

УДК 621.791.13

DOI: 10.12737/article_595256f165bf11.96830007

С.В. Кузьмин, д.т.н.,
В.И. Лысак, академик РАН,
Е.В. Кузьмин, к.т.н.
(ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет,
400005, Россия, г. Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, 28)
E-mail: weld@vstu.ru

Применение ультразвука при сварке взрывом*

Рассмотрен комбинированный процесс сварки металлов взрывом с одновременным воздействием ультразвука на свариваемые металлы. Показаны основные закономерности формирования соединения металлов при сварке взрывом с одновременным воздействием ультразвуковых колебаний, и установлены взаимосвязи между параметрами исследуемого комбинированного процесса и свойствами полученных соединений.

Ключевые слова: сварка взрывом; ультразвуковая обработка; композиционный материал; пластическая деформация; область свариваемости.

S.V. Kuzmin, D. Eng.,
V.I. Lysak, Academician of the RAS,
E.V. Kuzmin, Can. Eng.
(FSBEI HE Volgograd State Technical University, 28, Lenin Avenue, Volgograd, Russia, 400005)

Ultrasound application when explosion welding

A combined process of metal welding by means of an explosion with simultaneous an ultrasound impact upon metal pieces to be welded is considered. Basic regularities in the formation of metal joints during explosion welding with a simultaneous impact of ultrasonic oscillations are shown, and interconnections between parameters of the combined process under investigations and the properties of joints obtained are defined.

Keywords: explosion welding; ultrasonic machining; composite; plastic deformation; weldability area.

Воздействие несколькими видами энергии или совмещение различных способов ее подвода является одним из путей повышения технологичности изготовления конструкционных материалов и представляет значительный научный и практический интерес, напрямую связанный с разработкой и внедрением качественно новых технологий, что, в свою очередь, представляется актуальным.

При сварке взрывом образование соедине-

*Работа частично выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках "Совета по грантам Президента РФ" (СП-1940.2016.1) и гранта РФФИ № 15-08-09438.

ния происходит в результате деформационного воздействия на соединяемые материалы, которое характеризуется высокой скоростью их соударения при малой длительности контактного взаимодействия ($\sim 10^{-6}$ с). Процессы диффузии за такое короткое время не успевают произойти. Поэтому этот способ нашел широкое применение при производстве металлических слоистых композиционных материалов из разнородных материалов, соединить которые традиционными методами сварки затруднительно, либо невозможно. Полученные сваркой взрывом композиционные материалы обладают высокой прочностью соединения слоев и эффек-

тивно применяются в различных отраслях промышленности [1 – 3].

Вместе с тем, к негативным явлениям данного способа следует отнести образование в зоне соединения оплавленного металла и других неоднородностей, снижающих прочность и эксплуатационные свойства сваренного композита. Создание биметаллических и многослойных композитов из металлов с резко отличающимися физико-механическими свойствами имеет ряд сложностей, связанных не только с весьма узким диапазоном свариваемости, но и образованием в зоне соединения значительных термических напряжений и ряда интерметаллидных фаз.

Уменьшение вероятности образования нежелательных структур возможно за счет использования низкоскоростных взрывчатых веществ (ВВ), однако, промышленный выпуск ВВ с такими характеристиками не освоен.

Расширить диапазон свариваемости металлов с неудовлетворительной металлургической совместимостью позволяют несколько технологических методов: введение промежуточного слоя, обладающего хорошей свариваемостью с металлами, а также предварительное воздействие на металл термическим или иным способом, приводящее к изменению его физико-механических свойств [1 – 4].

Многочисленными исследованиями показано, что воздействие на металл (как в жидкой, так и твердой фазах) ультразвуковыми (УЗ) колебаниями приводит к ряду положительных явлений, улучшающих процесс их обработки, в том числе и при сварке [5 – 8].

Несмотря на значительные успехи в области высокоскоростного соударения тел и ультразвуковой обработки материалов, исследований по изучению процесса деформирования металла и формирования сварного соединения в условиях взрывного нагружения и воздействия УЗ колебаний практически не проводилось. Поэтому повышение качества и расширение области свариваемости металлов взрывом за счет ввода дополнительной энергии источника УЗ колебаний представляется актуальной.

Целью данной работы является обобщение результатов исследований структуры и свойств соединений однородных и разнородных пар металлов при их сварке взрывом с одновременным воздействием ультразвука.

Первые результаты проведенных опытов процесса сварки взрывом с одновременным воздействием УЗ колебаний произвели феноменологическое впечатление, оставив множество вопросов и предположений, требующих

объяснения. Так, впервые был обнаружен эффект изменения структуры и свойств сварных соединений, проявляющийся в увеличении прочности соединения, микротвердости и существенном уменьшении параметров волн и количества оплавленного металла в околошовной зоне по сравнению со сваркой взрывом без применения ультразвука.

