

Исследование структуры и свойств трехслойных медно-стальных и медно-алюминиевых композитов, полученных по батарейной схеме сварки взрывом

В. А. Чувичилов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. В. Борцов

Приведен анализ структуры и свойств композиционных материалов, полученных по батарейной и плоскопараллельной схемам сварки взрывом.

Ключевые слова: композиционные материалы, сварка взрывом.

The analysis of structure and properties of the composite materials received on battery and planeparallel schemes of welding by explosion is resulted.

Key words: Composition material, explosion welding.

Введение

Медно-алюминиевые и медно-стальные двух- и трехслойные композиционные материалы нашли широкое применение на предприятиях энергетического комплекса [1 – 3 и др.]. Их использование в качестве переходных элементов и ножей разъединителей в силовых и высоковольтных коммутирующих и распределительных устройствах позволяет свести к минимуму потери электроэнергии, обеспечить ремонтпригодность и увеличить срок службы узлов и оборудования в целом.

Для изготовления медно-алюминиевых и медно-стальных композиционных материалов наиболее целесообразно применение сварки взрывом, позволяющей в силу ряда ее особенностей (чрезвычайно малое время формирования сварного соединения, в течение которого диффузионные процессы не успевают развиваться) получать равнопрочные и бездефектные соединения с минимально возможным переходным электросопротивлением.

Изготовление трехслойных композиционных материалов с симметричной двусторонней (сплошной или локальной) медной плакировкой, предназначенных в основном для производства ножей разъединителей силового коммутационного оборудования, с помощью сварки взрывом возможно по

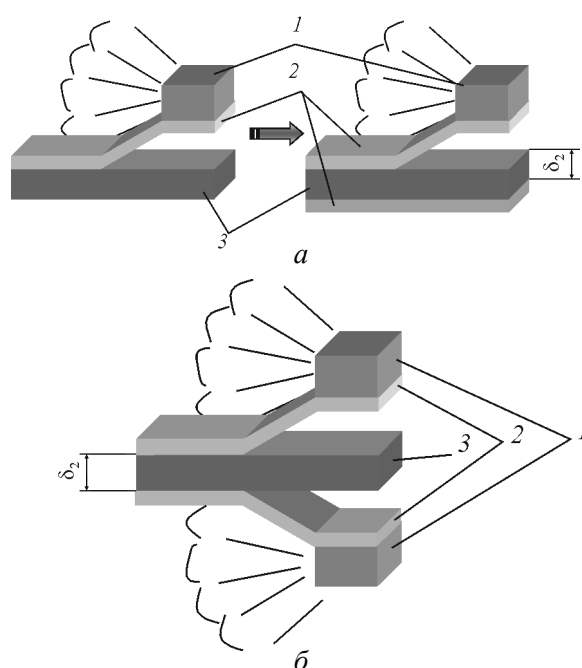


Рис. 1. Принципиальные схемы сварки взрывом трехслойного композита с двусторонней симметричной плакировкой: *a* — последовательное плакирование противоположных поверхностей материала основы; *б* — одновременное плакирование (батарейная схема); 1 — заряд взрывчатого вещества (ВВ); 2 — плакирующая пластина; 3 — плакируемая пластина (основа)

двум технологическим схемам [4] (рис. 1): последовательная наварка плакирующих слоев на противоположные поверхности заготовки-основы (рис. 1а) и одновременная сварка взрывом по батарейной схеме (рис. 1б). Последняя схема с точки зрения экономичности имеет явные преимущества, поскольку в этом случае из технологического процесса исключаются дополнительные трудоемкие операции промежуточной правки заготовки и ее термообработки для снятия наклепа. Однако, как было показано в [5 – 7], при сварке по батарейной схеме необходимо учитывать (особенно при плакировании тонколистовых материалов) возможность дополнительной активации деформационных процессов, протекающих на противоположных границах композита, за счет взаимодействия импульсов давления.

При этом, чем меньше толщина среднего элемента δ_2 (рис. 1), тем больше значение деформирующего импульса давления I_d и тем интенсивнее развиваются процессы пластического деформирования металла ОШЗ. А поскольку величина I_d определяет количество работы или энергии W_2 , затрачиваемой на пластическое деформирование металла, то упомянутый факт неизбежно приведет к росту энергозатрат, сопровождаемому значительным увеличением параметров волнового профиля и количества оплавленного металла по сравнению с соответствующими характеристиками зоны соединения, полученного по плоскопараллельной схеме на тех же режимах соударения.

