

А. Н. Ву Ван, В. О. Харламов, А. Д. Кочкалов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОПЛАВОВ
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИМЕТАЛЛА Cu-Al, ПОЛУЧЕННОГО
СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ ВБЛИЗИ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ СВАРИВАЕМОСТИ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: weld@vstu.ru

В работе методами растровой электронной микроскопии исследована зона соединения биметалла *Cu-Al*, полученного при помощи сварки взрывом вблизи нижней границы свариваемости. Проведен микрорентгеноспектральный энергодисперсионный элементный анализ (*EDS*) оплавов в зоне соединения. Выявлено, что оплавы имеют мелкодисперсную двухфазную микроструктуру, соответствующую эвтектике (*Al*)+ θ . Обнаружено, что с увеличением энергии пластических деформаций W_2 с 0,12 до 0,24 МДж/м² линейное содержание оплавов увеличивается с 15 до 57 %, а соотношение элементов *Al/Cu* изменяется от 80/20 до 50/50 ат.%. При этом механическая прочность на отрыв слоев биметалла при кинематических параметрах, соответствующих пересечению нижней границы свариваемости, скачкообразно увеличивается с нуля до равнопрочного значения 89 МПа.

Ключевые слова: сварка взрывом, зона соединения, оплав, прочность, химический анализ, фазовый состав, эвтектика

A. N. Vu Van, V. O. Kharlamov, A. D. Kochkalov, S. V. Kuz'min, V. I. Lysak

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MELT CHEMICAL COMPOSITION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF Cu-Al BIMETAL OBTAINED BY EXPLOSIVE WELDING NEAR THE LOWER LIMIT OF WELDABILITY

Volgograd State Technical University

In this work, using scanning electron microscopy, the joint zone of Cu-Al bimetal obtained by explosion welding near the lower limit of weldability was studied. Micro-X-ray spectral energy dispersive elemental analysis (EDS) of melts in the joint zone was carried out. It was revealed that the melts have a finely dispersed two-phase microstructure corresponding to the eutectic (Al) + θ . It was found that with an increase in the energy of plastic deformation W_2 from 0.12 to 0.24 MJ/m², the linear content of melts increases from 15 to 57%, and the ratio of Al/Cu elements changes from 80/20 to 50/50 At.%. In this case, the mechanical tear strength of bimetal layers with kinematic parameters corresponding to the intersection of the lower limit of weldability increases abruptly from zero to an equal strength value of 89 MPa.

Keywords: explosion welding, joint zone, melting zone, strength, chemical analysis, phase composition, eutectic

Введение

Сварка взрывом представляет собой перспективный метод, который обеспечивает формирование прочного соединения между двумя (или более) металлами путем их соударения под действием энергии, высвобождающейся при взрыве заряда взрывчатого вещества. Этот метод используется для создания биметаллических (многослойных) листов, цилиндрических изделий, а также слоистых композиционных материалов из различных металлов, которые невозможно сварить другими известными способами.

Несмотря на обширное исследование биметаллов, полученных с применением метода сварки взрывом, остаются не рассмотренными многие вопросы, касающиеся конкретных изделий с различными функциональными назначениями. Сложность структурных процессов и физико-механических свойств, происходящих в зоне сварного шва и околосшовной зоны, требует дальнейших исследований.

Биметалл *Cu-Al* предназначен для изготовления из него контактных переходников и то-

коведущих элементов электротехнического назначения с улучшенным комплексом физико-механических характеристик. Применение данного материала делает возможным обеспечение идеального электрического контакта [1–5]. Однако, между медью и алюминием возможно образование хрупких интерметаллидов при локальном оплавлении в результате соударения, препятствующих формированию качественного биметалла. Поэтому целью работы было изучение влияния химического состава оплавов на прочностные свойства биметалла *Cu-Al*, 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 (табл. 1). Для сварки взрывом меди с алюминием применялась классическая плоскопараллельная схема соударения двух пластин (рис. 1) вблизи нижней границы свариваемости [7] на режимах отмеченных красными точками (рис. 2).

