

ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ

УДК 621.791.12

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ С ОДНОВРЕМЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

© 2019 г. Е. В. Кузьмин^а*, В. И. Лысак^а, С. В. Кузьмин^а, М. П. Королев^а

^аВолгоградский государственный технический университет, 400005 Россия, Волгоград, пр. им. Ленина, 28

*e-mail: e.v.kuzmin@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.05.2018 г.

После доработки 09.08.2018 г.

Представлены сравнительные результаты исследования влияния параметров высокоскоростного соударения металлов при сварке взрывом с воздействием ультразвуковых колебаний на структуру и свойства полученных соединений. Показано влияние скорости соударения на прочность, микротвердость и формирование структуры свариваемых взрывом соединений меди, алюминия и стали под воздействием ультразвука.

Ключевые слова: сварка взрывом, скорость соударения, ультразвуковые колебания, прочность, микротвердость

DOI: 10.1134/S0015323019020116

ВВЕДЕНИЕ

Высокоскоростное соударение тел при сварке взрывом сопровождается рядом уникальных эффектов и явлений: волнообразование, интенсивная пластическая деформация металла в очень узкой околошовной зоне, кумуляция и образование соединения в течение нескольких микросекунд [1–4].

Одним из определяющих параметров процесса сварки взрывом является скорость соударения, от величины которой зависит как прочность, так и качество формирования границы соединения. Это связано с тем, что при малых значениях скорости соударения сдвиговая пластическая деформация металла в околошовной зоне также мала, и ее недостаточно для образования прочного сварного соединения. С другой стороны, большие скорости соударения приводят к чрезмерной пластической деформации металла, повышенному тепловложению, образованию оплавов и интерметаллидов, снижающих прочность и эксплуатационные свойства сварного соединения. Поэтому для получения высокой прочности и качественного работоспособного соединения необходимо выдерживать скорость соударения для каждой пары свариваемых металлов в оптимальном диапазоне [5–7].

Известно [8–10], что, если на материал, подвергаемый статическому деформированию, воздействовать ультразвуком, характер пластической деформации меняется: изменяется структура, уменьшаются значения предела прочности и

текучести, соответствующие данной деформации, т.е. материал становится более пластичным. Вместе с тем вопросы динамического деформирования металла при высокоскоростном соударении тел под воздействием ультразвука мало исследованы [11–13], а их дальнейшее изучение представляет как научный, так и практический интерес.

Целью данной работы является исследование влияния скорости соударения на структуру и свойства свариваемых взрывом материалов под воздействием ультразвука.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении экспериментов в качестве материалов исследования применяли пластины меди М1, алюминия А5 и стали Ст. 3, толщиной 3,5, 4 и 2 мм соответственно. Сварку взрывом с воздействием ультразвуковых (УЗ) колебаний на неподвижную пластину осуществляли по параллельной схеме (рис. 1) в бронекамере, оборудованной электронной измерительно-регистрационной аппаратурой. Для сравнительной оценки полученных результатов одновременно производили сварку взрывом контрольных образцов тех же пар металлов на идентичных режимах динамического нагружения, но без воздействия ультразвука (контрольные образцы). Параметры высокоскоростного соударения свариваемых металлов рассчитыва-

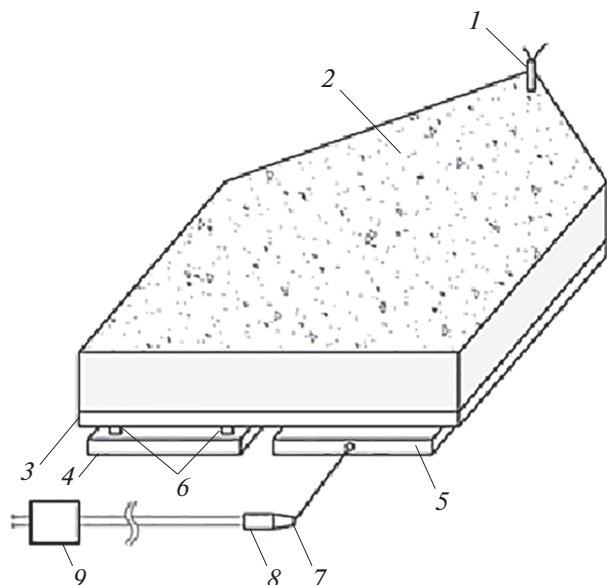


Рис. 1. Схема сварки взрывом с воздействием ультразвука: 1 – электродетонатор; 2 – заряд ВВ; 3 – металлическая пластина; 4 – неподвижная пластина; 5 – неподвижная пластина с подводом ультразвуковых колебаний; 6 – опорные элементы; 7 – волновод; 8 – пьезокерамический преобразователь; 9 – ультразвуковой генератор.

