

2. Henley V.F. Anodic oxidation of aluminum and its alloys. / Henley V.F. // Pergamon Press, 1982, - 156 p
3. Mattoso L.H.C. Influence of electropolymerization conditions on the molecular weight of polyaniline / Mattoso L.H.C., Faria R.M., Bulhões L.O.S., MacDiarmid A.G. // Polymer. - 1994. - Vol. 35. - № 23. - P. 5104-5108.
4. Тарасевич М.Р. Электрохимия полимеров. / Тарасевич М.Р., Орлов С.Б., Школьников Е.И. // Москва: Наука. - 1990. - 238 с.

УДК 669.017

Г. Микалаускас, Н. Вишняков, Р. Лукаускайте,
Е. Шкамат, О. Чернашей

(Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Вильнюс)

СОЕДИНЕНИЕ МИКРОКОМПОЗИТНЫХ Cu-Nb ПРОВОДНИКОВ СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

Компактные магнитноимпульсные установки, которые способны генерировать рекордные магнитные поля до 100 Т, становятся все более востребованными в различных областях научных исследований и в промышленности. Импульсные системы достаточно просты в конструкции и малоэнергозатратны, поэтому доступны более широкому кругу ученых, исследователей и промышленников. Самым важным элементом таких магнитных систем является – соленоид. Наибольшее распространение получили многослойные витые соленоиды. Материалы для проводников витых соленоидов должны обладать очень большой прочностью и хорошей электропроводностью. Магнитные поля свыше 45 Т могут быть сгенерированы только в форме кратковременных импульсов, поэтому проводники должны выдерживать ударные нагрузки и нагрев. Для таких целей в настоящее время применяются 4 вида композитных проводников: Cu-Nb и Cu-Ag микрокомпозиты, GlidCop, CuSS макрокомпозиты [1]. Cu-Nb микрокомпозит в настоящее время считается наиболее подходящим среди упомянутых аналогов из-за своих уникальных качеств. Его прочность достигает до 1,5 ГПа. Данный материал перспективен не только для использования в электромагнитных установках, но и в левитационном транспорте, высоковольтных электролиниях, промышленном оборудовании индукционной сварки, термообработки и других областях. При монтаже таких систем неизбежно возникает необходимость соединения проводников между собой и к выводам

других электрокомпонентов. Так как конструкция большинства соленоидов магнитных установок является секционной, то это подразумевает большое количество соединений проводников [2]. Ко всем контактным соединениям применяются жесткие требования к конструкции, электрическим характеристикам, механическим свойствам и надежности. Оценивая электрические характеристики соединения электрическое сопротивление проводника сравнивается с электрическим сопротивлением соединения. Во всех случаях оно не должно отличаться более чем в 1,5 раза. Надежность электрических соединений зависит от температуры. Такое соединение при протекании номинального тока не должно нагреваться более чем на 95 °С по сравнению с проводником. Если это проводка электролиний, то соединения должны выдерживать нагрузки до 90 % от предела прочности проводника. Если это не подвергаемые нагрузкам растяжения соединения, то они должны выдерживать нагрузки не менее 30 % от предела прочности проводника [3]. Все возможные соединения проводников делятся на неразъемные и разъемные. Одной из важных нерешенных задач в области техники сильных магнитных полей остается надежное неразъемное соединение проводников. Поскольку неразъемные более предпочтительны из-за того, что микрокомпозитные проводники обладают ограниченной возможностью деформирования, а также из-за ограниченного доступа к соединениям после ввода магнитных систем в эксплуатацию. Все контактные соединения не должны быть слабым звеном в системах. На практике пока применяются только недостаточной надежностью и прочностью обладающие резьбовые и паяные соединения проводников [4]. Хотя наиболее прогрессивными технологиями считаются сварные соединения. Сложность подбора технологии сварки для этой цели заключается в специфике структуры и особенностях производства микрокомпозитов. Структура Cu-Nb микрокомпозитов состоит из медной матрицы в которую вкомпонованы очень тонкие жилки Nb. В принципе технология производства микрокомпозитов схожа на процесс сварки давлением или диффузионной сварки, когда Cu-Nb проволока получается путем многократной пластической деформации материалов. Традиционные методы сварки плавлением не могут здесь применяться из-за неизбежного переплава микрокомпозита, сильного перегрева проводников и потери свойств. Однако данная проблема теоретически может быть решена применяя методы сварки давлением или другие специальные методы. Среди методов сварки электронно-лучевая сварка (ЭЛС) занимает особое место благодаря высокой концентрации мощности в электронном пучке, способности его глубокого

проникновения в металл, высокой скорости сварки, малому количеству вводимой теплоты, отсутствию насыщения расплавленного и нагретого металла газами. В результате достигается высокое качество сварных соединений химически активных металлов и сплавов (Nb, Zr, Ti, Mo, Cu, Ni, Al и др.). Обзор опубликованных результатов научных исследований в данной области продемонстрировал, что экспериментально подтвержденных данных об возможности сварки Cu-Nb микрокомпозитов недостаточно. Поэтому целью данной работы были экспериментальные исследования характеристик ЭЛС сварных соединений и возможностей применения ЭЛС для сварки Cu-Nb микрокомпозитов. Сварка проводников осуществлялась на ЭЛС установке, созданной в Физико-техническом институте НАН Беларуси (г. Минск, Беларусь) на базе энергоблока ЭЛА-15. Вакуум в рабочей камере установки создается диффузионным насосом АВП 400. Уровень вакуума в рабочей камере – $3 \cdot 10^{-3}$ Па. ЭЛС образцов выполнена согласно схеме, представленной на рисунке 1. Использовался расфокусированный электронный луч – диаметр пятна нагрева на свариваемых образцах порядка 5 мм.