Таблица 1

Характеристики используемых материалов

Марка	Химический состав, мас. %										$\sigma_{\text{в}}$, 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

Для варьирования энергией пластических деформаций W_2 в диапазоне значений от 0,12 до 0,24 МДж/м² изменялся угол соударения γ от 8,95° до 12,5° при постоянной скорости точки контакта $V_k = D = 1750$ м/с. Скорость

детонации 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.

Установочные параметры (высота заряда H и высота зазора h) подбирались с помощью

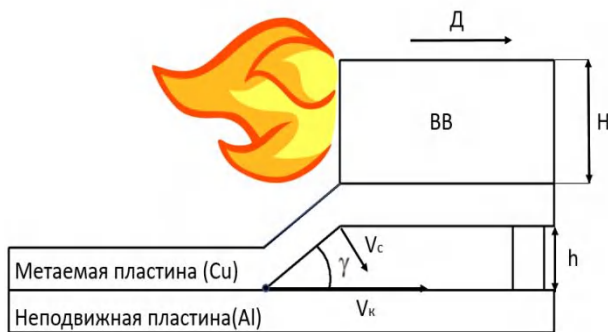


Рис. 1. Схема соударения пластин при сварке взрывом:

V_k – скорость точки контакта; V_c – скорость соударения;
 γ – угол соударения; H – высота заряда; h – высота зазора

специального программного обеспечения [6] таким образом, чтобы обеспечить изменение заданных кинематических параметров режимов сварки взрывом (рис. 3).

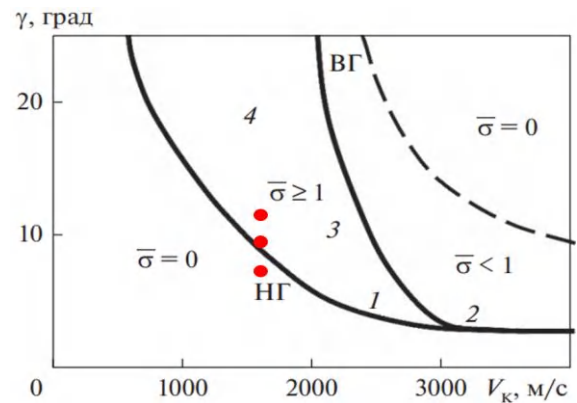


Рис. 2. Область свариваемости меди с алюминием при сварке взрывом [7]. Красными точками обозначены режимы сварки, использованные в опытах

