



УДК 669.1

*О.Г. Климова, Г.А. Туричин, В.А. Лопота,
А.И. Шамшурин, И.А. Сизова.*

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*O.G. Klimova, G.A. Turichin, V.A. Lopota,
A.I. Shamshurin, I.A. Sizova*

STRUCTURE FEATURES OF THE METAL WELDED BY ELECTRON BEAM WELDING OF DISSIMILAR MATERIALS

Описаны результаты исследования структуры соединений разнородных материалов, полученных с помощью электронно-лучевой сварки. Оценка тепловой ситуации в зоне сварки проведена с использованием математического моделирования. С помощью современных металлографических методов и сканирующей электронной микроскопии исследован химический и структурный состав металла шва и околошовной зоны при сварке сталей со сплавами на основе меди и алюминия. Установлены основные закономерности формирования микроструктуры металла в зоне сварного соединения, проанализировано распределение различных компонентов по сварному соединению.

СВАРКА РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ. ЭЛЕКТРОННО ЛУЧЕВАЯ СВАРКА. СТАЛЬ. МЕДЬ. АЛЮМИНИЙ.

Work describes research results of a structure, joining dissimilar materials, obtained with electron-beam welding. Temperature quality of the welding area was evaluated with mathematical simulation. Aluminum and copper steels were welded together. Weld and near-weld area chemical and structural compositions were observed with modern metallographic methods and scanning electron microscopy technic. Main patterns of metall microstructure formation in weld zone were established. Chemical component distribution in a weld area was analyzed.

WELDING OF DISSIMILAR MATERIALS. ELECTRON BEAM WELDING. STEEL. COPPER. ALUMINUM.

Современное машиностроение остро нуждается в получении качественных сварных соединений разнородных материалов, в частности соединений стали со сплавами на основе меди или алюминия. Подобные задачи особенно актуальны в автомобильной и авиационной промышленности (сварка корпусных конструкций, сварка трубопроводов). Использование в конструкциях разнородных материалов позволяет решить различные конструктивно-технологические задачи, в том числе повысить ресурс, износостойкость и сопротивляемость агрессивным средам.

Задача сварки сталей с алюминиевыми и медными сплавами технологически достаточно сложна. Это связано с металлургическими особенностями формирования швов таких соединений при сварке плавлением. Многие сочетания раз-

нородных металлов (медь — алюминий, алюминий — сталь, алюминий — титан, титан — сталь, железо — ниобий и др.) имеют ограниченную взаимную растворимость. Традиционно считается, что возникающие при кристаллизации таких швов интерметаллиды приводят к охрупчиванию [1]. Для пары алюминий — сталь известны несколько методов сварки, таких, как аргонодуговая сварка неплавящимся электродом [2], диффузионная сварка [3], сварка давлением [4], сварка с использованием промежуточного металла [5]. Однако ни один из перечисленных методов, а также использование сочетания разных видов сварки не исключают появления прослоек интерметаллидов. А успешно используемая сварка взрывом позволяет сваривать только листовые материалы.

Дополнительные трудности возникают при большой разнице в теплофизических свойствах, как, например, при сварке медных сплавов со сталью. Такие виды сварки, как лазерная (ЛС) и электронно-лучевая (ЭЛС), за счет значительно более точного управления параметрами теплового источника в зоне сварки обладают очевидным преимуществом для сварки разнородных материалов. Использование высокотехнологичной сварки электронным лучом алюминиевых сплавов позволяет избежать образования оксидной пленки Al_2O_3 , которая является частым дефектом при сварке плавлением [6]. Главная особенность применения лучевых технологий в сварке — высокие скорости. Это может позволить избежать образования прослойки интерметаллидов и образования обширной области зоны термического влияния (ЗТВ) в материалах с высокой теплопроводностью.

Методика и материалы

В работе приведено исследование структуры швов стыкового соединения без скоса кромок, полученных при электронно-лучевой сварке на установке ProBeam K7 Universal Electron Beam Chamber в вакууме. Параметры режимов, при которых были получены образцы, представлены в табл. 1.