Для детального понимания исследуемого процесса необходимо было выявить закономерности формирования соединения металлов при сварке взрывом с одновременным воздействием УЗ колебаний, и установить взаимосвязи между параметрами исследуемого комбинированного процесса и свойствами полученных соединений.

На первом этапе исследовалось совместное влияние схемы распространения УЗ колебаний и параметров взрывного нагружения на структуру и свойства полученных сварных соединений. Для этого сварку взрывом с одновременным воздействием ультразвука на неподвижную пластину производили по двум схемам: встречно-направленным и перпендикулярно-направленным распространением продольных УЗ колебаний относительно направления процесса сварки. Для сравнения результатов исследования одновременно производили сварку взрывом контрольных образцов (таких же пар металлов) на идентичных режимах взрывного нагружения, но без воздействия ультразвука [9].

Максимальный эффект от воздействия ультразвука наблюдается при его встречно-направленном приложении относительно направления процесса сварки взрывом. Также следует отметить, что при сварке взрывом модельных медных образцов воздействие ультразвуковых колебаний принципиально меняет волновой профиль зоны соединения, форму и структуру оплавленных участков. На границе соединения образуются волны неправильной формы с тонкой прерывающейся прослойкой оплавленного металла, вытянутой вдоль линии соединения, в то время как контрольные образцы без применения ультразвука имеют четко выраженный синусоидальный профиль волны с трапецеидальной формой оплава, вокруг центра кристаллизации которого расположены игольчатые дендриты [9].

В дальнейших исследованиях при идентичных условиях взрывного нагружения применялась усовершенствованная схема сварки взрывом с одновременной ультразвуковой обработкой одной из свариваемых неподвижных пластин, которая позволяла одной метаемой пла-

стиной одновременно сваривать два неподвижных образца, один из которых являлся исследуемым (с воздействием УЗ колебаний), второй – контрольным (без применения ультразвука) [9 – 11].

Для понимания в какой момент времени происходит указанный выше эффект от воздействия ультразвука, проводился рентгеноструктурный анализ четырех групп образцов из меди М1: в состоянии после отжига; после отжига и обработки ультразвуком; после отжига и сварки взрывом; сваренные взрывом образцы в состоянии после отжига с предварительной и одновременной УЗ обработкой [11].

Результаты опытов подтвердили предположение, что предварительная ультразвуковая обработка образцов с последующей их сваркой взрывом не влияет на структуру и свойства околошовной зоны, а ключевую роль на формирование сварного соединения оказывает именно одновременное воздействие УЗ колебаний и ударных волн в процессе сварки взрывом.

Одновременная ультразвуковая обработка при сварке взрывом изменяет свойства меди на уровне кристаллической решетки, которое выражается в уменьшении размера кристаллитов более чем 3–4 раза, увеличении микродеформаций и напряжений второго рода по сравнению с образцами, полученными без применения ультразвука. Увеличение времени предварительного воздействия с 10 до 60 с на металл высокочастотных акустических волн приводит к снижению напряжений второго рода [11].

Сравнительный анализ степени влияния мощности и времени предварительного воздействия высокочастотных акустических волн на изменение параметров зоны соединения при сварке взрывом под воздействием ультразвука показал, что дискретный рост мощности на порядок (с 0,2 до 2,0 кВт) приводит к уменьшению длины и амплитуды волны зоны соединения не более, чем на 15...20 %, в то время как увеличение продолжительности предварительного воздействия снижает указанные параметры волны в 2,5 ... 3 раза.

Следующим этапом стало исследование влияния кинематических параметров сварки взрывом и ультразвуковой обработки на структуру и свойства полученных соединений.

Так, при исследовании влияния скорости соударения на прочность на отрыв слоев соединений медных пластин видно, что во всем диапазоне изменения v_c от 260 до 440 м/с после сварки взрывом с воздействием УЗ наблюдается увеличение прочности по сравнению с кон-

трольными образцами без воздействия ультразвука. Причем наибольшая разница в значениях прочности соединения отмечается на режимах, близких к нижней границе сварки взрывом, что может свидетельствовать об изменении области свариваемости (в данном случае – нижней границы). Схожая тенденция наблюдалась как в стальных, так и в алюминиевых образцах [12].

Из общих результатов многочисленных исследований [7 – 9 и др.] можно сделать вывод, что при воздействии ультразвуком одними из основных регулируемых параметров процесса, определяющими, в конечном счете, свойства обрабатываемых и свариваемых материалов, являются частота и амплитуда УЗ колебаний. Поэтому дальнейшие опыты были направлены на исследование влияния данных параметров, причем в первой серии экспериментов изменяли только частоту УЗ колебаний в диапазоне 16... 25 кГц, остальные параметры сварки взрывом и УЗ воздействия оставались постоянными, а затем – только амплитуду УЗ колебаний в диапазоне 7... 25 мкм [12].