Цель работы — исследование особенностей формирования соединения, структуры и свойств трехслойных композитов (медь – алюминий – медь и медь – сталь – медь), полученных по батарейной схеме, и оценка границ применимости последней при изготовлении композитов электротехнического назначения.

Для реализации этой цели были поставлены серии опытов по сварке взрывом композиционных материалов медь + сталь и медь + алюминий при различных схемах соударения (батарейной, плоскопараллельной), в которых при постоянных V_c и V_k изменялась толщина неподвижной пластины δ_2 .

Композит медь – сталь – медь

Данный трехслойный композит в энергетике применяется для изготовления ножей разъединителей типа РЛНД [8], рассчитанных на номинальный ток 200 – 630 А и напряжение 10 кВ. Как правило, толщина плакирующих медных слоев в композите составляет 0,8 – 1 мм при его суммарной толщине 4 мм. Такое сочетание толщин медных и стального слоев позво-

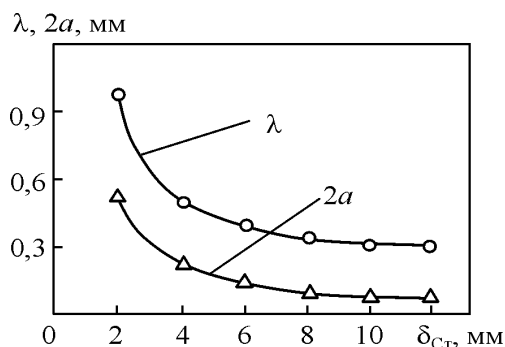


Рис. 2. Зависимость λ и $2a$ на границах трехслойного медно-стального композита от толщины $\delta_{ст}$ при сварке взрывом по батарейной схеме соударения: $V_c = 550$ м/с, $V_k = 2500$ м/с.

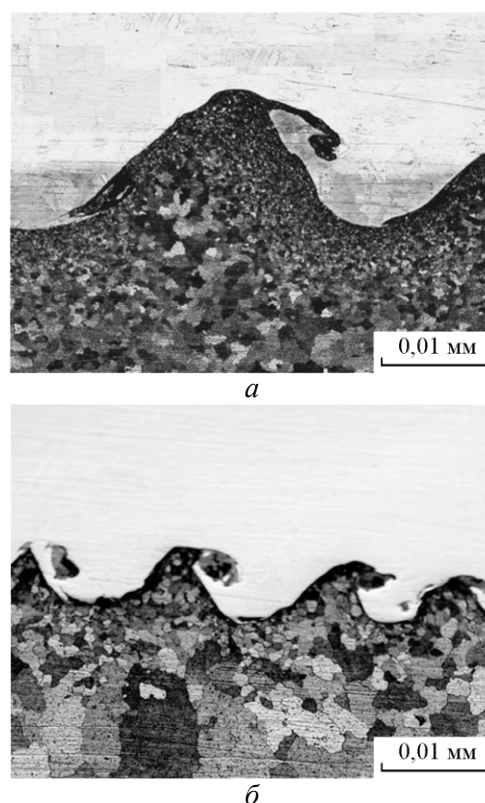


Рис. 3. Микроструктура зоны соединения медно-стального композита (медь сверху), полученного по батарейной (а) и плоскопараллельной (б) схемам сварки взрывом ($\delta_{ст} = 2$ мм).

ляет при сохранении высоких эксплуатационных свойств узла существенно снизить его себестоимость за счет экономии дорогостоящей меди.

В работах [9 – 11 и др.] показано, что соединение меди со сталью получают в широком диапазоне параметров соударения: скорость точки контакта $V_k = 2000 - 2800$ м/с, скорость соударения $V_c = 200 - 600$ м/с.

В наших опытах по сварке взрывом трехслойного медно-стального композита ($V_c = 550$ м/с, $V_k = 2500$ м/с) толщина медной метаемой пластины составляла $\delta_{Cu} = 1$ мм, а толщина стальной основы $\delta_{Ст}$ (δ_2) изменялась от 2 до 12 мм.

