

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-11-294-37-43

*Е. В. Кузьмин, канд. техн. наук, М. П. Королев, канд. техн. наук, В. И. Лысак, академик РАН,
С. В. Кузьмин, чл.-корр. РАН, И. Т. Еникеев, магистрант,
М. А. Кирилов, магистрант, В. Д. Шаталин, магистрант*

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ КОМПОЗИТА СТАЛЬ–МЕДЬ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru

Работа посвящена изучению влияния введения ультразвуковых колебаний при сварке взрывом пары соединения сталь+медь. Проведено сравнительное исследование влияние схемы взрывного нагружения соединений, полученных сваркой взрывом и сваркой взрывом с воздействием ультразвуковых колебаний. Экспериментально установлено, что введение дополнительной энергии ультразвука в процессе взрывного нагружения соединения сталь+медь способствует уменьшению количества оплавленного металла на границе соединения во всем исследуемом диапазоне. Рассмотрен химический состав участков оплавленного металла.

Ключевые слова: сварка взрывом, ультразвук, сталь, медь, зона соединения, структура, оплавленный металл

E. V. Kuz'min, M. P. Korolev, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min, I. T. Enikeev, M. A. Kirilov, V. D. Shatalin

FEATURES OF FORMING A STEEL–COPPER COMPOSITE JOINT DURING EXPLOSION WELDING WITH ULTRASOUND

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 steel+copper compounds. A comparative study of the effect of the explosive loading scheme of joints obtained by explosion welding and explosion welding under the influence of ultra-sonic vibrations has been carried out. It has been experimentally established that the introduction of additional ultrasound energy during the explosive loading of the steel+copper compound helps to reduce the amount of molten metal at the junction boundary throughout the studied range. The chemical composition of the molten metal sections is considered.

Keywords: explosion welding, ultrasound, steel, copper, joint area, structure, molten metal

Современный уровень развития энергоёмких отраслей производства, таких как химия, цветная и чёрная металлургии и др. предъявляет повышенные требования к показателю затрачиваемой электроэнергии на выпуск единицы продукции. Одним из возможных путей снижения удельного расхода электроэнергии является уменьшение потерь в токоподводящих узлах силовых электротехнических устройств (электролизёров, сталеплавильных печей, коммутационных распределителей и др.). Отдельные участки таких узлов выполняются разнородными, как правило, сталь+медь или сталь+алюминий, сочетая в себе лучшие характеристики каждого из металлов (высокую прочность стали с коррозионной стой-

костью и высокой электро- и теплопроводностью меди и алюминия) [1...3].

Существующее многообразие методов изготовления подобных композитов, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки, не позволяет в полной мере удовлетворить требования научно-технического прогресса [4]. Развитие отраслей промышленности, создающих наукоемкую продукцию для предприятий электрометаллургии, энергетики и нефте- и газодобывающих и перерабатывающих производств, связано с инновациями в сфере получения новых материалов (в частности, композитов) и оптимизации процессов их изготовления. В настоящее время в мировой науке отчетливо наблюдаются следующие пути решения данной проблемы: разработка

и внедрение качественно новых материалов или технологий их получения, либо придание известным материалам ряда уникальных эксплуатационных свойств. Одним из направлений повышения технологичности изготовления композиционных материалов является разработка технологий, основанных на воздействии на материалы несколькими высокоэнергетическими источниками энергии, в результате чего создается возможность получения уникальных свойств, как самих материалов, так и их соединений, которые невозможно достичь внешними источниками энергии иной природы.

В проведенных ранее исследованиях 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 [5, 6].

Результаты проведенных исследований (в частности, на паре медь+алюминий) показывают целесообразность применения ультразвука в ходе взрывного нагружения, выражающееся в повышении качества получаемых соединений и расширения области свариваемости соединяемых металлов. Изменение характеристик зоны соединения указывает на то, что диссипация энергии после соударения происходит по разным механизмам, следовательно, меняется энергетический баланс процесса формирования соединения [7, 8].

Таким образом, это создает предпосылки для проведения исследований формирования соединения композиционных материалов в условиях сварки взрывом с одновременным воздействием на соударяющиеся элементы высокочастотных колебаний.