Исследование влияния частоты УЗ колебаний на механические свойства сваренных взрывом соединений показало, что с их увеличением сначала наблюдается рост прочности на отрыв слоев, достигая максимального значения: для медных образцов $\sigma_{отр} = 278$ МПа при $f = 18$ кГц (рис. 1, а); для алюминиевых образцов $\sigma_{отр} = 115$ МПа при $f = 20$ кГц (рис. 1, б). Дальнейшее повышение частоты УЗ колебаний приводит к снижению прочности, по-видимому, за счет увеличения объема оплавленного металла в зоне соединения (рис. 2).

При этом максимальные значения прочности соединения М1+М1 достигаются в достаточно широком диапазоне частот 16...20 кГц (см. рис 1, а). При сварке взрывом алюминиевых образцов А5+А5 наблюдается более узкий диапазон значений «оптимальной» частоты $f = 20...22$ кГц со смещением в область больших значений (см. рис. 1, б).

Установлено, что с увеличением частоты УЗ колебаний во всем диапазоне изменения f (14...25 кГц) наблюдается увеличение параметров волн и объема оплавленного металла на границе соединения (см. рис. 1, 2).

Результаты опытов по исследованию влияния амплитуды УЗ колебаний на свойства сваренных взрывом соединений показали, что изменение амплитуды в диапазоне 7... 25 мкм при постоянной частоте не оказывает существенного влияния на прочность и структуру полученных медных и алюминиевых соединений

по сравнению с изменением частоты.

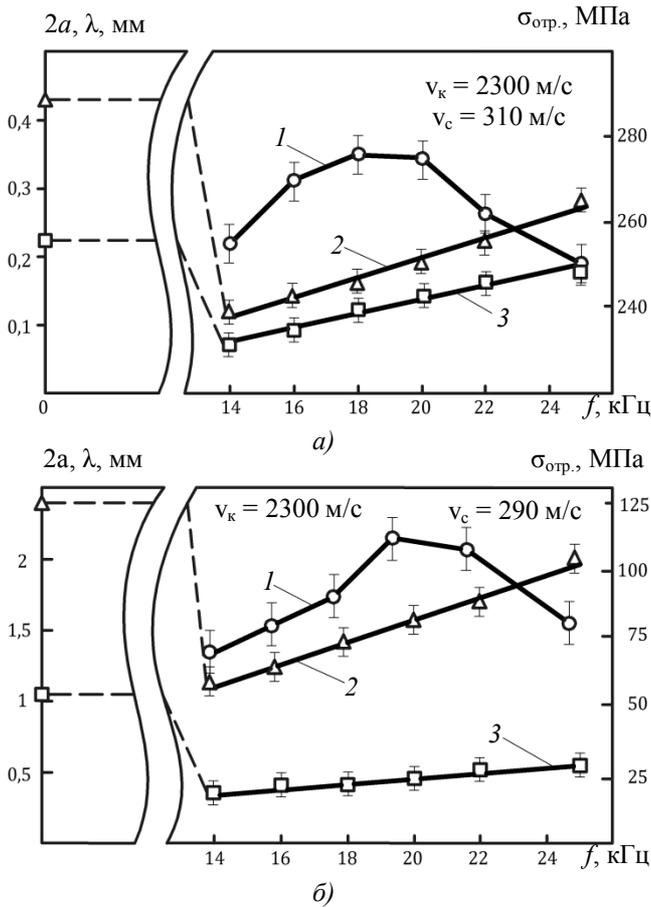


Рис. 1. Влияние частоты f УЗ колебаний на прочность $\sigma_{отр}$ и параметры волн ($2a, \lambda$) сваренного взрывом: *a* – соединение М1+М1; *б* – соединение А5+А5; *1* – прочность на отрыв слоев $\sigma_{отр}$; *2* – длина волны λ ; *3* – размах волны $2a$

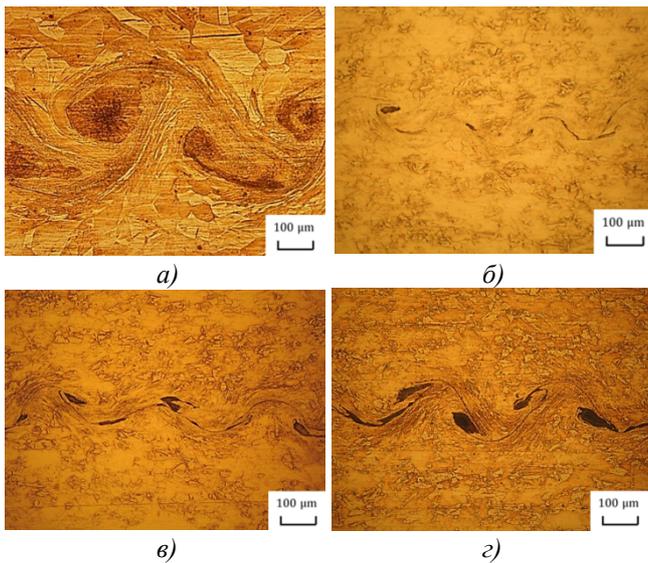


Рис. 2. Микроструктура границы соединения М1+М1: *a* – сварка взрывом без воздействия УЗ колебаний; *б* – *с* – сварка взрывом с воздействием УЗ колебаний частотой 18 кГц, 22 кГц и 25 кГц, соответственно

