УДК 620.18:620.17

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-4-251-13-18

В. Н. Арисова, А. Ф. Трудов, Л. М. Гуревич, В. О. Харламов, В. Ю. Назарова

**ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРУКТУРЫ В ЗОНЕ СОЕДИНЕНИЯ
БИМЕТАЛЛА МЕДЬ М3 + СТАЛЬ 30ХГСА
ПОСЛЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ОТЖИГА**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Приведены результаты исследований структуры в зоне соединения меди М3 со сталью 30ХГСА после сварки взрывом и последующего отжига при температуре 880 °С и времени выдержки 1 час. Показано формирование оплавок различной конфигурации, изучено распределение химических элементов и микротвердости по сечению биметалла.

Ключевые слова: медно-стальной биметалл, сварка взрывом, оплавы, отжиг, микроструктура, микротвердость, рентгеноспектральный анализ.

V. N. Arisova, A. F. Trudov L. M. Gurevich, V. O. Kharlamov, V. Yu. Nazarova

**STRUCTURE TRANSFORMATION IN THE ZONE OF BIMETAL
COPPER + STEEL 30CrMnSiA AFTER EXPLOSION
WELDING AND FOLLOWING ANNEALING**

Volgograd State Technical University

The results of studies of the structure in the joint zone of 30CrMnSiA steel with copper M3 after explosion welding and subsequent annealing at a temperature of 880 °C and a holding time of 1 hour are presented. The formation of alloys of various configurations is shown, the distribution of chemical elements and the distribution of hardness over the cross-section of the bimetal are studied.

Keywords: copper-steel bimetal, explosion welding, alloys, annealing, microstructure, microhardness, X-ray spectral analysis.

Применение слоистых композитов из разнородных металлов в узлах конструкций, испытывающих действие повышенных температур, силовых нагрузок и агрессивных сред, существенно повышает их эксплуатационные характеристики [1–3]. Областью рационального применения медно-стальных композитов может служить электрометаллургия – токоподводы электроплавильных агрегатов, сочетающие электро- и теплопроводность меди с прочностью стали, а также детали конструкционного назначения в машиностроении.

Технологические трудности при наплавке меди на сталь связаны с высоким родством меди к кислороду, низкой температурой плавления меди, значительным поглощением жидкой медью газов, различными величинами коэффициентов теплопроводности, линейного расширения и т. д. [4]. Вероятную микроструктуру зон соединения слоев композитов обычно оценивают исходя из диаграмм состояния сплавов. Диаграмму состояния медь - железо изучали многие исследователи. Жидкое железо неограниченно растворяет медь, но в твердом состоянии имеет место ограниченная раствори-

мость этих компонентов друг в друге [5, 6]. Наиболее подробная фазовая диаграмма системы Fe - Cu приведена в справочнике [7]. В системе Fe - Cu имеются три области первичной кристаллизации расплава, два перетектических превращения при 1477 и 1094 °С и одно эвтектическое превращение при температуре 857 °С. Растворимость железа в меди при 1025; 900; 800 и 700 °С составляет 2,5; 1,5; 0,9; 0,5 % (по массе) соответственно.

Для получения композиционных материалов (КМ) из разнородных материалов, таких как сталь-медь, целесообразно использовать технологию сварки взрывом [3, 8, 9]. Свойства сваренного взрывом композита в первую очередь определяются строением околошовной зоны.

Целью данной работы являлось исследование зоны соединения сваренного взрывом биметалла медь М3+сталь 30ХГСА после сварки взрывом и последующего отжига.

Материалы и методика проведения исследований

В качестве основы биметалла использовалась конструкционная сталь 30ХГСА толщиной 10 мм, на которую взрывом приваривалась медная пластина марки М3 толщиной 3 мм.

Отжиг сваренного взрывом композита проводился в печи СНОЛ-1.6,2.5,1/11-ИЗ при температуре 880 °С и времени выдержки 1 час.

Измерение микротвердости проводили на приборе ПМТ-3М. Металлографические исследования выполняли с помощью оптического металлографического микроскопа «Olympus BX61» с фиксацией микроструктур компонентов КМ с помощью цифровой камеры микроскопа DP12 при увеличениях 50–500.

