

В. Н. Арисова¹, А. И. Богданов¹, Л. М. Гуревич¹, В. С. Семенова², А. П. Голикова¹

**РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СВАРЕННОГО ВЗРЫВОМ МЕДНО-СТАЛЬНОГО БИМЕТАЛЛА
ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

¹ **Волгоградский государственный технический университет**

² **АО «Всероссийский научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт
оборудования нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности»**

e-mail: arisova1954@mail.ru

Приведены результаты исследований диффузионных процессов в зоне соединения биметалла медь МЗ + сталь 30ХГСА после сварки взрывом и последующих термических воздействий при 880 °С с временем выдержки до 10 ч, 1000 °С с временами выдержки 24, 50, 100 ч и 1050 °С с временем выдержки 1 ч. Показано, что интенсификация диффузионных процессов стали в медь и меди в сталь вблизи границы соединения с образованием твердых растворов вызывает существенное развитие характеристик тонкой структуры: увеличение уровня относительной деформации решетки и измельчение блоков мозаики.

Ключевые слова: медно-стальной биметалл, сварка взрывом, высокотемпературные нагревы, диффузия, микроструктура, рентгеноструктурный анализ, тонкая структура

V. N. Arisova¹, A. I. Bogdanov¹, L. M. Gurevich¹, V. S. Senenova², A. P. Golikova¹

**X-RAY STUDIES OF EXPLOSION-WELDED COPPER-STEEL
BIMETAL AFTER THERMAL IMPACTS**

¹ **Volgograd State Technical University**

² **"Research, Design And Technological Institute Of Oil Refining
And Petrochemical Equipment" Joint Stock Company**

The article presents the results of studies of diffusion processes in the joint zone of the bimetallic copper M3 + steel 30CrMnSiA after explosion welding and subsequent thermal effects at 880 °C with a holding time of up to 10 hours, 1000 °C with holding times of 24, 50, 100 hours and 1050 °C with a holding time of 1 hour. It is shown that the intensification of diffusion processes of steel into copper and copper into steel near the joint boundary with the formation of solid solutions causes a significant development of the thin structure characteristics: an increase in the level of relative lattice deformation and a refinement of mosaic blocks.

Keywords: copper-steel bimetal, explosion welding, high-temperature heating, diffusion, microstructure, X-ray diffraction analysis, thin structure

Детали металлургического оборудования, изготовленные из медно-стальных биметаллов, работают в тяжелых эксплуатационных усло-

виях, поэтому существенное влияние на их долговечность оказывают применяемые материалы и рабочие температуры [1].

Требуемые служебные показатели обеспечиваются созданием улучшенного комплекса физико-механических свойств композитов, которыми может не обладать каждый материал в отдельности. Свойства слоистых композитов, в свою очередь, определяются характером и закономерностями формирования структуры металлов, особенно в зоне соединения [2,3].

В [4–7] приведены результаты исследований медно-стального биметалла медь МЗ + сталь 30ХГСА после сварки взрывом и различных термических воздействий – отжигов при температурах 880–1050 °С и временах выдержки 1–100 ч и термического улучшения. Было установлено, что при температуре 880 °С диффузионные процессы начинают протекать при временах выдержки 5 и 10 ч, а увеличение температуры и длительности нагрева до 1000 °С от 24 до 100 ч способствует интенсификации диффузионных процессов как меди в сталь на глубину до 103 мкм, так и компонентов стали в медь – до 300 мкм. При повышении температуры до 1050 °С в течение 1 ч диффузионные зоны соответствовали толщинам 95 мкм со стороны меди и 25 мкм со стороны стали. Показано, что в «вихревых» зонах соединения с оплавами при отжиге 1000–1050 °С происходит растворение образующихся после сварки взрывом стальных фрагментов различного размера с образованием дисперсной структуры.

Целью данной работы являются исследования по влиянию температуры и длительности термического воздействия на тонкую структуру сваренного взрывом медно-стального композита с использованием рентгеноструктурного анализа.

Материалы и методика проведения исследований

Медно-стальной композит получен СВ по плоскопараллельной схеме метанием медной пластины марки МЗ толщиной 3 мм на лист конструкционной стали 30ХГСА толщиной 10 мм.

Нагрев сваренного взрывом композита проводился в печи СНОЛ-1.6,2.5,1/11-ИЗ при температурах 880 °С с временем выдержки от 1 до 10 ч, 1000 °С и временах выдержки 24–100 ч, а также при температуре 1050 °С в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе.

