УДК 669-419:621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-2-249-12-19

*В. Н. Арисова, А. Ф. Трудов, Л. М. Гуревич, А. Е. Биршбаева, В. О. Харламов***ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ В СВАРЕННОМ ВЗРЫВОМ
БИМЕТАЛЛЕ СТАЛЬ 20 + НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ 50X15M2Ф
ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРЕВОВ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: mv@vstu.ru

Приведены результаты исследований структуры зоны соединения нержавеющей стали 50X15M2Ф с углеродистой сталью 20 после сварки взрывом и последующей термической обработки при температуре 1000 °С и временах выдержки 5–20 час. Показано формирование сплошной диффузионной прослойки в зоне соединения, толщина которой зависит от времени выдержки.

Ключевые слова: сталь, биметалл, сварка взрывом, термическая обработка, легирующие элементы, диффузия, микротвердость, рентгеноспектральный анализ.

*V. N. Arisova, A. F. Trudov, L. M. Gurevich, A. E. Birshbaeva, V. O. Kharlamov***FEATURES OF STRUCTURE FORMATION IN EXPLOSION WELDED
BIMETAL STEEL 20 + STAINLESS STEEL 50Cr15Mo2V
AFTER LONG HIGH-TEMPERATURE HEATING****Volgograd State Technical University**

The results of studies of the structure in the joint zone of stainless steel 50Cr15Mo2V with carbon steel 20 after explosion welding and subsequent heat treatment at a temperature of 1000 °C and holding times of 5-20 hours are presented. The formation of a continuous diffusion layer in the joint zone is shown, the thickness of which depends on the holding time.

Keywords: steel, bimetal, explosion welding, heat treatment, alloying elements, diffusion, microhardness, X-ray spectral analysis.

В области сварки взрывом (СВ) однородных и разнородных материалов накоплен значительный теоретический и экспериментальный материал [1–3]. Ряд вопросов, касающихся формирования структуры в околошовной зоне композиционных материалов из углеродистых и легированных сталей при термической обработке освещен в работах [4–10].

В [11] было показано, что нормализация полученной сваркой взрывом биметалла сталь 20+50X15M2Ф приводит к значительным изменениям в структуре зоны соединения: при температурах обработки до 800–900 °С происходит диффузия углерода из низкоуглеродистой стали 20 в сталь с большим содержанием углерода 50X15M2Ф. Это связано с наличием в стали 50X15M2Ф элементов с высоким сродством к углероду (Cr, Mo, V), которые снижают термодинамическую активность углерода. При температурах выше 900 °С, когда в сформировавшейся обезуглероженной зоне за счет диффузии повышается содержание карбидообразующих элементов, туда становится возможным приток углерода как из стали 20, так и из стали 50X15M2Ф. При нагреве биметалла до высоких температур (1000–

1100 °С) происходит образование на границе раздела сплошной карбидной прослойки.

В [12] с помощью микрорентгеноспектрального анализа было проанализировано содержание хрома в околошовной зоне и установлено, что образующиеся при сварке взрывом оплавы в биметалле сталь 20 + сталь 50X15M2Ф содержат примерно от 6 до 8 % хрома, количество которого уменьшается в направлении от легированной стали к низкоуглеродистой, при этом диффузия хрома в низкоуглеродистую сталь при нагревах до 1100 °С с выдержками 1 час не была обнаружена.

Данная работа является продолжением исследований изменения микроструктуры зоны соединения в сваренном взрывом биметалле сталь 20+сталь 50X15M2Ф при длительных выдержках в процессе высокотемпературных нагревов.

**Материалы и методика проведения
исследований**

В качестве основы биметалла использовалась низкоуглеродистая сталь 20 толщиной 20 мм, на которую с использованием энергии взрыва приваривали лист высоколегированной

нержавеющей стали мартенситного класса 50X15M2Ф толщиной 6 мм.

Исследования влияния режимов термической обработки на структуру и свойства биметалла проводили на вырезанных из заготовки после СВ образцах, которые подвергались нагреву в печи СНОЛ-1.6.2.51/11-ИЗ при температуре 1000 °С (времена выдержки 5, 10, 15 и 20 ч) и последующему охлаждению на воздухе.

Измерение микротвердости проводили на приборе ПМТ-3М. Металлографические исследования выполняли с помощью оптического металлографического микроскопа «Olympus BX61» с фиксацией микроструктур компонентов биметалла с помощью цифровой камеры микроскопа DP12 при увеличениях 50–500. Выявление структуры проводилось в два этапа: 1 – химическое травление в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты в течении 20–40 с

для выявления структуры стали 20; 2 – электролитическое травление в 10 %-ном растворе хромового ангидрида в течение 20–25 с при силе тока 2 А для выявления структуры стали 50X15M2Ф.