ли с использованием пакета прикладных программ EW Calc [14].

В качестве ультразвукового генератора использовали установку УЗГИ-2 и специальную колебательную систему (преобразователь с волноводом) повышенной прочности [15]. Замеры микротвердости на границе сварного соединения проводили на приборе МЕТКОМ DUROLINE-M. Металлографические исследования выполняли на микроскопе OLYMPUS BX61.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Соединение М1 + М1. Исследование влияния скорости соударения V_c на прочность $\sigma_{отр}$ на отрыв слоев медных соединений показало, что во всем диапазоне изменения V_c от 260 до 440 м/с после сварки взрывом с воздействием УЗ-колебаний наблюдается увеличение прочности по сравнению с контрольными образцами. Максимальное значение прочности соединения М1 + М1 с воздействием УЗ-колебаний составляло $\sigma_{отр} = 277$ МПа при скорости соударения $V_c = 310$ м/с, в то время как в контрольных образцах при той же скорости соударения значение прочности соединения было меньше – $\sigma_{отр} = 253$ МПа (рис. 2).

При этом наибольшая разница в значениях прочности соединения отмечается на режимах, близких к нижней границе области сварки взрывом.

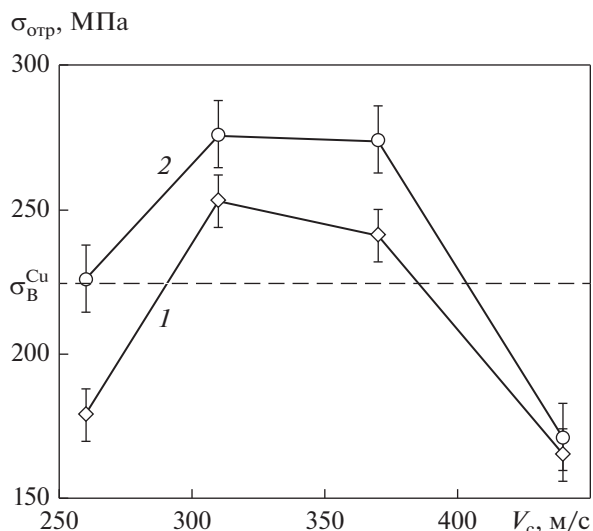


Рис. 2. Влияние скорости соударения V_c на прочность $\sigma_{отр}$ сваренного взрывом соединения М1 + М1: 1 – сварка взрывом; 2 – сварка взрывом с воздействием УЗ-колебаний.

Так при скорости соударения $V_c = 260$ м/с применение ультразвука при сварке взрывом медных образцов позволило получить равнопрочное соединение с прочностью $\sigma_{отр} = 224$ МПа. В контрольных образцах при той же скорости соударения прочность соединения составляла всего 176 МПа, т.е. равнопрочного соединения не удалось получить (рис. 2).

Проведенные металлографические исследования показали, что при сварке взрывом с воздействием УЗ-колебаний на границе соединения М1 + М1 наблюдается уменьшение как параметров волн, так и уменьшение количества оплавленного металла $K_{опл}$ по сравнению с контрольными образцами. Так, в условиях сварки взрывом с воздействием ультразвука при $V_c = 370$ м/с количество оплавленного металла на границе соединения составляло $K_{опл} \approx 28\%$ при размахе волны $2a \approx 0.06$ мм и длине волны $\lambda \approx 0.16$ мм (рис. 3, кривые 2, 4, 6), в то время как при сварке без применения ультразвука значения параметров значительно больше: $K_{опл} \approx 54\%$, $2a \approx 0.14$ мм, $\lambda \approx 0.34$ мм (рис. 3, кривые 1, 3, 5). По мере снижения скорости соударения до 260 м/с при сварке взрывом с воздействием УЗ-колебаний в зоне соединения наблюдается постепенное уменьшение, как параметров волн до $2a \approx 0.03$ мм, $\lambda \approx 0.12$ мм, так и количества оплавленного металла до $K_{опл} \approx 10\%$ (рис. 3, кривые 2, 4, 6). При этом самые маленькие параметры волн и наименьшее количество оплавленного металла на границе соединения М1 + М1 наблюдали в образцах с воздействием ультразвука при $V_c = 260$ м/с (рис. 4).

