

УДК 621.791.76: 621.7.044.2

В. И. Кузьмин, О.В. Строков, В. И. Лысак, А.Н. Кривенцов

## ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО СТАЛЕАЛЮМИНИЕВОГО МАТЕРИАЛА С ДИФфуЗИОННЫМ БАРЬЕРОМ, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

Волгоградский государственный технический университет

Одним из преимуществ сварки взрывом является возможность получения не только высококачественных биметаллов и композиционных материалов, но и деталей сложной формы и конфигурации, с различным сочетанием слоев и толщин. Особенно это относится к получению биметаллов из разнородных материалов с резко отличающимися физико-механическими свойствами, таких как алюминий-сталь, алюминий-медь, титан-сталь и других, которые склонны к образованию хрупких интерметаллидов, резко снижающих прочность соединения [1].

Композиционные сталеалюминиевые материалы, полученные сваркой взрывом, широко применяются в цветной металлургии в токоподводящих устройствах алюминиевого электролизера благодаря их высоким эксплуатационным свойствам, прежде всего стабильной высокой прочности по всей площади соединения и практически нулевым переходным электросопротивлением [2-4]. Нормальная эксплуатации данного переходника ограничивается температурой не более 200-250 С, т.к. нагрев выше этой температуры приводит к диффузионным процессам и образованию на границе соединения алюминия со сталью ряда химических соединений вида  $Fe_nAl_m$  (рис.1), имеющих высокую твердость, высокое электросопротивление, низкую механическую прочность и пластичность [5]. Однако последующая сварка плавлением и длительная

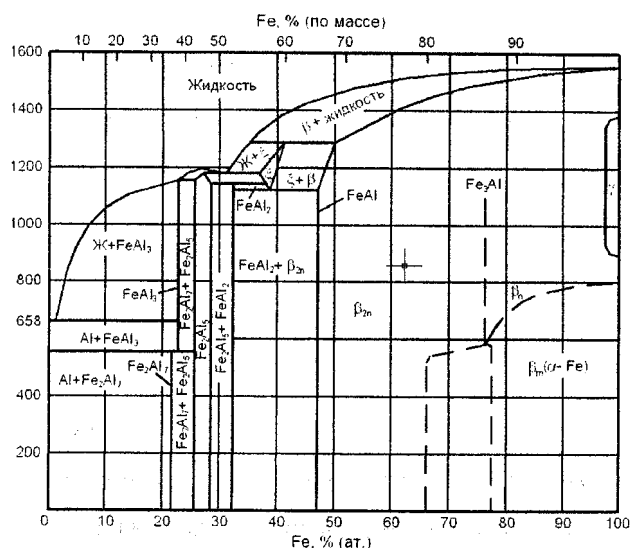


Рис. 1. Диаграмма состояния Fe-Al

эксплуатация переходника при повышенных температурах, что связано прежде всего с изношенностью металлургического оборудования и перегрузками мощной электрической цепи (рабочий ток более 130 кА), могут привести к образованию на границе сварного соединения сплошной интерметаллидной прослойки, потерям электроэнергии, резкому снижению прочности и даже разрушению анодного узла.

Для повышения термостойкости композита за счет торможения протекания диффузионных процессов между свариваемыми элементами вводятся различные прослойки, которые выполняются как из моно так и из биметаллов, не образующих интерметаллидов с исходными материалами [6-8], а также вводятся специальные прослойки, получаемые с помощью гальванических покрытий [8] и термохимической обработки (азотирования стали) [9].

Однако, введение таких прослоек, как правило, требует применения дорогостоящих цветных металлов, кроме этого значительно усложняется сборка схемы и требуется дополнительная длительная операция для термической правки прослойки.

Целью данной работы являлась разработка высокоэффективного способа повышения термостойкости сваренного взрывом композиционного сталеалюминиевого материала и исследование свойств полученных соединений.

