УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-11-246-19-23

*Е. В. Кузьмин, канд. техн. наук, М. П. Королев, аспирант, В. И. Лысак, академик РАН,
С. В. Кузьмин, д-р техн. наук, М. С. Зарубин, магистрант, П. А. Петрушкин, магистрант,
В. А. Львов, магистрант*

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ КОМПОЗИТА ТИТАН-СТАЛЬ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru

В статье приводятся исследования влияния воздействия ультразвука в ходе взрывного нагружения на процессы формирования соединения композита титан-сталь. Показано, что введение ультразвука в ходе взрывного нагружения приводит к формированию практически прямолинейной границы соединения титана со сталью. Рассмотрен химический состав участков оплавленного металла. Приведены результаты прочности на отрыв слоев композита титан-сталь.

Ключевые слова: сварка взрывом, ультразвук, композиционный материал, титан, сталь, прочность

E. V. Kuz'min, M. P. Korolev, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min, M. S. Zarubin, P. A. Petrushkin, V. A. L'vov

FEATURES OF FORMING A COMPOSITE TITANIUM-STEEL JOINT DURING ULTRASOUND-ASSISTED EXPLOSIVE WELDING

Volgograd State Technical University, weld@vstu.ru

The article presents studies of the influence of ultrasound exposure during explosive loading on the formation of a titanium-steel composite compound. It is shown that the introduction of ultrasound during explosive loading leads to the formation of an almost rectilinear boundary between titanium and steel. The chemical composition of the fused metal sections is considered. The results of the separation strength of layers of the titanium-steel composite are presented.

Keywords: explosion welding, ultrasound, composite material, titanium, steel, strength

Развитие отраслей промышленности, создающих наукоемкую продукцию для предприятий ракетно-космической техники, 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 [1, 2].

Одним из направлений повышения технологичности изготовления металлических композиционных материалов является разработка и внедрение качественно новых технологий, основанных, в том числе, на комбинированном воздействии нескольких видов энергии или совмещении различных способов ее подвода.

Основной проблемой при получении композиционных разнородных материалов является их резкое различие физико-

механических свойств, что значительно сужает диапазон качественного формирования соединения, вследствие образования структурной и химической неоднородностей, резко снижающих эксплуатационные свойства композитов [1 ... 4].

Сварка взрывом является одним из эффективных инструментов создания высококачественных композиционных материалов благодаря малой длительности процесса формирования соединения [1, 2, 4, 6, 7].

Соединения титана со сталью нашли широкое практическое применение благодаря сочетанию высокой коррозионной стойкости титана с высокими прочностными и технологическими свойствами сталей. Задача получения сваркой взрывом качественного соединения титана со сталью в полной мере не решена вследствие весьма узкого диапазона получения прочного соединения,

а также образования в зоне соединения ряда хрупких интерметаллидов [1, 5 ... 7].

Авторами работ [8 ... 11] на примере ряда однородных и разнородных композитов показано, что сварка взрывом с одновременным воздействием ультразвука позволяет не только существенно расширить область свариваемости (пара медь-алюминий), но и получать на низкоинтенсивных режимах сварки равнопрочные соединения практически без оплавленного металла с минимальным развитием структурной и механической неоднородностей.

В связи с вышеизложенным, целью данной работы явилось исследование влияния воздействия ультразвука в процессе взрывного нагружения на формирование структуры и свойств композита титан-сталь.

Материалы и методика проведения исследований

В качестве исходных материалов использовали пластины из стали Ст3 толщиной 10 мм и титана ВТ1-0 толщиной 5 мм. Сварку взрывом осуществляли при одновременном воздействии ультразвука на неподвижную пластину (исследуемый образец) по схеме с встречно-направленным распространением ультразвуковых колебаний относительно направления процесса сварки [12] на режимах, приведенных в таблице 1. Параметры высокоскоростного соударения свариваемых металлов рассчитывали с использованием пакета прикладных программ EW Calc [13].

Для сравнения результатов исследования одновременно производили сварку взрывом контрольных образцов (таких же пар металлов) на идентичных режимах взрывного нагружения, но без воздействия ультразвука. Контроль скорости детонации взрывчатого вещества осуществляли электроконтактным методом с регистрацией параметров электронной аппаратурой (осциллограф ТЕКТРОНИХ DPO, частотомер ЧЗ-63).

В качестве ультразвукового генератора использовали установку УЗГИ-2 с пьезокерамическим преобразователем и конусным концентратором, характеризующихся простотой, надежностью в работе и возможностью изменения амплитуды колебаний в достаточно широком диапазоне.

Свойства и качество сваренных взрывом композитов оценивали по изменению прочности слоев на отрыв, количества оплавленного металла, параметров волн на границе соединения и микротвердости металла околошовной зоны [14]. Исследования структуры и химического состава зоны соединения проводили на растровом двухлучевом электронном микроскопе VERSA 3D FEI.

Результаты и их обсуждение

Как было отмечено выше снижение прочности композита титан-сталь связано не только с образованием в зоне соединения хрупких интерметаллидов FeTi и Fe₂Ti в результате взаимодействия данного сочетания материалов. Так в работах [1, 4, 7] показано, что одним из условий получения без-

Таблица 1 – 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 пластической деформации МДж/м ²
1	ВТ1-0+Ст3	5+10	20	5	2200	330	0,7
1к			–	–			

к – контрольный образец

дефектного соединения является ограничение верхнего предела скорости точки контакта значением порядка 2000-2200 м/с.