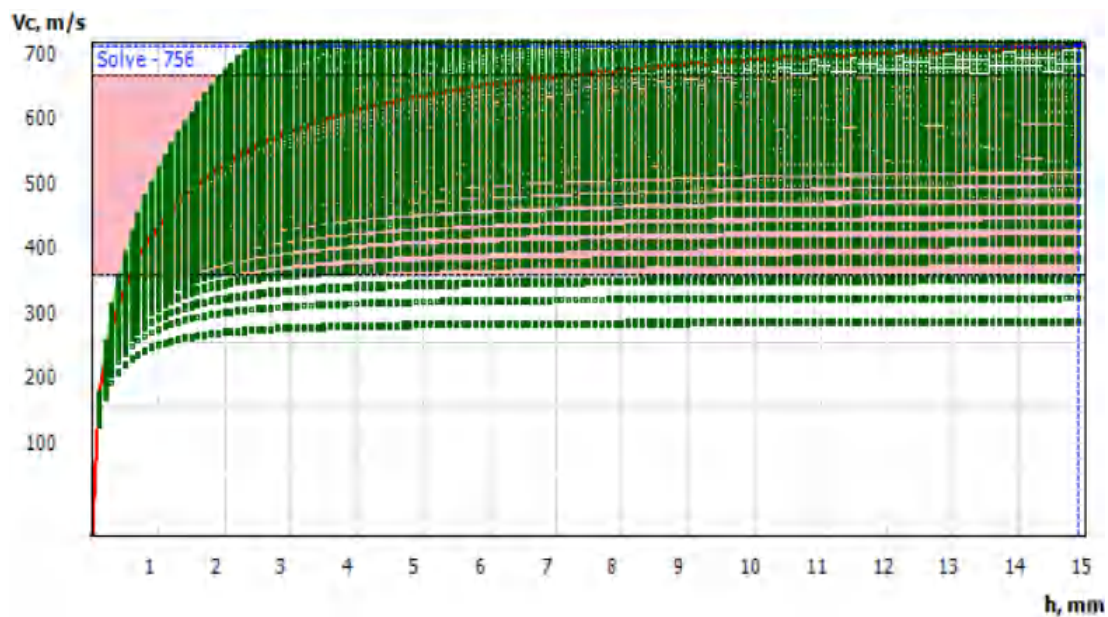


Рис. 3. Кривые разгона для подбора установочных параметров сварки взрывом меди с алюминием при помощи специализированного программного обеспечения.

Механические испытания сваренных взрывом биметаллов проводили на отрыв слоев [8] согласно ОСТ 5.9311–78 на разрывной машине Р-20 (рис. 4). Заготовки под образцы вырезались из центра полученных пластин, количество вы-

резанных 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 слоев (рис. 4).

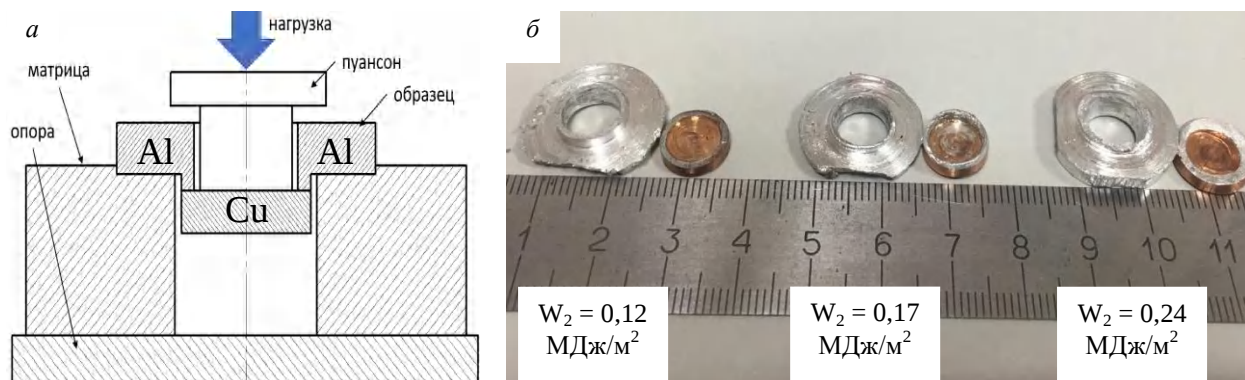


Рис. 4. Схема проведения механических испытаний на отрыв слоев биметалла (а) и внешний вид образцов после разрушения (б)

Микроструктура и химический анализ зоны соединения, изучены в режиме обратно-отраженных электронов (CBS) на растровом электронном микроскопе Versa 3D, FEI, Чехия, оснащенном интегрированным микрорентгеноспектральным энергодисперсионным детектором (EDS) Apollo-X, EDAX, США. Содержание оплавов определяли линейным методом.

Полученные результаты и их обсуждение

Зона соединения меди с алюминием на образцах полученных при помощи сварки взрывом вблизи нижней границы свариваемости на

энергиях пластической деформации W_2 в интервале от 0,12 до 0,24 МДж/м² ожидаемо оказалась безволновой (рис. 5). Однако при этом были выявлены участки оплавленного металла протяженностью от 17 до 290 мкм в количестве от 15 до 57 % (табл. 2).