На основе анализа результатов проведенных исследований был разработан высокоэффективный способ получения с помощью сварки взрывом толстолистового композиционного сталеалюминиевого материала с диффузионным барьером [10]. Диффузионный

барьер обеспечивался за счет создания на свариваемой стальной поверхности тонкого азотированного слоя толщиной 0,4 - 0,6 мм. Азотирование поверхностного слоя стали производили в заводских условиях при температуре нагрева 600 °С и выдержке в аммиачной среде 24 часа. Следует также отметить, что разработанный новый способ получения композиционного сталеалюминиевого материала позволил не только существенно затормозить протекание диффузионных процессов между алюминием и сталью и сместить температурный интервал начала их протекания в область более высоких температур, но и повысить коррозионную стойкость переходника, предназначенного для работы в агрессивной среде при повышенных температурах. С целью оценки термостойкости сваренного

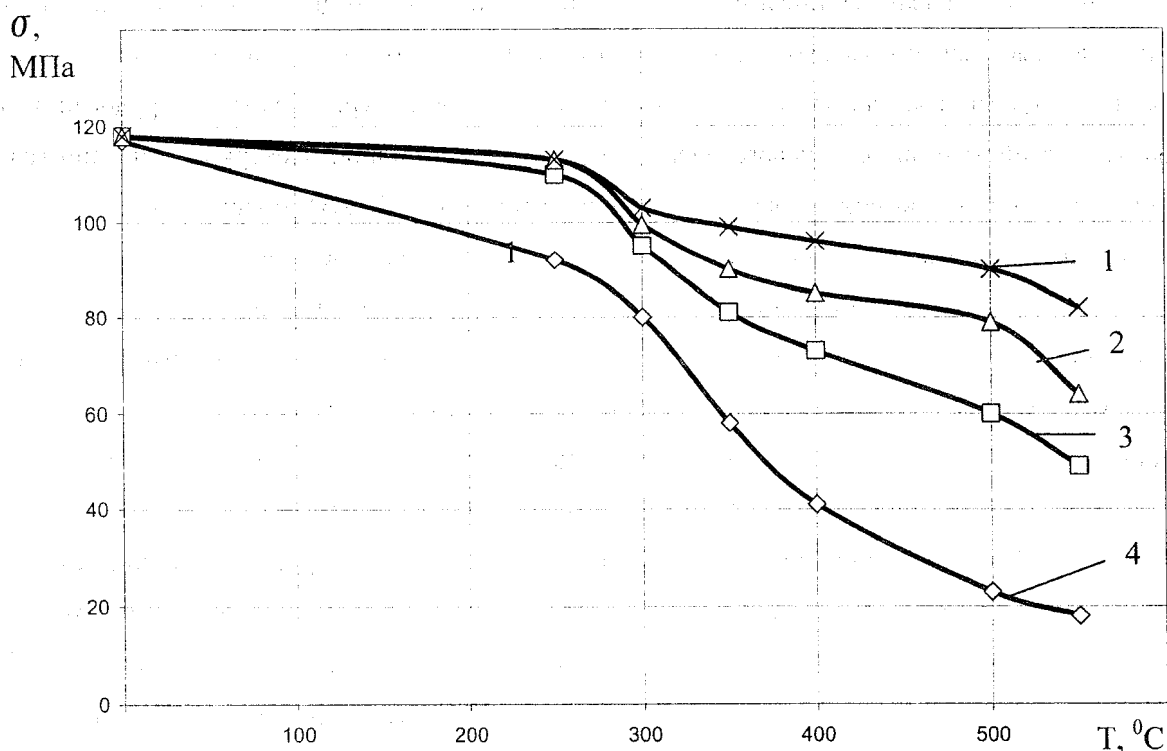


Рис. 2. Влияние температуры нагрева и времени выдержки на прочность композиционного материала.  
1 – азотированный выдержка 1 ч; 2 – азотированный выдержка 5 ч;  
3 – азотированный выдержка 10 ч; 4 – исходный выдержка 10 ч;

взрывом сталеалюминиевого композита с азотированным диффузионным барьером производили нагрев образцов в интервале температур от 250 °С до 550 °С с выдержкой 1, 5 и 10 час. Полученные результаты исследований показали, что создание на стальной поверхности тонкого азотированного слоя позволило существенно затормозить диффузионные процессы и сохранить работоспособное равнопрочное соединение при температуре нагрева до 500 °С, в то время как в сваренных взрывом не термообработанных сталеалюминиевых образцах прочность соединения резко снижалась до 20 МПа (рис. 2). Исследование микроструктур зон соединения показало, что снижение прочности не термообработанных сталеалюминиевых образцов объясняется наличием на границе соединения алюминия со сталью хрупкой интерметаллидной прослойки толщиной (рис. 3а), образовавшейся в результате высокотемпературного воздействия и протекания диффузионных процессов. В образцах Al + Ст.3 с азотированным слоем интерметаллидная прослойка отсутствовала (рис. 3б), что связано с образованием на границе раздела

тонкой пленки нитрида алюминия AlN, которая существенно тормозит процессы диффузии и создает условия для получения мягкого биметалла [6].