Химический состав исследуемых материалов приведен в табл. 2.

В работе представлены результаты экспериментального исследования сварных соединений бронза — сталь и алюминий — сталь, полученных с использованием ЭЛС. Изучена микроструктура полученных сварных соединений с целью определения возможности использования ЭЛС для получения удовлетворительных сварных соединений разнородных материалов. Для анализа особенностей формирования структуры сварных соединений при сварке разнородных материалов необходимо знание поля температур и скоростей охлаждения в зоне сварного шва. Для определения этих величин нами была использована система моделирования LaserCAD [7], позволяющая рассчитывать поле температур и термические циклы любой точки сварного шва и зоны термического влияния. Поскольку математические модели процессов, используемые в LaserCAD, не позволяют учитывать разнородность соединения, они были доработаны для учета особенностей такого соединения. В частности, в модель рассеяния была добавлена возможность учета химического состава парового факела, который при сварке разнородных веществ состоит из нескольких компонентов. Решение задачи о тепломассопереносе в расплаве

Таблица 1

Параметры режима эксперимента

Свариваемые материалы	U , кВ	I , мА	$V_{св}$, мм/с	P , Вт	$Q_{пог}$, Дж/мм
Сталь — бронза	120	11	45	1320	29,33
Сталь — алюминий	120	10	50	1200	24

Таблица 2

Химический состав сваренных материалов

Материал	Содержание элементов, масс. %, в сваренном шве														
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ti	Zn	Ni	Mg	Al	Cu	Sn	Fe
Сталь	0,02	0,01	0,23	0,01	0,005	0,01	0,005	0,001	0,004	0,0126	—	0,031	0,01	0,002	99,9
Бронза	—	—	—	0,06	0,004	—	—	—	0,05	0,015	—	—	94,5	5,37	0,014
Сплав Al	—	0,4	0,7	—	—	0,13	—	0,15	0,2	—	4,5	95,2	0,1	—	0,4

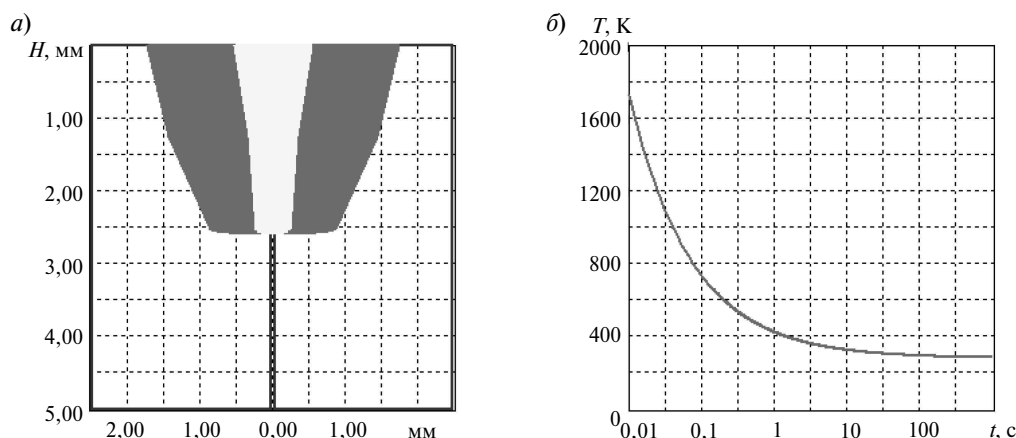


Рис. 1. Результаты моделирования формы проплавления (а) и скорости охлаждения (б) при сварке стали с алюминиевым сплавом

также было изменено для учета влияния смешения свариваемых материалов на теплофизические свойства расплава. Пример расчетов формы проплавления и скорости охлаждения на границе сталь — алюминий показаны на рис. 1.

Скорость сварки — 3 см/сек, ускоряющее напряжение — 100 кВ, ток луча — 11 мА, радиус сканирования луча — 0,5 мм, линия движения луча смещена в сторону Al на 0,5 мм. Результаты моделирования показывают, что даже при смещении оси движения луча в сторону более легкоплавкого материала наблюдается частичное подплавление более тугоплавкого материала (сталь). Соответственно, это свидетельствует о возможном формировании сварного шва при сварке выбранных разнородных материалов электронным лучом.