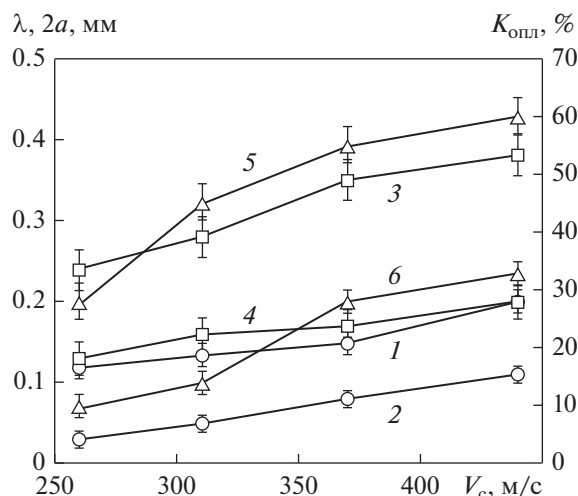


Рис. 3. Влияние скорости соударения V_c на изменение размаха волны $2a$ (1, 2), длины волны λ (3, 4) и количества оплавленного металла $K_{\text{опл}}$ (5, 6) соединения М1 + М1 при: 1, 3, 5 – сварка взрывом; 2, 4, 6 – сварка взрывом с воздействием УЗ колебаний.

Исследование влияния скорости соударения V_c на распределение микротвердости HV по толщине соединения М1 + М1 показало, что при сварке взрывом с воздействием УЗ-колебаний наблюдается некоторое увеличение микротвердости по сравнению с контрольными образцами, сваренными без применения ультразвука. Так, при сварке взрывом с воздействием УЗ-колебаний при $V_c = 370$ м/с максимальное значение микротвердости металла околошовной зоны, измеренное в непосредственной близости от линии соединения, составляло $HV = 198$ кгс/мм², а для контрольного образца, сваренного на идентичных режимах, микротвердость составляла $HV = 172$ кгс/мм². С уменьшением V_c до 260 м/с наблюдается снижение микротвердости до 166 кгс/мм² (рис. 5).

Соединение А5 + А5. Экспериментально установлено, что во всем диапазоне изменения скорости соударения V_c от 260 до 400 м/с после сварки взрывом с воздействием УЗ-колебаний наблюдается увеличение прочности соединения алюминиевых образцов по сравнению с контрольными образцами без воздействия ультразвука. Максимальное значение прочности соединения А5 + А5 с воздействием УЗ-колебаний составляло $\sigma_{\text{отр}} = 113$ МПа при скорости соударения $V_c = 290$ м/с, в то время как в контрольных образцах при той же скорости соударения значение прочности соединения было меньше – $\sigma_{\text{отр}} = 102$ МПа (рис. 6). При этом наибольшая разница в значениях прочности соединения отмечается на средних режимах скоростей соударения при $V_c = 290$ – 340 м/с. Следует отметить, что по сравнению со сваркой медных образцов, при сварке взрывом алюминиевых образцов

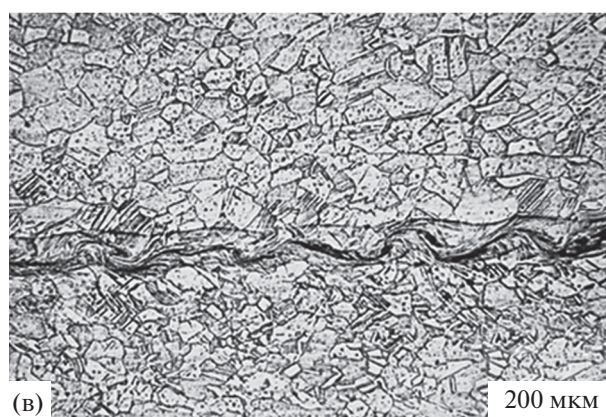


Рис. 4. Микроструктура границы сваренного взрывом соединения М1 + М1: а – сварка взрывом ($V_c = 370$ м/с); б – сварка взрывом с воздействием УЗ-колебаний ($V_c = 370$ м/с); в – сварка взрывом с воздействием УЗ-колебаний ($V_c = 260$ м/с).

равнопрочное соединение было достигнуто во всем диапазоне исследуемых скоростей соударения как с применением ультразвука, так и без него.

