А. Ф. Трудов, В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. Е. Биршбаева, В. О. Харламов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
В БИМЕТАЛЛЕ СТАЛЬ 20–НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ 50X15M2Ф
ПОСЛЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ И ТЕРМООБРАБОТКИ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Приведены результаты изучения диффузии легирующих элементов нержавеющей стали 50X15M2Ф в двухслойном композиционном материале на границе с углеродистой сталью 20 после сварки взрывом и последующей термической обработки. Установлено отсутствие значительной диффузии хрома из легированной в низкоуглеродистую сталь.

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

A. F. Trudov, V. N. Arisova, L. M. Gurevich, A. E. Birshbaeva, V. O. Kharlamov

**STUDY OF DIFFUSION PROCESSES IN BIMETAL STEEL 20 - STAINLESS
STEEL 50Cr15Mo2V AFTER EXPLOSION WELDING AND THERMAL TREATMENT**

Volgograd State Technical University

The results of studying the diffusion of alloying elements of stainless steel 50Cr15Mo2V of a two-layer composite material at the interface with carbon steel 20 after explosion welding and subsequent heat treatment are presented. The absence of significant diffusion of chromium from alloyed to low-carbon steel has been established.

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

При создании слоистых металлических композиционных материалов (СМК) из углеродистых и легированных сталей с использованием технологии, включающей сварку взрывом и последующую термическую обработку, важным является протекание диффузионных процессов в зоне соединения сталей после сварки взрывом и последующее перераспределение химических элементов после термической обработки [1–4].

В [5] было показано, что нормализация полученного 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, что связано с наличием в ней элементов с большим сродством к углероду (Cr, Mo, V), которые снижают термодинамическую активность углерода; при температурах более 900 °С, когда в обезуглероженной зоне повышается за счет диффузии содержание карбидообразующих элементов, становится возможным приток туда 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.

Целью данной работы явилось исследование диффузии легирующих элементов стали 50X15M2Ф в зоне соединения со сталью 20 после сварки взрывом и последующей термической обработки при разных температурах.

Материалы и методика проведения исследований

Основой композиционного стального материала являлась низкоуглеродистая сталь 20 (толщиной 20 мм), на которую с помощью сварки взрывом приваривалась высоколегированная нержавеющая мартенситная сталь 50X15M2Ф (толщиной 6 мм).

Термическую обработку осуществляли в печи СНОЛ-1.6.2.51/11-ИЗ.

Исследование процессов диффузии легирующих элементов стали 50X15M2Ф в околошовной зоне композиционного материала проводили на растровом двухлучевом электронно-ионном микроскопе системы Versa3D DualBeam, который снабжен энергодисперсионным спектрометром INCA X-Max (Oxford Instruments) для определения химического состава.

Результаты исследований и их обсуждение

Поскольку основным легирующим элементом в стали 50X15M2Ф является хром, то наибольшее внимание было уделено изменению его содержания в зоне соединения и прилегающих к ней участках биметалла.

На рис. 1 приведены структуры зоны соединения после сварки взрывом и последующих нагревов до температур 800, 900, 950, 1000, 1050 и 1100 °С с выдержкой 1 час и последующим охлаждением на воздухе, а также показано распределение основных химических элементов по сечению биметалла. Кроме общего распределения химических элементов в зоне соединения определялось их содержание в пяти характеристических точках: 1 – в стали 50X15M2Ф вблизи оплава; 2 – на границе сталь 50X15M2Ф – оплав; 3 – в центре оплава; 4 – на границе сталь 20 – оплав; 5 – в стали 50X15M2Ф вблизи оплава. В качестве примера показано расположение анализируемых точек в зоне соединения после выдержки при 1050 °С (рис. 2).

СВ+900 °С

СВ+950 °С

СВ+1000 °С

СВ+1050 °С

Рис. 1. Структуры зон соединения и распределения основных элементов в биметалле сталь 20+ 50X15M2Ф после сварки взрывом и последующей термообработки

Рис. 2. Схема определения химического состава в зоне соединения и прилегающих участках сталей после выдержки 1 час при температуре 1050 °C

Структура после сварки взрывом имеет традиционный волновой характер с некоторым содержанием оплавов (рис. 1). Если содержание хрома в легированной стали 15 %, то в оплаве его ~ 6 %, что свидетельствует об участии в образовании оплавов поверхностных слоев углеродистой и легированной сталей. На границе между оплавом и сталью 20 хром отсутствует.