Металлографические исследования сварных соединений были проведены на микроскопе DMI5000 (Leica) с программным обеспечением Tixomet. Для определения микроструктуры использовано поочередное травление: сначала вытравливали стальную составляющую, затем цветной сплав. Для травления стали использовали раствор азотной кислоты в спирте, для бронзы — раствор хлорного железа, для алюминиевого сплава — раствор плавиковой кислоты.

Исследования химического состава и распределения химических элементов в сварном шве были выполнены на сканирующем электронном микроскопе SUPRA 55VP (Carl Zeiss) с использованием приставки Oxford INCA Wave 500. Определение микротвердости проводилось на микротвердометре MicroMet 5103.

Анализ структуры сварного соединения сталь — алюминий

Согласно диаграмме Al—Fe[8] в структуре шва можно обнаружить несколько интерметаллидов — $AlFe_3$, $AlFe$, Fe_2Al_5 , $FeAl_3$ [9]. На рис. 2 представлен сварной шов «алюминий — сталь».

При травлении стали в верхней области шва присутствует область ЗТВ шириной 50–100 мкм; структура ЗТВ стали — бейнитная (рис. 2, в). Затем присутствует область со стальной литой структурой. При переходе к алюминию обнаруживается область фазы (рис. 2, г), отличной от исходных свариваемых материалов. При травлении алюминия также обнаруживается область, которая не была определена и при травлении стали (рис. 2, а). Структуру каплеподобной области не удалось вытравить. Вероятней всего, в процессе ЭЛС произошло оплавление стали, что обусловило протекание взаимной диффузии компонентов.

Для установления качества сплавления между железом и алюминием был исследован распределение элементов в области капли (рис. 3). Количественное содержание, %, элементов в исследуемой области спектров, продемонстрированных на рис. 4, следующее:

Номер спектра	Al	Fe
1	3,01	96,99
2	10,13	89,87
3	7,24	92,76
4	27,60	72,40
5	9,35	90,65
6	99,31	0,69
7	55,07	44,93