Исследование микроструктуры показали, что оплавки имеют мелкодисперсное двухфазное строение, а также содержат частицы меди (рис. 6). При этом соотношения элементов Al/Cu изменяется от 80/20 до 50/50 At.% при повышении энергии W_2 с 0,12 до 0,24 МДж/м².

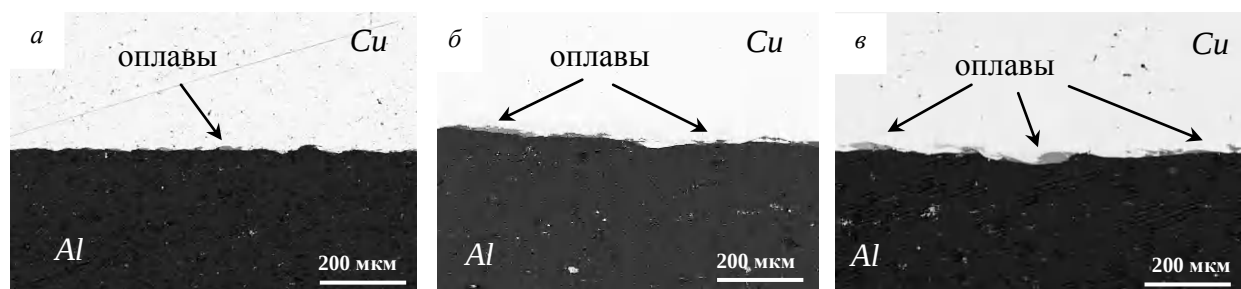


Рис. 5. Зона соединения биметаллов Cu-Al, полученных при помощи сварки взрывом вблизи нижней границы свариваемости на различных энергиях W_2 (МДж/м²) 0,12 (а); 0,17 (б); 0,24 (в)

Таблица 2

Параметры режимов сварки взрывом и механические свойства биметалла

Энергия W_2 , МДж/м ²	Высота зазора, мм	Измеренная скорость детонации $D=V_k$, м/с	Скорость соударения V_c , м/с	Угол соударения, γ	Прочность на отрыв слоев, МПа	Количество оплавов, %
0,12	0,5	1700± 50	202	8,95	0	15
0,17	1	1700± 50	245	10,9	88	56
0,24	2	1700± 50	285	12,5	89	57

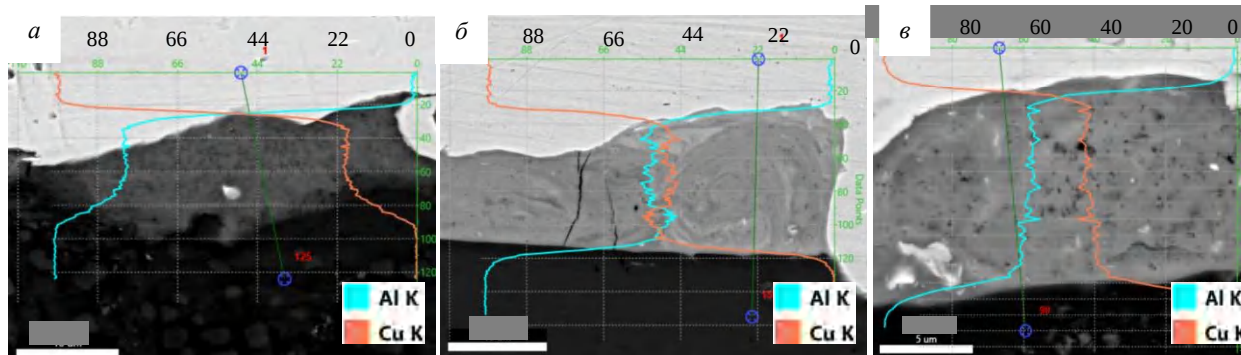


Рис. 6. Микроструктура и распределение элементов внутри оплавов в зоне соединения биметалла Cu-Al, полученного вблизи нижней границы свариваемости взрывом при энергиях W_2 (МДж/м²) 0,12 (а); 0,17 (б); 0,24 (в)