Металлографические исследования показали, что при сварке взрывом с воздействием УЗ колебаний на границе соединения алюминиевых образцов наблюдается (аналогично медным образцам) уменьшение параметров волн и количества

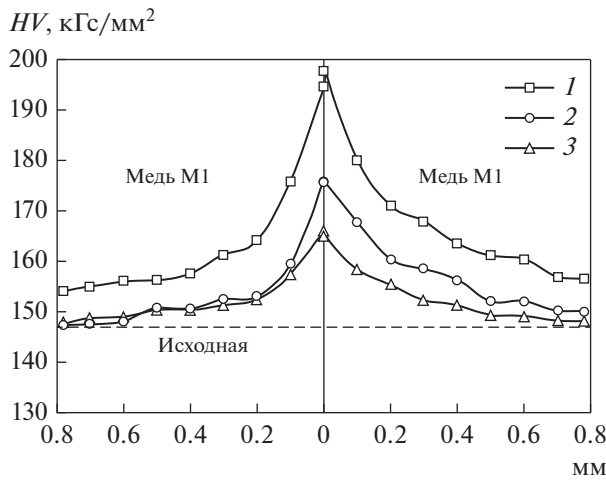


Рис. 5. Распределение микротвердости HV в околошовной зоне по толщине сваренного взрывом соединения М1+М1: 1 – сварка взрывом с воздействием УЗ-колебаний ($V_c = 370$ м/с); 2 – сварка взрывом с воздействием УЗ-колебаний ($V_c = 260$ м/с); 3 – сварка взрывом ($V_c = 370$ м/с).

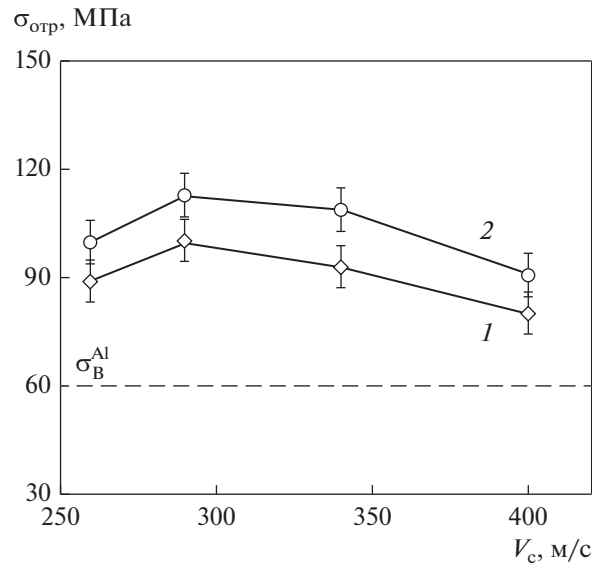


Рис. 6. Влияние скорости соударения V_c на прочность $\sigma_{отр}$ сваренного взрывом соединения А5 + А5: 1 – сварка взрывом; 2 – сварка взрывом с воздействием УЗ-колебаний.

оплавленного металла $K_{опл}$ по сравнению с контрольными образцами. Так, после сварки взрывом с воздействием ультразвука при $V_c = 400$ м/с количество оплавленного металла на границе соединения А5 + А5 составляло $K_{опл} \approx 19\%$ при размахе волны $2a \approx 0.24$ мм и длине волны $\lambda \approx 0.7$ мм (рис. 7, кривые 2, 4, 6), в то время как при сварке контрольных образцов значения параметров больше: $K_{опл} \approx 46\%$, $2a \approx 0.29$ мм, $\lambda \approx 0.84$ мм (рис. 7, кривые 1, 3, 5). Снижение скорости соударения до 260 м/с при сварке взрывом с воздействием ультразвука закономерно приводит к уменьшению параметров волн и количества оплавленного металла до $2a \approx 0.18$ мм, $\lambda \approx 0.51$ мм и $K_{опл} \approx 9\%$ (рис. 7 кривые 2, 4, 6). При этом для всех алюминиевых образцов (как с применением ультразвука, так и без него) во всем диапазоне исследуемых скоростей соударения наблюдается стабильная волнообразная граница соединения (рис. 8).

Измерение микротвердости на границе соединения алюминиевых образцов показало, что воздействие УЗ-колебаний в условиях сварки взрывом приводит (аналогично медным образцам) к некоторому увеличению максимальных значений микротвердости HV по сравнению с контрольными образцами, сваренными на идентичных режимах без применения ультразвука. Так при сварке взрывом с воздействием УЗ-колебаний при $V_c = 400$ м/с максимальное значение микротвердости металла околошовной зоны, измеренное в непосредственной близости от линии соединения, составляло $HV = 79$ кГс/мм², а для контрольного образца, сваренного на идентичных режимах, микротвердость составляла $HV = 58$ кГс/мм².

С уменьшением V_c до 290 м/с наблюдается снижение микротвердости до 66 кГс/мм² (рис. 9).