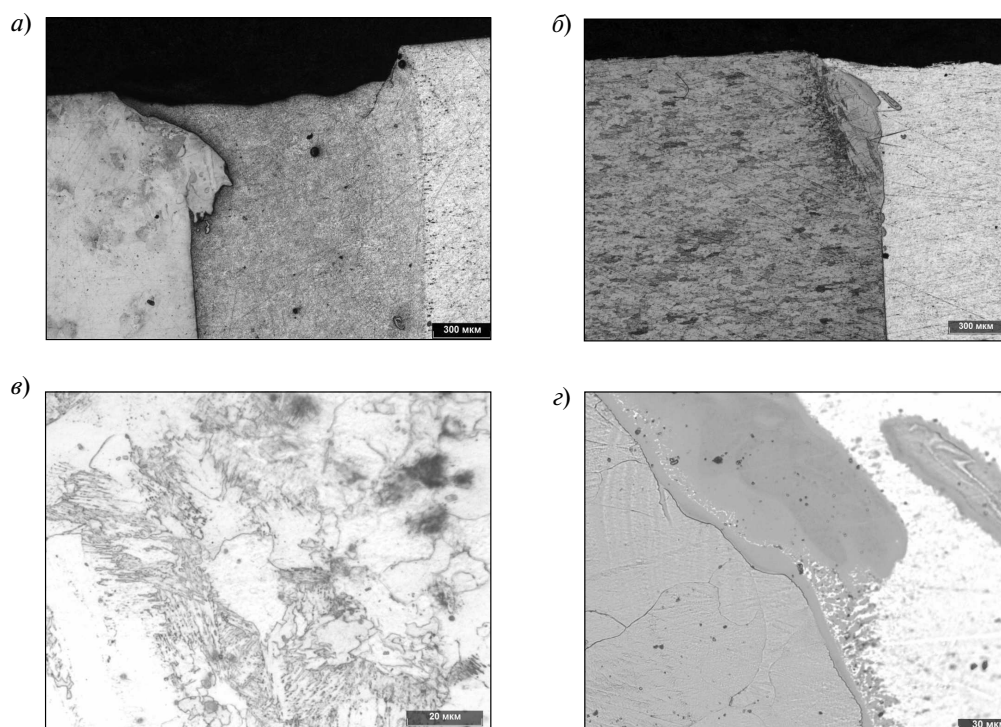


Рис. 2. Сварное соединение Al–Fe при травлении алюминия (а) и стали (б, в, з)

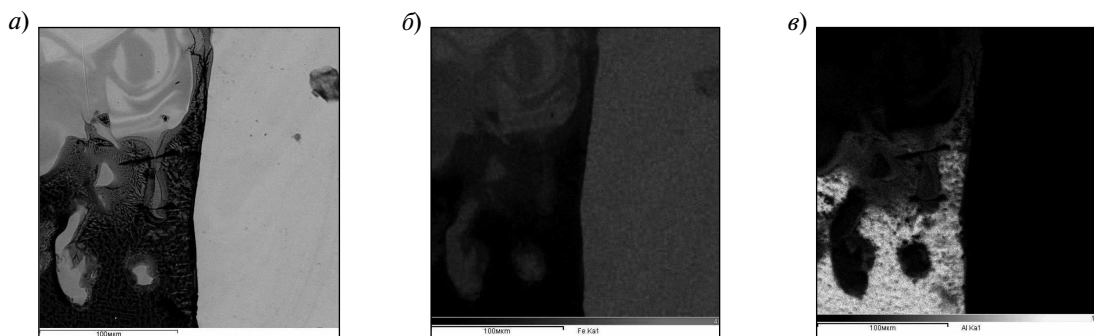


Рис. 3. Фотография капли (а), распределение железа (б) и алюминия (в)

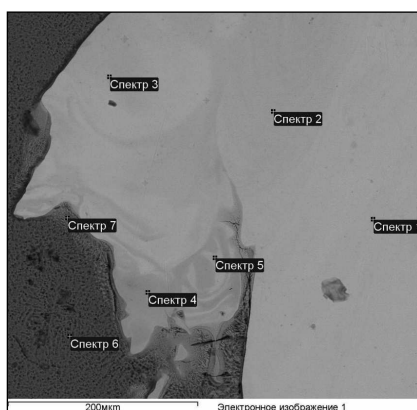


Рис. 4. Расположение спектров (точки 1–7) в области капли

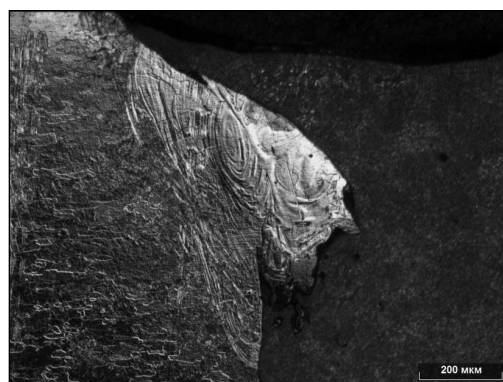


Рис. 5. Структура перемешивания («косое поле»)

