

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2023-11-282-32-41

*Е. В. Кузьмин, канд. техн. наук, М. П. Королев, м. н. с., В. И. Лысак, академик РАН,
С. В. Кузьмин, чл.-корр. РАН, В. М. Данилевич, магистрант,
Н. С. Гниломёдов, магистрант, А. А. Ахмедов, магистрант*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ
И СВОЙСТВ СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЯ СО СТАЛЬЮ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ
НА ФОРСИРОВАННЫХ РЕЖИМАХ СОУДАРЕНИЯ**

Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru

Работа посвящена изучению влияния введения ультразвуковых колебаний при сварке взрывом пары соединения алюминия со сталью. Проведено сравнительное исследование влияние схемы взрывного нагружения соединений, полученных обычным способом сварки взрывом и сваркой взрывом с воздействием ультразвуковых колебаний на форсированных режимах сварки. Экспериментально установлено, что введение дополнительной энергии ультразвука в процессе взрывного нагружения соединения алюминия со сталью способствует существенному уменьшению количества оплавленного металла на границе соединения во всем исследуемом диапазоне. Рассмотрен химический состав участков оплавленного металла. Приведены результаты прочности на отрыв слоев композита алюминий+сталь.

Ключевые слова: сварка взрывом, ультразвук, алюминий, сталь, зона соединения, прочность, оплавленный металл

E. V. Kuz'min, M. P. Korolev, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min, V. M. Danilevich, N. S. Gnilomedov, A. A. Akhmedov

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ULTRASOUND ON THE FORMATION OF THE STRUCTURE
AND PROPERTIES OF ALUMINUM-STEEL JOINTS DURING EXPLOSION WELDING
IN FORCED COLLISION MODES**

Volgograd State Technical University, weld@vstu.ru

The work is devoted to the study of the effect of the introduction of ultrasonic vibrations during explosion welding of a pair of aluminum-steel compounds. A comparative study of the effect of the explosive loading scheme of joints obtained by the conventional method of explosion welding and explosion welding with the influence of ultrasonic vibrations in forced welding modes was carried out. It has been experimentally established that the introduction of additional ultrasound energy in the process of explosive loading of an aluminum-steel compound contributes to a significant reduction in the amount of molten metal at the junction boundary throughout the studied range. The chemical composition of the areas of the melted metal is considered. The results of the tensile strength of aluminum+steel composite layers are presented.

Keywords: explosion welding, ultrasound, aluminum, steel, joint area, strength, molten metal

Композиционные материалы из стали с алюминием нашли широкое применение в различных отраслях промышленности в качестве переходных элементов, деталей и узлов электрометаллургического оборудования, судостроение и авиастроение и др. благодаря сочетанию высокой прочности сталей с малой плотностью, электросопротивлением и высокой теплопроводностью алюминия [1–4].

Сваркой взрывом возможно получить качественные соединения алюминия со сталью различной номенклатуры, типоразмеров и толщин. Однако основная сложность

при этом заключается в весьма ограниченном диапазоне свариваемости взрывом, что большинством исследователей связывается с различием механических и теплофизических свойств алюминия и стали. Следствием этого при сварке взрывом на границе соединения стали с алюминием является образование интерметаллидных фаз, появление которых в соединении обусловлено локальным оплавлением приконтактных слоев при форсированных режимах соударения [5–10].

В этой связи весьма актуальным является поиск новых путей формирования структуры и свойств композиционных материалов с

применением различных комбинированных методов, основанных на воздействии нескольких источников энергии или совмещении различных способов ее подвода. Всестороннее изучение совместного воздействия нескольких видов высококонцентрированных источников энергии позволит раскрыть фундаментальные механизмы их влияния на характеристики и поведение материалов в экстремальных условиях, в результате чего создается возможность получения уникальных физических, механических и эксплуатационных свойств, как самих материалов, так и их соединений, которые невозможно достичь внешними источниками энергии иной природы.

Ранее авторским коллективом в работах [11–14] была разработана методика получения высококачественных композитов нового типа, основанная на высокоскоростном соударении металлических пластин в условиях нагружения скользящей детонационной волной с одновременным воздействием на соударяющуюся систему ультразвуковых волн. Показано, что введение ультразвука в ходе взрывного нагружения оказывает су-

щественное влияние на структуру и свойства соединения алюминия со сталью при сварке взрывом на низкоинтенсивных и средних режимах соударения. Экспериментально установлено, что введение дополнительной энергии ультразвука в процессе сварки взрывом алюминия со сталью способствует существенному уменьшению количества оплавленного металла на границе соединения. Поскольку область свариваемости состоит не только из нижней, но и верхней границы, то целью данной работы стало определение степени влияния ультразвука на формирование структуры и свойств соединения алюминия со сталью при сварке взрывом на форсированных режимах соударения.

Материалы и методы проведения исследований

Для проведения исследований применялись следующие основные материалы: технически чистый алюминий А5 и конструкционная сталь ВСтЗсп.