Соединение Ст.3 + Ст.3. Анализ результатов исследования при сварке взрывом образцов из более прочного и твердого металла Ст.3 показал практически аналогичные зависимости и схожую тенденцию изменения параметров, как и при

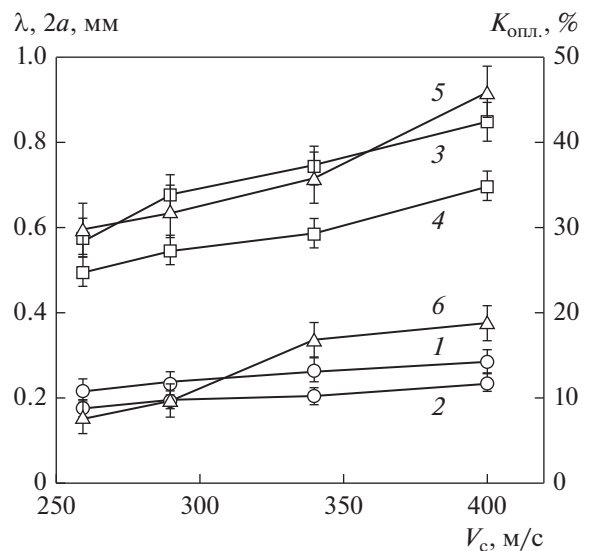


Рис. 7. Влияние скорости соударения V_c на изменение размаха волны $2a$ (1, 2), длины волны λ (3, 4) и количества оплавленного металла $K_{опл}$ (5, 6) соединения А5 + А5 при: 1, 3, 5 – сварка взрывом; 2, 4, 6 – сварка взрывом с воздействием УЗ-колебаний.

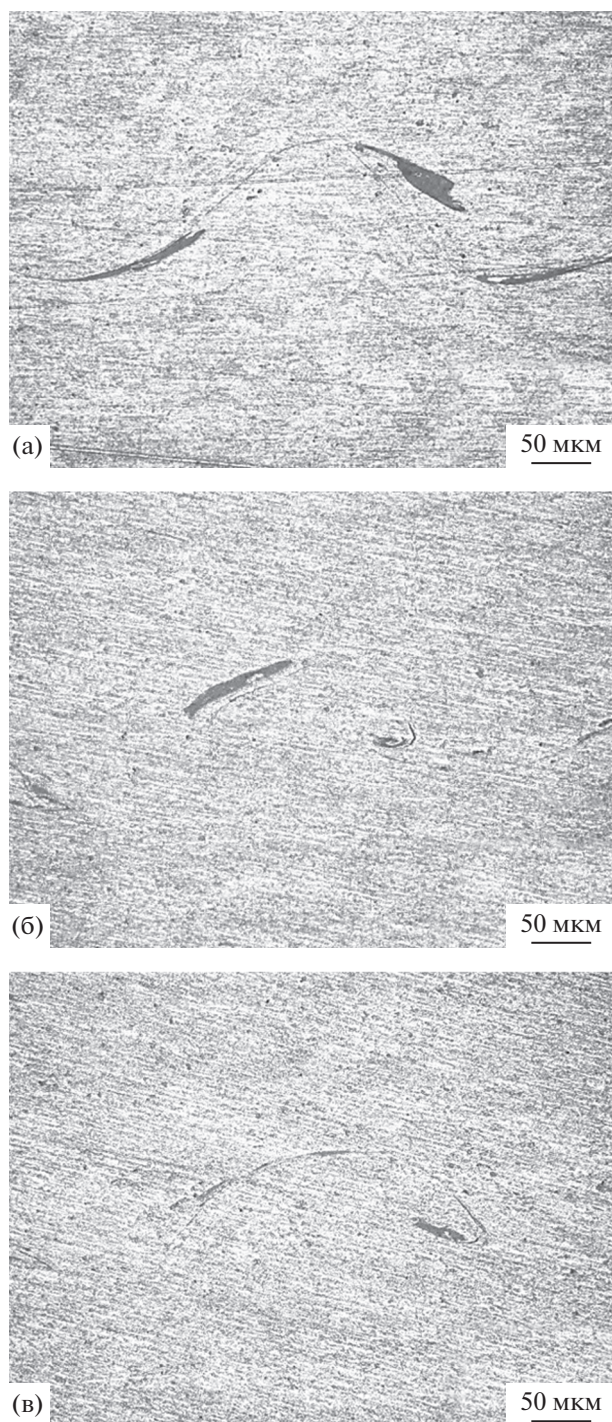


Рис. 8. Микроструктура границы сваренного взрывом соединения А5 + А5: а – сварка взрывом ($V_c = 400$ м/с); б – сварка взрывом с воздействием УЗ-колебаний ($V_c = 400$ м/с); в – сварка взрывом с воздействием УЗ-колебаний ($V_c = 290$ м/с).