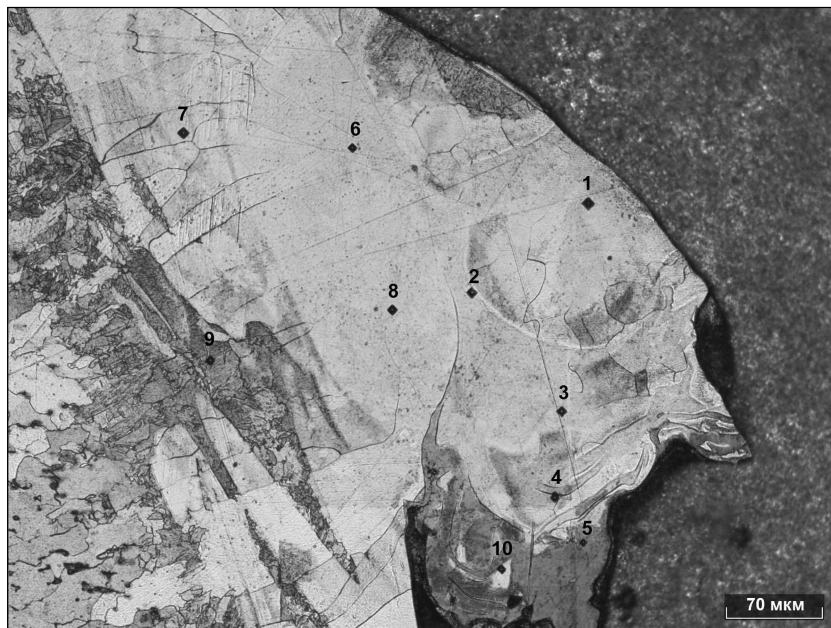


Рис. 6. Расположение в каплеподобной области участков (точки 1–10), где измерялась микротвердость

Результаты распределения железа и алюминия показывают, что перемешивание неравномерное; слоистой структуры не обнаруживается. О характере перемешивания и наличии областей с различным соотношением алюминия и железа свидетельствуют также микрофотография, сделанная в косом свете (рис. 5).

При подобном неравномерном перемешивании возможно образование интерметаллидов. Для косвенного определения наличия интерметаллидов в области перемешивания необходимо изучение твердости в различных участках каплеподобной области (рис. 6). Результаты измерений микротвердости на участках 1–10 следующие:

Номер участка	$HV_{0,01}$
1	154,3
2	162,6
3	178
4	190,5
5	261,1
6	215
7	147,2
8	172,9
9	143,3
10	206,1

Для возможности обнаружения интерметаллидной прослойки в средней и нижней зоне шва (рис. 7) был проведен поэлементный химиче-

ский анализ. Он дал следующие результаты по содержанию Al и Fe, %:

Номер спектра	Al	Fe
1	97,94	2,06
2	94,00	6,00
3	1,10	98,90
4	0,58	99,42

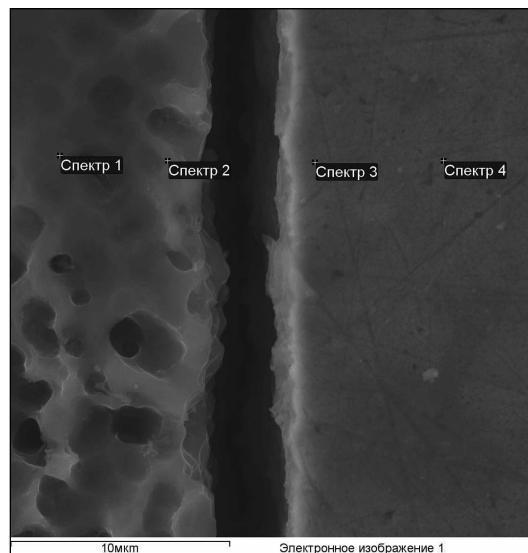


Рис. 7. Расположение спектров (точки 1–4) в нижней и средней зонах шва, где анализировался элементный состав

Согласно проведенному химическому анализу наличие интерметаллидных прослоек маловероятно. Однако механические испытания на подобных образцах показывают низкие значения предела прочности, что, вероятнее всего, связано с отлипанием во время сварки. Таким образом, в случае электронно-лучевой сварки стали и алюминиевого сплава требуется принятие новых технологических решений.

Анализ микроструктуры сварного соединения сталь — бронза

Согласно диаграмме бинарной системы Cu—Fe [8] в структуре сварного шва будет существовать смесь двух твердых растворов на основе меди и железа [10]. На рис. 8 представлена микроструктура шва, полученного по использованным режимам (см. табл. 1).

