

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 620.18:620.17

DOI: 10.35211/1990-5297-2023-10-281-6-11

В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. П. Голикова, В. С. Семенова

ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРЕННОГО ВЗРЫВОМ МЕДНО-СТАЛЬНОГО БИМЕТАЛЛА ПОСЛЕ ИЗГИБА

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Показана принципиальная возможность использования для сваренного взрывом биметалла медь МЗ со сталью 30ХГСА технологических переделов, сопровождающихся значительными изгибными деформациями, после отжига при температуре 880 °С и времени выдержки 1 час. Установлено, что трехточечный изгиб ножом 20 мм до степеней деформации в меди 23–26 %, а в стали 10–11 % не приводит к появлению трещин в составляющих композита.

Ключевые слова: медно-стальной биметалл, сварка взрывом, отжиг, изгиб, степень деформации, микротвердость, микроструктура.

V. N. Arisova, L. M. Gurevich, A. P. Golikova, V. S. Semenova

INVESTIGATION WELDED COPPER-STEEL BIMETAL AFTER BENDING

Volgograd State Technical University

It is shown that for explosion-welded bimetal M3 copper with 30CrMnSiA steel, technological stages accompanied by significant bending deformations after annealing at a temperature of 880 °C and a holding time of 1 hour are shown. It has been established that a three-point bending with a 20 mm knife to a degree of deformation in copper of 23–26 %, and in steel of 10–11 % does not lead to the appearance of cracks in the components of the composite.

Keywords: copper-steel bimetal, explosion welding, annealing, bending, degree of deformation, microhardness, microstructure.

Биметаллические материалы представляет собой композит, состоящий из двух различных по химическому составу компонентов, разделенных границей, обладающих уникальными свойствами, отличающимися от свойств каждого компонента по отдельности. Форма, состав и распределение компонентов задаются заранее. Уникальность свойств биметаллов объясняется предоставлением возможности подбора химического состава слоев, наиболее полно отвечающих условиям эксплуатации, например, плакирующий слой обеспечивает коррозионную стойкость, износостойкость, жаропрочность и другие необходимые свойства, а основной слой – конструкционную прочность свойства изделий. К таким биметаллам относят медно-стальные соединения с гарантированными

ми служебными свойствами в условиях высоких давлений, транспортных перегрузок, низких и повышенных температур. Медно-стальные композиты могут быть применены в электрометаллургии для создания токоподводов электроплавильных агрегатов, сочетающих электро- и теплопроводность меди и прочность стали.

Для получения композиционных материалов (КМ) из разнородных материалов, таких как сталь-медь, целесообразно использование технологии сварки взрывом [1–5]. В этом случае свойства сваренного взрывом композита в первую очередь определяются строением околошовной зоны.

В [6–8] изучался композиционный сваренный взрывом биметаллический материал медь МЗ+ сталь 30ХГСА. В [6] установлено, что свар-

ка взрывом биметалла медь МЗ-сталь 30ХГСА обеспечивает формирование надежного соединения с характерным для сварки взрывом волновым профилем и образованием на гребнях волн вихревых зон. Интенсивная пластическая деформация, вызванная сваркой взрывом, приводит к появлению структурно-механической неоднородности – зон максимального упрочнения составляющих композита, которое наиболее выражено в стали 30ХГСА вблизи волнового профиля границы соединения, и могут устраняться последующим отжигом. Дефектов кристаллизационного происхождения (усадочная пористость, кристаллизационные трещины) в композите медь МЗ+ сталь 30ХГСА в ранее проведенных исследованиях [6–8] не обнаружено. Результаты энергодисперсионного анализа показали, что в зонах соединения с оплавами, как непосредственно после сварки взрывом, так и после отжига, имеет место неоднородное распределение химических элементов с образованием эвтектической смеси с фрагментами частиц стали разной дисперсности. В зонах отсутствия оплавов визуально не обнаруживались участки взаимодействия между медью и сталью.

Для придания формы конкретным изделиям из листового медно-стального биметалла необходимы технологические операции, например прокатка [5], гибка, штамповка и др. Целью данной работы являлось исследование сваренного взрывом композиционного материала медь МЗ + сталь 30ХГСА после отжига и последующего изгиба с разными степенями деформации.

Материалы и методика проведения исследований

При сварке взрывом в качестве неподвижной основы биметаллического композита использовалась конструкционная сталь 30ХГСА толщиной 10 мм, на которую образующимися продуктами взрыва металась медная пластина марки МЗ толщиной 3 мм.