Условия проведения каждой серии опытов приведены в таблице. В качестве метаемой пластины выступала алюминиевая пла-

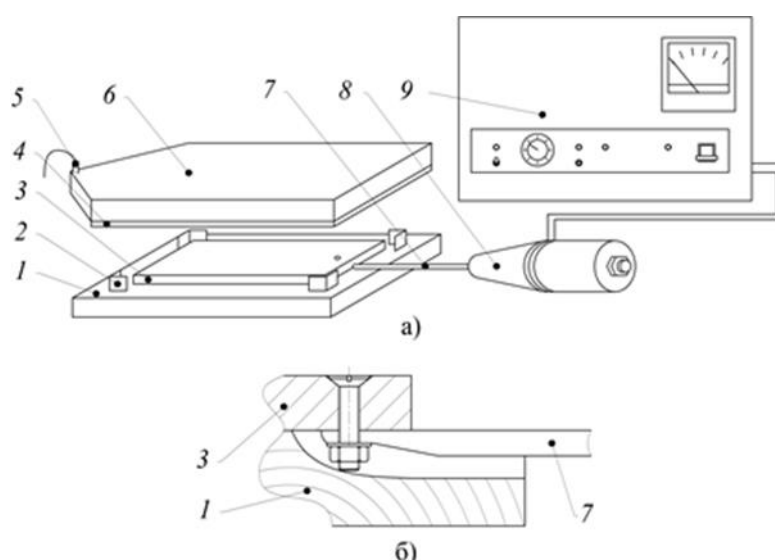


Рис. 1. Схема проведения опытов:

- а – схема сборки под сварку; б – схема подключения волновода к неподвижной пластине;
 1 – основание; 2 – зазор; 3 – неподвижная пластина; 4 – метаемая пластина;
 5 – детонатор; 6 – заряд ВВ; 7 – волновод; 8 – пьезокерамический преобразователь;
 9 – ультразвуковой генератор

стина толщинами 3,7 и 3,9 мм, а неподвижной служила стальная пластина толщиной 4 мм (см. таблицу, серии опытов 1-3). Сварку взрывом производили по плоскопараллельной схеме (рис. 1). Поскольку при сварке взрывом разнородных материалов существенное влияние на структуру и свойства соединений может оказывать схема метания, проводили дополнительные опыты по исследованию не только прямой (метается алюминий) схемы нагружения, но и обратной (метается сталь) схемы нагружения (таблица, серия опытов 4). В каждой серии опытов исследовали несколько пар соединений, состоящей из образца, свариваемого с воздействием ультразвуком, и контрольного образца, свариваемого взрывом без воздействия ультразвука. Параметры высокоскоростного соударения свариваемых металлов рассчитывали с использованием пакета прикладных программ EW Calc.

Ультразвуковые колебания в неподвижной пластине создавали при помощи пьезокерамических преобразователей с резонансными частотами в диапазоне от 16 до 24 кГц, и ультразвукового генератора УЗГ4-2, с максимальной выходной мощностью до 2 кВт. Колебания преобразователя подводили к

неподвижной пластине при помощи волновода со стороны конца детонации, благодаря чему воздействие ультразвука сохранялось в течение всего процесса сварки. Подачу ультразвуковых колебаний в неподвижную пластину начинали за 10-30 секунд до начала сварки. Схема крепления волновода к неподвижной пластине показана на рис. 1, б. Неподвижную пластину (3), присоединяли к волноводу (7), и устанавливали на основание из древесно-стружечной плиты (1). На основание устанавливали зазоры (2), на которых располагалась метаемая пластина (4) и заряд ВВ (5). С целью снижения влияния краевых эффектов, связанных с боковым разлетом продуктов детонации и падением импульса давления, размеры заряда и метаемой пластины со всех сторон превышали размеры неподвижной пластины. Сборку под сварку контрольных пластин, свариваемых без ультразвука, осуществляли аналогичным образом.

Амплитуду стоячей волны измеряли при помощи лазерного виброметра VibroFlex Neo (VFX-I-110). Измерения показали, что при заданной мощности ультразвука, среднеквадратическое значение (RMS) амплитуды вблизи пучностей составило 6 ± 1 мкм. На

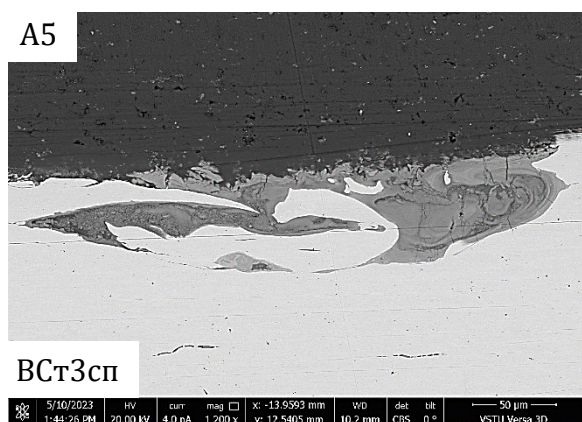
Условия проведения опытов

№ обр.	Свариваемые материалы	Толщины, мм	Частота УЗ колебаний, кГц	Амплитуда УЗ колебаний, мкм	Скорость контакта, м/с	Скорость соударения, м/с	Энергия, затрачиваемая на пластическую деформацию МДж/м ²
1	А5 + ВСтЗсп	3,9+4,0	18	6±1	2200	610	1,2
1к			–	–			
2			20	6±1		670	1,4
2к			–	–			
3			22	6±1		710	1,6
3к			–	–			
4	ВСтЗсп + А5	4,0+3,9	20	6±1	2300	560	1,0
4к			–	–			

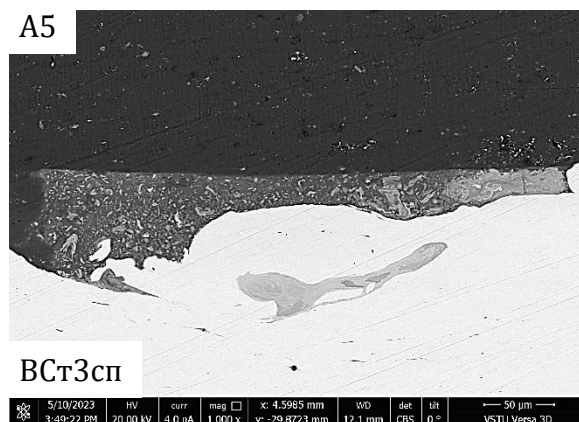
к – контрольный образец

противоположном конце пластины от точки закрепления преобразователя, амплитуда незначительно снижалась и составляла 5 ± 1 мкм.