В верхней зоне шва обнаруживается область перемешивания. От средней зоны шва до его

корня происходило оплавление стали за счет эффекта Ребиндера [11]: проникновение медного сплава по границам зерен и микротрещинам вызвало оплавление стальных зерен в области ЗТВ. В зоне термического влияния (ее ширина составляет 170–190 мкм) сталь состоит из бейнитных зерен, при этом на всей протяженности ЗТВ присутствуют медные вкрапления; допустимая глубина затекания при стандартных методах сварки составляет 0,3–0,5 мм [10].

Для более наглядного представления степени перемешивания железа и меди было детально изучено распределение элементов в области сплавления стали и бронзы (рис. 9, а, б, в), а также определен химический состав в точках 1–5 (рис. 10). средней зоны шва. Результаты представлены в табл. 3.

В данной области можно наблюдать и линию сплавления, и непосредственное перемешивание обоих компонентов в жидком состоянии.

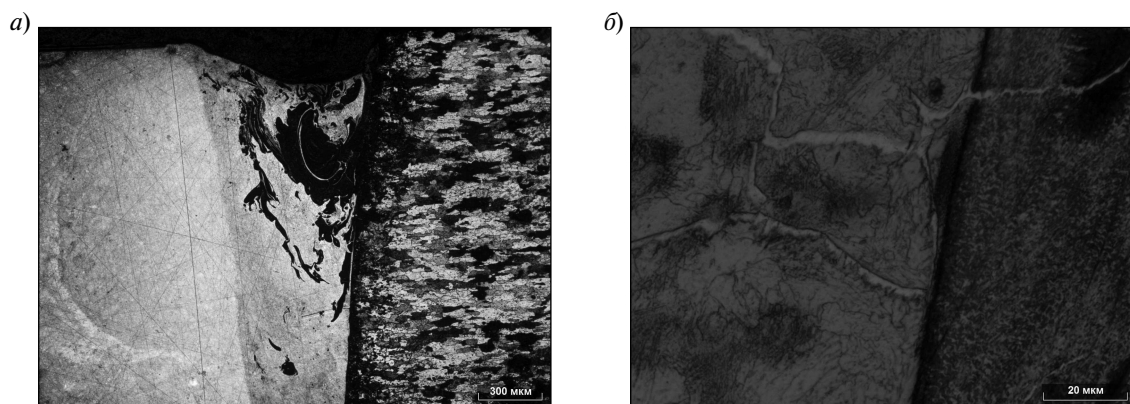


Рис. 8. Сварное соединение Cu—Fe при травлении бронзы (а) и линия сплавления в средней зоне шва (б)

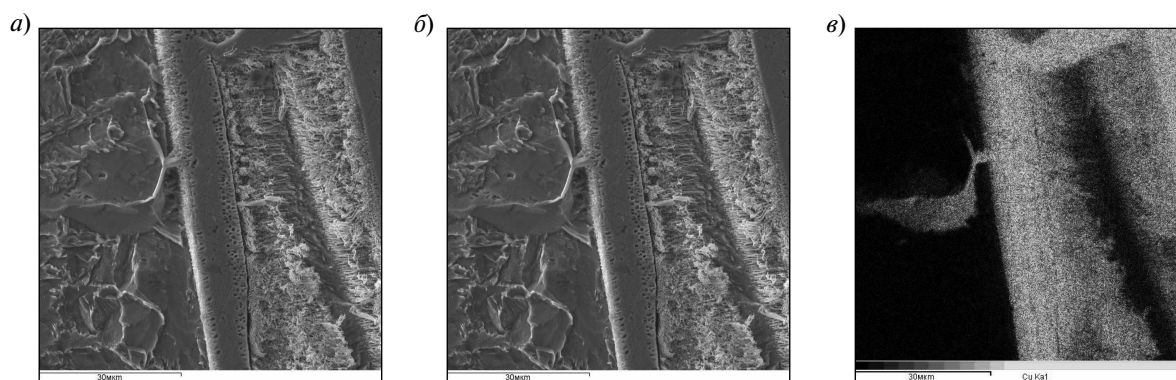


Рис. 9. Фотография линии сплавления (а) и распределение Cu (б) и Fe (в) в области линии сплавления



Исследование распределения элементов наглядно показывает образование микротрещин в области ЗТВ стали из-за перегрева и затекание более легкоплавкой медной составляющей с оплавлением стальных зерен. Медь была обнаружена также в микропорах ЗТВ. Анализ измерений микротвердости не показал скачков твердости в области перемешивания меди и железа ($240\text{--}250\text{ HV}_{0,01}$).