Материалы и методы

Для проведения исследований применялись следующие основные материалы: отожженная медь марки М1 и конструкци-

Таблица – Основные параметры сварки взрывом

№	Материалы	Смесь ВВ (аммонит 6ЖВ/песок)	Скорость контакта V_k , м/с	Скорость соударения V_c , м/с	Угол соударения γ , °	Энергия W_2 , МДж/м ²
1	Медь (3,0 мм) +Сталь (3,8 мм)	60/40	1878	224	6,84	0,3
2			1917	263	7,87	0,4
3			1967	324	9,45	0,6
4			2030	375	10,6	0,8
5			2075	421	11,64	1,0
6	Медь (3,0 мм) +Сталь (10 мм)		2050	386	10,8	1,2
7			2088	418	11,49	1,4
8			2105	448	12,22	1,6

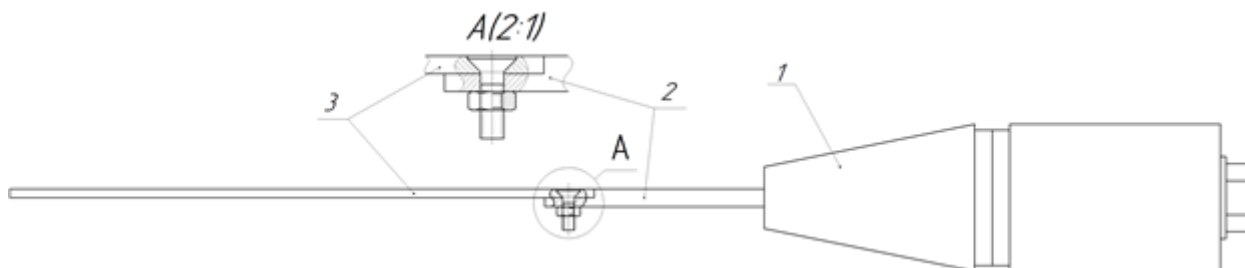


Рис. 1. Схема колебательной системы:

1 – ультразвуковой пьезокерамический преобразователь; 2 – волновод; 3 – пластина

онная углеродистая сталь общего назначения Ст3. Сварку взрывом производили в широком диапазоне энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию W_2 от 0,3 до 1,6 МДж/м². Расчетные режимы сварки приведены в таблице. На каждом из режимов было получено несколько пар образцов, один из которых сваривали обычным способом сварки взрывом, другой – сваркой взрывом с воздействием ультразвуковых акустических колебаний.

В качестве метаемой пластины выступала медь с толщиной 3 мм, а в качестве неподвижной пластины служил стальной лист с габаритами 200x80 мм. Толщина стального слоя в эксперименте составляла 3,8 и 10 мм, что обусловлено необходимостью увеличения толщины и усредненной массы матери-