Для проведения исследований из различных частей сваренных взрывом пластин вырезали образцы для изготовления микрошлифов и проведения механических испы-



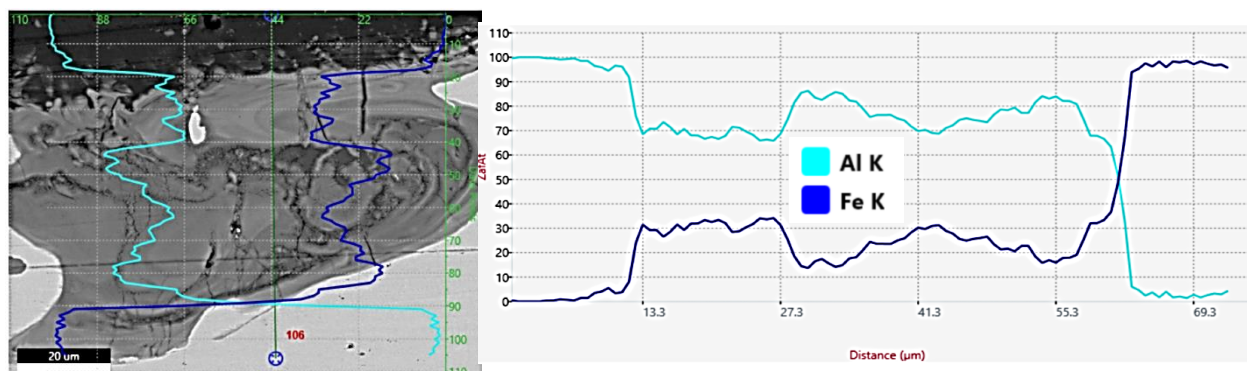
а



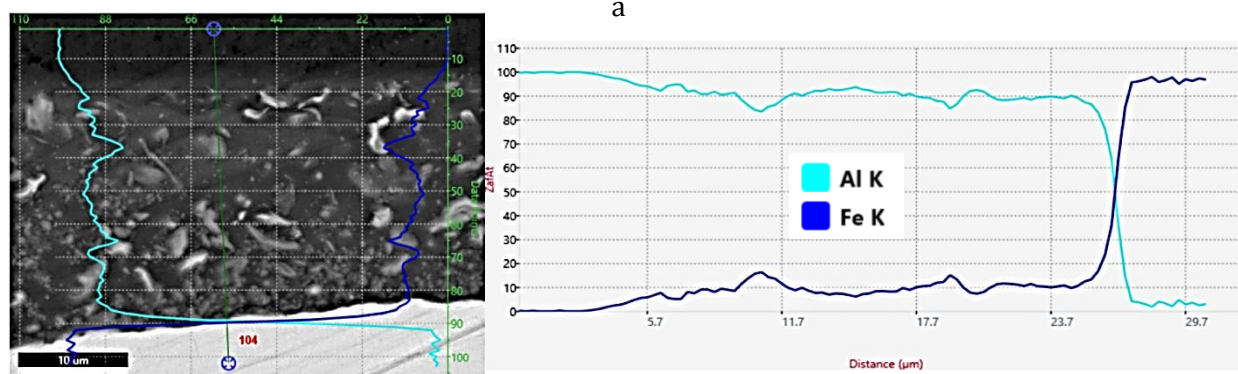
б

Рис. 2. Микроструктура зоны соединения А5+ВСт3сп, полученного при энергии $W_2=1,2$ МДж/м²:

а – сварка взрывом (контрольный образец);
б – сварка взрывом с воздействием ультразвука



а



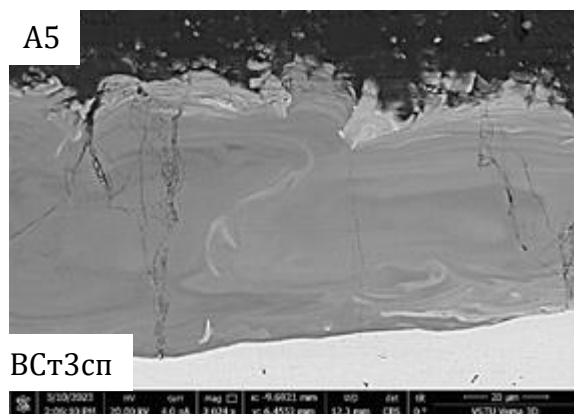
б

Рис. 3. Распределение элементов в участке оплавленного металла соединения А5+ВСт3сп ($W_2 = 1,2$ МДж/м²), РЭМ:

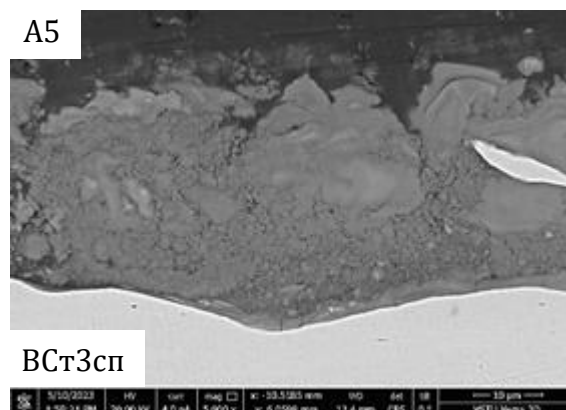
а – сварка взрывом (контрольный образец);
б – сварка взрывом с воздействием ультразвука