Исследование распределения микротвердости на границе раздела алюминия со сталью показало, что после сварки взрывом значение микротвердости для сталеалюминиевых образцов с азотированным слоем немного выше по сравнению с не термообработанными сталеалюминиевыми образцами. При этом по мере приближения к границе контакта алюминия со сталью в образцах Al + Ст.3 с азотированным слоем значение микротвердости увеличилось с 180 до 290 МПа, а в не термообработанных образцах Al + Ст.3 значение микротвердости увеличилось с 205 до 250 МПа (рис.4).

Замеры микротвердости непосредственно оплавленных участков показали, что после сварки взрывом у не термообработанных сталеалюминиевых образцов она составляла около 4000...4500 МПа, а у сталеалюминиевых образцов с азотированным слоем значение микротвердости было намного больше и составляло 8000...8500 МПа, что связано с образованием

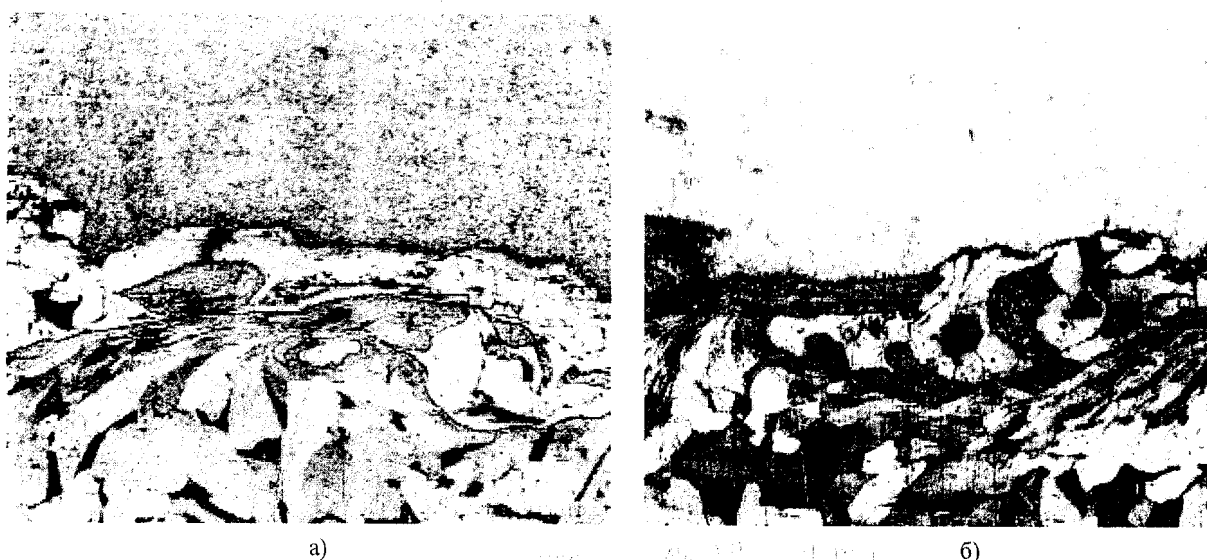


Рис. 3. Зона соединения композиционного материала Al + Ст.3, полученного сваркой взрывом  
а) – Al + Ст.3, б) – Al + Ст.3 (азотированная)

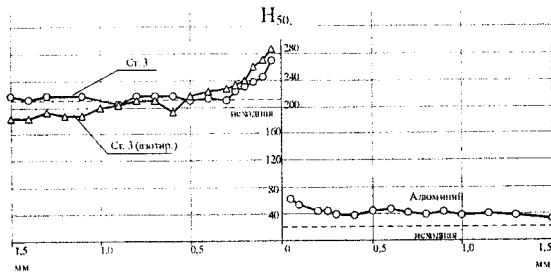


Рис. 4. Влияние термохимической обработки на распределение микротвердости композиционного материала Al + Ст.3