Так, при увеличении амплитуды ξ более чем в три раза наблюдается незначительное уменьшение прочности соединения и небольшой рост количества оплавленного металла: для медных образцов величина $\sigma_{отр}$ уменьшилась с 276 до 258 МПа, а величина $K_{опл}$ возросла с 23 до 27 %; для алюминиевых образцов величина $\sigma_{отр}$ уменьшилась с 115 до 103 МПа, а величина $K_{опл}$ возросла с 9 до 15 % (рис. 3) [13].

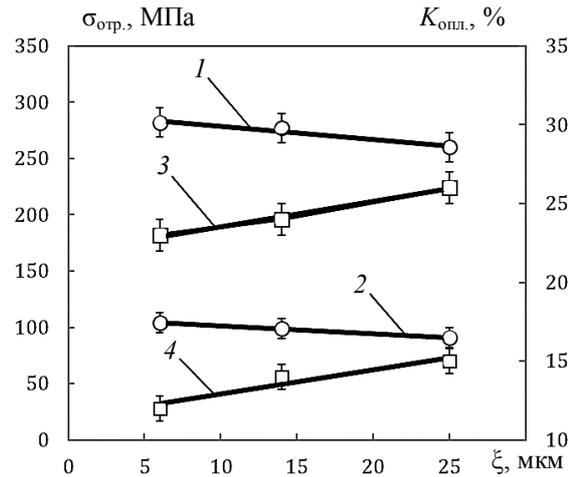


Рис. 3. Влияние амплитуды ξ УЗ колебаний на прочность $\sigma_{соед}$ и количество оплавов $K_{опл}$ сваренных взрывом медных и алюминиевых соединений: *1* – $\sigma_{отр}$. М1+М1; *2* – $\sigma_{отр}$. А5+А5; *3* – $K_{опл}$. М1+М1; *4* – $K_{опл}$. А5+А5

Полученные результаты указывают на изменение условий пластического течения металла в окрестностях точки соударения, что может быть вызвано изменением свойств металла, находящегося под воздействием ультразвука. Для детального изучения данного процесса необходимо было исследовать характер пластического деформирования металла околошовной зоны (ОШЗ) при сварке взрывом однородных модельных алюминиевых и медных пластин под воздействием УЗ колебаний.

Сварку взрывом при одновременном воздействии ультразвука на неподвижную пластину осуществляли на режимах, при которых образуется синусоидальный профиль зоны соединения. Для сравнения полученных результатов одновременно производили сварку взрывом тех же пар металлов на идентичных режимах (v_c, v_k, W_2) без воздействия ультразвука.

Условия опытов выдерживались такими, чтобы в каждом из них параметры процесса (в том числе, единичная масса) были строго оди-

наковыми независимо от схемы сварки, что достигалось соответствующим расчетом высоты заряда взрывчатого вещества и установочного зазора. Переменным параметром являлось наличие или отсутствие ультразвукового воздействия. Такое построение условий опытов позволило детально проследить характер и особенности пластического течения металла (ОШЗ) сваренных взрывом однородных материалов и выявить параметры процесса, оказывающие наибольшее влияние на деформационные процессы.

Исследование пластического деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом однородных модельных алюминиевых и медных пластин под воздействием ультразвука позволило выявить следующие особенности.

При сварке взрывом с одновременным ультразвуковым воздействием максимальная остаточная сдвиговая деформация g_{max} , измеренная в непосредственной близости от условной линии соединения слоев, составляет около 155 %, в то время как в контрольном образце, полученном на идентичных режимах сварки взрывом, но без воздействия ультразвука, сдвиговая деформация меньше и составляет $g_{max} \sim 130$ %. По мере удаления от линии соединения значения g_{max} интенсивно уменьшаются, но с разным градиентом (рис. 4, а).

Аналогичное распределение остаточной сдвиговой деформации g_{max} наблюдается и для случая сварки алюминиевых модельных пластин (рис. 4, б). Так, при сварке взрывом с воздействием ультразвука максимальная остаточная сдвиговая деформация g_{max} , измеренная в непосредственной близости от условной линии соединения (ЛС), для алюминиевых образцов составляет около 175 %, в то время как в контрольном образце без воздействия ультразвука значения $g_{max} \sim 155$ %.

Анализ эпюр g_{max} и микроструктуры медных и алюминиевых образцов показывает, что при формировании соединения под воздействием ультразвука, несмотря на уменьшение параметров границы раздела слоев, в пластическое течение вовлекается больший объем металла ОШЗ по сравнению с образцами без ультразвукового воздействия. Наряду с увеличением максимальных значений g_{max} , в пластическую деформацию вовлекаются более глубоко расположенные слои (см. рис. 4). При этом стоит отметить, что значения остаточной сдвиговой деформации g_{max} , измеренные на одинаковом расстоянии от условной линии соединения, различны для образцов с воздействием и без

воздействия ультразвука.