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

Из полученных двухслойных заготовок медь МЗ + сталь 30ХГСА вырезали два образца размерами 100x13x10 мм (рис. 1), на полиро-

ванные торцовые поверхности которых с помощью прибора ПМТ-3 наносили сетку реперных линий с интервалом 1 мм (рис. 2), позволяющую по изменению линейных расстояний между реперными линиями определять величину остаточных деформаций.



Рис. 1. Сетка реперных линий на боковых поверхностях медно-стальных образцов для определения распределения деформаций после испытаний на изгиб

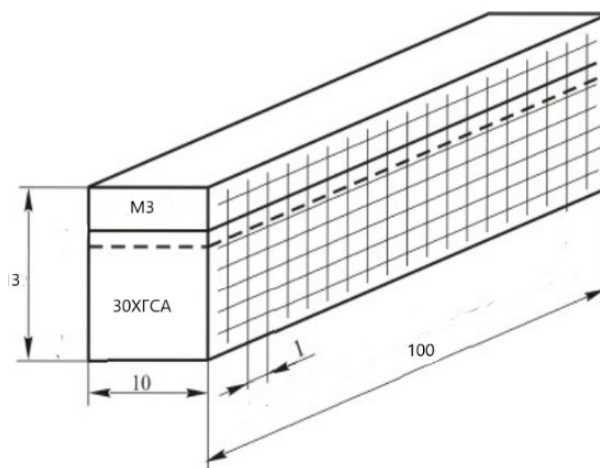


Рис. 2. Схема нанесения реперных линий на образцы КМ. Экспериментально определенное положение нейтральной оси обозначено пунктиром

Схема проведения трехточечного изгиба композита показана на рис. 3. Изгиб проводился по двум вариантам, с максимальными растягивающими деформациями как на поверхности меди, так и на поверхности стали. Испытания на изгиб проводили на машине УММ 10 (максимальное усилие 100 кН) с использованием верхнего пуансона («ножа») Ø20 мм, и расстояниями между нижними опорами 80 мм.

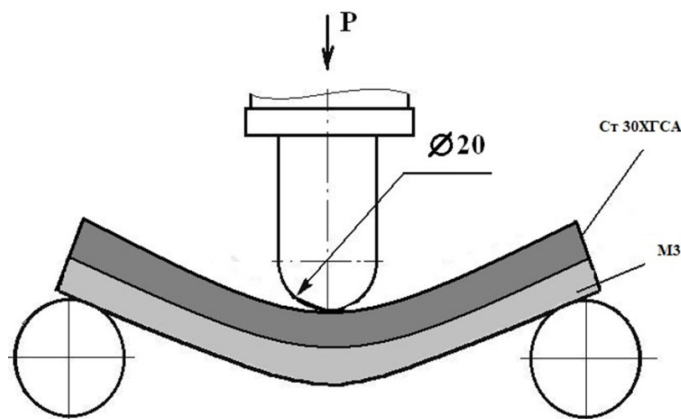


Рис. 3. Схема проведения испытаний медно-стального композита при трехточечном изгибе

Размеры исходных и деформированных ячеек замеряли по цифровым фотографиям с помощью компьютерного графического ре-

дактора AdobePhotoshop (рис. 4), среди инструментов линейка, позволяющая измерять расстояния на графических изображениях.