Сопоставление данных EDS анализа с известной диаграммой состояния алюминий-медь [10] позволяет предположить, что при сварке взрывом на режиме ниже нижней границы свариваемости образуются участки локального оплавления, имеющие фазы (Al)+ θ (твердый раствор на основе соединения $CuAl_2$) и состав близкий к эвтектическому (рис. 6, а) с температурой плавления 548 °С. Однако механические испытания на отрыв слоев показали, что энергии пластической деформации равной 0,12 МДж/м² недостаточно для образования прочного соединения, а внешний вид разрушенного образца (рис. 6, б), указывает на то что отрыв произошел по межфазной границе.

Повышение энергии W_2 до 0,17 МДж/м² (табл. 2) приводит к вовлечению в процессы совместной пластической деформации более глубоких слоев соударяемых металлов [7], что приводит к росту содержания оплавов вдоль линии соединения до 56 % и увеличению содержания меди в некоторых из них (рис. 6, б) до значений соответствующих η -фазе (на основе соединения $AlCu$). Однако механические свойства на отрыв слоев соединения достигают значений равноправности.

При параметрах сварки соответствующим энергии W_2 равной 0,24 МДж/м² линейное содержание оплавов незначительно увеличивается до 57 %, но происходит их заметное укрупнение в поперечнике (рис. 5, в). Содержание элементов Al/Cu равно 60/40 At.% (рис. 6, б) соответствует двухфазной области диаграммы $\eta+\theta$. При механических испытаниях соединение также оказалось равнопрочным, а разрушение образца, как видно из рис. 6, б происходит по алюминию.

Выводы

При сварке взрывом меди с алюминием вблизи нижней границы свариваемости увеличение энергии пластических деформаций W_2 с 0,12 до 0,24 МДж/м² приводит к повышению линейного содержания оплавов с 15 до 57 %. При этом концентрация меди в них увеличивается с 20 до 50 At.%, что говорит о присутствии в оплавах соединений $CuAl_2$ и $AlCu$. Механические испытания показали, что энергии пластических деформаций $W_2 = 0,12$ МДж/м² недостаточно для получения прочного биметалла, разрушение образца происходит в основном по границе соединения медь-алюминий. При достижении нижней границы свариваемости ($W_2 = 0,17$ МДж/м²) прочность биметалла на отрыв слоев скачкообразно увеличивается с нуля до равнопрочного значения 89 МПа. Дальнейшее увеличение энергии W_2 до 0,24 МДж/м² так же приводит к равнопрочному соединению со смещением области разрушения образцов при испытаниях в алюминий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергосберегающие композиционные элементы токоподводящих узлов силовых электрических цепей / Е. А. Чугунов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак и др. // Энергетик. – 2001. – № 9.
2. Новые биметаллические переходные элементы для силовых электрических цепей / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Ю. Г. Долгий и др. // Энергетик. – 1995. – № 4.
3. Новые конструкции токоподводящего узла катодной секции электролизера алюминия / А. П. Пеев, С. В. Кузьмин, Лысак В. И. [и др.] // Цветные металлы. – 2002. – № 8.
4. Техничко-экономическая эффективность применения новых конструкций композиционных токоподводов электролизера алюминия / А. П. Пеев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак [и др.] // Вестник машиностроения. – 2004. – № 6.

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.
6. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2009616788 от 7 дек. 2009 г. РФ Программное обеспечение расчета 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 : учеб. 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 [и др.]. – 2-е издание, переработанное. – Москва : Главная редакция физико-математической литературы Издательства «Наука», 1975. – 704 с.
10. Лякишев, Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справ. / Н. П. Лякишев. – М. : Машиностроение, 1996. – Т. 1. – С. 992.