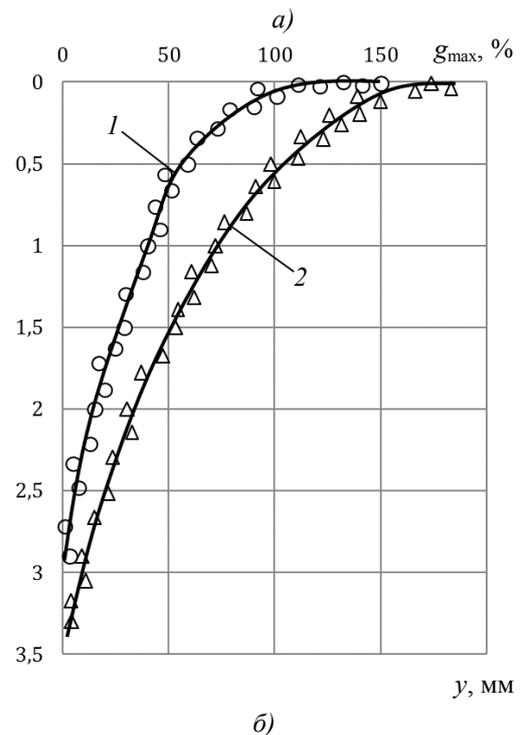
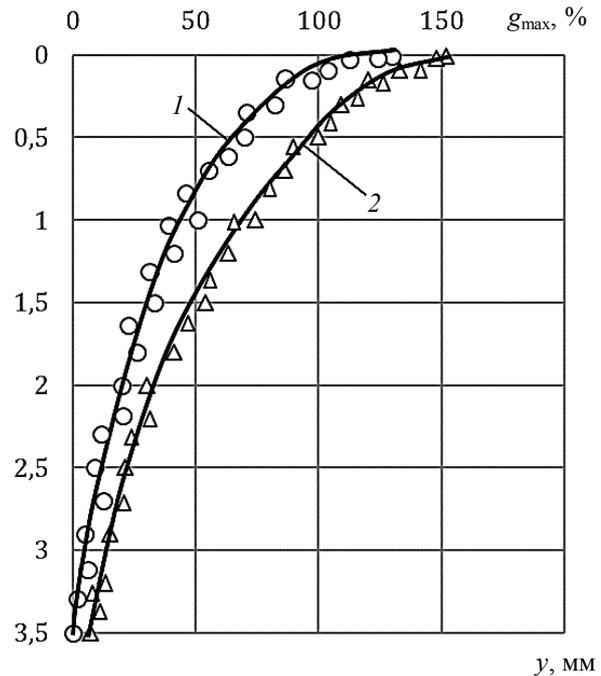


Рис. 4. Эпюры максимальных сдвигов g_{max} в околошовной зоне соединения М1+М1 (а) и соединения А5+А5 (б) в контрольном образце без подключения ультразвука (1) и образце с воздействием ультразвука (2)

Выявленная закономерность пластического течения металла ОШЗ в процессе образования соединения при сварке взрывом под воздействием ультразвука, очевидно, связана с изменением механических свойств поверхностных слоев металла, в котором генерируются высо-

кочастотные волны непосредственно перед соударением пластин.

При воздействии на металл ультразвуковых колебаний в нем реализуется акустопластический эффект, заключающийся в снижении предела текучести материала при постоянной скорости деформации, что дает возможность дислокациям и вакансиям с меньшими энергетическими затратами преодолевать барьеры, перемещаться и взаимодействовать друг с другом. В свою очередь, это ведет к изменению пластических свойств поверхностных слоев металла и условий формирования соединения соударяемых пластин [12].

Анализ результатов проведенных исследований на однородных материалах (алюминий, медь) показал, что сварка взрывом с применением ультразвука позволяет повысить прочность на границе соединения, особенно на режимах, близких к нижней границе сварки взрывом, что особенно актуально для композиций из металлов с резко-отличающимися физико-механическими свойствами. С этой целью исследовалась область сварки взрывом, структура и свойства медно-алюминиевых композитов, получаемых сваркой взрывом с воздействием ультразвука.

Чтобы полностью охватить основные характерные области сварки взрывом пары алюминий-медь [1, 2] скорость точки контакта v_k варьировалась в диапазоне 600...3500 м/с, за счет применения смесевых взрывчатых веществ (аммонит 6ЖВ + кварцевый песок), динамический угол соударения изменялся от 4° до 18° (скорость соударения v_c от 140 до 530 м/с), что, в свою очередь, позволило получить значения энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию, W_2 , в диапазоне 0,07...1,0 МДж/м².