таний. Образцы для металлографических исследований и механических испытаний на разрушение вырезали из центра сваренных пластин. Свойства и качество сваренных взрывом композитов оценивали по измене-

нию прочности слоев на отрыв, количества оплавленного металла и параметров волн на границе соединения металла околошовной зоны. Исследования структуры и химического состава проводили на электронном



а

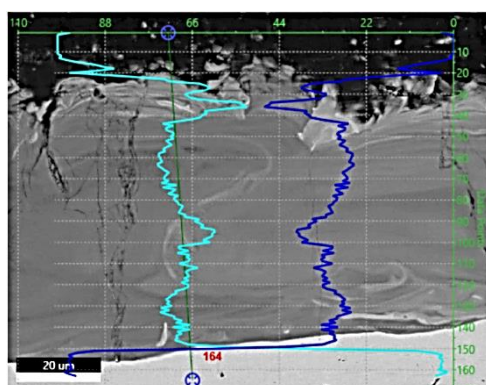


б

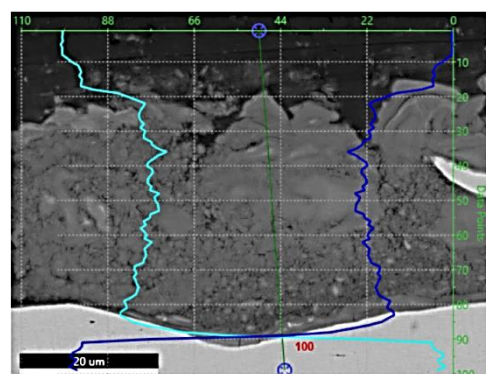
Рис. 4. Микроструктура зоны соединения А5+ВСт3сп, полученного при энергии $W_2=1,4$ МДж/м²:

а – сварка взрывом (контрольный образец);

б – сварка взрывом с воздействием ультразвука



а



б

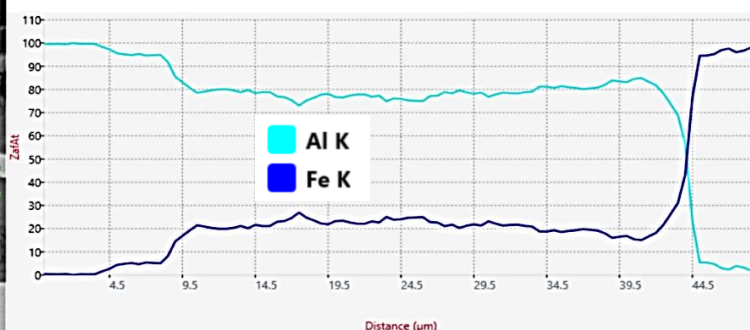


Рис. 5. Распределение элементов в участке оплавленного металла соединения А5+ВСт3сп ($W_2 = 1,4$ МДж/м²), РЭМ:

а – сварка взрывом (контрольный образец);

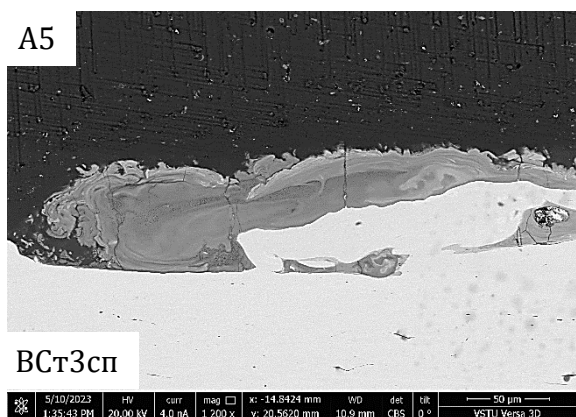
б – сварка взрывом с воздействием ультразвука

растровом микроскопе FEI Versa 3D.

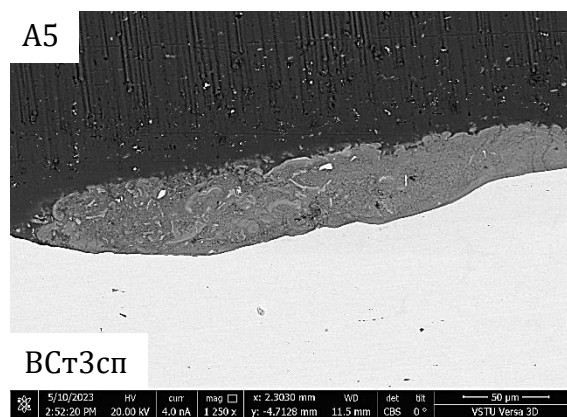
Результаты и их обсуждение

Результаты проведенных исследований показали, что ультразвук оказывает суще-

ственное влияние на формирование структуры и свойств сталеалюминиевых композитов в процессе взрывного нагружения.