Микроструктуру изучали с помощью оптического металлографического микроскопа «Olympus BX61» с фиксацией микроструктур компонентов КМ с помощью цифровой камеры микроскопа DP12 при увеличениях $\times 50$ – $\times 200$ и растрового двухлучевого электронно-ионного микроскопа системы Versa3D DualBeam. Распределение химических элементов в околошовной зоне композиционного материала изучали с использованием энергодисперсионного спектрометра INCA X-Max (Oxford Instruments). Измерение микротвердости проводили на приборе ПМТ-3М.

Для определения изменений характеристик тонкой структуры осуществляли рентгеносъемки на дифрактометре D8 ADVANCE BRUKER профилей дифракционных линий (110) и (220) стали и (1110 и (222) меди в сечениях перпендикулярных толщине биметалла, начиная с поверхности меди МЗ до зоны соединения и от нее в сталь 30ХГСА путем последовательного удаления слоев (рис. 1).

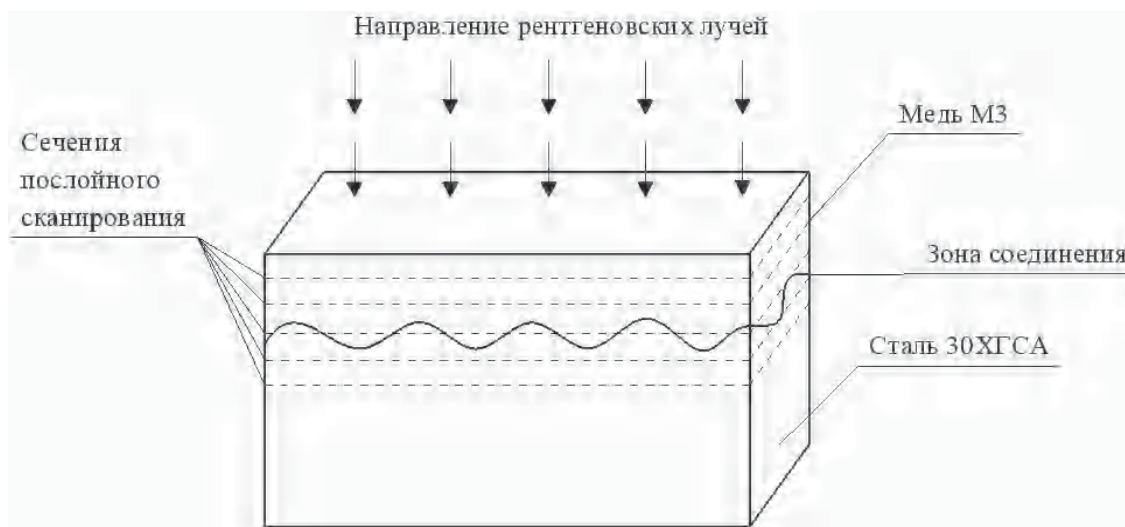


Рис. 1. Схема рентгеновских съемок при последовательном снятии слоев от меди МЗ к стали 30ХГСА

Для выделения из общей ширины рентгеновских линий физического уширения (β), определения относительной деформации решетки ($\Delta a/a$) и размера областей когерентного рассея-

ния (ОКР) – блоков мозаики использовали метод аппроксимации [8]. Общий вид дифрактограммы в зоне соединения в диапазоне углов $2\Theta = 20\text{--}110$ град представлен на рис. 2.