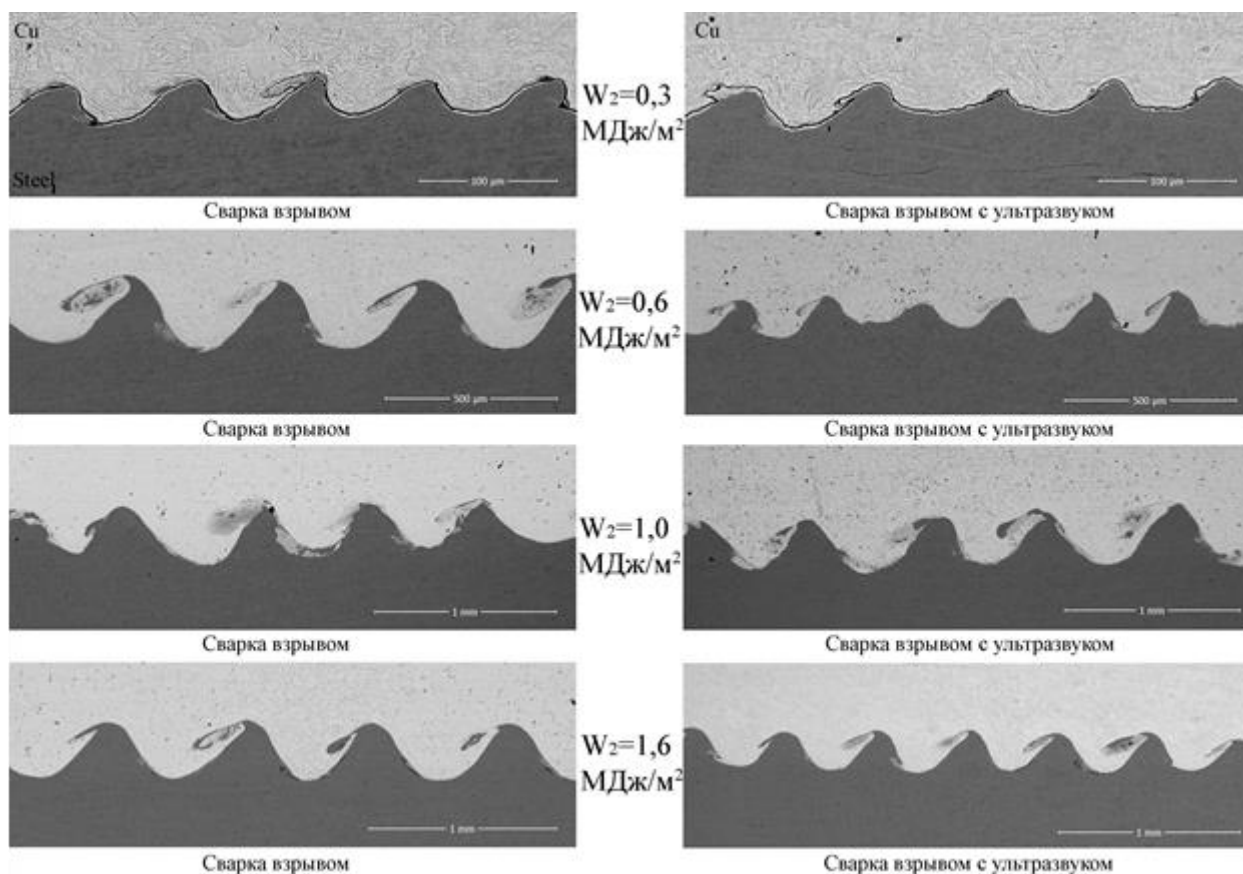


Рис. 2. Микрофотографии границ соединений образцов

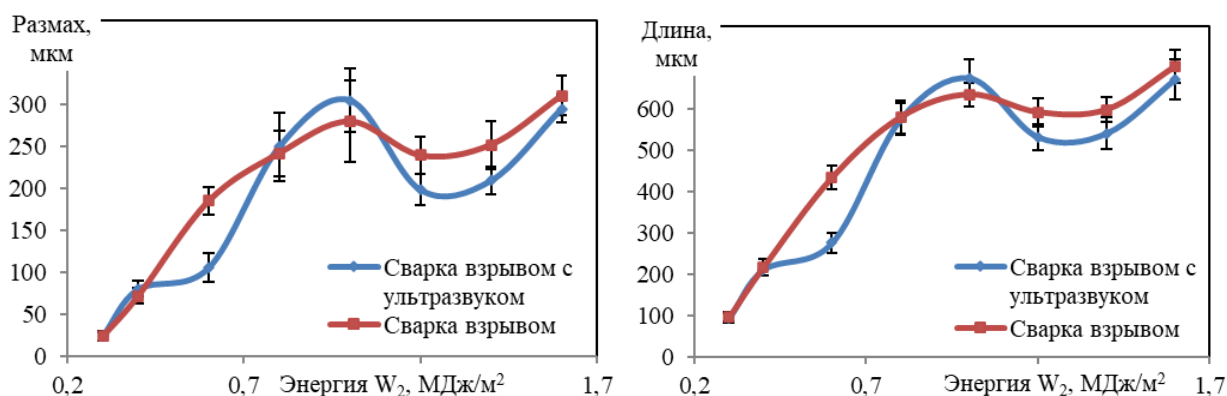


Рис. 3. Параметры волнового профиля на границе соединений

алов для обеспечения энергии $W_2=1,2-1,6$ МДж/м².

В ходе эксперимента ультразвук подводи к стальной пластине за 5-10 секунд до начала процесса сварки. Генерация колебаний производилась при помощи пьезокерамического преобразователя с коническим концентратором, который соединялся с неподвижной пластиной при помощи волновода. Схема колебательной системы приведена на рис. 1.

Частота колебаний находилась в диапазоне от 16700 до 17400 Гц и подбиралась отдельно для каждого образца с целью достижения резонанса, обеспечивающего максимально возможную (для данной колебательной системы) амплитуду колебаний в пластине.