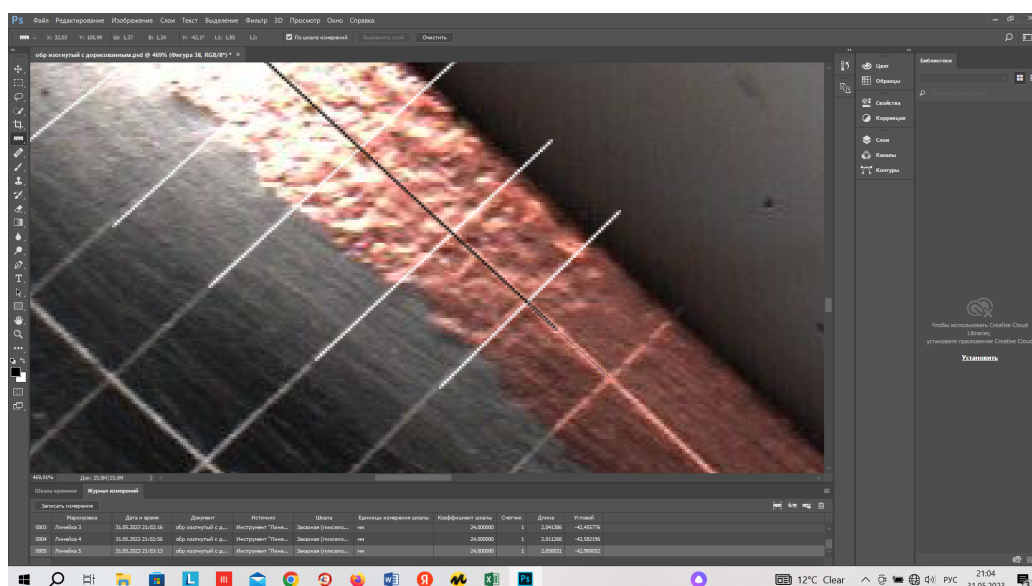


Рис. 4. Проведение измерений исходных и деформированных ячеек в графическом редакторе AdobePhotoshop

По изменению базовых расстояний между реперными линиями после снятия нагрузки рассчитывали распределение остаточной пластической деформации на разном расстоянии от зоны соединения в деформируемых образцах по формуле

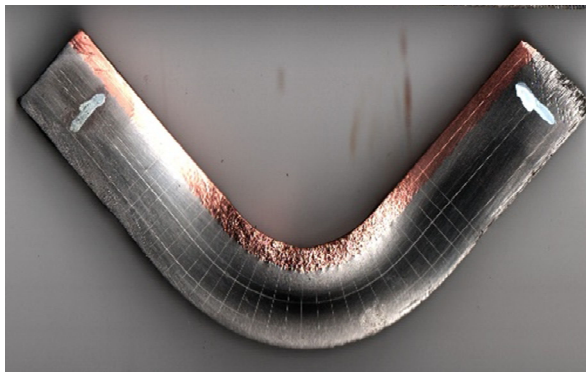
$$\delta = \frac{x_i - x_0}{x_0}$$

где x_0 – расстояние между реперными линиями исходных образцов, мм; x_i – расстояние между реперными линиями деформированных после изгиба образцов, мм.

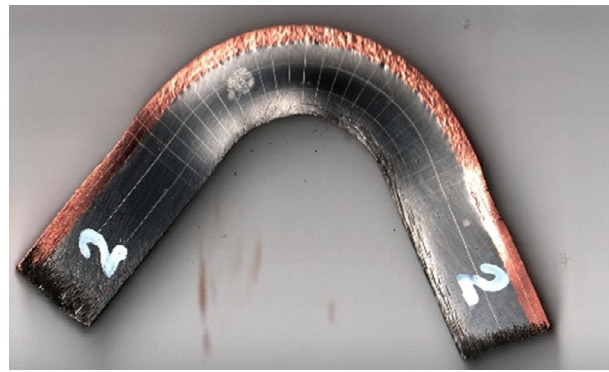
Измерение микротвердости проводили на приборе ПМТ-3М. Металлографические исследования выполняли с помощью оптического металлографического микроскопа «Olympus BX61» с фиксацией микроструктур компонентов КМ с помощью цифровой камеры микроскопа DP12 при увеличениях 50–500.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 5 показан вид исследуемых медно-стальных биметаллических образцов после изгиба.



a



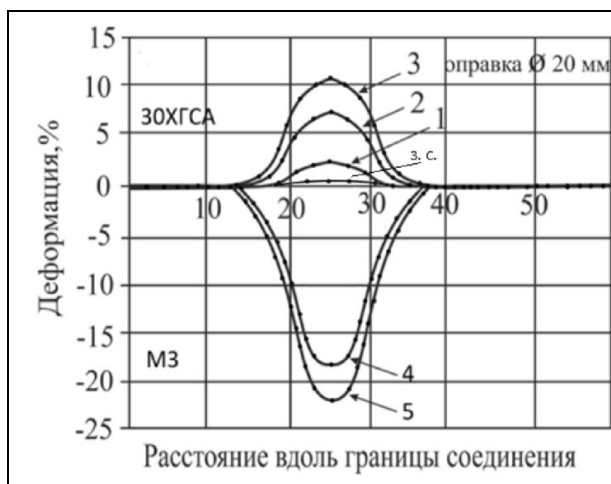
б

Рис. 5. Образцы исследуемого композита медь МЗ + сталь 30ХГСА после изгиба:
a – с максимальными растягивающими деформациями на поверхности стали;
б – с максимальными растягивающими деформациями на поверхности меди