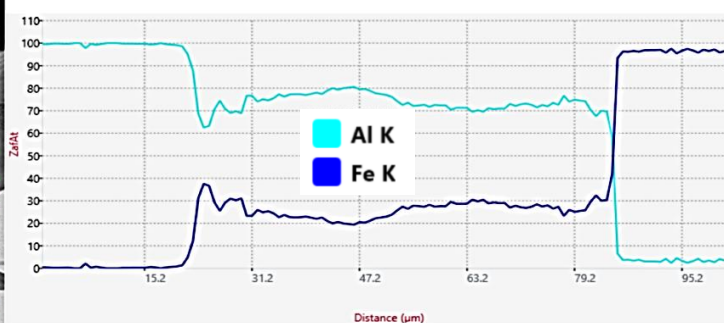
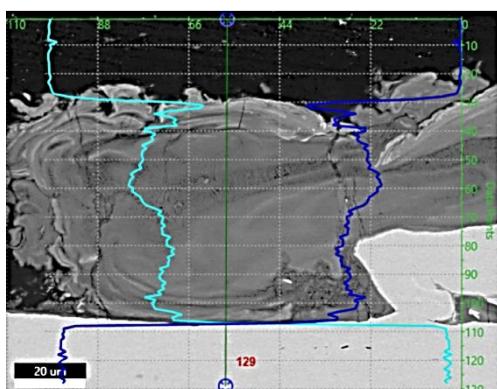
а



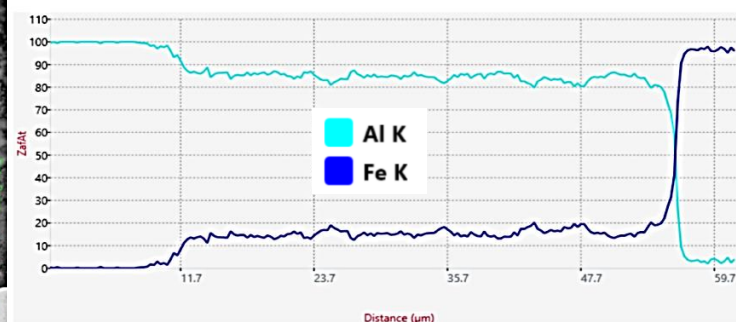
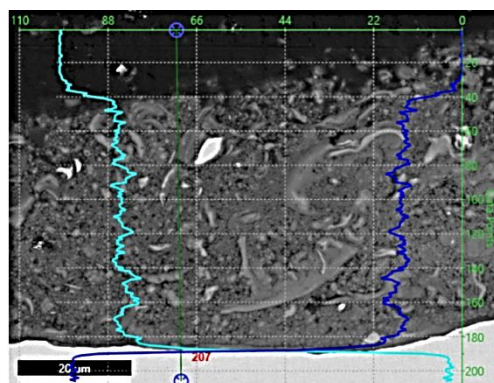
б

Рис. 6. Микроструктура зоны соединения А5+ВСт3сп, полученного при энергии $W_2=1,6$ МДж/м²:

а – сварка взрывом (контрольный образец);
б – сварка взрывом с воздействием ультразвука



а



б

Рис. 7. Распределение элементов в участке оплавленного металла соединения А5+ВСт3сп ($W_2 = 1,6$ МДж/м²), РЭМ:

а – сварка взрывом (контрольный образец);
б – сварка взрывом с воздействием ультразвука

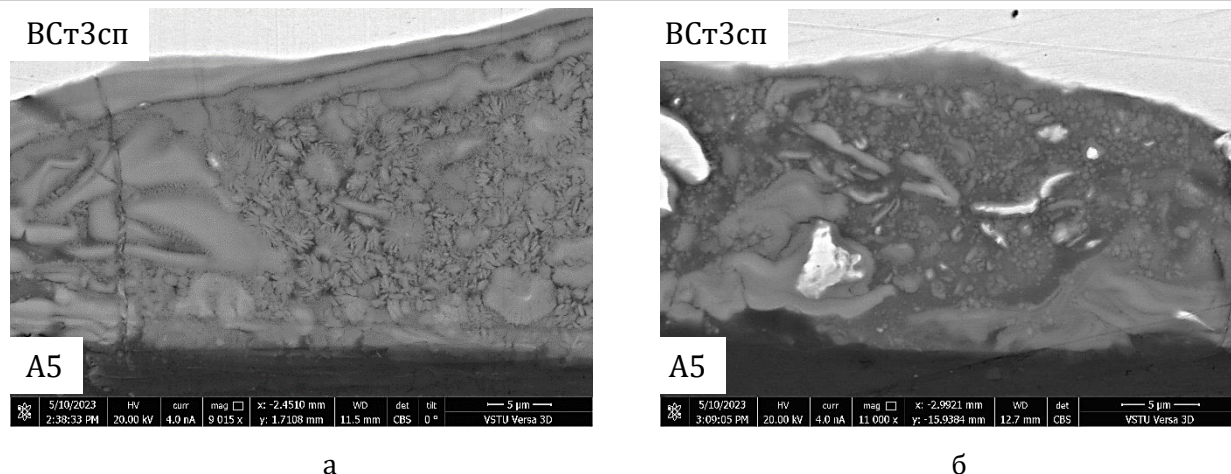


Рис. 8. Микроструктура зоны соединения ВСт3сп+А5, полученного при энергии $W_2=1,0$ МДж/м²:

а – сварка взрывом (контрольный образец);
б – сварка взрывом с воздействием ультразвука

