СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 669-419:621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-2-237-7-12

А. Ф. Трудов, В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. Е. Биришбаева

ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРУКТУРЫ В СВАРЕННОМ ВЗРЫВОМ БИМЕТАЛЛЕ СТАЛЬ 20+СТАЛЬ 50X15M2Ф ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Приведены результаты исследований изменения структуры в двухслойном сваренным взрывом композиционном материале углеродистая сталь 20 + легированная нержавеющая сталь 50X15M2Ф после нормализации при температурах 800 – 1100 °С и времени выдержки 1 час. Установлено, что при 800 °С наблюдается «обратная» диффузия углерода – из стали с меньшей его концентраций в сталь 50X15M2Ф с образованием обезуглероженного слоя в стали 20. При дальнейшем повышении температуры атомы углерода диффундируют в сталь 20 вместе с атомами хрома, изменяя структуру околосшовной зоны (увеличение объемного содержания перлита и формирование структуры видманштеттового феррита в стали 20 и образование мартенсита в стали 50X15M2Ф). Рассмотрены особенности изменения структуры в локальных оплавах, сформировавшихся в процессе сварки взрывом.

Ключевые слова: сваренный взрывом биметалл, сталь, термическая обработка, диффузия, структура.

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

STRUCTURE TRANSFORMATION IN THE EXPLOSION WELDED BIMETAL STEEL 20 + STEEL 50Cr15Mo2V AFTER THERMAL TREATMENT

Volgograd State Technical University

The results of studies of structural changes in a two-layer explosion-welded composite material are presented: carbon steel 20 + alloyed stainless steel 50Cr15Mo2V after normalization at temperatures of 800 - 1100 °C and holding time 1 hour. It was found that at 800 °C there is a “reverse” diffusion of carbon — from its lower to higher concentrations and the formation of a decarburized layer in steel 20, and with increasing temperature, carbon diffuses back into steel 20 together with chromium, changing the structure of the heat-affected zone: with an increase in the amount of perlite, the formation of the structure of Widmannstätten and carbide colonies in steel 20 and the formation of martensite in steel 50Cr15Mo2V. The features of structural changes in the alloys that were formed after explosion welding are considered.

Keywords: explosion-welded bimetal, steel, thermal treatment, diffusion, structure.

Получение сваркой взрывом (СВ) соединений со стабильными свойствами и оптимальной структурой осложняется проявлением нестационарности процесса СВ, способствующей формированию в зоне соединения различных видов дефектов и неоднородностей, причинами возникновения которых могут быть: масштабный фактор, различная степень пластической деформации вдоль волнообразной границы раздела металлов, структурная неоднородность поверхностных слоев пластин и др. Особую сложность представляет обеспечение стабильности механических характеристик (σ_b , σ_t , δ , ψ) и характера разрушения композиционных со-

единений из металлов и сплавов, имеющих узкий диапазон оптимальных режимов сварки. Реализуемая при сварке взрывом крайне неоднородная по толщине соединяемых элементов пластическая деформация приводит к анизотропии свойств слоистых материалов. Образование химической, физической и структурной неоднородности в свариваемых взрывом соединениях оказывает значительное влияние на конструкционную прочность, деформационную способность, работу разрушения и другие характеристики в процессе их технологических переделов и последующей эксплуатации соответствующих конструкций [1–3].

Несмотря на то, что в области СВ однородных и разнородных материалов накоплен значительный теоретический и экспериментальный материал [1–13], ряд вопросов, касающихся трансформирования структуры в околосварочной зоне композиционных материалов из углеродистых и легированных сталей при термической обработке, изучен недостаточно.

Формирование соединений металлов заканчивается на стадии взаимной диффузии химических элементов. Во многих случаях биметаллы подвергаются дополнительной термической обработке, что вызывает дальнейшее диффузионное перераспределение атомов химических элементов соединяемых металлов. Для управления процессом получения биметаллов необходимо разработать методики определения направленности диффузии атомов в биметаллических соединениях и ширины диффузионной зоны в биметаллических соединениях в зависимости от химического состава соединяемых сталей.

В предыдущих работах авторов данной статьи [14–16], а также в исследованиях других авторов, например [17–18], показано, что в зоне соединения разнородных сталей происходят сложные диффузионные процессы, связанные с перемещением углерода и легирующих элементов. Так, в работе [17] методами атомно-силовой микроскопии и оптической металлографии установлено, что в биметалле сталь Ст3-сталь 12Х18Н9Т имеют место два встречных диффузионных потока: диффузия углерода из Ст3 и легирующих элементов (хрома и никеля) из стали 12Х18Н9Т. Казалось бы парадоксальной диффузия элемента (углерода) из стали с меньшей концентрацией в сталь с большей

концентрацией объясняется тем, что она определяется не разностью концентраций в сталях, а градиентом термодинамической активности углерода, которая резко снижается в присутствии легирующих карбидообразующих элементов.

Целью данной работы явилось детальное изучение диффузионных процессов в биметалле, состоящем из углеродистой (сталь 20) и легированной стали (50Х15М2Ф), при термической обработке при разных температурах, и их влияние на формирование структуры зоны соединения с использованием методов количественной металлографии.

Материалы и методика проведения исследований

В данной работе проводилось изучение трансформации структуры в полученном сваркой взрывом (СВ) биметалле сталь 20 + 50Х15М2Ф после нормализации при температурах 800–1100 °С в течение 1 часа. В качестве основы толщиной 20 мм использовалась низкоуглеродистая сталь 20, на которую взрывом приваривалась высоколегированная нержавеющая мартенситная сталь 50Х15М2Ф толщиной 6 мм.

Исследования влияния режимов термической обработки на структуру и свойства биметалла проводились на вырезанных из заготовки после СВ образцах, которые подвергались нагреву в печи СНОЛ-1.6.2.51/11-ИЗ.

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 микро-

Рис. 1. К определению количества перлитной составляющей стали 20 на оптическом металлографическом микроскопе «Olympus BX61»

скопа DP12 при увеличениях 50–500. Выявление структуры проводилось в два этапа: 1-й – химическое травление в спиртовом растворе азотной кислоты ($4 \text{ см}^3 \text{ HNO}_3$, 96 см^3 этилового спирта $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) в течении 20–40 сек для выявления структуры стали 20; 2-й – электролитическое травление в 10 % – растворе хромового ангидрида в течение 20–25 сек при силе тока 2 А для выявления структуры стали 50X15M2Ф.

Объемную долю перлита в околосшовной зоне стали 20 определяли количественным металлографическим анализом на оптическом металлографическом микроскопе «Olympus BX61» с использованием лицензионного программного обеспечения фирмы AnalySiS GmbH:

производилось окрашивание перлитной составляющей (рис. 1) с последующим определением количества перлита по окрашиваемой площади.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2 приведены микроструктуры зоны соединения исследуемого биметалла после СВ и термической обработки при различных режимах. Исходная структура после сварки взрывом представляет собой: в стали 20 – феррит с равномерно-распределенными зернами перлита, количество которого составляет 21 %; в структуре нержавеющей стали присутствуют мелкие равномерно распределенные включения карби-

Рис. 2. Микроструктуры околосшовной зоны биметалла сталь 20+сталь 50X15M2Ф после СВ и нормализации при разных температурах

дов на ферритном поле, что соответствует ото-
 жженному состоянию. При большом увеличении ($\times 500$) в зоне соединения выявлены не-
 дифференцируемые при травлении оплавы. Распре-
 деление микротвердости по зоне соединения

(рис. 3) соответствует металлографически выяв-
 ляемой структуре: у стали 50X15M2Ф ~ 3–
 4 ГПа, у стали 20 ~ 2 ГПа, а твердость оплава до-
 стигает 5–5,5 ГПа, что соответствует бесструк-
 турному высоколегированному мартенситу.

Рис. 3. Графики распределения микротвердости по зоне соединения биметалла сталь 20+сталь 50X15M2Ф после СВ и нормализации при разных температурах

Нагрев и последующая выдержке при 800 °С в течение 1 ч привели к существенным изменениям в структуре: в стали 20 образовался обезуглероженный слой толщиной до 500 мкм, содержание перлита в котором не превышает 5 %, что свидетельствует о диффузии углерода из стали 20 в сталь 50X15M2Ф. При этом несколько изменяется распределение твердости (рис. 3): твердость стали 50XM2Ф снижается до 1,5–2 ГПа, а оплавов – до 2,5 ГПа, при этом структура оплавов дифференцируется при травлении с выявлением мелких карбидных частиц.

Нагрев до 900 °С привел к уменьшению толщины обезуглероженной зоны в стали 20 до 300 мкм и увеличению объемной доли перлита до 12 %. Твердость околошовной зоны в коррозионностойкой стали составила 3–3,5 ГПа, а оплавов достигала 4,0–4,5 ГПа. Термическая обработка биметалла при 950 °С приводила к дальнейшему уменьшению ширины обезуглероженной зоны, то есть к перемещению углерода в стали 20 в направлении зоны соединения. При температурах 1000, 1050 и 1100 °С обезуглероженный слой в стали 20 уже не наблюдается.

Приведенная на рис. 4 структура зоны соединения после термической обработки при 950 °С свидетельствует о наличии в оплаве участков бесструктурного мартенсита с твердостью до 4,5 ГПа и участков продуктов распада мартенсита с твердостью ~ 2 ГПа.

Рис. 4. Микроструктура зоны соединения после нагрева 950 °С ×200

Нормализация при высоких температурах (более 1000 °С) приводит к повышению твердости легированной стали до 5 ГПа, связанному с образованием мартенсита в высоколегированной зоне при охлаждении на воздухе, и существенное изменение перлитно-ферритной

структуры стали 20 в структуру видманштеттова феррита. Выдержка при температуре 1100 °С вызывает образование на границе соединения сталей сплошной карбидной прослойки, вызванное, вероятно, диффузией легирующих элементов (рис. 2).

Выводы

1. Установлено, 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 (Сг, Мо, 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.

2. Нагрев биметалла до высоких температур 1000–1100 °С приводит к образованию на границе раздела сплошной карбидной прослойки и существенному изменению перлитно-ферритной структуры стали 20 в структуру видманштеттова феррита.

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. Трыков, Ю. П. Свойства сваренных взрывом соединений из углеродистых сталей при пластической деформации / Ю. П. Трыков, А. Ф. Трудов, И. Б. Степанищев // Изв. вуз. Черная металлургия, 2002. – № 6. – С. 52.
5. Трыков, Ю. П. Неоднородность свариваемых взрывом соединений из углеродистых сталей и пути ее направленного регулирования / Ю. П. Трыков, А. Ф. Трудов, И. Б. Степанищев // Изв. вуз. Черная металлургия, 2002. – № 7. – С. 76–77.
6. Степанищев, И. Б. Тонкая структура композиционного соединения из углеродистых сталей / И. Б. Степанищев, Ю. П. Трыков, В. Н. Арисова // Изв. вуз. Черная металлургия, 2002. – № 11. – С. 75.
7. Трыков, Ю. П. О повышении стабильности свойств слоистых композитов / Ю. П. Трыков, А. Ф. Трудов, И. Б. Степанищев // Изв. вуз. Черная металлургия, 2002. – № 12. – С. 62.

8. *Трыков, Ю. П.* Структура и свойства сваренных взрывом соединений из углеродистых сталей / Ю. П. Трыков, А. Ф. Трудов, И. Б. Степанищев // *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2002. – № 12. – С. 26–30.

9. *Трыков, Ю. П.* Структура и свойства биметалла сталь 50X15M2Ф + сталь 09Г2С, полученного сваркой взрывом / Ю. П. Трыков, А. Ф. Трудов, И. Б. Степанищев // *Изв. вуз. Черная металлургия*, 2003. – № 1. – С. 76–77.

10. *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.

11. *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.

12. *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.

13. *Трыков, Ю. П.* Влияние энергетических условий сварки взрывом биметаллических соединений из углеродистых сталей на механическую неоднородность зоны соединения / Ю. П. Трыков, А. Ф. Трудов, И. Б. Степанищев // *Изв. вуз. Черная металлургия*, 2003. – № 7. – С. 78.

14. *Трыков, Ю. П.* Исследование влияния нагревов на формирование тонкой структуры биметалла углеродистая сталь – нержавеющая сталь / Ю. П. Трыков, А. Ф. Трудов, В. Н. Арисова // *Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(96) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2012. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 67–61.

15. *Трудов, А. Ф.* Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и свойства сваренного взрывом биметалла 16Г2С+50X15M2Ф / А. Ф. Трудов, В. Н. Арисова // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4(96)*. – Волгоград, 2019. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 23–27.

16. *Арисова, В. Н.* Структура и свойства биметаллоа из сталей 50X15M2Ф и 09Г2С после технологических переделов / В. Н. Арисова, Ю. П. Трыков, А. Ф. Трудов, И. А. Пономарева // *Упрочняющие технологии и покрытия*, № 12. – 2006. – С. 43–46.

17. *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.

18. *Гельман, А. С.* Плакирование стали взрывом / А. С. Гельман. – М. : Машиностроение, 1978. – 191 с.