Исследования микроструктуры, химического состава, текстуры и плотности дислокаций в образцах проводили при помощи электронного микроскопа FEI Versa 3D Dual-beam.

Результаты и обсуждение

Изучение микроструктуры показало, что на границе всех соединений сформировался

волновой профиль, параметры которого (размах и длина), увеличиваются вместе с увеличением скорости соударения и энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию W_2 . На рис. 2 приведены микрофотографии границы раздела некоторых пар соединений.

Параметры волнового профиля в соединениях, сваренных обычным способом сварки взрывом и сваркой с воздействием ультразвука, в большинстве случаев оказались схожими (рис. 3). Длина и размах волнового профиля увеличивались на интервале энергии $W_2=0,3-1,0$ МДж/м², однако при $W_2=1,2$ МДж/м² произошло снижение размеров волн, что вероятно было связано с изменением кинематических параметров режимов сварки.

Оплавленные участки на границе соединения присутствовали во всех соединениях, а их количество и структура зависели от режимов сварки. Уже при минимальной энергии $W_2=0,3$ МДж/м² наблюдалось формирование оплавов на локальных участках границы соединения (рис. 4, а). Оплавы располагались в типичных областях вихревых зон,

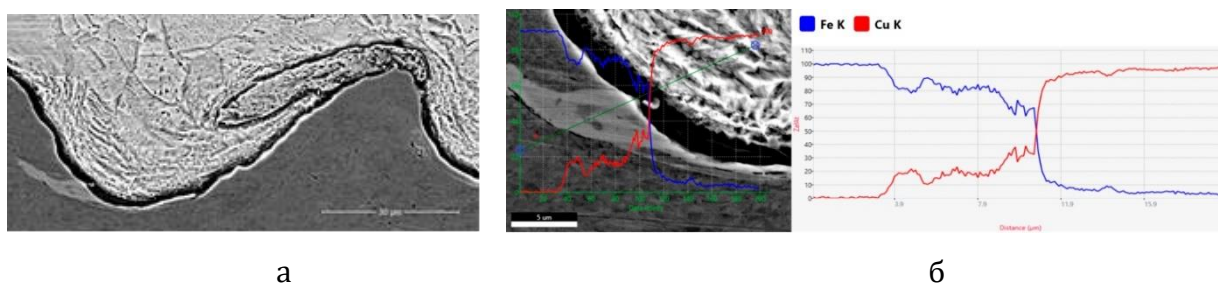


Рис. 4. Граница соединения (а) и химический состав оплава (б) в соединении, сваренном без ультразвука, $W_2=0,3$ МДж/м²

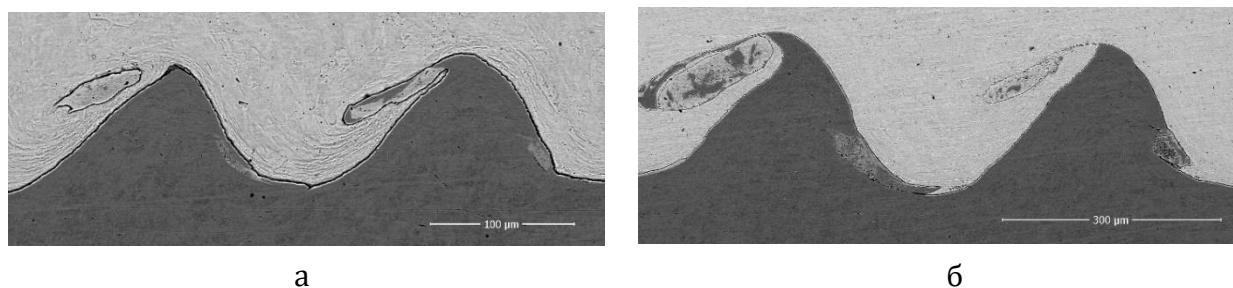


Рис. 5. Граница соединения с оплавленными участками соединения, сваренного с ультразвуком при $W_2=0,4$ МДж/м² (а) и без ультразвука при $W_2=0,6$ МДж/м² (б)