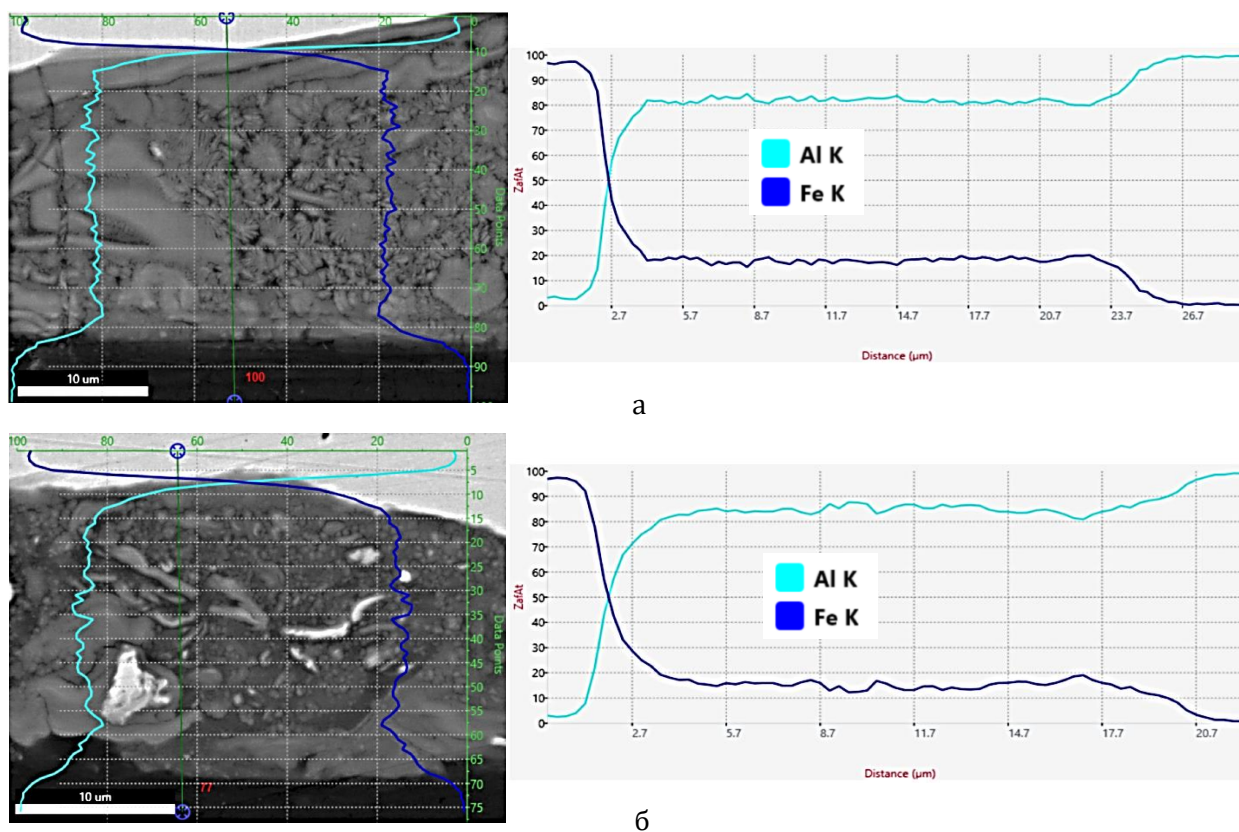


Рис. 9. Распределение элементов в участке оплавленного металла соединения ВСт3сп+А5 ($W_2 = 1,0$ МДж/м²), РЭМ:

а – сварка взрывом (контрольный образец);
б – сварка взрывом с воздействием ультразвука

Как было отмечено ранее [15] при увеличении энергетических затрат на пластическую деформацию до $W_2=1,1$ МДж/м² зона соединения контрольного образца представляла собой неровную границу, на от-

дельных участках наблюдалось формирование волнового профиля с длиной порядка 450 мкм и размахом около 35 мкм. При сварке взрывом с воздействием ультразвука зона соединения имела практически прямоли-

нейную границу с значительно меньшей толщиной прослойки оплавленного металла. Структура прослойки оплавленного металла в обоих образцах была схожей, и также как в предыдущих парах образцов представляла собой механическую смесь частиц интерметаллида FeAl_3 с алюминиевой матрицей.

Причиной появления частиц интерметаллидов, по всей видимости, являлось взаимодействие расплавленного алюминия с частицами железа, вынесенными кумулятивным потоком. В пользу этого говорит форма частиц, а также наличие непрореагировавших участков железа внутри интерметаллидных частиц. На границе оплавленного металла со сталью была обнаружена тонкая прослойка чистого интерметаллида, содержание железа в которой по данным химического анализа составляет 25 атомных %, что соответствует соединению FeAl_3 . Внутри этой прослойки обнаружены поперечные усадочные трещины.

При дальнейшем увеличении энергозатрат до $W_2=1,2$ МДж/м² в обоих образцах зона соединения представляет собой неровную границу раздела, на отдельных участках

также наблюдалось формирование волнового профиля (рис. 2). При сварке взрывом с воздействием ультразвука толщиной прослойки оплавленного металла значительно меньше. Отдельно следует отметить, что при указанных выше значениях энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию химический состав участков оплавленного металла в исследуемых и контрольных образцах отличается (рис. 3). Так, в исследуемых образцах содержание железа в зоне оплавленного металла по-прежнему находилось в диапазоне до 15-20 атомных % (рис. 3, б), в то время как, в контрольных образцах химический состав участка оплавленного металла неравномерен, содержание железа доходило до 35 атомных % (рис. 3, а).

Схожая картина наблюдалась и при значениях $W_2=1,4$ МДж/м² и $W_2=1,6$ МДж/м² с той лишь разницей, что в контрольных образцах химический состав участка оплавленного металла неравномерен, содержание железа увеличилось до 45 атомных % (рис. 4–7).