Исследование химического состава в околошовной зоне композиционного материала проводили на растровом двухлучевом электронно-ионном микроскопе системы Versa3D DualBeam, снабженном энергодисперсионным спектрометром INCA X-Max (Oxford Instruments) для определения химического состава в локальных точках.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 приведены микроструктуры зоны соединения исследуемого сваренного биметалла после термообработки при 1000 °С и временах выдержки 5, 10, 15 и 20 час.

Рис. 1. Микроструктуры зоны соединения биметалла сталь 20 + сталь 50X15M2Ф, термообработанного при температуре 1000 °С и различных временах выдержки: а – 5 ч; б – 10 ч; в – 15 ч; г – 20 ч

В отличие от микроструктуры после 1 ч термообработки при этой температуре, когда диффузионная зона формировалась в основном в местах оплавов зоны соединения [11, 12], увеличение времени выдержки в диапазоне 5–20 ч способствует формированию уже сплошной диффузионной белой зоны по всей границе соединения сталей.

Рис. 2. Изменение толщины белой диффузионной прослойки в биметалле в зависимости от времени термообработки при 1000 °C

На рис. 2 приведены данные по изменению толщины диффузионной прослойки, образовавшейся в зоне соединения стальных слоев (рис. 1 – белая зона).

Из полученных данных видно, что толщина прослойки вначале растет от 20 мкм (при 1 ч выдержки) до 138 мкм (при 10 ч выдержки), а потом при 15 и 20 ч значительно уменьшается до 40–42 мкм, что, видимо, связано с особенностями протекания диффузионных потоков углерода и легирующих элементов.

Анализ графиков измерения микротвердости (рис. 3) показывает, что в стали 50X15M2Ф твердость соответствует закаленному состоянию, формирующемуся при охлаждении на воздухе вследствие низких значений критической скорости закалки высоколегированной стали, но имеет место определенный градиент в пределах от 4,5 до 7 ГПа. Белая диффузионная зона при всех временах выдержки имеет примерно одинаковую микротвердость – около 3,5 ГПа.

Рис. 3. Изменение микротвердости по сечению биметалла при различных временах выдержки

На рис. 4–7 представлены данные энергодисперсионного анализа распределения легирующих элементов по толщине диффузионной

зоны и химического состава в отдельных точках микроструктуры.

Точка	Содержание элемента, ат.%				
	Fe	Mo	V	Cr	Mn
1	89,36	0,33	0,11	10,19	–
2	91,45	0,33	0,08	8,14	–
3	91,44	0,78	0,21	7,58	–
4	94,01	–	–	5,99	–
5	99,09	–	–	0,3	0,61

Рис. 4. Результаты энергодисперсионного анализа диффузионной зоны после нормализации при температуре 1000 °С в течение 5 ч

Точка	Содержание элемента, ат. %				
	Fe	Mo	V	Cr	Mn
1	87,80	0,43	0,04	11,74	—
2	91,55	0,3	0,05	8,11	—
3	91,87	0,39	0,07	7,67	—
4	92,27	0,34	0,07	7,32	—
5	99,47	—	—	0,12	0,41

Рис. 5. Результаты энергодисперсионного анализа диффузионной зоны после нормализации при температуре 1000 °С в течение 10 ч

Точка	Содержание элемента, ат.%			
	Fe	Mo	V	Cr
1	88,36	0,37	0,08	11,19
2	89,86	0,45	0,05	9,64
3	94,64	0,39	0,02	4,94
4	95,99	0,39	0,01	3,60
5	97,77	—	—	2,23

Рис. 6. Результаты энергодисперсионного анализа диффузионной зоны после нормализации при температуре 1000 °С в течение 15 ч

Точка	Содержание элемента, ат. %			
	Fe	Mo	V	Cr
1	88,25	0,40	0,05	11,30
2	90,02	0,39	0,07	9,52
3	91,56	0,36	0,05	8,02
4	92,80	0,29	0,04	6,87
5	97,65	–	–	2,35
6	99,42	–	–	0,58

Рис. 7. Результаты энергодисперсионного анализа диффузионной зоны после нормализации при температуре 1000 °С в течение 20 ч

При временах выдержки 5 и 10 ч на всем протяжении зоны обезуглероживания наблюдается постепенное снижение содержания хрома. Учитывая высокую подвижность атомов углерода при температуре 1000 °С, изменение толщины обезуглероженной зоны должно, в пер-

вую очередь, определяться диффузией карбидообразующих элементов, изменяющих химический потенциал углерода. Анализ результатов энергодисперсионного анализа показывает, что в светлой диффузионной зоне содержание хрома варьируется от 9 до 2 ат.%. Сложный ха-

раактер изменения толщины светлой обезуглероженной зоны можно объяснить протеканием трех параллельных процессов диффузии карбидообразующих элементов:

– диффузия хрома (и других карбидообразующих элементов) из примыкающих к поверхности соединения тонких слоев стали 50X15M2Ф в сталь 20, приводящая, за счет снижения содержания хрома в стали 50X15M2Ф и одновременного повышения хрома в стали 20, к появлению приграничных зон с требуемым содержанием хрома от 9 до 2 ат.%. Учитывая небольшую протяженность транспортных путей и значительный градиент содержания карбидообразующих элементов, достигающий первоначально только для хрома 15 масс.%, этот процесс является преобладающим при относительно небольших временах термической обработки;

– диффузия хрома (и других карбидообразующих элементов) в стали 50X15M2Ф из глубинных слоев к сформировавшейся приграничной зоне с содержанием хрома не более 9 ат.%, приводящая к некоторому восстановлению содержания хрома;

– диффузия хрома (и других карбидообразующих элементов) в стали 20 из сформировавшейся приграничной зоны с повышенным содержанием хрома в более глубокие слои.

Для двух последних диффузионных процессов характерны более низкие градиенты концентрации карбидообразующих элементов и значительная протяженность транспортных путей, что приводит к их заметному вкладу в трансформацию микроструктуры околошовной зоны биметалла только при высокой длительности термической обработки.

Увеличение времени выдержки до 15–20 ч вызывает коагуляцию карбидов и исчезновение их строчечного расположения в стали 50X15M2Ф, сформировавшееся при прокатке стали.

Выводы

1. Показано, что увеличение времени выдержки до 5–20 часов при высокотемпературной нормализации (температура 1000 °С) биметалла сталь 50X15M2Ф+сталь 20 приводит к формированию сплошной диффузионной обезуглероженной зоны. Установлено что для сформировавшейся диффузионной обезуглероженной зоны характерно содержание хрома от 2 до 9 ат.%.
2. При временах выдержки до 10 часов происходит рост толщины диффузионной зоны до 138 мкм, а при увеличении времени выдержки

до 15–20 часов идет ее уменьшение до 40 мкм. Сложный характер изменения толщины светлой обезуглероженной зоны объясняется разной интенсивностью протекания трех параллельных процессов диффузии карбидообразующих элементов.

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. I. A. Bataev, A. A. Bataev, V. I. Mali, V. G. Burov, E. A. Prikhod'ko. Formation and structure of vortex zones arising upon explosion welding of carbon steels. The Physics of Metals and Metallography. Vol. 113. 2012 – P. 233–240.
5. Bulent Kurt. The interface morphology of diffusion bonded dissimilar stainless steel and medium carbon steel couples. Journal of Materials Processing Technology, Vol.190, 2017. – P. 138–141.
6. Hong Ma, Guoliang Qin, Peihao Geng, Fei Li, Banglong Fu, Xiangmeng Meng Microstructure characterization and properties of carbon steel to stainless steel dissimilar metal joint made by explosion welding. Materials and Design, Vol. 86, 2015. – P. 587–597
7. Bulent Kurta, Adnan Çalikb. Interface structure of diffusion bonded stainless steel and medium carbon steel couple. Materials characterization. Vol.60, 2009. – P.1035 – 1040.
8. Трыков, Ю. П. Неоднородность структуры и свойств биметаллических материалов, полученных сваркой взрывом из углеродистых сталей / Ю. П. Трыков, И. Б. Степанищев, А. Ф. Трудов, В. Н. Арисова // Перспективные материалы, 2003, № 2. – С. 79–89.
9. Трыков, Ю. П. Структура и микромеханические свойства соединений из углеродистых сталей, полученных сваркой взрывом / Ю. П. Трыков, А. Ф. Трудов, И. Б. Степанищев, В. Н. Арисова // Технология металлов, 2003, № 3. – С. 14–20.
10. Трыков, Ю. П. Структурообразование зоны соединения при сварке взрывом биметаллов из углеродистых сталей / Ю. П. Трыков, И. Б. Степанищев, А. Ф. Трудов // Изв. вуз. Черная металлургия, 2003, № 5. – С. 64.
11. Трудов, А. Ф. Трансформация структуры в сварном взрывом биметалле сталь 20+50X15M2Ф после термической обработки / А. Ф. Трудов, В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. Е. Биршбаева // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2(237) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 7–12.
12. Трудов, А. Ф. Исследование диффузионных процессов в биметалле сталь 20 – нержавеющей сталь 50X15M2Ф после сварки взрывом и термообработки / А. Ф. Трудов, В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. Е. Биршбаева, В. О. Харламов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (239) / ВолгГТУ.— Волгоград, 2020. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 18–22.
13. Бокштейн, С. З. Диффузия в металлах / С. З. Бокштейн. – М. : Металлургия, 1978. – 250 с.