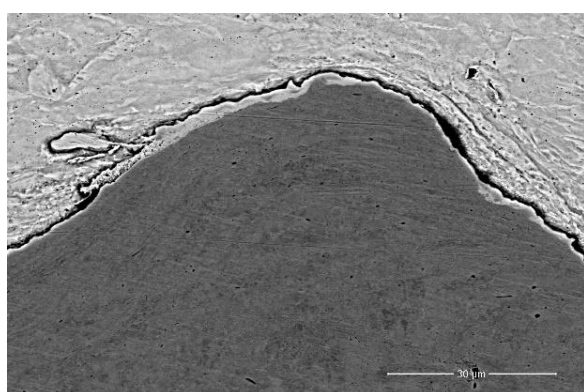
возникающих в процессе волнообразования вблизи верхнего и нижнего гребня волны. Химический состав оплавов сильно различался в зависимости от их расположения. Оплавы вблизи верхнего гребня, как правило, располагались со стороны меди, и были частично отделены от границы со сталью слоем меди, что ограничивало возможность вовлечения стали в вихревую зону, и тем самым ограничивало долю железа в оплаве. Вблизи нижнего гребня волны, напротив, оплавы располагались со стороны стали, а в их составе преобладало железо, доля которого могла достигать до 90% (рис. 4, б).

Дальнейшая интенсификация режимов привела к увеличению объёма оплавов без изменения их структуры (рис. 5), которая представляет собой эвтектическую смесь

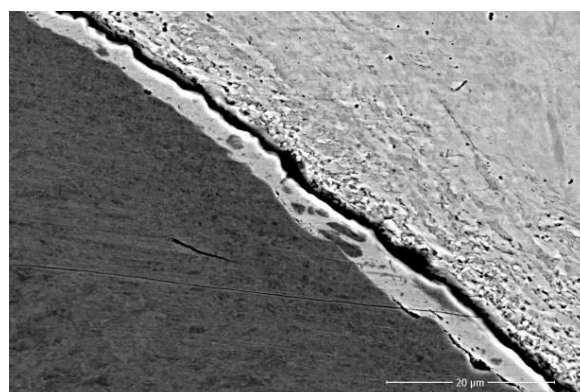
твёрдых растворов меди в α -железе и α -железа в меди с включениями частиц стали [9].

Помимо этого, в ряде образцов на границе между материалами была обнаружена сплошная прослойка оплавленного металла (рис. 6), толщиной от десятых долей до десятков микрометров. Внутри прослойки обнаруживаются следы завихрений и частицы стали, отделившиеся от поверхности (рис. 6, б), что указывает на протекание процессов перемешивания в расплаве.

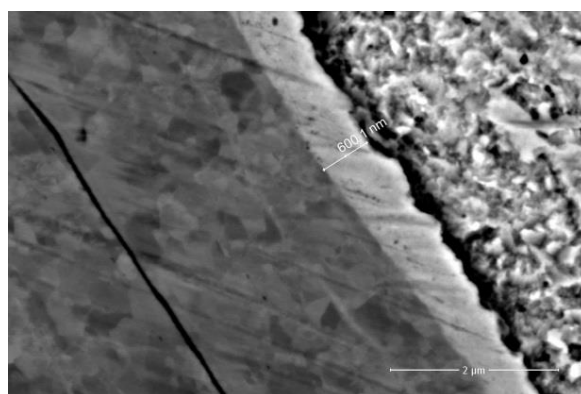
Изучение химического состава прослойки показало, что доля железа в её составе значительно изменяется в зависимости от выбранного участка и образца (рис. 7), что, по всей видимости, является следствием различной интенсивности перемешивания расплава и различной степени вовлечения в расплав более тугоплавкой стали.



а



б



в

Рис. 6. Прослойка оплава на границе соединений, сваренных с ультразвуком при $W_2=0,4$ МДж/м² (а) $W_2=1,6$ МДж/м² (б) и без ультразвука при $W_2=1,4$ МДж/м² (в)