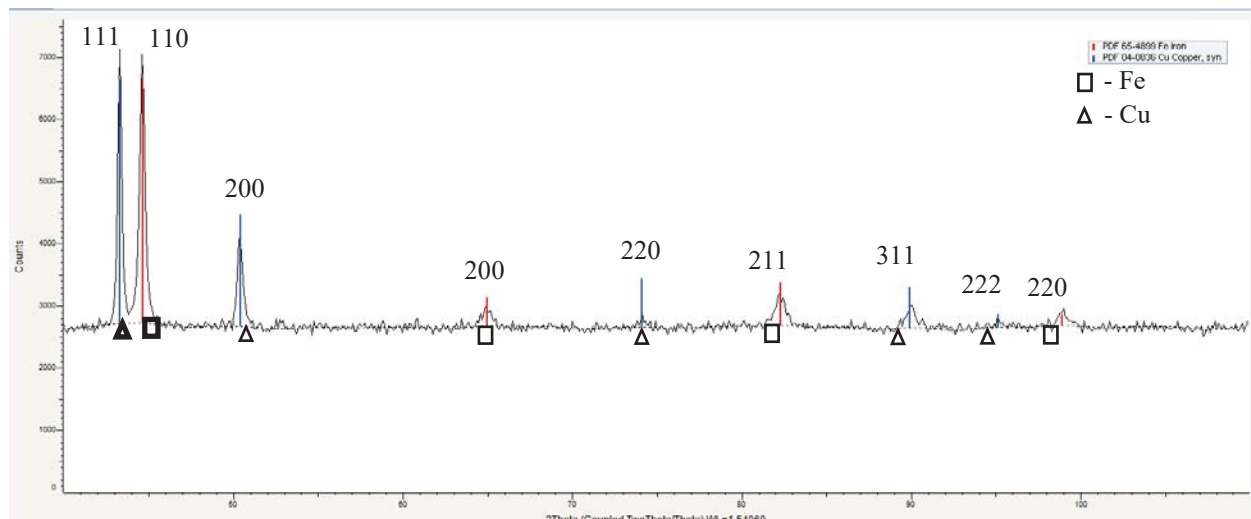


Рис. 2. Дифрактограмма МЗ+ Сталь 30ХГСА после СВ в зоне соединения, отражения Cu: 111, 200, 220, 311, 222; отражения Fe: 110, 200, 211, 220

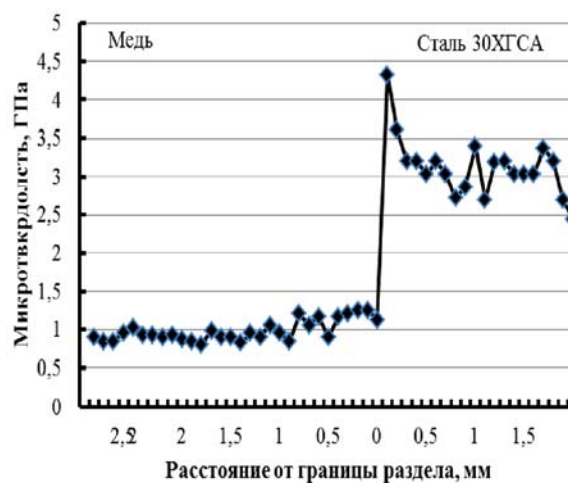
Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 3 представлены полученные оптической микроскопией микроструктура зоны со-

единения медно-стального композита после сварки взрывом (рис. 3, а) и распределение микротвердости составляющих композита возле зоны соединения (рис. 3, б).



а



б

Рис. 3. Микроструктура зоны соединения композита медь МЗ+сталь 30ХГСА после сварки взрывом (а) $\times 50$ и распределение микротвердости по сечению биметалла (б)

Анализ микроструктуры (излома рис. 3, а) показал, что после сварки взрывом в зоне соединения наблюдаются участки «вихрей», которые образовались вследствие расплавления меди при сварке, в которых присутствуют равномерно распределенные частицы стали, при этом взаи-

модействия между компонентами меди и стали по данным рентгеноспектрального анализа [4] не происходит. Из рис. 3, б следует, что сталь возле зоны соединения имеет более высокую твердость до 4,5 ГПа вследствие явления наклепа при соударении пластин при сварке взрывом.

На рис. 4 приведены данные рентгеноструктурного анализа по определению характеристик тонкой структуры: относительной деформации

решетки $\frac{\Delta a}{a}$, вызванную микронапряжениями, и размеров областей когерентного рассеяния – блоков мозаики D .

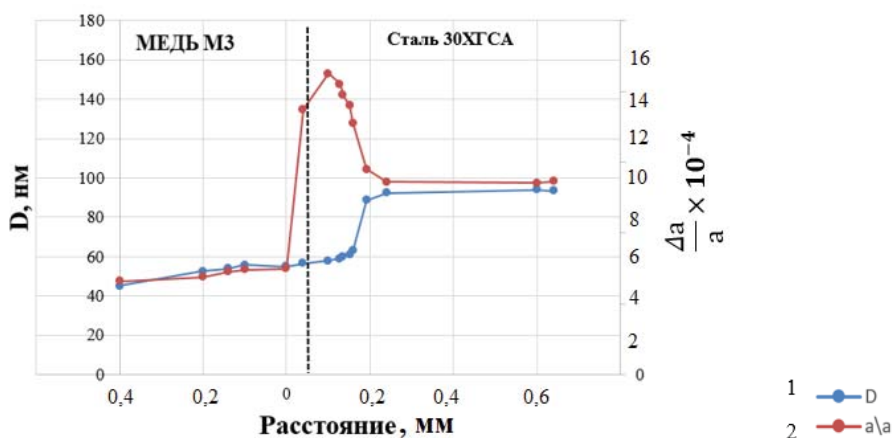


Рис. 4. Изменение уровня относительной деформации решетки $\frac{\Delta a}{a}$ и размеров блоков мозаики D в зависимости от расстояния до зоны соединения в сваренном взрывом композите