полученных сваркой взрывом с воздействием ультразвука, прочность на отрыв слоев выше, а количество оплавленного металла

Рис. 1. Микроструктура зоны соединения BT1-0+Ст3, полученного:
а – сварка взрывом (контрольный образец);
б – сварка взрывом с воздействием ультразвука

Помимо значений скорости точки контакта равной 2200 м/с в данной работе были выбраны низкоинтенсивные режимы соударения, обеспечивающие энергетические затраты на пластическую деформацию в ОШЗ на уровне критических значений (см. таблицу 1).

Результаты проведенных исследований показали, что в титано-стальных образцах,

на границе соединения значительно меньше по сравнению с контрольными образцами без воздействия ультразвука (рис. 1, а, б). Так, среднее значение прочности на отрыв слоев в титано-стальных образцах, полученных сваркой взрывом с одновременным воздействием ультразвука, составляло порядка 505 МПа, в то время как в контрольных образцах значение прочности было зна-

Таблица 2 – Сравнительные данные результатов исследования микроструктуры и механических свойств соединения титан-сталь

№ обр.	Свариваемые материалы	Прочность на отрыв слоев, МПа	Удельная площадь оплавленного металла, мкм ² /мкм	Размах волны, мкм	Длина волны, мкм
1	BT1-0+Ст3	505	0,5	4,3	36,5
1к		315	1,7	25,2	154,7

к – контрольный образец

Рис. 2. Распределение элементов в участке оплавленного металла соединения титан-сталь, РЭМ:

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

чительно меньше – 315 МПа (табл. 2).

Металлографические исследования микроструктуры околосшовной зоны показали, что в контрольных образцах граница соединения слоев имеет слабо выраженный синусоидальный профиль с незначительными участками оплавленного металла без завихрений ($2a = 25,2$ мкм; $\lambda = 154,7$ мкм). В образцах, полученных сваркой взрывом с воздействием ультразвука, граница соединения имеет практически прямолинейный профиль ($2a = 4,3$ мкм; $\lambda = 36,5$ мкм) с значи-

тельно меньшим количеством оплавленного металла. Так, удельная площадь оплавленного металла в титано-стальных образцах, полученных сваркой взрывом с воздействием ультразвука, составляла $0,5$ мкм²/мкм, в то время как в контрольных образцах – $1,7$ мкм²/мкм (таблица 2).

Незначительное количество участков оплавленного металла как в контрольных, так и в исследуемых титано-стальных образцах связано с ограничением верхнего предела скорости точки контакта до 2200 м/с,

что привело к снижению степени локализации пластической деформации металла околошовной зоны и как следствие более равномерному распределению температуры в ней.

Исследование структуры и химического состава участков оплавленного металла методами растровой электронной микроскопии показало, что в титано-стальных образцах, полученных сваркой взрывом с воздействием ультразвука средний состав концентраций соответствует соединению FeTi (рис. 2, б, г), в то время как в контрольных образцах средний состав концентраций соответствует соединению Fe₂Ti (рис. 2, а, в).

Вывод

Экспериментально установлено, что введение дополнительной энергии ультразвука в процессе взрывного нагружения на низкочастотных режимах позволяет повысить качество соединения титан-сталь, проявляющееся в изменении структуры, увеличении прочности, существенном уменьшении параметров волн и количества оплавленного металла по сравнению со сваркой взрывом без применения ультразвука.

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. Рыкалин, Н. Н. Физические и химические проблемы соединения разнородных металлов / Н. Н. Рыкалин, М. Х. Шоршоров, Ю. Л. Красулин // Неорганические материалы. – 1965. – №1. – С. 29-36.
4. Дерибас, А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом / А. А. Дерибас. – Новосибирск: Наука, 1980. – 222 с.
5. Седых, В. С. Особенности сварки взрывом титана и его сплавов с конструкционными сталями / В. С. Седых, Ю. П. Трыков // Сварка взрывом / ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, ХМ-9. – М., 1965. – С. 42-49.
6. Кудинов, В. М. Сварка взрывом в металлургии / В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев // М.: Машиностроение, 1978. – 168 с.
7. Трыков, Ю. П. Титаностальные композиты и соединения: монография / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгул; ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – 344 с.
8. Кузьмин, С. В. Применение ультразвука при сварке взрывом / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Е. В. Кузьмин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 7 (73). – С. 3-10.
9. 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 металловедение. – 2017. – Т. 118, № 8. – С. 861-868.
10. 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. Королёв // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120, № 2. – С. 212-218.
11. Влияние ультразвука на сварку взрывом / В. В. Пай, Я. Л. Лукьянов, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин, Е. В. Кузьмин // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – Волгоград, 2017. – № 13 (208). – С. 35-38.
12. Влияние схемы распространения ультразвуковых колебаний на структуру и свойства свариваемых взрывом соединений / Е. В. Кузьмин, А. П. Пеев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. Н. Дородников // Сварка и диагностика. – 2016. – № 3. – С. 53-57.
13. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017660260 от 20 сентября 2017 г. РФ. Программное обеспечение по расчёту и оптимизации параметров сварки взрывом многослойных металлических композиционных материалов / С. В. Хаустов, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин, В. О. Харламов; ВолгГТУ. – 2017.
14. Кузьмин, В. И. Методики испытаний сваренных взрывом композиционных материалов: учеб. пособие / В. И. Кузьмин, С. В. Кузьмин, А. П. Пеев; ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – 66 с.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00545