

В. Г. ЗАГОРЯНСКИЙ, Л. Э. ДИКАЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕДНО-АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАКИРОВАНИЕМ ВЗРЫВОМ

В статье исследованы электрические свойства медно-алюминиевых композиций, полученных плакированием взрывом. Получена закономерность влияния отношения толщин слоев биметалла на его удельное электрическое сопротивление. Удельное электрическое сопротивление данного биметалла с отношением толщин слоев меди к алюминию 0,2...0,5 находится между значениями этого параметра для меди и алюминия. Разность между теоретическими и экспериментальными значениями удельного электрического сопротивления при увеличении толщины биметалла возрастает. С увеличением доли плакирующего слоя меди в общей толщине биметалла теоретическое удельное электрическое сопротивление биметалла монотонно понижается, тенденция уменьшения экспериментальных значений также в основном сохраняется, кроме случаев максимальной толщины биметалла.

Ключевые слова: медно-алюминиевый биметалл, плакирование взрывом, отношение толщин слоев, удельное электрическое сопротивление

Введение. Одним из основных направлений производства и потребления биметаллов традиционно являются проводниковые и контактные биметаллы на основе меди, алюминия и других металлов и сплавов [1].

В биметалле медь-алюминий основной слой выполняется из более дешевого алюминия и, имея большую, чем медный плакирующий слой, толщину, выполняет функцию силового элемента. Плакирующий слой из более дорогой и дефицитной меди имеет несколько более высокую электропроводность (в 1,52...1,64 раза) [2]. Таким образом, данный биметалл в силу сочетания в нем двух проводящих слоев эффективен как проводник. При этом благодаря поверхностному эффекту, даже при невысокой доле медного слоя в толщине биметалла, обеспечивается высокая проводимость биметалла и его экономичность.

Основными материалами контактных соединений (мест соединения шин между собой, а также с выводами электрооборудования) являются медь и ее сплавы (латунь, бронза) и алюминий электротехнического назначения.

Соединение токоведущих участков электрических цепей из разных металлов неизбежно приводит к значительным потерям электроэнергии в контактном узле, что обуславливается высоким значением переходного электросопротивления в контакте разнородных металлов, прогрессирующем во времени вследствие протекания контактной коррозии (например, при соединении «напрямую» медных и алюминиевых проводов, шин, аппаратных зажимов и др.).

Контакт алюминия и его сплавов с другими металлами может вызвать интенсивную контактную коррозию, особенно в растворах электролитов или в очень влажной атмосфере, поскольку большинство металлов является катодами в отношении к алюминию.

В соответствии с ГОСТ 5272-68 «Коррозия металлов. Термины», контактная коррозия – это электрохимическая коррозия, вызванная контактом металлов, имеющих разные стационарные потенциалы в данном электролите. Контактная коррозия представляет собой локализуемое вблизи контакта ускоренное разрушение металла, вызываемое соприкосновением в электролите двух

разнородных металлов, образующих замкнутый гальванический элемент.

Особенно опасен в этих условиях для алюминия и его сплавов контакт с медью, сплавами меди и нержавеющей сталью. Так, в морской воде значения стационарных электродных потенциалов составляют: для алюминия $E_n = -0,53$ В, для дюралюминия $E_n = -0,5$ В, для меди $E_n = -0,08$ В, для латуни (40% Zn) $E_n = -0,2$ В, для бронзы (5-10% Al) $E_n = -0,1$ В, для нержавеющей стали (12X18H9, пассивное состояние) $E_n = +0,2$ В.

В сухой атмосфере, например, в отопляемом помещении, контакт алюминия с медью практически не влияет на скорость коррозии. Это доказано опытом эксплуатации мест контакта алюминиевых электрических шинопроводов с медными, а также достаточно широким применением алюминия, плакированного медью.

В результате контактной коррозии ухудшается качество контакта, как следствие, происходит нагрев места соединения и потеря электроэнергии. По этой причине контактные соединения алюминия и меди необходимо защищать от проникновения влаги специальными пастами или покрывать антикоррозионным слоем (кадмирование, цинкование, цинко-оловянистое лужение, фосфатирование с последующей покраской).

Использование биметаллических контактов медь-алюминий позволяет свести к минимуму, а в ряде случаев и полностью устранить эти недостатки.