Установлено (рис. 2, 3а), что при применяемой в опытах минимальной толщине стальной основы $\delta_{Ст} = 2$ мм параметры волн (λ , $2a$), реализуемые в случае батарейной схемы, имеют максимальные значения ($\lambda = 1,1$ мм, $2a = 0,5$ мм), которые с увеличением толщины стальной основы резко уменьшаются и при $\delta_{Ст} \geq 10$ мм достигают минимума, составляя $\lambda = 0,3$ мм, $2a = 0,12$ мм.

Для плоскопараллельной схемы соударения на тех же режимах и при той же толщине $\delta_{Ст} = 2$ мм характерно образование волн с минимальными значениями $\lambda \approx 0,1$ мм и $2a \approx 0,04$ мм (рис. 3б).

Реализуемые при батарейной схеме чрезмерные размеры волн, соизмеримые с толщиной медного плакирующего слоя, при малой толщине средней стальной пластины ведет к их “выходу” на поверхность тонкой плакировки, что является неисправимым дефектом композиционного материала электротехнического назначения (несмотря на высокую прочность соединения слоев), существенно ухудшая контактные свойства изготавливаемой из него детали (рис. 4).

Уменьшить размеры образующихся в зоне трехслойного соединения волн теоретически возможно, соответствующим образом изменив условия соударения слоев. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что для уменьшения параметров волн до приемлемых значений ($2a = 0,1 - 0,2$ мм) при сварке по батарейной схеме необходимо снизить скорость соударения до 200 – 250 м/с. Последнее можно реализовать (при заданной толщине метаемой

медной пластины, равной 1 мм) лишь при весьма малых установочных зазорах (несколько десятых миллиметра) и высоте заряда, близкой к критической. При таких исходных условиях получить прочное соединение со стабильными свойствами в пределах всей площади заготовки практически невозможно [12].

Второй путь уменьшения размеров параметров волн при сварке по батарейной схеме — увеличение толщины стальной пластины, по крайней мере, до 4 – 6 мм с последующей холодной или горячей прокаткой полученного композита до требуемой толщины, что значительно удорожает его себестоимость.

Таким образом, единственно приемлемой и экономически выгодной технологией изготовления тонколистовых трехслойных медно-стальных заготовок ножей разъединителей является последовательное плакирование противоположных поверхностей стальной пластины-основы с промежуточными операциями правки и термообработки.

Композит медь – алюминий – медь

Область свариваемости меди с алюминием в отличие от большинства других пар материалов весьма узка. Построенная по многочисленным экспериментальным данным она представлена на рис. 5, из анализа которой следует, что получить равнопрочное соединение при “традиционных” скоростях контакта (2500 – 3000 м/с) можно лишь в ограниченном диапазоне углов соударения ($4,5 - 7^\circ$ для $V_k = 2,5$ км/с и всего $4 - 5^\circ$ при $V_k = 3$ км/с)* и энергии W_2 (0,15 – 0,4 МДж/м²). Диапазон свариваемости существенно расширяется при уменьшении скорости точки контакта и при $V_k = 2 - 2,2$ км/с прочные соединения гарантированно можно получить при $\gamma = 5 - 15^\circ$.

Характерным для рассматриваемой пары является наличие примыкающей к верхней границе довольно обширной области параметров, при которых прочность соединения на отрыв составляет 0,7 – 0,8 прочности алюминия (рис. 5) при весьма низкой прочности на срез и на отслаивание [13].

Другая особенность формирования сварного медно-алюминиевого соединения — аномально низкое значение критической величины энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию металлов $W_{2кр}$. Экспериментально установлено, что

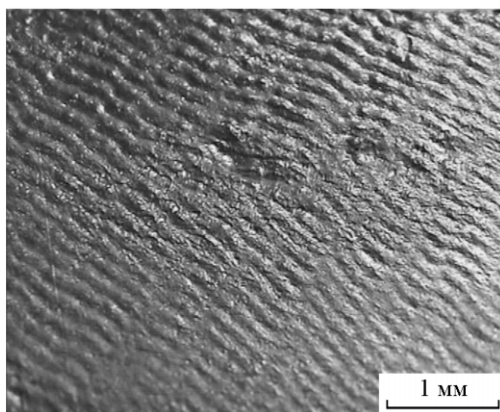


Рис. 4. Внешний вид поверхности трехслойного медно-стального композита, полученного по батарейной схеме сварки взрывом ($\delta_2 = 2$ мм)

*Для сравнения: диапазон углов соударения при сварке трудносвариваемой пары алюминий + сталь для тех же скоростей контакта гораздо шире и составляет соответственно $7 - 13^\circ$ и $6 - 9^\circ$ [7].