В результате нагрева и выдержки при 800 °C в верхней части оплава содержание хрома ~ 10 %, а в нижней – 5,45 %, на границе со сталью 20 – 4,85 %, в самой стали 20 хром отсутствует. После выдержки 900 °C содержание хрома в оплаве уменьшается и в нижней части составляет – 5 %, а в прилегающем к оплаву стали 20 – 0,15 %. Нагрев до 950 °C существенного изменения в распределение хрома не внес – его количество в оплаве уменьшается и на границе со сталью 20 составляет 0,83 %.

После выдержки при 1000 °C в верхней части оплава ~ 12 % хрома, в средней части ~ 8,5 %

и в нижней 6 %. В стали 20 ниже оплава – 0,35 % хрома. После нагрева до 1050 °C в верхней части оплава ~ 8,0 % хрома, а в нижней уменьшается до 0,4 %. Выдержка при 1100 °C также не вносит существенных изменений в распределение хрома: в верхней части оплава его содержится ~ 7,5 %, в средней ~ 7,1 %, в нижней – 0,75 % и примыкающей к оплаву стали 20 его содержание не более 0,2 %.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что нагревы биметалла до температур вплоть до 1100 °C с выдержками в течение 1 ч не приводят к значительной диффузии хрома из легированной стали в низкоуглеродистую, увеличение содержания хром наблюдалось только в оплавах. Низкая скорость диффузии хрома из оплавов в сталь 20 вероятно связана с относительно небольшим градиентом концентрации хрома между ними.

В работе [5] был показан сложный процесс трансформации структуры вблизи оплава: первоначально формирование участков обезуглероживания в стали 20 на границе с легированной сталью 50X15M2Ф при температурах отжига до 800 °C, и последующее уменьшение их толщины при отжигах до 900 °C и полное исчезновение при температурах отжига более 1000 °C. Результаты энергодисперсионного анализа показывает, что для объяснения такой трансформации трудно использовать механизм, предложенный в работе [6], в соответствии с которым в биметалле сталь Ст3-сталь 12X18Н9Т имеют место два встречных диффузионных потока: диффузия углерода из Ст3 и легирующих элементов (хрома и никеля) из стали 12X18Н9Т, накопление при температурах выше 900 °C в приграничных слоях стали Ст3 продифун-

дировавшего хрома объясняет приток в эту зону углерода. В нашем случае практически не обнаружено повышение содержание хрома в приграничных слоях стали 20, поэтому исчезновение зон обезуглероживания связано с возросшей скоростью миграции углерода в них из глубинных слоев стали 20 под действием градиента концентрации и блокированием оттока углерода в оплавы с уже сформировавшимся в них повышенным содержанием карбидов.

Выводы

1. Образующиеся при сварке взрывом оплавы в биметалле сталь 20+ сталь 50X15M2Ф вследствие интенсивной пластической деформации приграничных слоев и адиабатичности процесса содержат примерно среднее содержание хрома от 6 до 8 %, и его количество уменьшается в направлении от легированной стали к низкоуглеродистой.

2. Диффузии хрома в низкоуглеродистую сталь при нагревах до 1100 °С с выдержками 1 час не обнаружено. Присутствующие в зоне

соединения оплавы выполняют роль барьеров на пути перемещения атомов хрома.

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. Свойства и работоспособность слоистых композитов : монография / Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгун ; ВолгГТУ. – Волгоград, 1999. – 190 с.
4. Гельман А. С. Плакирование стали взрывом / А. С. Гельман. – М. : Машиностроение, 1978. – 191 с.
5. Трудов, А. Ф. Трансформация структуры в сваренном 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.
6. Шляхова, Г. В. Исследование структуры биметалла конструкционная углеродистая сталь–нержавеющая сталь / Г. В. Шляхова, С. А. Баранникова, А. В. Бочкарева, Ю. В. Ли, Л. Б. Зуев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2018. – № 61 (4). – С. 300–305.