Специфические свойства металлов композиции (их интенсивное окисление на воздухе, интенсивное окисление меди при повышенных температурах) и характер их взаимодействия при соединении (возникновение хрупких интерметаллидных фаз) обуславливают определенные трудности при получении биметалла медь-алюминий традиционными методами (холодной и горячей прокаткой) [3].

Дополнительные трудности, связанные с выбором термомеханического режима пластической деформации, температур совместной рекристаллизации и т. д., при получении биметаллического соединения создают разница в температурах плавления обоих металлов и в рекомендуемых температурах пластической обработки (для алюминия – 400...500 °С, для меди – 800...900 °С).

Кроме того, прочность соединения медно-алюминиевого биметалла, получаемого прокаткой, ниже прочности на разрыв не только меди, но и алюминия (рис. 1, по данным [3]).

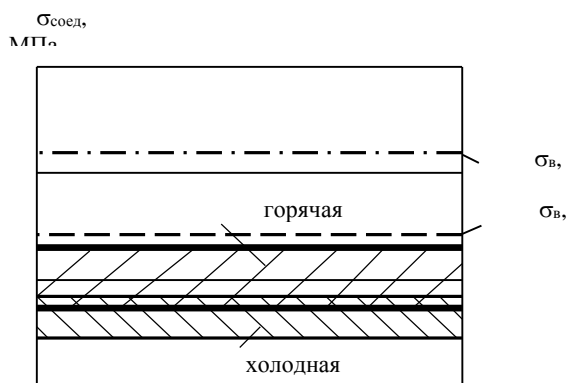


Рис. 1 – Прочность соединения слоев $\sigma_{\text{соед}}$ медно-алюминиевого биметалла, получаемого холодной и горячей прокаткой в сравнении с пределами прочности металлов слоев (по данным [3])

Обзор последних источников исследований и публикаций. Перспективным методом получения данного биметалла является плакирование взрывом [4]. На основе анализа большого количества работ, посвященного проблемам плакирования взрывом, выделены основные направления исследований в этой области [5], одним из которых является исследование служебных характеристик биметаллов, полученных плакированием взрывом.

Удельное электрическое сопротивление ρ металла является постоянной величиной, характеризующей его электрические свойства [6]. В случае проводникового и контактного биметалла, которым является композиция медь-алюминий, этот параметр определяет его эксплуатационные свойства.

Кроме того, значение удельного электрического сопротивления (величины, обратной электропроводности) биметалла применяется при расчетах, реализуемых при контроле расслоения методом электрического потенциала [7]. Метод электрического потенциала применяется для контроля проводниковых материалов.

Согласно ГОСТ 25315-82 «Контроль неразрушающий электрический. Термины и определения», электропотенциальный метод – метод электрического неразрушающего контроля, основанный на регистрации распределения потенциалов по поверхности объекта контроля.

Путем измерения падения потенциала на некотором участке проводника контролируется толщина проводящего слоя и наличие несплошностей вблизи поверхностей проводника [8]. Метод основан на том, что при обигании электрическим током поверхностного дефекта увеличивается падение потенциала на дефектном участке, что позволяет определить глубину несплошности с погрешностью в несколько процентов.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Несмотря на интерес исследователей к

эксплуатационным свойствам (в первую очередь, очевидно, электрическим) данного биметалла, закономерности влияния соотношения слоев в биметалле, полученном плакированием взрывом, на его электрические свойства не проанализированы. Изучение закономерностей изменения удельного электрического сопротивления медно-алюминиевого биметалла от соотношения толщин его слоев актуально как для обеспечения эксплуатационных свойств данного биметалла, так и для эффективного контроля его качества.

Постановка задачи. Таким образом, целью работы является исследование влияния соотношения толщин слоев медно-алюминиевых композиций, полученных плакированием взрывом, на их удельное электрическое сопротивление.

Основной материал и результаты. Режимы плакированием взрывом для получения требуемой производством (в настоящее время внедренной) слоистой медно-алюминиевой композиции (основной слой – лист из алюминия АД0 толщиной 8 мм, плакирующий слой – лист из меди М1 толщиной 2 мм) были рассчитаны по уточненной методике, приведенной в работе [9]. Данная методика расчета апробирована экспериментально, с ее использованием получены качественные композиции. Исследования электрических свойств данной композиции, приведенные в этой работе, выполнялись на образцах, полученных плакированием взрывом с использованием этой методики.