Установлено, что при сварке взрывом меди с алюминием под воздействием ультразвука наблюдается существенное уменьшение количества оплавленного металла во всем диапазоне свариваемости, принципиально меняется и форма участков оплавленного металла, граница соединения имеет более прямолинейный профиль, в сравнении с образцами, полученными сваркой взрывом без воздействия ультразвука [14].

Одновременное воздействие ультразвука при сварке взрывом позволяет повысить качество соединений, расширить область свариваемости пары медь-алюминий, как вблизи нижней границы, так и вблизи верхней (рис. 5) и обосновано подойти к оптимизации режимов взрывного нагружения, обеспечивающих полу-

чение высокопрочных соединений с минимальным развитием структурной и механической неоднородностей.

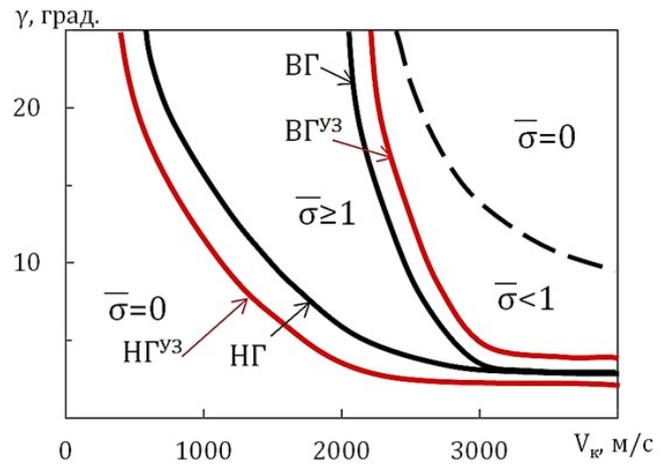


Рис. 5. Влияние воздействия ультразвука на область сварки взрывом соединения М1+А5:

ВГ – верхняя граница; НГ – нижняя граница; УЗ – сварка взрывом с воздействием ультразвука

В работе [15] исследовалось воздействие ультразвука на термический цикл в сварном шве в процессе его формирования при сварке константановой и медной пластин невозмущающим термопарным методом измерения температуры на границе соединения. Из сравнения температурных циклов в шве и параметров волн при сварке взрывом медных пластин с константановыми в условиях воздействия ультразвука и без его воздействия, разницы, превосходящей погрешности измерений, не наблюдается (рис. 6, 7). Это может объясняться тем, что степень влияния ультразвука на процессы, происходящие при сварке металлов взрывом, зависит как от материалов свариваемых пар, так и от режима соударения.

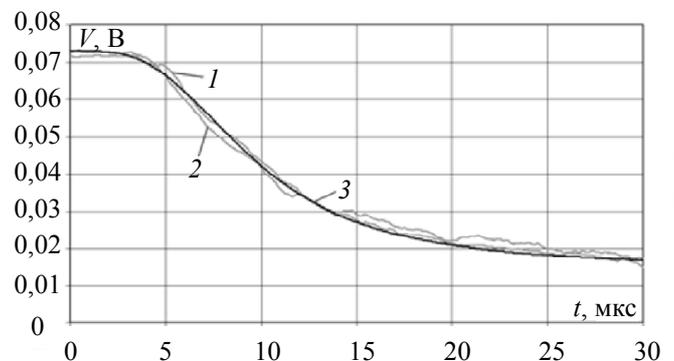


Рис. 6. Зависимость напряжения от времени на естественной термопаре:

1, 2 – экспериментально определенные напряжения при воздействии и без воздействия ультразвука соответственно; 3 – расчетная зависимость напряжения от времени $V_\phi(t)$

В данной работе измерения проводились при параметрах соударения пластин, обеспечивающих развитие волнообразование с расплавами на границе соединения металлов. По-видимому, процесс деформации металлов в зоне соединения наиболее чувствителен к ультразвуковому воздействию в условиях пограничного режима соударения с волнообразованием и без волнообразования.

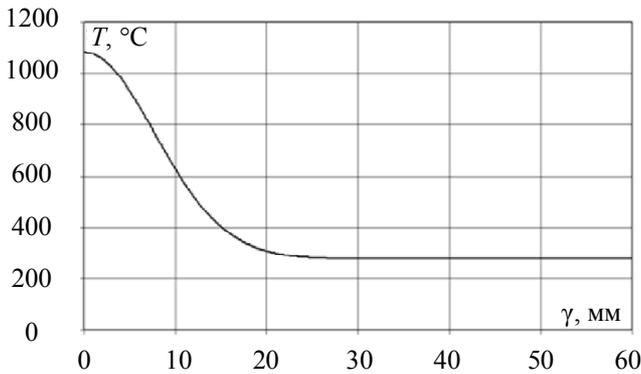


Рис. 7. Распределение температуры в шве в процессе сварки взрывом

Результаты проведенных исследований показывают целесообразность применения ультразвука в ходе взрывного нагружения, выражающуюся в повышении качества получаемых соединений и расширения области свариваемости соединяемых металлов. Тем не менее, данный комбинированный процесс еще не до конца изучен, поэтому исследования в этом направлении будут продолжены.