Результаты исследования влияния схемы взрывного нагружения показали, что влия-

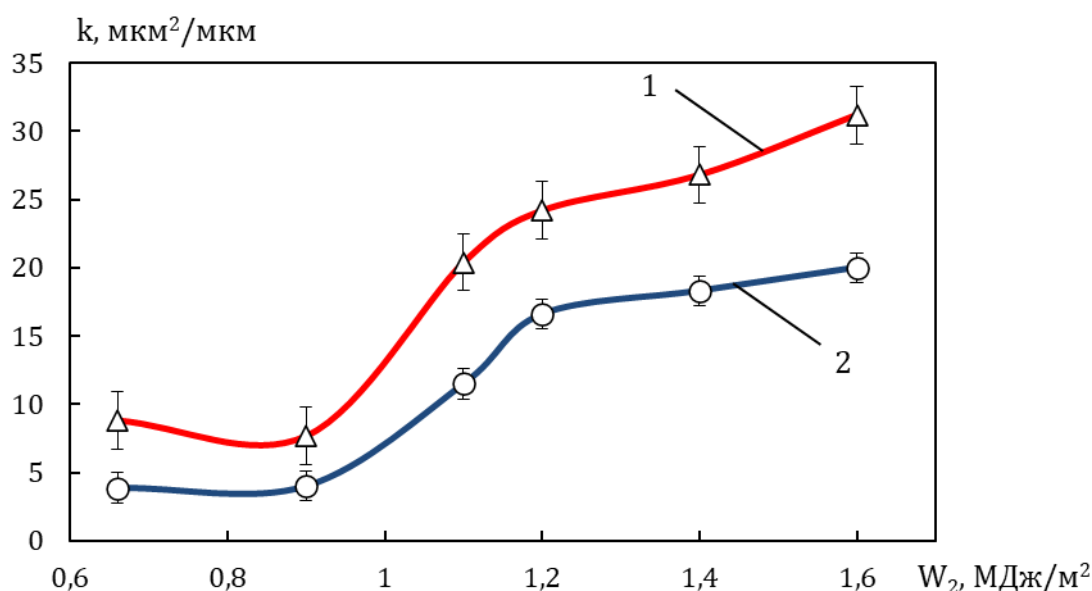


Рис. 10. Влияние энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию, на удельную площадь участков оплавленного металла соединения А5+ВСтЗсп:

а – сварка взрывом (контрольный образец);
б – сварка взрывом с воздействием ультразвука

ние ультразвука на структуру и свойства соединения несколько снижается. В обоих образцах зона соединения представляет собой неустойчивое волнообразование (рис. 8, а, б). Увеличение энергии W_2 при сварке сопровождалось незначительным увеличением содержания железа в зоне оплавленного металла до 15-20 атомных % (рис. 9).

Для численной оценки количества оплавленного металла была измерена удельная площадь оплавленного металла по отношению к длине соединения (что эквивалентно средней толщине прослойки оплавленного металла). Результаты показали, что при сварке взрывом с воздействием ультразвуковых колебаний количество оплавленного металла в зоне соединения во всем исследуемом диапазоне энергии оказалось значительно меньше, чем при обычном способе сварки взрывом (рис. 10). Так, при энергии $W_2=1,1$ МДж/м², удельная площадь в контрольных образцах составила 20,4 мкм²/мкм, в то время как в исследуемых образцах, полученных сваркой взрывом с воздействием ультразвука – 10,8 мкм²/мкм.

Результаты проведенных механических испытаний показали, что при сварке взрывом с воздействием ультразвука все полученные соединения были равнопрочными, в то время как при сварке взрывом только образцы, полученные при значениях $W_2=1,6$ МДж/м² не обладали равнопрочностью несмотря на наличие столь значительного количества оплавленного металла на границе не сказалось на прочности на отрыв слоёв (рис. 11). Вероятно, это связано со структурой прослойки оплавленного металла и наличием пластичной алюминиевой матрицы, позволяющей релаксировать напряжения при остывании расплава без образования трещин. Вместе с тем, в образцах А5+ВСт3сп, полученных сваркой взрывом с воздействием ультразвука, прочность на отрыв слоёв во всем диапазоне изменения энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию выше по сравнению с контрольными образцами без воздействия ультразвука (рис. 11). Так, при $W_2 = 0,66$ МДж/м² среднее значение прочности на отрыв слоёв в образцах А5+ВСт3сп, полученных сваркой