Как известно, удельное электрическое сопротивление ρ металла может быть получено измерением сопротивления r на образце длиной l и сечением s ; вычисляется ρ из зависимости [6]

$$r = \frac{\rho l}{s}, \quad (1)$$

где для металлических проводников r в Ом; длина l – в м, сечение s – в мм². В этом случае ρ будет выражено в Ом·мм²/м.

Использовалось измерение электрического сопротивления по методу двойного моста [6].

Удельное электрическое сопротивление использованных в экспериментах листов меди ρ_1 составило (среднее по листам толщиной 2 и 3 мм) 0,0178 Ом·мм²/м. Удельное электрическое сопротивление использованных в экспериментах листов алюминия ρ_2 составило (среднее по листам толщиной 7, 8 и 10 мм) 0,0271 Ом·мм²/м. Отметим, что в справочнике [2] приводятся значения удельного электрического сопротивления при 20 °С: меди – 0,01724...0,018 мкОм·м, алюминия – 0,0262...0,0295 мкОм·м. Измеренные значения соответствуют табличным диапазонам, что подтверждает корректность измерений.

Измерение удельного электрического сопротивления ρ проводилось на установке МВТ-3. Размеры образцов, в соответствии с

рекомедаціями роботи [7], приймались 10...13×20×100 мм.

Теоретическе (расчетное) удельное электрическое сопротивление биметалла определялось по зависимости [10]

$$\rho = \rho_1 \frac{\left(1 + \frac{\delta_1}{\delta_2}\right)}{\frac{\rho_1 + \delta_1}{\rho_2 + \delta_2}}, \quad (2)$$

где δ_1 – толщина плакирующего слоя биметалла, δ_2 – толщина плакирующего слоя биметалла, ρ_1 – удельное сопротивление металла плакирующего слоя, ρ_2 – удельное сопротивление металла основного слоя.

Полученные по зависимости (2) теоретические значения удельного электрического сопротивления для композиций с разными вариантами соотношения толщин приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Исходные данные и результаты экспериментов

Параметр	Вариант				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Толщина слоя меди δ_1 , мм	2	3	2	3	2+2
Толщина слоя алюминия δ_2 , мм	8	7	10	10	8
Отношение толщин слоев δ_1/δ_2	0,25	0,43	0,2	0,3	0,5
Отношение толщины плакирующего слоя к толщине биметалла $\delta_1/(\delta_1+\delta_2)$	0,2	0,3	0,17	0,23	0,33
Удельное электрическое сопротивление биметалла $\rho_{12} \times 10^{-2}$, Ом·мм ² /м (теоретическое)	2,45	2,34	2,49	2,42	2,31
Удельное электрическое сопротивление биметалла $\rho_{12} \times 10^{-2}$, Ом·мм ² /м (экспериментальное)	2,55	2,44	2,64	2,65	2,47
Разность между экспериментальным и теоретическим значением, %	3,9	4,1	5,9	9,6	7

Также в табл. 1 приведены измеренные (экспериментальные) значения удельного электрического сопротивления для полученных плакированием взрывом композиций с разными вариантами отношения толщин слоев δ_1/δ_2 (зачастую в работах, посвященных биметаллам, используется близкий параметр – отношение толщины плакирующего слоя к общей толщине биметалла $\delta_1/(\delta_1+\delta_2)$).

Как следует из данных табл. 1, удельное электрическое сопротивление биметалла ниже, чем у алюминия, и выше, чем у меди. Таким образом подтверждается полученная ранее закономерность, что значение удельного электрического

сопротивления двухслойной композиции лежит между значениями этого параметра для металлов слоев. На примере коррозионностойких биметаллов установлено [7], что при удельном электрическом сопротивлении 0,345 Ом·мм²/м основного слоя (стали 14Х2ГМ) и 0,746 Ом·мм²/м плакирующего слоя (сталь 12Х18Н10Т) при отношении толщины плакирующего слоя к общей толщине биметалла 0,27 (1,6 мм/6 мм), удельное электрическое сопротивление биметалла 0,4 Ом·мм²/м. Установлено [7] хорошее совпадение расчетных (по зависимости (2)) и экспериментальных данных для этой композиции, а также для композиций плакирующей слой 12Х18Н10Т + основной слой 17Г2СФ или 16Г2АФ.