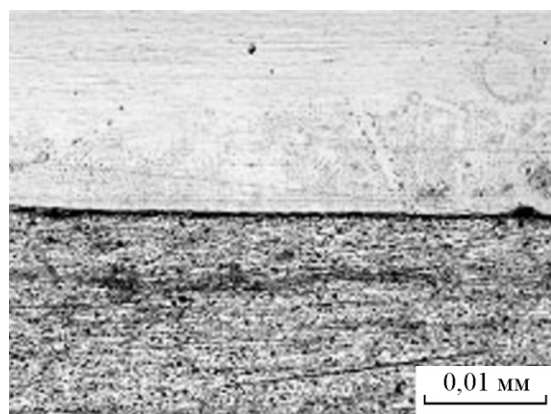
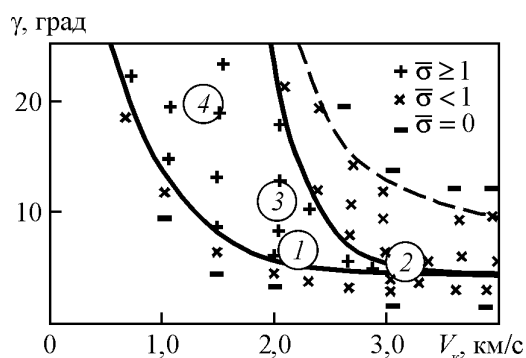


Рис. 6. Микроструктура зоны соединения медно-алюминиевого композита (рис. 5, зона 1).

прочное сварное соединение начинает образовываться уже при $W_2 > 0,1 - 0,12$ МДж/м².

Равнопрочные соединения, полученные на режимах, ограниченных верхней и нижней границами сварки (рис. 5), существенно разнятся по структуре зоны соединения, в зависимости от чего область свариваемости меди с алюминием условно можно разделить на несколько характерных зон или участков. В пределах зоны 1 (рис. 5), примыкающей к нижней границе области свариваемости ($W_2 = 0,15 - 0,2$ МДж/м²), линия раздела слоев композита имеет прямолинейный профиль и бездефектную структуру (рис. 6). Протяженность этой зоны по скорости точки контакта ограничивается значениями 1000 – 2400 м/с.

Переход в зону 2 с увеличением V_k до ~3 км/с (даже при минимально возможных углах соударения) ведет к образованию в соединении отдельных участков оплавленного металла (рис. 7а), относительная протяженность которых достигает 50%, что связано, как было показано в [14], с локализацией пластических

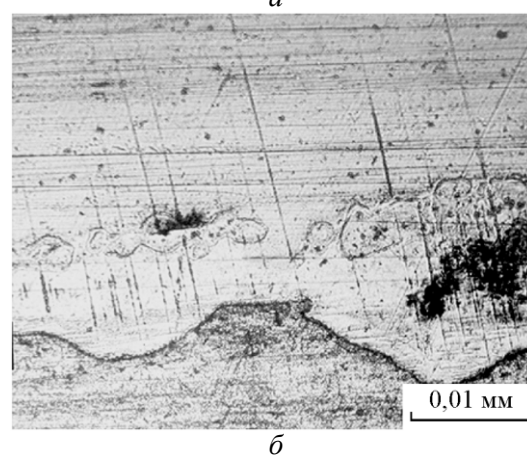
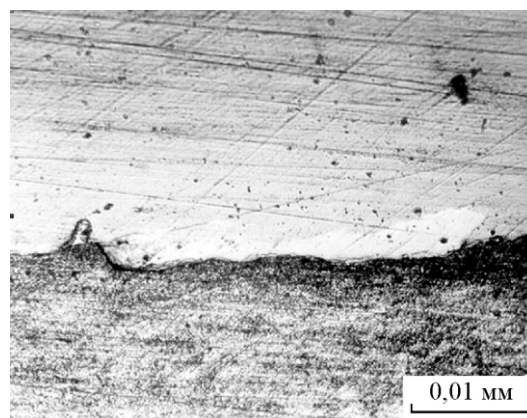


Рис. 7. Микроструктура зоны соединения медно-алюминиевого композита (рис. 5, зона 2): а – $V_k = 3000$ м/с; б – $V_k = 3500$ м/с.