Исследование распределения химических элементов в околошовной зоне композиционного материала проводили на растровом двухлучевом электронно-ионном микроскопе системы Versa3D DualBeam, который снабжен энергодисперсионным спектрометром INCA X-Max (Oxford Instruments).

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 приведены микроструктура зоны соединения исследуемого сваренного биметалла после СВ.

Рис. 1. Микроструктуры зоны соединения сваренного взрывом композита медь МЗ+сталь 30ХГСА. $\times 500$

Микроструктуры зоны соединения меди со сталью 30ХГСА имеет традиционный для сварки взрывом волновой характер. На гребнях и впадинах волн, рассматриваемых относительно основы из стали 30ХГСА, зачастую образуются участки с литой структурой. Образование расплавленного металла в зоне контакта свариваемых металлов связано с выделением

большого количества тепла вследствие значительной пластической деформации приграничных слоев и адиабатичности процесса. Перемешивание металлов основания (стали 30ХГСА) и плакировки (меди) в жидкой фазе приводит к образованию локальных участков нового сплава, отличного от обоих свариваемых металлов по структуре и химическому составу. В некоторых случаях интенсивная пластическая деформация приводит к отрыву стальных фрагментов разного размера и перемещению их в зону «вихрей» (рис. 2).

Рис. 2. Микроструктура «вихря» после сварки взрывом $\times 1200$ (съемка с использованием детектора обратно отраженных электронов BSE, темносерые участки – сталь)

Распределение химических элементов вблизи волнообразной границы соединения без локального оплавления представлено на рис. 3.

При металлографическом исследовании и при анализе спектрограммы распределения химических элементов между слоями меди и стали наблюдается четкая граница без видимого взаимодействия компонентов биметалла или образования значительных областей твердых растворов. Протяженность области на спектрограмме, в которой содержание меди изменяется от 100% до нуля не превосходит размера области возбуждения под действием электронного зонда

На рис. 4 приведена микроструктура и распределение химических элементов вблизи волнообразной границы соединения в зоне локального «вихря».

Рис. 3. Распределение химических элементов вблизи волнообразной границы соединения

Рис. 4. Распределение хим. состава в зоне соединения с оплавом

В этом случае на ширине «вихря» около 400 мкм имеет место переменная концентрация меди и стали, связанная с наличием фрагментов стали.

В табл. 1 представлены данные энергодисперсионного анализа химического состава в отдельных точках вихревой зоны, показанных на рис. 5.

Таблица 1

Химический состав в отдельных точках микроструктуры

Точка	Содержание элемента, ат. %				
	Si	Cr	Mn	Fe	Cu
1	1,04	—	—	13,8	86,12
2	1,03	1,02	0,99	95,75	1,20
3	—	—	—	31,20	68,80
4	0,86	0,60	0,57	54,38	43,60
5	1,19	0,80	0,86	95,86	1,29

В точке 1 на границе «вихря» с медью содержится 86 % меди и около 14 % железа. В точке 2, находящейся преимущественно на фрагменте стали в вихревой зоне состав практически соответствует стали 30ХГСА с небольшим количеством меди – до 1 %. В точке 3 образуется эвтектическая смесь твердых растворов типа $Fe_a(Cu)$ и $Cu(Fe_a)$ с содержанием железа 68,8 % и 31,2 % меди. Аналогичная смесь образовалась в точке 4 – содержание железа 54,4 %, меди –

43,6 %. В точке 5, расположенной на вершине волны содержатся все компоненты стали с небольшим количеством меди – около 1 %.

Рис. 5. Расположение точек определения локального химического состава энергодисперсионным анализом

Распределение микротвердости в биметалле после СВ приведено на рис. 6. Микротвердость меди составляет около 1 ГПа и находится практически на одном уровне по всей длине слоя. В стали 30ХГСА наблюдается развитие значительной структурно-механической неоднородности – зона максимального упрочнения (ЗМУ), вызванная интенсивной пластической деформацией: в приграничном слое микротвердость около 4,8 ГПа, а при удалении от зоны соединения снижается до 3,0–2,5 ГПа.