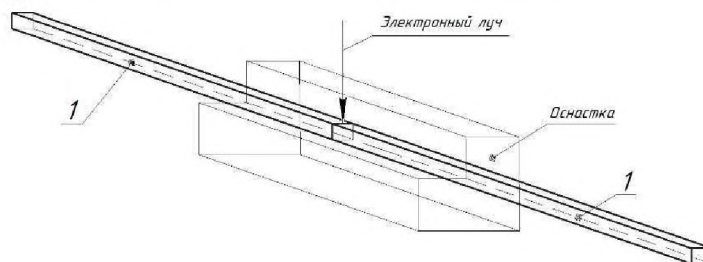


Рисунок 1 – Схема сварки ЭЛС: 1 – свариваемые образцы

Свариваемые образцы нагревались до образования сварочной ванны. Ток луча составлял 12 мА и выключался при достижении полного проплавления. В качестве объекта исследований использовалась Cu-Nb (82 %–18 %) микрокомпозитная проволока сечением 2.4х4.2 мм, предел упругости 830–850 МПа, предел прочности 1120 МПа [4]. Образцы после ЭЛС представлены на рисунке 2. Разница электрических сопротивлений соединения и проводника измерена используя U2810D Digital LCR Meter Tester согласно методике [3]. Электрическое сопротивление проводника 0,009 ом, образца той же длины с соединением 0,013 ом. Разница электрических сопротивлений (коэффициент дефективности) составлял около 1.44, что не превышает рекомендованного для соединений проводников значения.



Рисунок 2 – Внешний вид сварного соединения ЭЛС

Разница нагрева проводника и соединения при прохождении электрического тока зафиксирована с помощью термовизора Flir – E49001. Фиксация изображения велась каждые 30 секунд с момента включения тока. В качестве источника тока использован сварочный выпрямитель ВДУ-305. Образцы со сварным соединением нагревались пропуская 200 А ток. Разница температур нагрева проводника и сварного соединения не превышала 47 °С, что тоже не превышало требуемых для контактных соединений значений. Механические свойства опытных образцов сварных соединений испытывались используя универсальную машину растяжения TIRAtest 2300 с компьютерной системой регистрации данных (погрешность измерений не более 0,5 %). Предел прочности сварного соединения составлял 356 Мпа, что составляет 31,8 % прочности проводника. Основываясь на экспериментальных данных исследований такое сварное соединение и сама технология ЭЛС сварки пригодна для соединения микрокомпозитных проводников, которые не подвержены в процессе эксплуатации нагрузкам растяжения, т.е. которые должны выдерживать нагрузки не менее 30 % предела прочности проводника.

ВЫВОДЫ

Используя электроннолучевую сварку Cu-Nb микрокомпозитных проводников возможно получить сварные соединения с приемлемыми характеристиками. Механические и электрические свойства полученных соединений удовлетворяют минимальным требованиям, которые предъявляются к соединениям проводников.

Авторы статьи выражают благодарность научному сотруднику лаборатории электрофизики ГНУ «ФТИ НАН Беларуси» Юревичу Сергею Владимировичу за оказанную помощь в проведении экспериментов, ЭЛС сварку образцов и технические консультации.

ЛИТЕРАТУРА

1 Shneerson G. A., Dolotenko M. I., Krivosheev S. I. 2006. Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Fields Generation. De Gruyter Studies in Mathematical Physics: p. 147-178.

2 Ciazynski D., Duchateau J., Decool P., Libeyre P., Turck B. Large superconductors and joints for fusion magnets. From conceptual design to testing at full scale. Nuclear fusion, Vol 41, Nr. 2, 2001, IAEA: p. 223-226.

3 М.В. Хомяков, И.А. Якобсон. Термитная сварка многопроволочных проводов линий электропередачи и подстанций. 2-е издание. Москва, Госэнергоиздат, 1963. 80 с.

4 Višniakov N, Novickij J, Ščekaturovienė D, Petrauskas A. 2011. Quality Analysis of Welded and Soldered Joints of Cu-Nb Microcomposite Wires. Materials Science. 2011; Vol. 17(1): p. 16-19.

УДК 621.794.4:661.862.22

Н.В. Богомазова, доц., канд. хим. наук;
А.В. Пянко, асп.; А.Н. Мурашкевич, проф., д-р техн. наук
(БГТУ, г. Минск),

Г.Г. Горох, доц., канд. техн. наук (БГУИР, г. Минск)

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МАТРИЧНО-
ПЛЕНОЧНЫХ ХЕМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ
СКВОЗНОГО АНОДИРОВАНИЯ АІ**

Разработка технологий производства современных электронных структур и изделий зачастую связана с усложнением состава предлагаемых материалов, а также с комбинированием физико-химических процессов, используемых на конкретных этапах многостадийного маршрута изготовления финишных многофункциональных устройств. Традиционные физические или химические процессы обработки и модифицирования поверхностей уступают место более сложным физико-химическим процессам, предполагающим протекание целевых химических превращений при активирующем воздействии электрических и магнитных полей, оптического излучения, ультразвука, плазмы и других факторов. Кроме того, среди современных технологических подходов к производству электронных устройств все более весомое значение приобретают самоорганизующиеся процессы формирования целевых структур и материалов на их основе, таких как пористые анодные оксидные пленки и мембраны, пористый кремний, массивы нанокристаллов и другие. Актуальным примером таких процессов, в том числе при производстве и разработке электронных устройств различного назначения, является технология самоупорядоченного роста пористой оксидной матрицы при анодировании алюминия [1, 2].

Целью данной работы являлось получение на поверхности традиционной для микро- и наноэлектроники кремниевой подложки мно-