деформаций в узкой околошовной зоне. При V_k больше ~3 км/с в околошовной зоне медно-алюминиевых образцов формируется сплошная прослойка расплава (рис. 7б) толщиной 0,1 – 0,2 мм, имеющая высокую микротвердость $H_{010} = 1600 - 4500$ МПа, что соответствует твердости интерметаллидов типа $CuAl_2$, Cu_2Al , Cu_3Al .

При увеличении энергоснабжения W_2 до 0,3 и выше (рис. 5, зона 3) в приконтактной области композиции образуются волны неправильной, несинусоидальной формы (рис. 8) с заостренными вершинами со стороны алюминия, ориентированными в противоположном процессе распространения детонации направлению. Для такого профиля характерно наличие вихревых зон, располагающихся над впадинами волн, и одностороннее залегание оплава с высокой микротвердостью.

Снижение скорости точки контакта с одновременным увеличением скорости или угла соударения (рис. 5, зона 4) приводит к “нормализации” процесса



Рис. 8. Микроструктура зоны соединения медно-алюминиевого композита (рис. 5, зона 3).



Рис. 9. Микроструктура зоны соединения медно-алюминиевого композита (рис. 5, зона 4).

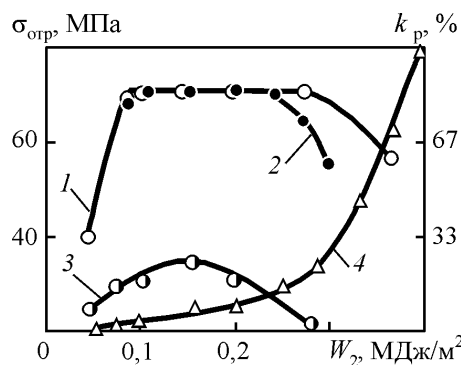


Рис. 10. Зависимость прочности $\sigma_{отр}$ медно-алюминиевого биметалла (1 – 3) и количества оплавленного металла k_p (4) от W_2 [7]: 1, 4 – $V_k = 1600$ м/с; 2 – $V_k = 2000$ м/с; 3 – $V_k = 3200$ м/с.

образования волн, профиль которых становится близким к синусоидальному, без завихрений, но также с односторонним залеганием участков оплавленного металла (рис. 9).

На основе обобщения многочисленных экспериментальных данных были построены зависимости, связывающие прочность медно-алюминиевых композиций, а также количество оплавленного металла с энергией, затрачиваемой на пластическую деформацию (рис. 10). Очевидно, что предельные энергозатраты на пластическую деформацию для данной пары материалов зависят от V_k (рис. 10, кривые 1 и 2). Кроме того, сопоставляя ход кривых 1 и 4, построенных для одной скорости точки контакта,

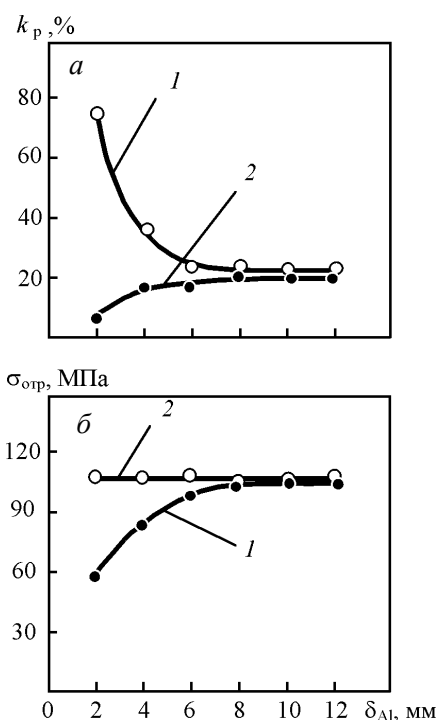


Рис. 11. Зависимость количества оплавок k_p (а) на границах медно-алюминиевого композита и прочности соединения слоев $\sigma_{отр}$ (б) от толщины $\delta_{Ал}$ при сварке взрывом по батарейной (1) и плоскопараллельной схемам соударения (2).

можно сделать вывод, что соединение начинает терять прочность при суммарной относительной протяженности оплавленного металла в шве более 30%.