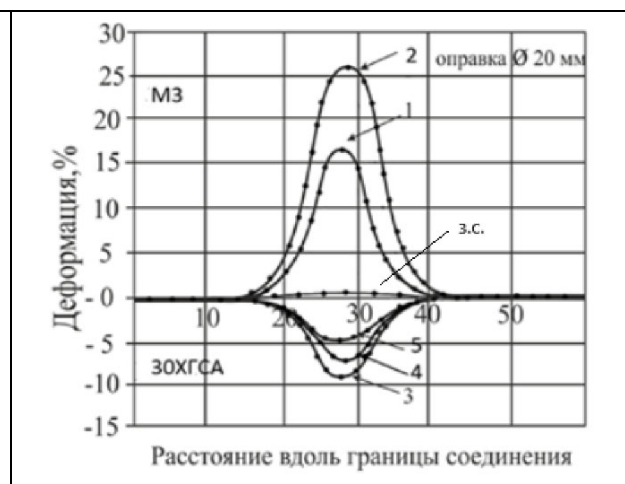
На рис. 6 представлены результаты распределения степени деформации в зоне соединения и на различных расстояниях от нее: на стали 30ХГСА на расстояниях 2, 4, и 9 мм,

а в меди измерения проводились расстояниях 1,5 и 3 мм от зоны соединения.

Трещин после изгиба в составляющих композита и в зоне соединения не обнаружено.



a



б

Рис. 6. Изменение пластической деформации на различном удалении от линии соединения биметалла МЗ-30ХГСА при изгибе с использованием верхнего пуансона Ø20 мм:

a – со стороны меди (1 – 2 мм; 2 – 4,5 мм; 3 – 9 мм; 4 – 1,5 мм; 5 – 3 мм от линии соединения);
б – со стороны стали (1 – 1,5 мм; 2 – 3 мм; 3 – 9 мм; 4 – 4,5 мм; 5 – 3 мм от линии соединения); 3. с. – зона соединения

При изгибе с максимальными растягивающими деформациями на поверхности стали (рис. 6, *a*) в меди наблюдаются сжимающие деформации: при удалении на 1,5 мм от границы соединения они составили 17 %, а при удалении на 3 мм возросли до 23 %. При этом в стали 30ХГСА действуют растягивающие напряжения: при удалении на 2 мм от зоны соединения деформация составляла 3 %, при 4,5 мм – 7 %, а при 9 мм деформация достигала 11 %.

При изгибе с максимальными растягивающими деформациями на поверхности меди де-

формации в стали 30ХГСА при удалении на 3 мм от линии соединения достигали 4 %, при 4,5 мм – 7 %, а при 9 мм – около 10 %. Со стороны меди растягивающие деформации достигали 26 % при удалении на 3 мм от зоны соединения, и 16 % при удалении на 1,5 мм от границы соединения.

Установлено, что при изгибе образцов пуансоном Ø20 мм деформации на линии соединения композита незначительны (рис. 6, линия 3.с.). Так при изгибе с максимальными растягивающими деформациями на поверхности стали деформация на линии соединения 0,5 %,

а при изгибе с максимальными растягивающими деформациями на поверхности меди – 0,2 %.

После сварки взрывом величина микротвердости меди составляла 1 ГПа, а в стали значения колебались от 4,5 до 2,5 ГПа. После отжига микротвердость меди составила около 0,7 ГПа, а стали – до 2 ГПа. После проведенного деформирования изгибом вследствие пластической деформации и наклепа произошло упрочнение составляющих биметалла. При из-

гибе с максимальными растягивающими деформациями на поверхности меди ее микротвердость увеличилась в 2 раза до 1,5 ГПа, а сталь упрочнилась до 3 ГПа. При изгибе с максимальными растягивающими деформациями на поверхности стали микротвердость меди возросла до 1,5–1,7 ГПа, а значения микротвердости в стали увеличились до 4 ГПа.

Структуры образцов после изгиба представлены на рис. 7.

