamov_vo@mail.ru

Sergey V. Kuzmin – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice-Rector of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>

e-mail: weld@vstu.ru

Vladimir I. Lysak – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Viktor V. Ageev is a Master's student at Volgograd State Technical University

e-mail: frosttboll_1337@bk.ru

Maxim Y. Emelianenko is a Master's student at Volgograd State Technical University

e-mail: maksemelyanenko123@gmail.com

Вклад авторов

А. Н. Ву Ван – подготовка экспериментов по сварке взрывом, проведение механических испытаний, написание текста статьи

В. О. Харламов – проведение исследований методами электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа

С. В. Кузьмин – расчеты параметров сварки взрывом, анализ полученных результатов

В. И. Лысак – определение цели работы, участие в обсуждении результатов

В. В. Агеев, М. Ю. Емельяненко – подготовка материалов для проведения исследований

Contribution of the authors

A. N. Vu Van – preparation of explosion welding experiments, conducting mechanical tests, wrote the article.

V. O. Kharlamov – conducting studies using electron microscopy and X-ray structural analysis.

S. V. Kuzmin – calculations of explosive welding parameters, analyses of results.

V. I. Lysak – defining the purpose of the work, participation in discussion of results

V. V. Ageev, M. Y. Emelianenko – preparation of materials for research

*Статья поступила в редакцию 15.10.2025, доработана 30.10.2025,
подписана в печать 21.11.2025*

*The article was submitted 15.10.2025, revised 30.10.2025,
accepted for publication 21.11.2025*