Обсуждение результатов

При сварке алюминия со сталью между ними практически всегда образуется четко выраженная прослойка, толщина которой составляет $10\text{--}40\text{ мкм}$ в зависимости от режима сварки. В работе [5] отмечено, что согласно рентгенофазовому анализу при лазерной сварке с использованием давления образуются наиболее хрупкие интерметаллиды FeAl_3 и Fe_2Al_5 ; при использовании рентгенофазового анализа для нашего образца было обнаружено наличие только двух фаз — железа и алюминия. Твердость указанных интерметаллидов составляет более 1000 HV . В нашем случае размер отпечатков составлял не более 5 мкм ; результаты измерения микротвердости показали отсутствие интерметаллидных прослоек; максимальная твердость составила $261,1\text{ HV}$. На твердость в области шва также оказывает влияние наличие бейнитных зерен. Однако даже при отсутствии интерметаллидов в области сварного соединения значения предела прочности при испытаниях на растяжение — низкие, что, вероятно, связано с отлипанием металла во время сварки. Подобная проблема требует принятия новых технологических решений при использовании ЭЛС для сварки сталей и алюминиевых сплавов.

В результате ЭЛС бронзы и стали в верхней зоне шва образуется область гидродинамического перемешивания глубиной $0,6\text{--}0,8\text{ мм}$. В средней зоне шва и ниже происходит оплавление медного сплава и частичное оплавление стали за счет протекания меди в микротрещины и по границам зерен, что действует, как залечивание дефектов, возникших при сварке. При измерении твердости резкого изменения значений не установлено. Глубина затекания бронзы не превышает допустимые $0,3\text{--}0,5\text{ мм}$. Проведенные исследования показывают удовлетворительное качество шва бронза — сталь.

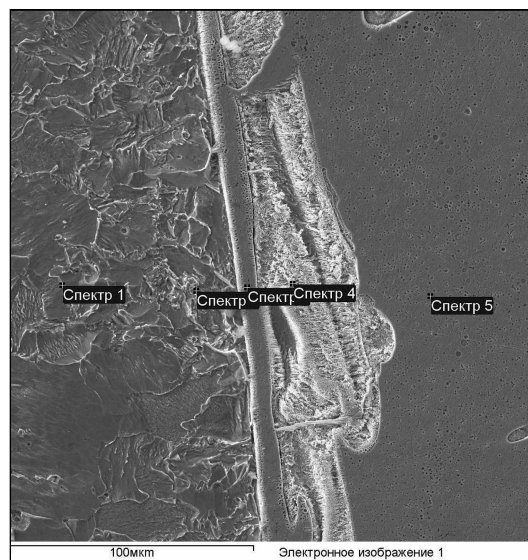


Рис. 10. Расположение точек (спектров) в области сплавления стали и бронзы

Исследования привели к следующим выводам:

При сварке алюминиевого сплава со сталью наблюдается перемешивание алюминия и железа в приповерхностной области шва. При исследовании микротвердости в различных участках каплеподобной области не обнаружена твердость, превышающая $261,1\text{ HV}_{0,01}$. В данном случае невозможно говорить об образовании непрерывных интерметаллидных прослоек, отличающихся хрупкостью. Наличие интерметаллидов также не обнаружено в области средней зоны сварного шва. Для повышения механических характеристик сварочного соединения требуется предложить новые технологические решения для ЭЛС разнородных материалов.