Из рис. 4 следует, что изменение характеристик тонкой структуры коррелирует с изменением твердости. В стали наблюдается существенное увеличение уровня относительной деформации решетки возле зоны соединения: относительная деформация решетки $\frac{\Delta a}{a}$ достигает 15×10^{-4} , при этом измельчаются блоки мозаики до 60 нм. В меди повышение уровня относительной деформации решетки заметен только в зоне волнообразования (см. рис. 1), а на всем остальном протяжении уровень деформации незначительный и составляет 3×10^{-4} ,

при этом блоки мозаики достаточно мелкие и находятся на уровне стали в зоне наклепа – порядка 50 нм.

После термического воздействия на сваренный взрывом биметалл [6, 7] происходят диффузионные процессы, которые начинаются при температуре 880 °С и сваренного времени вторичной выдержки 5–10 часов с толщиной диффузионного слоя около 10 мкм и интенсифицируются при температуре 1000 °С от 24 до 100 часов и более высокой температуре 1050 °С в течение 1 часа (таблица).

Толщины диффузионных зон в сваренном взрывом композите МЗ+сталь 30ХГСА после высокотемпературных нагревов

Режим нагрева	Толщина диффузионной зоны, мкм	
	со стороны МЗ	со стороны стали
1000 °С, 24 ч	100	25
1000 °С, 50 ч	230	55
1000 °С, 100 ч	380	103
1050 °С, 1 ч	95	25

На микроструктуре (рис. 5), полученной при оптической металлографии биметалла нагреве 1000 °С в течение 24 ч, диффузионная зона в меди имеет более яркую окраску, толщиной до 100 мкм. Диффузия меди в сталь, по данным рентгеноспектрального анализа [6], происходит на меньшую глубину – до 20–30 мкм.



Рис. 5. Микроструктура диффузионной зоны при нагреве 1000 °С, 24 ч x500

В результате диффузионного взаимодействия происходит образование твердых растворов, которое оказывает влияние на тонкую структуру. На рис. 6 представлены результаты

измерений микротвердости (*а*) и изменения характеристик тонкой структуры (*б*) сваренного взрывом композита после термического воздействия 1000 °С, 24 ч.

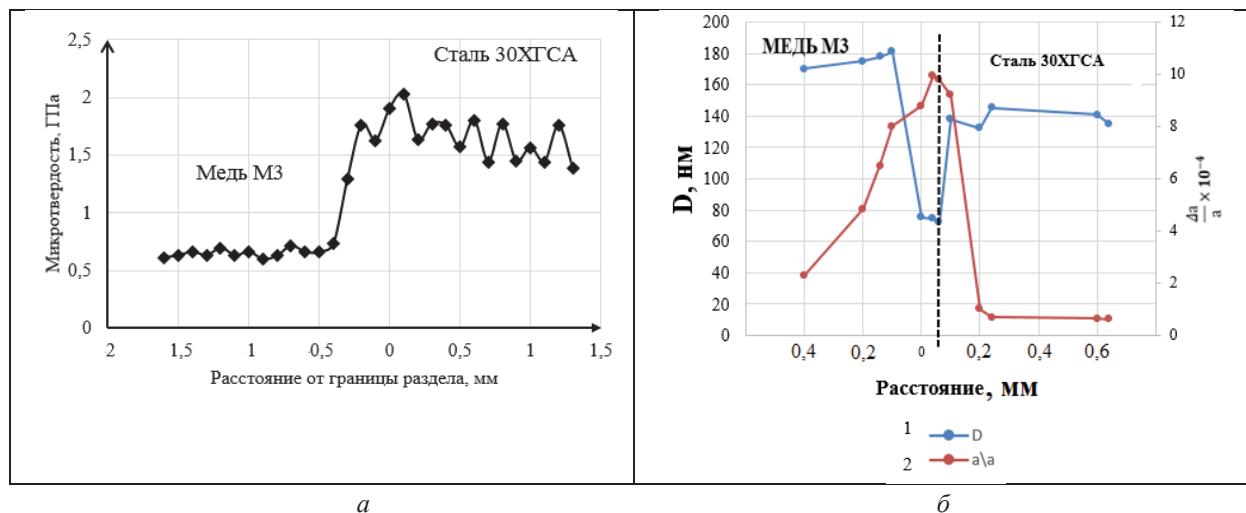


Рис. 6. Распределение микротвердости (*а*) и изменений уровня относительной деформации решетки и размеров блоков мозаики в зависимости от расстояния до зоны соединения в сваренном взрывом композите после отжига 1000 °С, 24 ч

Из рисунка 6 следует, что в зоне диффузионного взаимодействия стали в медь и меди в сталь идет развитие характеристик тонкой структуры: уровень относительной деформации решетки соответствует $\frac{\Delta a}{a} = 10 \times 10^{-4}$, а размер блоков мозаики уменьшается до 70–80 нм.