Рис. 6. Распределение микротвердости в зоне соединения КМ медь МЗ-сталь 30ХГСА после сварки взрывом

Микротвердость в вихревой зоне составила –1,08–1,31 ГПа, что близко к значениям микротвердости меди.

Для уменьшения неоднородности механи-

ческих свойств материалов в зоне соединения проводился отжиг при температуре 880 °С с выдержкой 1 час.

На рис. 7 представлен график распределе-

ния микротвердости после отжига, который свидетельствует об уменьшении градиента значений: в меди микротвердость снижается до 0,8 ГПа, а в стали до 2,0 ГПа. Микроструктура после отжига приведена на рис. 8.

Твердость вихревой зоны после отжига снижается до 0,8–1,5 ГПа.

Рис. 7. Микротвердость в зоне соединения биметалла после отжига

Рис. 8. Микроструктура зоны соединения биметалла после отжига. $\times 200$

Энергодисперсионный анализ материала в зоне соединения без вихревых участков не обнаружил участков взаимодействия компонентов после отжига (также как и после сварки).

Распределение химических элементов на линии определения состава и в характерных точках показано на рис. 9 и табл. 2.

Рис. 9. Изменение распределения химических элементов по сечению вихревого участка после отжига

Таблица 2

**Содержание химических элементов
в контрольных точках**

Точка	Содержание элемента, ат. %				
	Si	Cr	Mn	Fe	Cu
1	1,59	0,73	0,46	96,04	1,19
2	1,74	0,69	0,55	96,59	0,43
3	–	–	–	–	100
4	–	–	–	10,36	89,64
5	–	–	–	19,68	80,32

Интенсивного взаимодействия между медью и сталью не наблюдается. Однако присутствуют участки механической смеси с отдельными фрагментами стали.

Выводы

1. Сварка взрывом биметалла медь МЗ-сталь 30ХГСА обеспечивает формирование надежного соединения с характерным для сварки взрывом волновым профилем и образованием на гребнях волн вихревых зон. Дефектов кристаллизационного происхождения (усадочная пористость, кристаллизационные трещины) не обнаружено.

2. Интенсивная пластическая деформация, вызванная сваркой взрывом, приводит к появлению структурно-механической неоднородности – зон максимального упрочнения составляющих композита, которое наиболее выражено в стали 30ХГСА, и устраняется последующим отжигом.

3. Результаты энергодисперсионного анализа показали, что в зонах соединения с опла-

вами, как после сварки взрывом, так и после отжига, имеет место неоднородное распределение химических элементов: образуется эвтектическая смесь с включениями частиц стали разного размера. При отсутствии оплавов видимого взаимодействия между медью и сталью не наблюдается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конон, Ю. А. Сварка взрывом / Ю. А. Конон, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский. – М. : Машиностроение, 1987. – 216 с.
2. Кудинов, В. М. Сварка взрывом в металлургии / В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев. – М. : Металлургия, 1978. – 168 с.
3. Трыков, Ю. П. Диффузия в слоистых композитах : монография / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Н. Арисова ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – 403 с.
4. Рябов, В. Р. Сварка разнородных металлов и сплавов / В. Р. Рябов, Д. М. Рабкин, Р. С. Курочко, Л. Г. Стрижевская. – М. : Машиностроение, 1984. – 239 с, ил.
5. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди : справ. / под ред. Н. Х. Абрикосова. – М. : Наука, 1979. – 248 с.
6. Кубашевски, О. Диаграммы состояния систем на основе железа / О. Кубашевски. – М. : Металлургия. – 985. – 184 с.
7. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т. Т. 2 / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М. : Машиностроение, 1997. – 1024 с.
8. Гуревич, Л. М. Слоистые интерметаллидные композиты и покрытия : монография / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. И. Богданов. – Москва : Металлургия, 2016. – 346 с.
9. Гладковский, С. В. Прочность и разрушение металлического композита на основе меди М1 и стали 20 / С. В. Гладковский, Т. А. Трунина, Е. А. Коковихин, С. В. Смирнова, Д. И. Вичужанин // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук, т. 12, № 1 (2), 2010. – С. 321–325.