сварке пластичных цветных металлов меди и алюминия.

Максимальное значение прочности соединения Ст.3 + Ст.3 с воздействием УЗ-колебаний со-

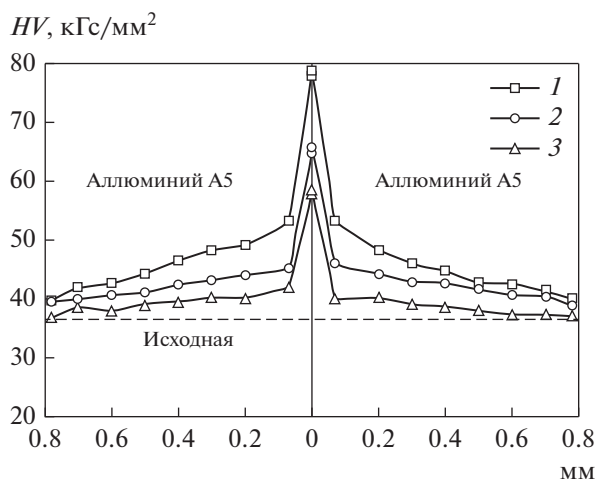


Рис. 9. Распределение микротвердости HV в околошовной зоне по толщине сваренного взрывом соединения А5 + А5: 1 – сварка взрывом с воздействием УЗ колебаний ($V_c = 400$ м/с); 2 – сварка взрывом с воздействием УЗ колебаний ($V_c = 290$ м/с); 3 – сварка взрывом ($V_c = 400$ м/с).

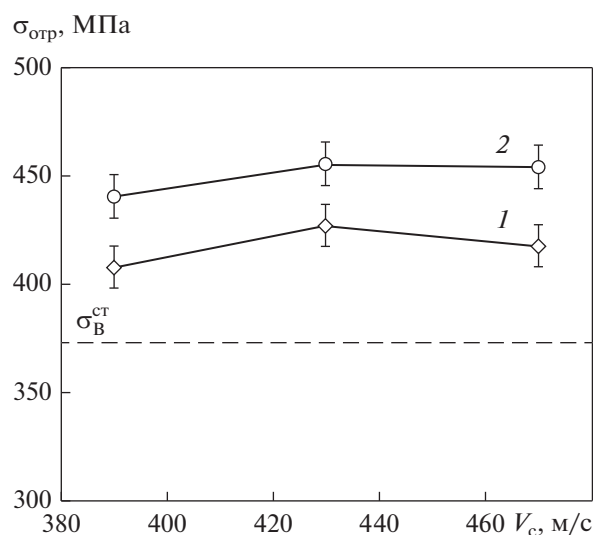


Рис. 10. Влияние скорости соударения V_c на прочность $\sigma_{отр}$ сваренного взрывом соединения Ст. 3 + Ст. 3: 1 – сварка взрывом; 2 – сварка взрывом с воздействием УЗ-колебаний.

ставляло $\sigma_{отр} = 456$ МПа при скорости соударения $V_c = 430$ м/с, в то время как в контрольных образцах при той же скорости соударения значение прочности соединения было меньше – $\sigma_{отр} = 425$ МПа (рис. 10).

Металлографические исследования показали, что при сварке взрывом с воздействием УЗ-колебаний на границе соединения стальных образцов наблюдается (аналогично медным и алюми-

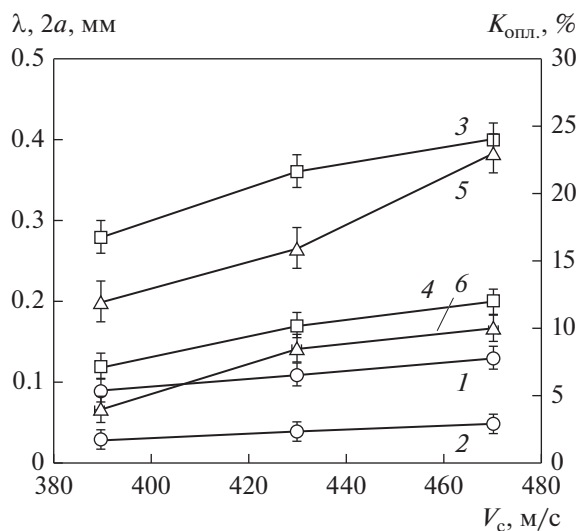


Рис. 11. Влияние скорости соударения V_c на изменение размаха волны $2a$ (1, 2), длины волны λ (3, 4) и количества оплавленного металла $K_{опл}$ (5, 6) соединения Ст.3 + Ст.3 при: 1, 3, 5 – сварка взрывом; 2, 4, 6 – сварка взрывом с воздействием УЗ-колебаний.