При увеличении времени выдержки до 50–100 ч при температуре 1000 °С развитие харак-

теристик тонкой структуры наблюдается на всем протяжении диффузионной зоны (рис. 7).

При времени выдержки до 50 ч на расстоянии до 0,25 мм от зоны соединения наблюдается увеличение, по сравнению с выдержкой 24 ч, уровня относительной деформации решетки и со стороны меди и со стороны стали $\sim \frac{\Delta a}{a} \approx 12 \times 10^{-4}$, блоки мозаики имеют размер ~ 80 нм.

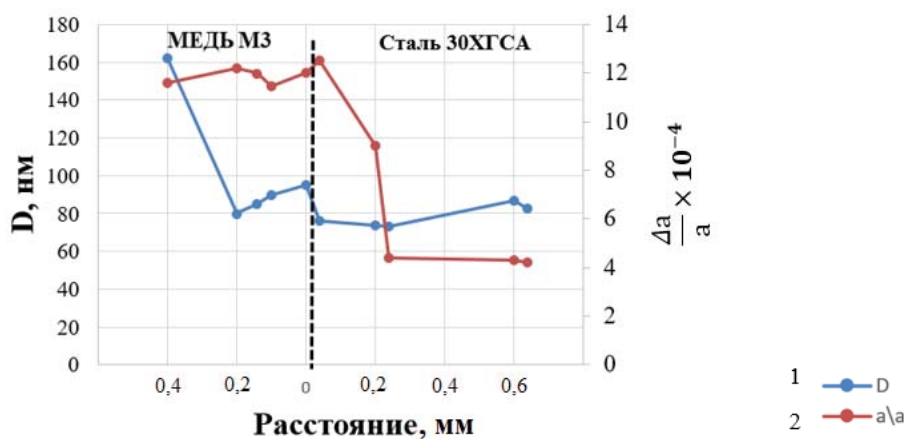


Рис. 7. Изменение уровня относительной деформации решетки и размеров блоков мозаики в зависимости от расстояния до зоны соединения в сваренном взрывом композите после отжига 1000 °С, 50 ч

При увеличении времени выдержки при температуре 1000 °С до 100 ч в зоне соединения значения относительной деформации ре-

шетки остаются на уровне, соответствующем 50 часам – 12×10^{-4} . Блоки мозаики имеют размер 90 нм.

При увеличении температуры 1050 °С в течение 1 часа установлено, что уровень относительной деформации решетки достигает максимального значения 13×10^{-4} в меди на расстоянии 0,4 до зоны соединения, а в стали на расстоянии 0,2 мм, при этом размер блоков мозаики составляет 80–90 нм.

Выводы

1. В медно-стальном биметалле в околошовной зоне после сварки взрывом изменение характеристик тонкой структуры коррелирует с изменением микротвердости: в зоне наклепа стали происходит существенное увеличение относительной деформации кристаллической решетки, вызванное микронапряжениями в этой зоне, и дробление блоков мозаики. В меди развитие характеристик тонкой структуры наблюдается только в зоне волнообразования.

2. При термическом воздействии в интервале температур 880–1050 °С и различных временах выдержки увеличение относительной деформации решетки меди и стали и измельчение блоков мозаики происходит в диффузионных зонах, в которых образуются твердые растворы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пасечник, Н. В. Машиностроение : энциклопедия. В 40 т. Т. 4 – 5 Машины и агрегаты металлургического производства / Н. В. Пасечников, В. М. Синицкий, В. Г. Дрозд. – М. : Машиностроение, 2000. – 342 с.
2. Гуревич, Л. М. Слоистые интерметаллидные композиции и покрытия : монография / Л. М. Гуревич, В. Г. Шмор-

гун, О. В. Слаутин, А. И. Богданов. – Москва : Металлургиздат, 2016. – 346 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. 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.

5. Арисова В. Н. Особенности формирования структуры в зоне соединения 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.

6. Арисова В. Н. 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 : научный журнал № 6 (265) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 13–18.

7. Арисова В. Н. 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 : научный журнал № 6 (277) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 10–15. – DOI: 10.35211/1990-5297-2023-6-277-10-15.

8. Иванов, А. Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / А. Н. Иванов, Л. Н. Расторгуев, Я. С. Уманский. – М. : Металлургия, 1982. – 632 с.