ВЫВОДЫ

1. Впервые обнаружен эффект изменения структуры и свойств сварных соединений в условиях сварки взрывом с одновременным воздействием УЗ колебаний, проявляющийся в увеличении прочности, микротвердости и существенном уменьшении параметров волн, количества оплавленного металла по сравнению со сваркой взрывом без применения ультразвука.

2. Экспериментально доказано, что предварительная ультразвуковая обработка образцов с последующей их сваркой взрывом не влияет на структуру и свойства околошовной зоны, а ключевую роль на формирование сварного соединения оказывает именно одновременное воздействие УЗ колебаний и ударных волн в процессе сварки взрывом.

3. Показано, что наибольшее влияние на изменение структуры и свойств свариваемых

взрывом соединений оказывает частота УЗ колебаний, при этом максимальные значения прочности слоев на отрыв для медных образцов реализуются в диапазоне частот $f = 17 \dots 20$ кГц, а для алюминиевых образцов наблюдается смещение в сторону больших значений частот $f = 20 \dots 22$ кГц.

4. Установлено, что пластическое течение металла околошовной зоны в условиях сварки взрывом с воздействием УЗ колебаний характеризуется меньшим градиентом эпюр остаточных сдвиговых деформаций и большей глубиной продеформированного слоя по сравнению со сваркой взрывом без применения ультразвука.

5. Одновременное воздействие ультразвука при сварке взрывом позволяет повысить качество соединений, расширить область свариваемости металлов и обосновано подойти к оптимизации режимов взрывного нагружения, обеспечивающих получение высокопрочных соединений с минимальным развитием структурной и механической неоднородностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лысак, В.И., Кузьмин, С.В. Сварка взрывом. – М.: Машиностроение -1, 2005. – 544 с.
2. Оголихин, В.М., Яковлев, И.В. Сварка взрывом в электрометаллургии. – Новосибирск: СО РАН, 2009. – 160 с.
3. Конон, Ю.А., Первухин, Л.Б., Чудновский, А.Д. Сварка взрывом. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
4. Бондарь, М.П., Псахье, С.Г., Дмитриев, А.И., Никонов, А.Ю. Об условиях локализации деформации и фрагментации микроструктуры при высокоскоростном нагружении // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т.16. №3. – С.5–13.
5. Takehiko Watanabe, Hideo Sakuyama, Atsushi Yanagisawa. Ultrasonic welding between mild steel sheet and Al-Mg alloy sheet // Journal of Materials Processing Technology, 2009. Vol. 209. Pp. 5475–5480.
6. Балдев, Р., Раджендран, В., Паланичами, П. Применение ультразвука. – М.: Техносфера, 2006. – 576 с.
7. Абрамов, О.В. Воздействие мощного ультразвука на жидкие и твердые металлы. – М.: Наука, 2000. – 297 с.
8. Тяпунина, Н.А., Бушуева, Г.В., Силис, М.И., Подсобляев, Д.С., Лихущин, Ю.Б., Богуненко, В.Ю. Поперечное скольжение дислокаций в ультразвуковом поле и влияние на этот процесс амплитуды и частоты ультразвука, ориентации образца и коэффициента динамической вязкости // Физика твердого тела. – 2003. – Т.45. №5. – С.836–841.
9. Кузьмин, Е.В., Пеев, А.П., Кузьмин, С.В., Лысак, В.И., Дородников, А.Н. Влияние схемы распространения ультразвуковых колебаний на структуру и свойства свариваемых

рых взрывом соединений // Сварка и диагностика. – 2016. – №3. – С. 53–57.

10. Пеев, А.П., Кузьмин, С.В., Лысак, В.И., Кузьмин, Е.В., Дородников А.Н. Формирование структуры и свойств свариваемых взрывом соединений под воздействием ультразвука // Физика металлов и металловедение. – 2015. – Т. 116, № 8. – С. 837–843.

11. Пеев, А.П., Кузьмин, С.В., Лысак, В.И., Кузьмин, Е.В. Исследование влияния ультразвука на тонкую структуру и свойства меди при сварке взрывом // Известия ВолгГТУ. – 2013. – № 18 (121). – С. 24–28.

12. Пеев, А.П., Кузьмин, С.В., Лысак, В.И., Кузьмин, Е.В., Дородников, А.Н. Влияние параметров высокочастотной акустической волны на структуру, свойства и пластическое течение металла зоны соединения свариваемых взрывом материалов с одновременным воздействием ультразвука // Физика металлов и металловедение. – 2017. – Т. 118. – № 5. – С. 513–521.

13. Кузьмин, Е.В., Пеев, А.П., Лысак, В.И., Кузьмин, С.В., Дородников, А.Н. О влиянии параметров ультразвуковой обработки на структуру и свойства алюминиевых соединений при сварке взрывом // Известия ВолгГТУ. – 2014. Вып.7. № 20. – С. 21–24.