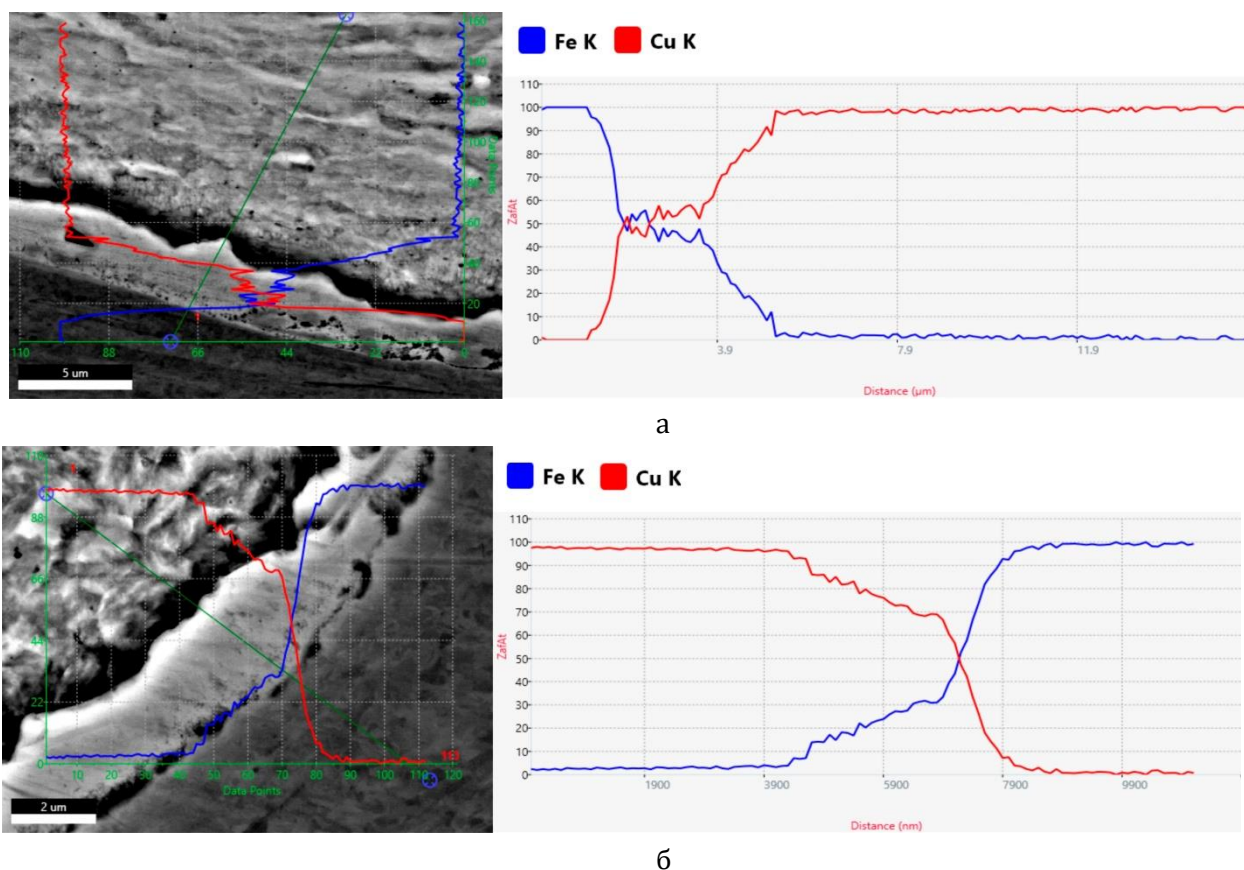


Рис. 7. Химический состав оплавленной прослойки на границе между материалами в соединении, сваренном с ультразвуком при $W_2=0,6$ МДж/м² (а) и без ультразвука при $W_2=1,0$ МДж/м² (б)

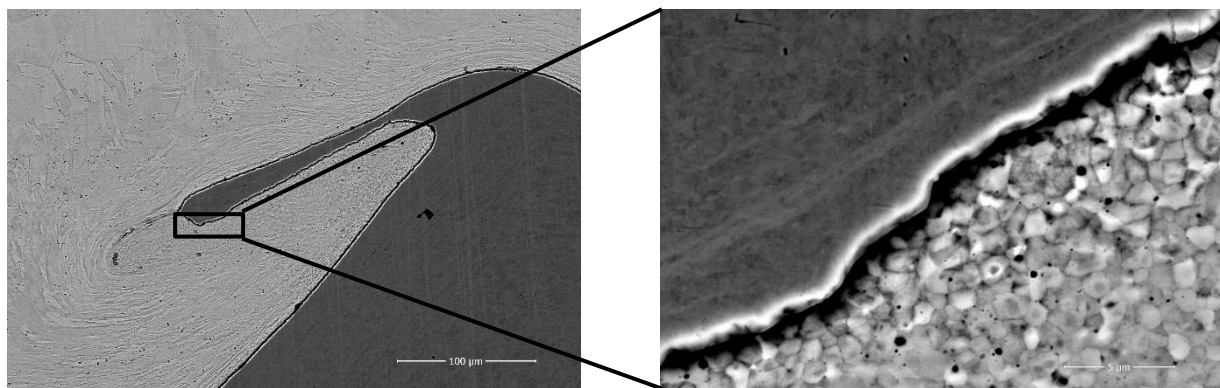


Рис. 8. Рекристаллизованные зерна меди в вихревой зоне соединения, сваренного с ультразвуком при $W_2=1,2$ МДж/м²