вым образцам) уменьшение параметров волн и количества оплавленного металла $K_{опл}$ по сравнению с контрольными образцами без применения ультразвука. Так после сварки взрывом с воздействием ультразвука при $V_c = 470$ м/с количество оплавленного металла на границе соединения Ст.3 + Ст.3 составляло $K_{опл} \approx 10\%$ при размахе волны $2a \approx 0.06$ мм и длине волны $\lambda \approx 0.20$ мм (рис. 11, кривые 2, 4, 6), в то время как при сварке контрольных образцов значения параметров больше: $K_{опл} \approx 23\%$, $2a \approx 0.22$ мм, $\lambda \approx 0.40$ мм (рис. 11, кривые 1, 3, 5).

Измерение микротвердости на границе соединения Ст.3 + Ст.3 показало, что в сваренных взрывом стальных образцах с применением ультразвука при $V_c = 470$ м/с максимальное значение микротвердости составляло $HV = 284$ кгс/мм², а в контрольных образцах, сваренных на идентичных режимах, микротвердость значительно меньше – $HV = 220$ кгс/мм² (рис. 13).

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлено, что во всем диапазоне изменения скоростей соударения после сварки взрывом с воздействием УЗ-колебаний наблюдается увеличение прочности, микротвердости и уменьшение параметров волн, количества оплавленного металла в исследованных соединениях меди, алюминия и стали по сравнению с контрольными образцами, сваренными на идентичных режимах взрывного нагружения, но без воздействия ультразвука.

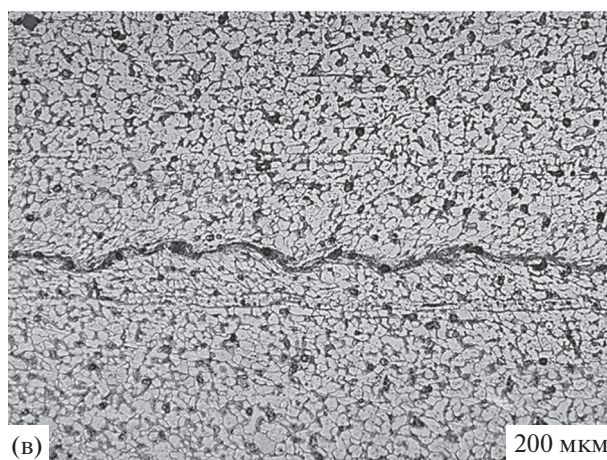
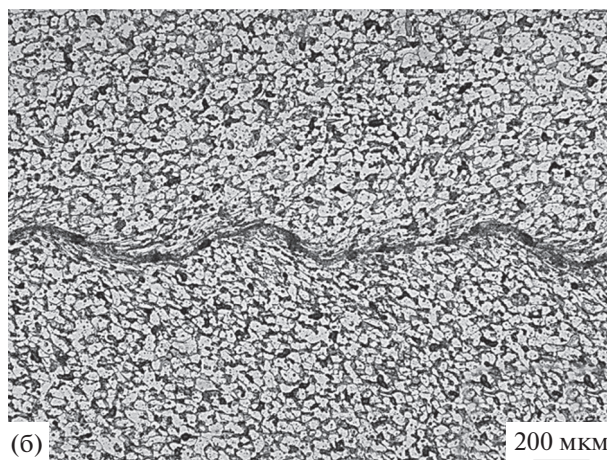
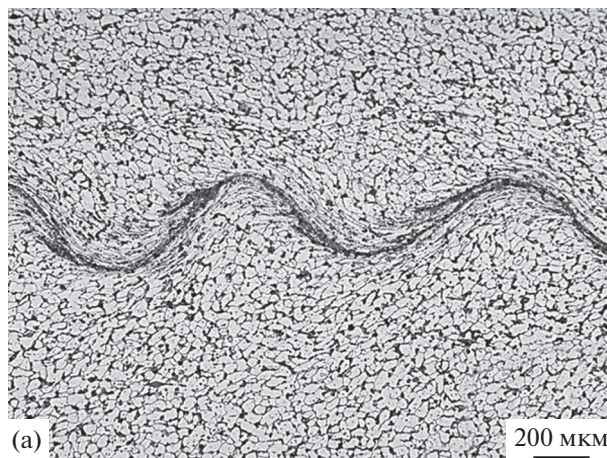


Рис. 12. Микроструктура границы сваренного взрывом соединения Ст.3 + Ст.3: а – сварка взрывом ($V_c = 470$ м/с); б – сварка взрывом с воздействием УЗ-колебаний ($V_c = 470$ м/с); в – сварка взрывом с воздействием УЗ-колебаний ($V_c = 390$ м/с).