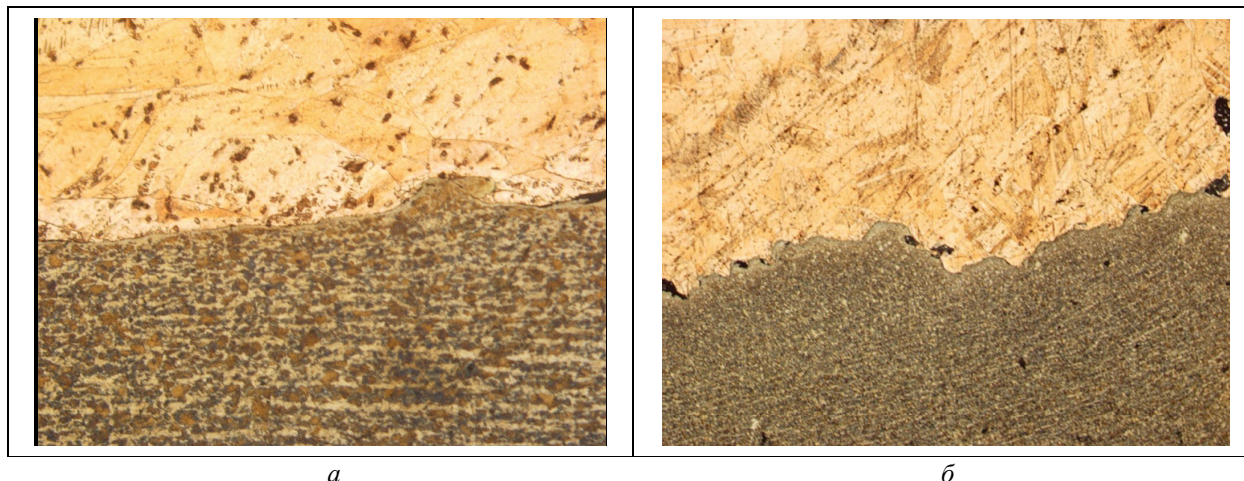


Рис. 7. Микроструктуры зоны соединения сваренного взрывом композита медь М3+сталь 30ХГСА:
а – изгиб с максимальными растягивающими деформациями на поверхности меди $\times 200$;
б – изгиб с максимальными растягивающими деформациями на поверхности стали $\times 50$

На микроструктурах (рис. 7, а, б) наблюдается ярко выраженная перлитная полосчатость стали, возникшая еще на стадии прокатки исходного листа, и не устраненная проведенным отжигом при температуре 880 °С. В структуре меди видны рекристаллизованные зерна, сформировавшиеся после отжига при высокой для меди температуры 880 °С, явной текстуры в ней не наблюдается. При изгибе с максимальными растягивающими деформациями на поверхности стали в структуре меди отчетливо видны двойники, сформировавшиеся в процессе пластической деформации. При изгибе с максимальными растягивающими деформациями на поверхности меди двойники в меди визуально не наблюдаются.

Выводы

1. Исследования установили возможность проведения формообразующих технологических операций для сваренного взрывом биметалла медь М3 + сталь 30ХГСА после отжига 880 °С с максимальными деформациями в меди 23–26 %, а в стали 10–11 % без появления трещин в составляющих композита.

2. Показано, что при трехточечном при достижении деформаций в меди до 23–26 %, а в стали до 10–11 % микротвердость меди увеличилась до 1,5 ГПа, а сталь до 3 ГПа по сравнению с микротвердостью меди после отжига 0,7 ГПа, а стали – до 2 ГПа.

3. Металлографический анализ выявил особенности структуры сваренного взрывом медно-стального композита после отжига при 880 °С и изгиба: в стали 30ХГСА сохраняется ярко выраженная перлитная полосчатость, сформировавшаяся еще на стадии горячей прокатки исходного листа, а в меди сформировалась после отжига сваренного взрывом биметалла крупнозернистая структура. При изгибе с максимальными растягивающими деформациями на поверхности стали в структуре меди отчетливо видны двойники, сформировавшиеся в процессе пластической деформации.

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. Гуревич, Л. М. Слоистые интерметаллидные композиты и покрытия : монография / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. И. Богданов. – Москва : Metallurgizdat, 2016. – 346 с.

5. 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.

6. 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.

7. Особенности формирования структуры в зоне со-

единения медно-стального композита медь МЗ + сталь 30ХГСА после сварки взрывом и термического улучшения / В. Н. Арисова, А. Ф. Трудов, Л. М. Гуревич, В. О. Харламов, В. Ю. Назарова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (253) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 11–17.

8. Исследование процессов диффузии в зоне соединения биметалла медь МЗ + сталь 30ХГСА после сварки взрывом и последующих нагревов / В. Н. Арисова, А. Ф. Трудов, Л. М. Гуревич, В. О. Харламов, В. Ю. Ломакина, В. С. Семенова // Известия ВолгГТУ № 6 (265) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 13–18.

9. Воздействие повышенных температур на сваренный взрывом биметалл медь МЗ-сталь 30ХГСА / В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, В. О. Харламов, В. С. Семенова // Известия ВолгГТУ : № 6 (277) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 10–15.