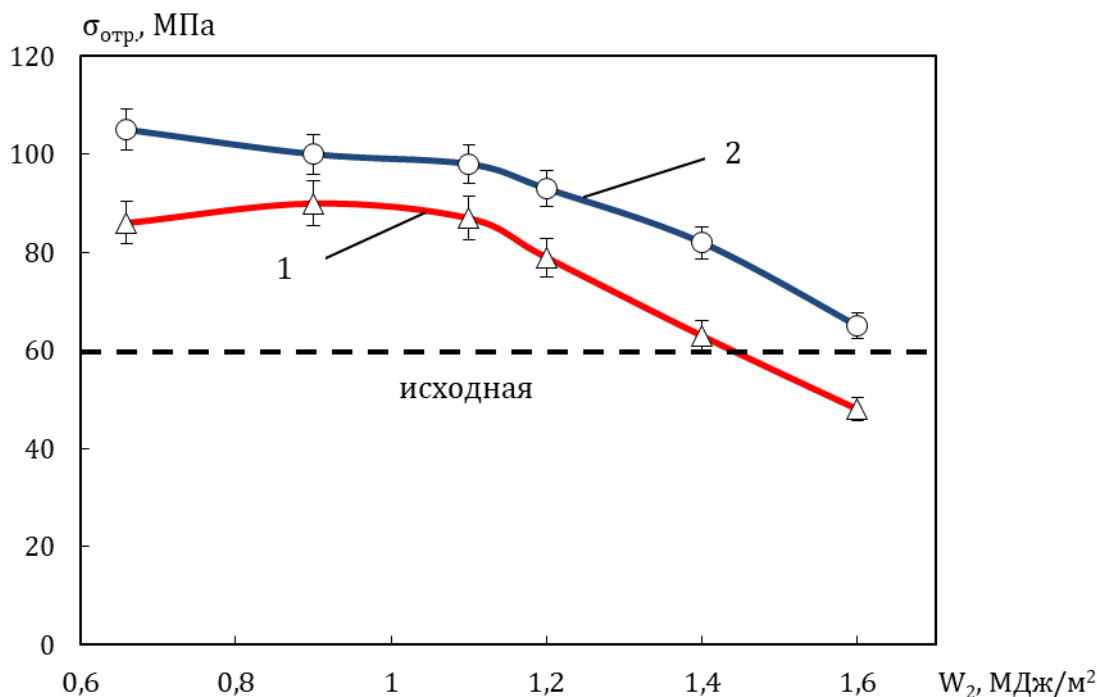


Рис. 11. Влияние энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию на прочность на отрыв слоёв сваренного взрывом А5+ВСт3сп:

а – сварка взрывом (контрольный образец);
б – сварка взрывом с воздействием ультразвука

взрывом с воздействием ультразвука, составляло порядка 104 МПа, в то время как в контрольных образцах значение прочности было значительно меньше – 86 МПа.

Выводы

1. Ультразвук оказывает существенное влияние на формирование структуры и свойств соединений алюминия со сталью в процессе взрывного нагружения.

2. Во всем исследуемом диапазоне значений энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию все полученные образцы имели неровную границу с прослойкой оплавленного металла вдоль поверхности контакта. В образцах, полученных сваркой взрывом с воздействием ультразвука, толщина прослойки оплавленного металла была значительно меньше.

3. Результаты проведенных механических испытаний показали, что при сварке взрывом с воздействием ультразвука все полученные соединения были равнопрочными, в то время как при сварке взрывом только образцы, полученные при значениях $W_2=1,6$ МДж/м² не обладали равнопрочностью.

Библиографический список

1. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М.: Машиностроение - 1, 2005. – 544 с.
2. Материаловедение и технология композиционных материалов / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, В. Н. Чернышев, Е. В. Кузнецов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 368 с.
3. Структурная и механическая неоднородность свариваемых взрывом стале-алюминиевых соединений / Е. Б. Сахновская, В. С. Седых, Г. Т. Тарабрин, Ю. П. Трыков // Сварочное производство. – 1972. – № 9. – С. 7-9.
4. Трыков, Ю. П. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов: монография / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун. – М., 2004. – 230 с.
5. Formation characteristics and properties of an explosion-welded steel-aluminum composite with a diffusion barrier / V. I. Kuz'min, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min, E. V. Kuz'min // Composite Interfaces. – 2023. – 24 p.
6. Explosive welding of aluminium to stainless steel using carbon steel and niobium interlayers / G.H.S.F.L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R.M. Leal, A. Loureiro // Journal of Materials Processing Technology. – 2020. – Vol. 283. – P. 116707.
7. Злобин, Б. С. Сварка взрывом стали с алюминием / Б. С. Злобин // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38. – № 3. – С. 137-140.
8. Исследование соединения биметалла сталь-алюминий, полученного сваркой взрывом / А. А. Калитова, Л. И. Квеглис, Ф. М. Носков, Н. В. Ларионова, И. С. Семенников // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2014. – Т. 11. – № 3. – С. 285-289.
9. Богунов, А.З. Получение биметалла алюминий-сталь с профилированной контактной границей / А. З. Богунов, А. А. Кузовников // Автоматическая сварка. – 2009. – №11. – С.74-77.
10. Кузьмин, В. И. Исследование закономерностей образования соединения при сварке взрывом толстолистовых композитов сталь-алюминий / В. И. Кузьмин, В. И. Лысак, М. А. Тупицин // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – № 3. – С. 64-69.
11. Influence of structure formation and properties of bimetals produced by ultrasound-assisted explosive welding / E. V. Kuz'min, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min, M. P. Korolev // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 71. – Pp. 734-742.
12. Влияние параметров высокочастотной акустической волны на структуру, свойства и пластическое течение металла зоны соединения свариваемых взрывом материалов с одновременным воздействием ультразвука / А. П. Пеев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Е. В. Кузьмин, А. Н. Дородников // Физика металлов и материаловедение. – 2017. – Т. 118, № 5. – С. 513-521.
13. Особенности формирования соединения композита титан-сталь при сварке взрывом с воздействием ультразвука / Е. В. Кузьмин, М. П. Королев, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин, М. С. Зарубин, П. А. Петрушкин, В. А. Львов // Известия ВолГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – Волгоград, 2020. – № 11 (246). – С. 19-23.
14. Влияние параметров высокоскоростного соударения на структуру и свойства соединений при сварке взрывом с одновременным воздействием ультразвука / Е. В. Кузьмин, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин, М. П. Королев // Физика металлов и материаловедение. – 2019. – Т. 120. – № 2. – С. 212-218.
15. Закономерности формирования соединения алюминия со сталью при сварке взрывом с воздействием ультразвуковых колебаний / Е. В. Кузьмин, М. П. Королев, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин // Сварка и Диагностика. – 2023. – № 4. – С. 13-17.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00217, <https://rscf.ru/project/22-79-00217/>