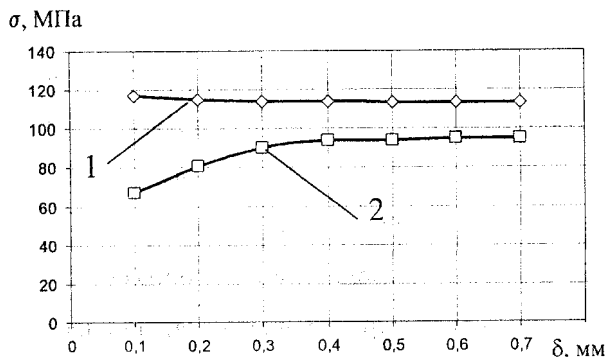


Рис. 5. Влияние толщины азотированного слоя на прочность композиционного материала Al + Ст.3  
1 — после сварки, 2 — после сварки и термообработки (500 °С, t=10 ч)  
 $\rho_l, \text{ Ом} \times \text{мм}^2 \cdot 10^{-6}$

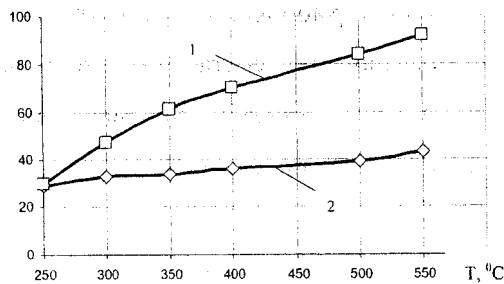


Рис. 6. Зависимость удельного переходного электросопротивления  $\rho_l$  пары Al + Ст.3 после термообработки:  
1 — исходный, 2 — азотированный.

твердого раствора на основе нитридов железа  $\text{Fe}_4\text{N}$ ,  $\text{Fe}_3\text{N}$  и  $\text{Fe}_2\text{N}$ , имеющих высокую микротвердость [11].

Анализ результатов проведенных исследований показал, что оптимальная толщина азотированного слоя составляет 0,4 - 0,6 мм, что позволяет обеспечить надежный диффузи-

онный барьер при термическом воздействии на сталеалюминиевый композит (рис.5). При выполнении азотированного слоя меньшей толщины и последующего нагрева сваренного взрывом композита происходит снижение прочности сварного соединения вследствие частичного выноса такого очень тонкого азотированного слоя за счет кумулятивного эффекта и перемешивания его с соединяемыми металлами в результате их высокоскоростного деформирования. Увеличивать толщину азотированного слоя нецелесообразно экономически, т.к. это приведет к существенному увеличению времени термохимической обработки стали и дополнительным расходам аммиака и электроэнергии. Как показали многочисленные эксперименты, наличие тонкого азотированного слоя на стальной поверхности практически не влияет на прочность сваренного взрывом сталеалюминиевого соединения.

Одним из основных требований, предъявляемых при эксплуатации композиционных переходников, является наличие низкого переходного сопротивления. Поэтому был проведен комплекс электрофизических исследований и натурных испытаний по изучению свойств полученных сталеалюминиевых соединений. Определение переходного электросопротивления зоны контакта алюминия со сталью осуществляли по методике [12], основанной на непосредственном измерении падения напряжения в образцах "П"-образной формы при пропускании через них постоянного тока, разница заключалась лишь в том, что в наших исследованиях образцы выполнялись "Z"-образными. Натурные испытания проводились на действующих электролизерах ОАО «Волгоградский алюминий» путем измерения падения напряжения в токо-

подводящих анодных узлах базовой и разработанной новой конструкции [13].