На рис. 2 показано влияние отношения толщин слоев медно-алюминиевого биметалла на его удельное электрическое сопротивление в сопоставлении расчетных значений с результатами измерений.

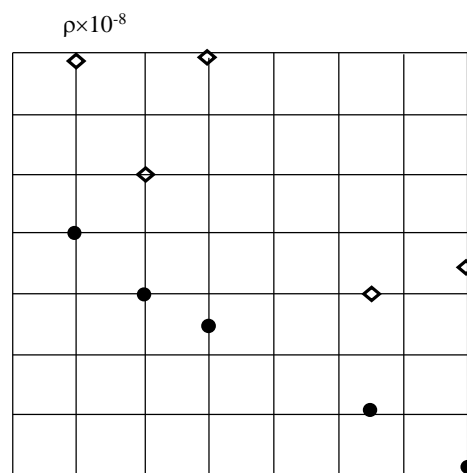


Рис. 2 – Зависимость удельного электрического сопротивления медно-алюминиевого биметалла от отношения толщин слоев (круги – теоретические значения, ромбы – экспериментальные значения)

При увеличении отношения толщины плакирующего слоя меди к общей толщине биметалла теоретическое удельное электрическое сопротивление биметалла монотонно понижается, занимая промежуточное положение между удельными электрическими сопротивлениями металлов слоев. Экспериментальное удельное электрическое сопротивление биметалла при увеличении отношения толщины плакирующего слоя меди к общей толщине биметалла имеет более сложный характер.

Из данных табл. 1 следует, что разность между расчетными и экспериментальными значениями удельного электрического сопротивления биметалла составляет 3,9...9,6%. Можно предположить, что разность возникает вследствие характерных для плакирования взрывом явлений – в частности, образования интерметаллидов и литых включений расплавленного вследствие нагрева при плакировании металла.

Отметим, что с увеличением толщины биметалла разность между теоретическими и экспериментальными значениями удельного электрического сопротивления возрастает. Это происходит, предположительно, в связи с увеличением удельной энергии W_2 , затрачиваемой на пластическую деформацию металла в зоне соединения свариваемых элементов при плакировании взрывом. Удельная энергия W_2 определяется в соответствии с известной зависимостью [11]

$$W_2 = \frac{m_1 \cdot m_2}{2(m_1 + m_2)} v_c^2 \left[1 - \left(\frac{v_k}{C_0} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где m_1 – масса метаемой пластины; $m_1 = \rho_1 \delta_1$, ρ_1 – плотность металла метаемой пластины, δ_1 – толщина металла метаемой пластины; m_2 – масса неподвижной пластины, где $m_2 = \rho_2 \delta_2$, ρ_2 – плотность металла неподвижной пластины, δ_2 – толщина металла неподвижной пластины; v_k – скорость точки контакта; v_c – скорость соударения пластин; C_0 – скорость звука в металле.

Как следует из зависимости (3), при прочих равных условиях с увеличением толщины биметалла повышается удельная энергия W_2 , что, видимо, служит причиной создания дефектов в зоне соединения, повышающих удельное электрическое сопротивление биметалла.

Выводы. Установлено, что удельное электрическое сопротивление полученных плакированием взрывом слоистых медно-алюминиевых композиций (с отношением толщины слоя меди к толщине слоя алюминия 0,2...0,5) ниже, чем у алюминия, и выше, чем у меди.

С увеличением толщины данного биметалла разность между теоретическими и экспериментальными значениями удельного электрического сопротивления возрастает.

С увеличением доли плакирующего слоя меди в общей толщине биметалла теоретическое удельное электрическое сопротивление биметалла монотонно понижается, тенденция уменьшения экспериментальных значений также в основном сохраняется, кроме случаев максимальной толщины биметалла.