14. Кузьмин, Е.В., Пеев, А.П., Кузьмин, С.В., Лысак, В.И., Дородников, А.Н., Сорокин А.Е., Никулин Е.А. Особенности формирования медно-алюминиевых соединений при сварке взрывом с воздействием ультразвука // Известия ВолгГТУ. – 2015. – № 10 (170). – С. 70–78.

15. Пай, В.В., Гулевич, М.А., Яковлев, И.В., Пеев, А.П., Лысак, В.И., Кузьмин, С.В., Кузьмин, Е.В., Дородников, А.Н. Измерение температуры в шве при сварке металлов взрывом под действием ультразвука // Известия ВолгГТУ. – 2016. – № 10 (189). – С. 5–10.

REFERENCES

1. Lysak, V.I., Kuzmin, S.V. *Explosion Welding*. – М.: Mechanical Engineering -1, 2005. – pp. 544.

2. Ogolikhin, V.M., Yakovlev, I.V. *Explosion Welding in Electrometallurgy*. – Novosibirsk: SS of the RAS, 2009. – pp. 160.

3. Konon, Yu.A., Pervukhin, L.B., Chudnovsky, A.D. *Explosion Welding*. – М: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 216.

4. Bondar, M.P., Psakhiye, S.G., Dmitriev, A.I., Nikonov, A.Yu. *On Conditions of Deformation Localization and Microstructure Fragmentation at High-speed Loading* // Physical Meso-mechanics. – 2013. – Vol.16. №3. – pp.5–13.

5. Takehiko Watanabe, Hideo Sakuyama, Atsushi Yanagi

sawa. Ultrasonic welding between mild steel sheet and Al-Mg alloy sheet // Journal of Materials Processing Technology, 2009. Vol. 209. Pp. 5475–5480.

6. Baldev, R., Ragendran, V., Palanichamy, P. *Ultrasound Application*. – М.: Technosphere, 2006. – pp. 576.

7. Abramov, O.V. *Strong Ultrasound Impact upon Liquid and Solid Metals*. – М.: Science, 2000. – pp. 297.

8. Tyapunina, N.A., Bushueva, G.V., Silis, M.I., Podsoblyayev, D.S., Likhushin, Yu.B., Bogunenkov, V.Yu. Dislocations cross slip in ultrasonic field and impact of ultrasound amplitude and frequency, sample orientation and dynamic viscosity factor upon this process // *Solid-State Physics*. – 2003. – Vol.45. №5. – pp.836–841.

9. Kuzmin, E.V., Peyev, A.P., Kuzmin, S.V., Lysak, V.I., Dorodnikov, A.N. Impact of ultrasonic oscillations propagation procedure upon structure and properties of joints welded by explosion // *Welding and Diagnostics*. – 2016. – №3. – pp. 53–57.

10. Peyev, A.P., Kuzmin, S.V., Lysak, V.I., Kuzmin, E.V., Dorodnikov, A.N. Formation of structure and properties of joints welded by explosion under impact of ultrasound // *Metal Physics and Metal Science*. – 2015. – Vol. 116, № 8. – pp. 837–843.

11. Peyev, A.P., Kuzmin, S.V., Lysak, V.I., Kuzmin, E.V. Investigation of ultrasound impact upon thin structure and copper properties during explosion welding // *Proceedings of VolgaSTU*. – 2013. – № 18 (121). – pp. 24–28.

12. Peyev, A.P., Kuzmin, S.V., Lysak, V.I., Kuzmin, E.V., Dorodnikov, A.N. Impact of high-frequency acoustic wave upon structure, properties and plastic flow of metal in area of material joint welded with explosion with simultaneous ultrasound impact // *Physics of Metals and Metal Science*. – 2017. – Vol. 118. – № 5. – pp. 513–521.

13. Kuzmin, E.V., Peyev, A.P., Lysak, V.I., Kuzmin, S.V., Dorodnikov, A.N. On impact of ultrasonic machining parameters upon structure and properties of aluminum joints during welding with explosion // *Proceedings of VolgaSTU*. – 2014. Edition7. № 20. – pp. 21–24.

14. Kuzmin, E.V., Peyev, A.P., Kuzmin, S.V., Lysak, V.I., Dorodnikov, A.N., Sorokin, A.E., Nikulin E.A. Peculiarities of copper-aluminum joints formation during explosion welding with ultrasound impact // *Proceedings of VolgaSTU* – 2015. – № 10 (170). – pp. 70–78.

15. Pai, V.V., Gulevich, M.A., Yakovlev, I.V., Peyev, A.P., Lysak, V.I., Kuzmin, S.V., Kuzmin, E.V., Dorodnikov, A.N. Temperature measurement in joint during metal explosion welding under ultrasound impact // *Proceedings of VolgaSTU*. – 2016. – № 10 (189). – С. 5–10.

Рецензент д.т.н. Д.И. Фатюхин