

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Wiesenthal A., Hunter L., Wang S., Wickliffe J., Wilkerson M. Nanoparticles: small and mighty // *International Journal of Dermatology*. – 2011. – Vol. 50. – pp. 247-254.
2. Arya S.K., Saha S., Ramirez-Vick J.E., Gupta V., Bhansali S., Singh S.P. Recent advances in ZnO nanostructures and thin films for biosensor applications: Review // *Analytica Chimica Acta*. – 2012. – Vol. 737. – pp. 1-21.
3. Kim J., Kwon S., Park J.K., Park I. Quantum dot-based immunoassay enhanced by high-density vertical ZnO nanowire array // *Biosensors and Bioelectronics*. – 2014. – Vol. 55. – pp. 209-215.
4. Cao Y., Galoppini E., Ivanoff Reyes P., Duan Z., Lu Y. Morphology effects on the biofunctionalization of nanostructured ZnO // *Langmuir*. – 2012. – Vol. 28. – pp. 7947-7951.
5. Zhang Y., Chan H.F., Leong K.W. Advanced materials and processing for drug delivery: The past and the future // *Advanced Drug Delivery Reviews*. – 2013. – Vol. 65. – pp. 104–120.
6. Shanenkov I.I., Sivkov A.A., Pak A., Kolganova Y.L. effect of gaseous medium pressure on plasmadynamic synthesis product in the c-n system with melamine // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 1040. pp. 813-818.
7. Shanenkov I.I., Pak A.Ya., Sivkov A.A., Shanenkova Yu.L. Energy efficiency of electric pulse installation based on a high-current plasma accelerator // *MATEC Web of Conferences*. – 2014. – Vol. 19. – art. no. 01030
8. Пат. 137443 РФ. МПК7 H05H 11/00. Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель / А.А Сивков, А.С. Сайгаш, Ю.Л. Колганова. Заявлено 24.09.2013; Опубл. 10.02.2014, Бюл. № 4. – 6 с.

Научный руководитель: А.А. Сивков, д.т.н., профессор каф. ЭПП ЭНИН ТПУ.

## **НАНЕСЕНИЕ МЕДНОГО ПОКРЫТИЯ НА АЛЮМИНИЕВЫЕ ПОВЕРХНОСТИ С ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТЬЮ СЦЕПЛЕНИЯ**

<sup>1</sup>Ю.Н. Половинкина, <sup>2</sup>Ю.Л. Шаненкова  
<sup>1,2</sup>Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭПП, <sup>1</sup>5АМ64

Известный факт, что медь и алюминий являются главными материалами в электроэнергетике ввиду низкой величины удельного сопротивления – отсюда их повсеместное использование. Величина удельного контактного сопротивления существенно увеличивается при непосредственном соединении данных материалов, таким образом, происходит ухудшение качества контакта и увеличение потерь электрической энергии [1]. В работе предлагается уникальный метод совмещения контактной пары медь-алюминий посредством нанесения мед-

ного покрытия на алюминиевые контактные поверхности при помощи высоко-точного коаксиального магнитоплазменного ускорителя с медными электродами [2]. В сравнении с другими существующими методиками можно выделить достоинства данного способа, а именно: простота (не требует предварительной подачи и обработки наносимого материала), достаточно высокая быстрота нанесения покрытий (порядка 1 мс), низкая энергоемкость процесса.

Была проведена серия опытов по нанесению медных покрытий на алюминиевые контактные поверхности с помощью высокоскоростной импульсной сильноточной плазменной медной струи. Типичные фотографии полученных Cu покрытий на Al подложки (а) и на Al наконечники (б) представлены на рис. 1. Из фотографии видно, что покрытие нанеслось по всей площади подложки. Стоит отметить, что качество полученных покрытий достаточно велико – высокая плотность меди на алюминии (отсутствуют области без покрытия), Al подложка не подверглась сильным изменениям (отсутствуют места прогаров) и значение площади покрытия достигает до 220 см<sup>2</sup>.

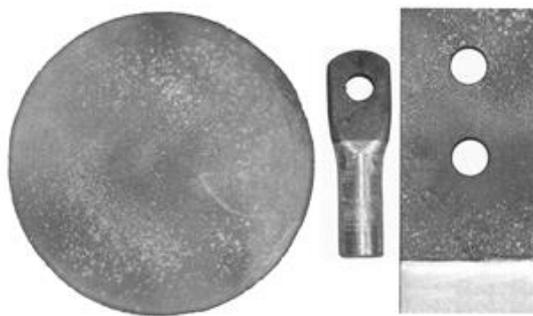


Рис. 6. Фотографии полученных медных покрытий на плоских алюминиевых подложках и электротехнических изделиях

Толщина покрытий исследовалась на оптическом электронном микроскопе Olympus GX-71. Было установлено, что толщина покрытий варьируется от 50 до 100 мкм. