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

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ В ЗОНЕ СОЕДИНЕНИЯ
МЕДНО-СТАЛЬНОГО КОМПОЗИТА МЕДЬ М3 + СТАЛЬ 30ХГСА
ПОСЛЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ И ТЕРМИЧЕСКОГО УЛУЧШЕНИЯ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Приведены результаты оптических и электронно-микроскопических металлографических исследований и энергодисперсионного анализа структуры и состава в зоне соединения меди М3 со сталью 30ХГСА после сварки взрывом, последующей закалки от температуры 880 °С и высокого отпуска при температуре 520 °С. Показано изменение распределения твердости и химических элементов по сечению биметалла, формирование мартенсита в оплавах после закалки и его распад в процессе высокого отпуска.

Ключевые слова: биметалл медь-сталь, сварка взрывом, закалка, высокий отпуск, микроструктура, микротвердость, энергодисперсионный анализ.

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

**FEATURES OF STRUCTURE FORMATION IN THE JOINING ZONE
OF COPPER-STEEL COMPOSITE COPPER M3 + STEEL 30CrMnSiA
AFTER EXPLOSION WELDING AND THERMAL IMPROVEMENT**

Volgograd State Technical University

The results of optical and electron microscopic metallographic studies and energy-dispersive analysis of the structure and composition in the zone of connection of copper M3 with steel 30 CrMnSiA after explosion welding, subsequent quenching from a temperature of 880 °C and high tempering at a temperature of 520 °C are presented. The change in the distribution of hardness and chemical elements over the cross section of the bimetal, the formation of martensite in melts after quenching and its decomposition during high tempering are shown.

Keywords: bimetal copper-steel, explosion welding, hardening, high tempering, microstructure, microhardness, X-ray spectral analysis.

В [1] было показано, что сварка взрывом [2–6] биметалла медь МЗ-сталь 30ХГСА обеспечивает формирование надежного соединения с характерным для сварки взрывом (СВ) волновым профилем и образованием на гребнях волн вихревых зон без дефектов кристаллизационного происхождения (усадочная пористость, кристаллизационные трещины). Интенсивная пластическая деформация в процессе сварки взрывом приводит к появлению структурно-механической неоднородности – зон максимального упрочнения составляющих композита, которое наиболее выражено в стали 30ХГСА. Эта неоднородность может устраняться последующей термической обработкой. По результатам энергодисперсионного анализа было установлено, что в зонах соединения с оплавом как после сварки взрывом, так и последующего отжига, наблюдается неоднородное распределение химических элементов: образуется эвтектическая смесь с включениями стальных фрагментов различного размера, а в участках без оплавов при оптических и электронно-микроскопических металлографических исследованиях взаимодействие между медью и сталью не обнаруживалось.

Традиционно для получения комплекса высоких пластических и прочностных свойств монometаллических деталей из среднеуглеродистых сталей используют термическое улучшение (закалка+высокий отпуск). Однако к выбору такого вида термической обработки для деталей из слоистых металлических композитов надо прибегать только если есть уверенность, что она не приведет к формированию в процессе диффузии структурных составляющих, которые могут необратимо ухудшить конструкционную прочность.

Данная работа является продолжением исследований по изучению формирования структуры сваренного взрывом медно-стального биметалла после закалки и высокого отпуска. Варьирование параметров этих операций термической обработки позволяет получать различные свойства стали и использовать медно-стальной композит для более широкого спектра конструкций, испытывающих действие повышенных силовых нагрузок.

Материалы и методика проведения исследований

При сварке взрывом биметалла в качестве основы использовалась конструкционная сталь 30ХГСА ГОСТ 4543-2016 толщиной 10 мм, на

которую приваривалась медная пластина марки МЗ ГОСТ 495–92 толщиной 3 мм.

Нагрев под закалку и последующий отпуск проводился в печи СНОЛ-1,6,2,5.1/11-ИЗ: закалка от температуры 880 °С в масле, а высокий отпуск осуществлялся при температуре 520 °С.

Металлографические исследования выполняли с помощью оптического металлографического микроскопа «Olympus BX61» с фиксацией микроструктур компонентов КМ с помощью цифровой камеры микроскопа DP12 при увеличениях $\times 50$ – $\times 500$ и растровом двухлучевом электронно-ионном микроскопе системы Versa3D DualBeam. Химический состав в отдельных участках и распределение химических элементов в околошовной зоне композиционного материала проводили энергодисперсионным рентгеноспектральным анализом с помощью спектрометра INCA X-Max (Oxford Instruments), установленном на выше указанном растровом электронном микроскопе Versa3D DualBeam.

Измерение микротвердости проводили на приборе ПМТ-3М при нагрузке 1 Н на индентор Виккерса.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1, а показан волновой характер с вихревыми участками границы соединения исследуемого биметалла после СВ (рис. 1, а) и распределение микротвердости по сечению околошовных зон (рис. 1, б). Микротвердость меди (около 1 ГПа) практически не меняется по мере удаления от границы соединения, в стали 30ХГСА наблюдается развитие значительной структурно-механической неоднородности; вызванная интенсивной пластической деформацией зона максимального упрочнения (ЗМУ) вблизи границы соединения с твердостью около 4,8 ГПа, и снижение твердости до 3,0–2,5 ГПа при удалении от зоны соединения.

Как было показано в [1] во многих участках границы соединения интенсивная пластическая деформация приводила к отрыву стальных фрагментов разного размера и перемещению их в зону «вихрей» (рис. 2).

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

На рис. 3 показано изменение микроструктуры зоны соединения сваренного взрывом биметалла после закалки от температуры 880 °С в масле.

Рис. 1. Микроструктуры зоны соединения сваренного взрывом композита медь МЗ+сталь 30ХГСА (а) и распределение микротвердости по сечению околошовной зоны (б)

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

а $\times 500$

б $\times 1200$

в $\times 10000$

Рис. 3. Микроструктура зоны соединения медно-стального биметалла после закалки (а), съемка с использованием детектора обратно отраженных электронов BSE (б и в): темносерые участки – мартенсит в стальных фрагментах в «вихревой» зоне

Сталь 30ХГСА претерпела мартенситное превращение, как в основе (рис. 3, а), так и в участках стальных фрагментов в «вихревой» зоне (рис. 3, б и в). Измерение распределения микротвердости по сечению биметалла после закалки показало (рис. 4) увеличение твердости стали до 5–6 ГПа при практически постоянной твердости медной составляющей 0,9–1 ГПа. Наблюдается некоторое снижение твердости медного слоя только на расстоянии до 1 мм от границы раздела.

Рис. 4. Распределение микротвердости по сечению сваренного взрывом биметалла МЗ-30ХГСА после закалки

После закалки (рис. 5) были выявлено некоторое повышение микротвердости в вихревых

зонах до 1,3 ГПа, которое может быть связано как с повышением твердости стальных фрагментов, так и формированием пересыщенных твердых растворов железа в меди. Растворимость железа в меди при 900 и 800 °С составляет 1,5 и 0,9 % (по массе) соответственно [7].

Рис. 5. Диффузионная зона в меди после закалки зоны взаимодействия в «вихре» рядом с участком мартенсита (x500)

Распределение химических элементов вблизи волнообразной границы соединения без локального оплавления и в участках с «вихрем» представлено на рис. 6.

а

б

в

г

Рис. 6. Распределение химических элементов по сечению биметалла в околошовной зоне в участках без локального оплавления (а, б) и в участках с вихревой зоной (в, г)

Также как в ранее описанных микроструктурах биметалла МЗ + сталь 30ХГСА после СВ и после отжига [1], между слоями стали и меди после закалки наблюдается четкая граница без обнаруживаемых при оптическом или электронно-микроскопическом исследованиях химического взаимодействия составляющих биметалла или образования протяженных облас-

тей твердых растворов. На участке металлографического шлифа с «вихревой» зоной энергодисперсионный анализ показывает значительные флуктуации концентрации меди и стали, связанные с наличием стальных фрагментов, что подтверждается химическим составом, определенным в различных точках «вихря» (рис. 7, табл. 1).

Рис. 7. Расположение точек определения локального химического состава энергодисперсионным анализом в опаве после закалки

Таблица 1

Химический состав в отдельных точках микроструктуры (рис. 7) сваренного взрывом биметалла медь+сталь 30ХГСА после закалки

Точка	Содержание элемента, ат. %				
	Si	Cr	Mn	Fe	Cu
1	—	—	—	1,93	98,07
2	0,64	0,74	0,80	96,36	1,28
3	—	—	—	27,56	74,94
4	—	—	—	16,30	83,70

Проведенный после закалки высокий отпуск приводит к снижению твердости стального слоя композита до 3,5 ГПа с формированием сорбитной структуры (рис. 8). Такое же формирование структуры сорбита с твердостью 3,4 ГПа наблюдается в стальных фрагментах зоны «вихря».

Высокий отпуск привел к некоторому снижению твердости медной составляющей композита, возможно из-за релаксации остаточных напряжений.

В случае образования в зоне «вихрей» при закалке пересыщенных твердых растворов из-за

снижения растворимости железа в меди при понижении температуры, в процессе высокого отпуска происходит выделение из пересыщенного твердого раствора Cu(Fe) дисперсных частичек железа, искажение когерентно связанной кристаллической решетки меди и ее упрочнение.

Распределение химических элементов по сечению биметалла после отпуска аналогично их распределению после закалки — видимого взаимодействия компонентов не наблюдается (рис. 9, табл. 2) и сохраняются стальные фрагменты.

Рис. 8. Микроструктура биметалла после высокого отпуска (*а* и *б*) и распределение микротвердости (*в*) по околошовной зоне

Рис. 9. Распределение химических элементов в околошовной зоне биметалла (*а*, *б*) и расположение точек определения локального химического состава энергодисперсионным анализом (*в*) в «вихре» после высокого отпуска

Таблица 2

Химический состав в отдельных точках микроструктуры биметалла (рис. 9) после высокого отпуска

Точка	Содержание элемента, ат. %				
	Si	Cr	Mn	Fe	Cu
1	1,04	–	–	34,86	64,09
2	1,13	1,16	0,24	44,28	54,19
3	–	–	–	21,89	78,11
4	–	–	–	18,66	81,34
5	1,17	0,87	0,93	95,65	1,38

Таким образом проведенное термическое улучшение, направленное на достижение оптимального комплекса прочностных и пластических свойств стального слоя композита, не приводит к формированию в результате диффузионных процессов структурных составляющих, которые могут необратимо ухудшить конструкционную прочность.

Выводы

1. Проведенное исследование изменения микроструктуры, химического состава и распределения микротвердости в околошовной зоне сваренного взрывом биметалла МЗ + сталь 30ХГСА после закалки от 880 °С в масле показало, что сталь 30ХГСА претерпела мартенситное превращение, как в стальной основе композита, так и в стальных фрагментах в «вихревой» зоне. При оптическом и электронно-микроскопическом исследованиях не обнаружены участки химического взаимодействия составляющих биметалла или образование протяженных областей твердых растворов.

2. Энергодисперсионный анализ распределения химических элементов по сечению биметалла после отпуска показал сохранение стальных фрагментов и отсутствие химичес-

кого взаимодействия компонентов на границе соединения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арисова В. Н. Трансформация структуры в зоне соединения биметалла медь МЗ + сталь 30ХГСА после сварки взрывом и последующего отжига / В. Н. Арисова, А. Ф. Трудов, Л. М. Гуревич, В. О. Харламов, В. Ю. Назарова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (251) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 13–18.
2. Конон, Ю. А. Сварка взрывом / Ю. А. Конон, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский. – М. : Машиностроение, 1987. – 216 с.
3. Кудинов, В. М. Сварка взрывом в металлургии / В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев. – М. : Металлургия, 1978. – 168 с.
4. Трыков, Ю. П. Диффузия в слоистых композитах : монография / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Н. Арисова / ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – 403 с.
5. 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.
6. Гуревич, Л. М. Слоистые интерметаллидные композиты и покрытия : монография /Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгунов, О. В. Слаутин, А. И. Богданов. – Москва : Металлургиздат, 2016. – 346 с.
7. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа / О. А. Банных, П. Б. Будберг, С. П. Алисова [и др]. – М. : Металлургия, 1986. – 440 с.