Таблица 3

Химический состав, %, сварного соединения в области линии сплавления

Номер спектра (точки)	Mn	Fe	Cu	Sn
1	0,27	99,73	0,00	0,00
2	0,23	99,04	0,73	0,00
3	0,22	21,05	74,78	3,95
4	0,00	2,98	91,60	5,42
5	0,00	4,27	90,61	5,12

Микроструктура сварного соединения бронза — сталь представляет собой двухфазную смесь железа и меди; отчетливо просматривается наличие гидродинамического вихря в верхней области шва. Твердость шва не превышает 250 $HV_{0,01}$. Наблюдается затекание бронзы по границам зерен стали и по микротрещинам на до-

пустимую глубину до 0,2 мм, что действует как залечивание дефектов в области шва.

Настоящая работа выполнена в рамках гранта РФФИ по программе МОЛ_а 2012, № 12–08–31376 (тема: «Особенности фазовых и структурных превращений при лазерной сварке разнородных материалов»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Каракозов, Э.С.** Холодная сварка труб [Текст] / Э.С. Каракозов, В.Д. Сапрыгин. — М., Металлургия, 1978. — 176 с.
2. **Rattana, B.** Feasibility of Using TIG Welding in Dissimilar Metals between Steel/Aluminum Alloy [Текст] / B. Rattana, M. Pusit, R. Sirirat, M. Yoshiharu // *Ener. Res. J.* — 2010. Vol. 1, № 2. — P. 82–86.
3. **Wang, J.** Fine structure at the diffusion welded interface of $Fe_3Al/Q235$ dissimilar materials [Текст] / J. Wang, Y. Li, H. Wu // *Bull. Mater. Sci.* — 2001. Vol. 24, № 6. — P. 639–642.
4. **Shubhvardhan, R.N.** Friction Welding to Join Dissimilar Metals [Текст] / R.N. Shubhvardhan, S. Suren-dran // *Int. J. of Emer. Tech. and Adv. Eng.* — 2012. Vol. 2, Iss. 7, P. 200–210.
5. **Saidaa, K.** Fluxless laser brazing of aluminium alloy to galvanized steel using atandem beam — dissimilar laser brazing of aluminium alloy and steels [Текст] / K. Saidaa, H. Ohnishia, K. Nishimoto, // *Weld. Int.I.* — Vol. 24, № 3, P. 161–168.
6. **Рябов, В.Р.** Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами [Текст] / В.Р. Рябов. — Киев: Наукова думка, 1983. — 264 с.
7. **Туричин, Г.А.** Компьютерный анализ процессов лучевой обработки материалов: система моделирования LaserCAD [Текст] / Г.А. Туричин, Е.А. Валдайцева // *Фотоника.* — 2008. № 6. — С. 18–20.
8. **Банных, О.А.** Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа [Текст] / О.А. Банных, П.Б. Будберг, С.П. Алисова [и др.]. М.: Металлургия, 1986. — 440 с.
9. **Klages, K.** Laser Beam Micro Welding Dissimilar Metals [Текст] / K. Klages, C. Ruettimann, A.M. Olowinsky. // *Proc of ICALEO 2003 of Laser Institute.* — America, Jacksonville, 2003.
10. **Рябов, В.Р.** Сварка разнородных материалов [Текст] / В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин. — М.: Машиностроение, 1984. — 239 с.
11. **Грачев, С.В.** Физическое металловедение [Текст]: учеб. для вузов / С.В. Грачев, В.Р. Бараз, А.А. Богатов, В.П. Швейкин. — Екатеринбург: Изд-во Уральского гос. техн. ун-та, 2001. — 534 с.

КЛИМОВА Ольга Геннадьевна — кандидат технических наук, инженер 1-й категории кафедры технологии и исследования материалов института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-06-27
paniolia@list.ru

ТУРИЧИН Глеб Андреевич — доктор технических наук, профессор кафедры сварки и лазерных технологий института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-06-27

ЛОПОТА Виталий Александрович — профессор, заведующий кафедрой сварки и лазерных технологий института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, член-корреспондент РАН.

195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-06-27

ШАМШУРИН Алексей Игоревич — младший научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-06-27

СИЗОВА Ирина Александровна — студентка 5 курса кафедры технологии и исследования материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-06-27

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013