В некоторых случаях, как например, при сварке с ультразвуком при энергии $W_2=1,2$ МДж/м² формирования оплава в вихревой зоне не произошло, однако выделившееся в процессе деформации тепло способствовало рекристаллизации ближайших объемов меди с образованием мелкозерни-

стой равноосной структуры с размером зерна 1-1,5 мкм (рис. 8).

Заключение

Ультразвук оказывает влияние на формирование структуры и свойств соединений меди со сталью в процессе взрывного нагружения. Во всем исследуемом диапазоне

значений энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию все полученные соединения имели волновой профиль, параметры которого (размах и длина), увеличиваются вместе с увеличением режимов сварки. Параметры волнового профиля в соединениях, сваренных обычным способом сварки взрывом и сваркой с воздействием ультразвука, в большинстве случаев оказались схожими.

Оплавленные участки на границе соединения присутствовали во всех соединениях, а их количество и структура зависели от режимов сварки. Уже при минимальной энергии наблюдалось формирование оплавов на локальных участках границы соединения. Химический состав оплавов сильно различался в зависимости от их расположения. Оплавы вблизи верхнего гребня, как правило, располагались со стороны меди, и были частично отделены от границы со сталью слоем меди, что ограничивало возможность вовлечения стали в вихревую зону, и тем самым ограничивало долю железа в оплаве. Вблизи нижнего гребня волны, напротив, оплавы располагались со стороны стали, а в их составе преобладало железо, доля которого могла достигать до 90%.

При сварке с ультразвуком при энергии $W_2=1,2$ МДж/м² формирования оплава в вихревой зоне не произошло, однако выделившееся в процессе деформации тепло способствовало рекристаллизации ближайших объемов меди с образованием мелкозерни-

стой равноосной структуры с размером зерна 1-1,5 мкм.

Библиографический список

1. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М.: Машиностроение - 1, 2005. – 544 с.
2. Кудинов, В. М. Сварка взрывом в металлургии / В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев // М.: Машиностроение, 1978. – 168 с.
3. Оголихин, В. М. Сварка взрывом в электрометаллургии / В. М. Оголихин, И. В. Яковлев; отв. ред. Б. Д. Аннин. – Новосибирск : Изд-во Сиб. отд-ния Рос. акад. наук, 2009 (Новосибирск). – 159 с.
4. Материаловедение и технология композиционных материалов / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, В. Н. Чернышев, Е. В. Кузнецов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 368 с.
5. Influence of structure formation and properties of bimetal 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. [10.1016/j.jmapro.2021.10.006](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.10.006)
6. Перспективы применения технологии сварки взрывом с одновременным воздействием ультразвука для создания разнородных биметаллических композитов / Е. В. Кузьмин, М. П. Королев, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин // Сварка и диагностика. – 2024. – № 1. – С. 58-61.
7. Особенности формирования структуры и свойств соединения меди с алюминием при сварке взрывом под воздействием ультразвука / Е. В. Кузьмин, А. П. Пеев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Физика металлов и материаловедение. – 2017. – Т. 118, № 8. – С. 861-868.
8. Влияние ультразвукового воздействия на диффузионные процессы при термообработке сваренного взрывом СКМ медь М1 + алюминий АД1 / В. Г. Шморгунов, О. В. Слаутин, Е. В. Кузьмин, В. П. Кулевич // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. – Волгоград, 2020. – № 10 (245). – С. 18-20.
9. Трансформация структуры в зоне соединения биметалла медь М3 + сталь 30ХГСА после сварки взрывом и последующего отжига / В. Н. Арисова, А. Ф. Трудов, Л. М. Гуревич, В. О. Харламов, В. Ю. Назарова // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. – Волгоград, 2021. – № 4 (251). – С. 13-18.

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