С учетом предварительно полученных экспериментальных данных (рис. 5 – 10) для сварки взрывом трехслойного медно-алюминиевого композита по схеме, представленной на рис. 1б, в котором толщина медной плакировки составляла $\delta_{Cu} = 2,5$ мм, режимы принимали, исходя из условия обеспечения минимальных энергозатрат в зоне соединения [7, 12], при котором гарантировано получение высокопрочного композита с минимальным развитием структурной неоднородности на границе раздела слоев ($V_k = 2450$ м/с, $V_c = 240$ м/с). В опытах при постоянных выбранных значениях V_k и V_c варьировали толщину алюминиевого слоя δ_2 (δ_{Al}). По результатам опытов строили зависимости, связывающие δ_{Al} с прочностью на отрыв слоев и количеством оплавленного металла в зоне соединения. Для сравнения на тех же режимах получали медно-алюминиевый биметалл по плоскопараллельной схеме (рис. 1б).

Сопоставлена относительная протяженность участков оплавленного металла в медно-алюминиевых композициях, полученных по плоскопарал-

лельной и батарейной схемам, показало, что при выбранных режимах сварки максимальное количество оплава, существенным образом влияющего на прочностные и особенно на электрофизические свойства данного композита [7, 15, 16], образуется в последнем случае (батарейная схема) при толщине среднего алюминиевого слоя $\delta_{Al} = 2$ мм (рис. 11а, 12а). Это вполне закономерно и согласуется с положениями, изложенными в работах [5–7, 12]. При такой же толщине алюминиевого слоя в двухслойном композите, полученном по плоскопараллельной схеме, формируется практически “чистая”, свободная от расплавов граница раздела слоев (рис. 12б) с высокой прочностью на отрыв (рис. 11б).

Увеличение δ_{Al} в трехслойном композите приводит к резкому снижению $K_{опл}$ и при толщине алюминиевого среднего слоя, равного 8 мм, стабилизируется, не превышая при дальнейшем неограниченном возрастании $\delta_{Al} \sim 20\%$ (рис. 11а, кривая 1). Приблизительно такое же количество оплавленного металла наблюдается в образцах, сваренных по

плоскопараллельной схеме плакирования (рис. 11а, кривая 2).

Из анализа полученных экспериментальных зависимостей $\sigma_{отр} = f(\delta_2)$ (рис. 11б) следует также, что трехслойный композит, полученный по батарейной схеме, становится равнопрочным, начиная лишь с $\delta_{Al} = 8$ мм, когда количество оплавленного металла на границе раздела слоев не превышает 25–30%.

Учитывая, что трехслойный медно-алюминиевый композит, полученный по батарейной схеме, приобретает высокие прочностные и электрофизические (связанные с количеством оплавленного металла в зоне соединения) свойства начиная с толщины алюминиевого слоя $\delta_{Al} = 8$ мм, с одной стороны, а также то обстоятельство, что для оснащения высоковольтных разъединителей типа РВЗ (Р — разъединитель, В — внутренней установки, З — наличие заземлителей) применяют ножи толщиной не менее 12 мм, — с другой, применение схемы одновременного симметричного плакирования в данном случае вполне оправданно и рационально.

Выводы

Экспериментально показано, что структура и свойства композиционных материалов, полученных по батарейной схеме сварки взрывом, могут существенно образом отличаться от аналогичных показателей биметалла, сваренного по традиционной плоско-параллельной схеме. Особенно сильно это различие проявляется при плакировании относительно тонких слоев основного металла. При увеличении толщины материала основы различие нивелируется и при превышении некоторого значения δ_2 свойства и структура композитов, полученных по разным схемам, становятся одинаковыми. Это обстоятельство необходимо учитывать при обосновании выбора рациональной схемы сварки взрывом трехслойных медно-стальных и медно-алюминиевых композиционных материалов электротехнического назначения.

Литература

1. Лысак В.И., Кузьмин С.В., Долгий Ю.Г. и др. Новые биметаллические переходные элементы для силовых электрических цепей. Энергетик, 1995, № 4, с. 7–10.
2. Кузьмин С.В., Лысак В.И., Чугунов Е.А. и др. Энергосберегающие композиционные элементы токоподводящих узлов силовых электрических цепей. Энергетик, 2001, № 9, с. 13–14.
3. Лысак В.И., Седых В.С., Кузьмин С.В. и др. Сварка металлов взрывом. Композиционные материалы XXI века. Наука производству, 2000, № 1, с. 12–17.