2. Показано, что применение ультразвука в процессе сварки взрывом позволяет повысить качество соединений, расширить область свариваемости металлов и обоснованно подойти к оптими-

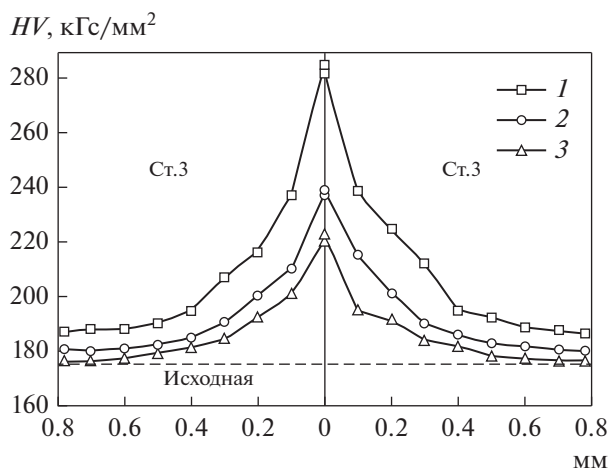


Рис. 13. Распределение микротвердости HV в околошовной зоне по толщине сваренного взрывом соединения Ст.3 + Ст.3: 1 – сварка взрывом с воздействием УЗ колебаний ($V_c = 470$ м/с); 2 – сварка взрывом с воздействием УЗ колебаний ($V_c = 390$ м/с); 3 – сварка взрывом ($V_c = 470$ м/с).

зации параметров высокоскоростного соударения, обеспечивающих получение высокопрочных соединений с минимальным развитием структурной и механической неоднородностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках “Совета по грантам Президента РФ” (СП-1940.2016.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. М.: Машиностроение-1, 2005. 544 с.
2. Яковлев И.В., Пай В.В. Сварка металлов взрывом. Новосибирск: СО РАН, 2013. 565 с.
3. Захаренко И.Д. Сварка металлов взрывом. Минск: Наука и техника, 1990. 205 с.
4. Конон Ю.А., Первухин Л.Б., Чудновский А.Д. Сварка взрывом. М.: Машиностроение, 1987. 216 с.
5. Трыков Ю.П., Шморгул В.Г. Свойства и работоспособность слоистых композитов. Волгоград: ВолгГТУ, 1999. 189 с.
6. Гринберг Б.А., Иванов М.А., Иноземцев А.В., Кузьмин С.В., Лысак В.И., Власова А.М. Рельеф поверхности раздела при сварке взрывом: всплески и волны // ФММ. 2015. Т. 116. № 4. С. 388–399.
7. Бондарь М.П. Влияние механизма деформации в зоне соударения пар материалов на выбор оптимальных параметров сварки взрывом // Автоматическая сварка. 2009. № 11. С. 14–19.
8. Артемьев В.В., Клубович В.В., Рубанчик В.В. Ультразвук и обработка материалов. Минск: Экоспектива, 2003. 335 с.
9. Абрамов О.В. Воздействие мощного ультразвука на жидкие и твердые металлы. М.: Наука, 2000. 297 с.
10. Агранат Б.А., Дубровин М.Н., Хавский Н.Н., Эскин Г.И. Основы физики и техники ультразвука. М.: Высшая школа, 1987. 352 с.
11. 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 // ФММ. 2015. Т. 116. № 8. С. 837–843.
12. 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 взрывом соединений // Сварка и диагностика. 2016. № 3. С. 53–57.
13. 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 // ФММ. 2017. Т. 118. № 5. С. 513–521.
14. Хаустов С.В., Лысак В.И., Кузьмин С.В., Ивченко В.А., Попов К.В., Нестеров В.И., Сагулев Д.О., Ионов Б.Б., Новикова Л.А. Программное обеспечение расчёта параметров соударения в многослойных системах металлических пластин // Изв. ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. Волгоград. 2017. № 13 (208). С. 5–22.
15. Кузьмин Е.В., Кузьмин С.В., Лысак В.И., Пеев А.П. П.М. 140332 РФ, МПК В06В1/06, В23К28/02, В23К20/08. Ультразвуковая колебательная система для обработки материалов; ВолгГТУ, заявл. 24.12.2013.