Список литературы: 1. Трыков Ю. П. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгул. – М. : Металлургиздат, 2004. – 230 с. 2. Алиев И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию / И. И. Алиев. – Ростов н/Д : Феникс, 2004. – 480 с. 3. Тодоров Р. П. Биметаллические контакты / Р. П. Тодоров, Л. И. Кюнстлер, Г. И. Бакалов. – М. : Металлургия, 1976. – 87 с. 4. Загорянский В. Г. Влияние основных технологических параметров на прочность соединения слоев биметалла алюминий-медь / В. Г. Загорянский // Металл и литье Украины. – 2014. – № 11 (258). – С. 30–35. 5. Конон Ю. А. Сварка взрывом / Ю. А. Конон, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский; Под ред. В. М. Кудинова. – М. : Машиностроение, 1987. – 216 с. 6. Лившиц Б. Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапошин, Я. Л. Линецкий. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с. 7. Некоторые физические свойства коррозионностойких биметаллов / Маслов А. М., Устименко В. А., Быков А. А. [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1983. – № 3. – С. 106–109. 8. Каневский И. Н. Неразрушающие методы контроля / И. Н. Каневский, Е. Н. Сальникова. – Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с. 9. Драгобецкий В. В. Расчет режимов сварки взрывом слоистой медно-алюминиевой композиции / В. В. Драгобецкий, В. Г. Загорянский, В. Е. Загирняк // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – № 13 (184). – Ч.1. – Луганськ : СХУ імені Володимира Даля, 2012. – С. 60–69. 10. Перепелица И. В. Основные зависимости для разработки технологии производства термобиметаллов / И. В. Перепелица, А. И. Гришков // Сталь. – 1971. – № 11. – С. 1023–1025. 11. Процессы обработки материалов взрывом / А. В. Крупин, С. Н. Калужин, Е. У. Атабеков [и др.]. – М. : Металлургия, 1996. – 336 с.

Bibliography (transliterated): 1. Trykov Ju. P., L. M. Gurevich and V. G. Shmorgun. *Sloistye kompozity na osnove aljuminija i ego splavov*. Moscow : Metallurgizdat, 2004. Print. 2. Aliev I. I. *Spravochnik po jelectrotehnikе i jelectrooborudovaniju*. Rostov n/D : Feniks, 2004. Print. 3. Todorov R. P., L. I. Kjunstler and G. I. Bakalov G. I. *Bimetallicheskie kontakty*. Moscow : Metallurgija, 1976. Print. 4. Zagorjanskij V. G. «Vlijanie osnovnyh tehnologicheskikh parametrov na prochnost' soedinenija sloev bimetalja aljuminij-med'». *Metall i lit'e Ukrainy*. No 11 (258). 2014. 30–35. Print. 5. Konon Ju. A., L. . Pervuhin, A. D. Chudnovskij. *Svarka vzryvom*. Moscow: Mashinostroenie, 1987. Print. 6. Livshic B. G., V. S. Kraposhin and Ja. L. Lineckij. *Fizicheskie svojstva metallov i splavov*. Mokok: Metallurgija, 1980. Print. 7. Maslov, A. M., et al. «Nekotorye fizicheskie svojstva korrozionnostojkih bimetallov.» *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*. No 3. 1983. 106–109. Print. 8. Kanevskij I. N. and E. N. Sal'nikova. *Nerazrushajushhie metody kontrolja*. Vladivostok : Izd-vo DVG TU, 2007. Print. 9. Dragobeckij V. V., V. G. Zagorjanskij and V. E. Zagirnjak. «Raschet rezhimov svarki vzryvom sloistoj medno-aljuminievoj kompozicii». *Visnik Shidnoukrajns'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalja*. No. 13 (184). Ch. 1. 2012. 60–69. Print. 10. Perepelica I. V. and A. I. Grishkov. «Osnovnye zavisimosti dlja razrabotki tehnologii proizvodstva termobimetallov». *Stal'*. No. 11. 1971. 1023–1025. Print. 11. Krupin A. V., et al. *Processy obrabotki materialov vzryvom*. Moscow: Metallurgija, 1996. Print.

Поступила (received) 31.10.2015

Сведения об авторах / About the Authors

Загорянский Владимир Георгиевич – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры технологии машиностроения Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, тел.: (050) 874-87-48; e-mail: zagor_vlad@ukr.net.

Zagoryanskiy Vladimir Georgievich – Candidate of Technical Sciences, Associated Professor, Person working for doctor's degree, department of technology of machine-building of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, tel.: (050) 874-87-48; e-mail: zagor_vlad@ukr.net.

Дикая Луиза Эхматовна – ассистент кафедры технологии машиностроения Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, тел.: (096) 254-20-90; e-mail: lu.di@mail.ru.

Dikaya Luiza Ehmatoyna – assistant of department of technology of machine-building of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, tel.: (096) 254-20-90; e-mail: lu.di@mail.ru.