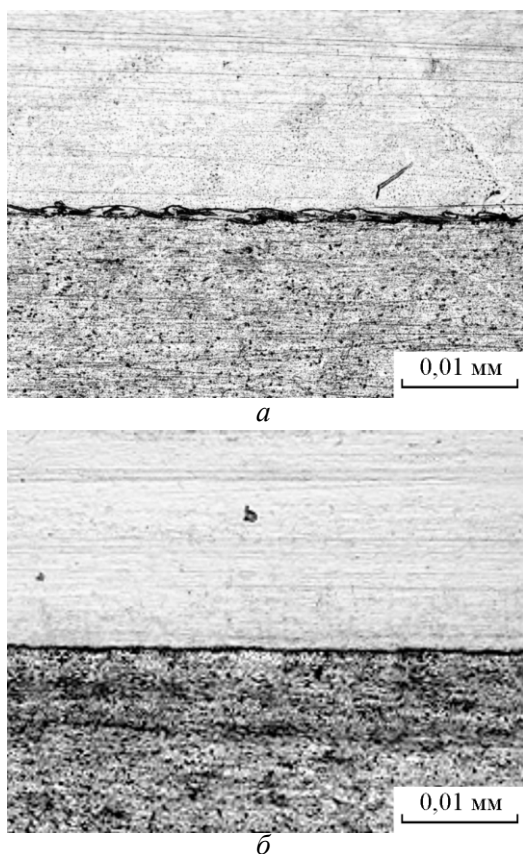


Рис. 12. Микроструктура зоны соединения медно-алюминиевого композита (медь сверху), полученного по “батарейной” (а) и плоскопараллельной (б) схемам сварки взрывом ($\delta_{Al} = 2$ мм).

4. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Классификация технологических схем сварки металлов взрывом. Сварочное производство, 2002, № 9, с. 33 – 39.
5. Чувичилов В.А., Лысак В.И., Кузьмин С.В., Долгий Ю.Г. К вопросу о времени формирования соединения при сварке металлов взрывом. Перспективные материалы, 2003, № 3, с. 89 – 94.
6. Кузьмин С.В., Чувичилов В.А., Лысак В.И. Временные условия формирования соединения при сварке взрывом. Перспективные материалы, 2005, № 1, с. 85 – 91.
7. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. М.: Машиностроение–1, 2005, 544 с.
8. Афанасьев В.В., Якунин Э.Н. Разъединители. Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979, 216 с.
9. Крупин А.В., Соловьев В.Я., Шефтель Н.И., Кобелев А.Г. Деформация металлов взрывом. М.: Металлургия, 1976, 416 с.
10. Конон Ю.А., Первухин Л.Б., Чудновский А.Д. Сварка взрывом. М.: Машиностроение, 1987, 216 с.
11. Кудинов В.М., Коротеев А.Я. Сварка взрывом в металлургии. М.: Металлургия, 1978, 168 с.
12. Чувичилов В.А., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Энергетические условия сварки взрывом слоистых композиционных материалов. Автоматическая сварка. 2007, № 3, с. 8 – 11.
13. Кобелев А.Г., Лысак В.И., Чернышов В.Н. и др. Производство слоистых композиционных материалов. М.: Интермет Инжиниринг, 2002, 426 с.
14. Пеев А.П., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Распределение температуры в околошовной зоне при сварке разнородных металлов взрывом. Автоматическая сварка, 2004, № 4, с. 9 – 12.
15. Пеев А.П., Поляков С.В., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Новая методика исследования электрофизических свойств сваренных взрывом композитов. Физика и химия обработки материалов, 2003, № 3, с. 60 – 63.
16. Седых В.С., Смелянский В.А., Хрипунов В.А., Еронов О.Н. Исследование электрофизических характеристик сваренных взрывом биметаллических соединений. Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. трудов. ВолгПИ, Волгоград, 1989, с. 13 – 22.

Чувичилов Виктор Анатольевич — Волгоградский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. Специалист в области сварки металлов взрывом. E-mail: weld@vstu.ru.

Кузьмин Сергей Викторович — Волгоградский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. Специалист в области сварки металлов взрывом. E-mail: weld@vstu.ru.

Лысак Владимир Ильич — Волгоградский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор, первый проректор-проректор по НИР ВолгГТУ, заведующий кафедрой. Специалист в области сварки металлов взрывом. E-mail: lysak@vstu.ru.

Борцов Александр Валерьевич — Волгоградский государственный технический университет, магистрант.