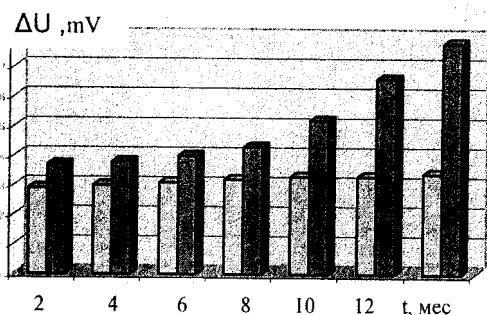


Рис.7. Сравнительные данные измерения перепада напряжения  $\Delta U$  на ОАО «Волгоградский алюминий»  
 ■ – Новая конструкция анодного узла  
 ■ – Базовая конструкция анодного узла

Электрофизические исследования показали, что термостойкость стале-алюминиевых образцов с диффузионным барьером из азотированного слоя значительно выше по сравнению с нетермообработанными сталеалюминиевыми образцами. Так, после нагрева при  $T = 500^{\circ}\text{C}$  у образцов А1 + Ст.3 с азотированным слоем единичное переходное электросопротивление составляло  $30...40 \text{ мкОм}\cdot\text{мм}^2$ , а у нетермообработанных образцов А1 - Ст.3 электросопротивление было намного выше и составляло  $80...90 \text{ мкОм}\cdot\text{мм}^2$  (рис. 6).

Замеры перепада напряжения в токоподводящих анодных узлах электролизеров на ОАО «Волгоградский алюминий» показали, что применение полученного сваркой взрывом композиционного сталеалюминиевого переходника с диффузионным барьером из азотированного слоя позволяет уменьшить потери электроэнергии более чем в 3-4 раза по сравнению с базовой конструкцией токоподводящего анодного узла (рис. 7).

Таким образом, на основе анализа результатов проведенных исследований и испытаний

разработан новый высокоэффективный надежный способ получения с помощью сварки взрывом толстолистового композиционного сталеалюминиевого переходника, позволяющий значительно повысить термостойкость композита за счет создания диффузионного барьера из азотированного слоя, а также повысить долговечность и существенно снизить переходное электросопротивление и тем самым значительно уменьшить потери электроэнергии в токоподводящих анодных узлах.

#### Библиографический список

1. Дерibas А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. - Новосибирск: Наука, 1980.-224с.
2. Обработка металлов взрывом / Крупин А.В., Соловьев В.А., Попов Г.С., Кръстев М.Р. - М: Металлургия, 1991. -496 с.
3. Применение сварки взрывом при изготовлении токоведущих узлов электролизеров для производства алюминия / Кузьмин В.И., Яковлев М.А., Лысак В.И., Кривенцов А.Н. // Сб. докл. международной конференции «Слоистые композиционные материалы - 2001». - Волгоград: ВолгГТУ, 2001, с.306-308.
4. Технико-экономическая эффективность внедрения новых конструкций композиционных токоподводов электролизера алюминия / Пеев А.П., Долгий Ю.Г., Лысак В.И. и др. // Вестник машиностроения, 2004, № 6, с.77-80.
5. Рябов В.Р. Применение биметаллических и армированных сталеалюминиевых соединений. -М.: Металлургия, 1975. -288 с.
7. Кудинов В.М., Коротеев А.Я. Сварка взрывом в металлургии. - М.: Металлургия, 1976. - 155 с.
8. Захаренко И.Д. Сварка металлов взрывом. - Минск: Наука и техника, 1990. -205с.
9. Горанский Г.Г., Демьянович Л.Б. Влияние параметров сварки взрывом на строение и коррозионную стойкость переходных зон сталеалюминиевых композиций // Сб. науч. ст. «Применение энергии взрыва в сварочной технике». -Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1985, с.32-36.
10. Патент РФ № 2194600 от 08.01.2002. Способ получения композиционного сталеалюминиевого переходника сваркой взрывом. Кузьмин В.И., Лысак В.И., Кривенцов А.Н. и др.
11. П.Лахтин Ю.М., Коган Я.Д. Азотирование стали. -- М.: Машиностроение, 1976.--256с.
- 12.Методика исследования электрофизических свойств сваренного взрывом медно-алюминиевого композита / Пеев А.П., Лысак В.И., Кузьмин С.В. и др. // Межвузовский сб. науч. тр. «Сварка взрывом и свойства сварных соединений». - Волгоград: ВолгГТУ, 2000, с.123-127.
13. Патент РФ № 2170289 от 27.07.2000. Анодный штырь алюминиевого электролизера. Кузьмин В.И., Лысак В.И., Кривенцов А.Н. и др.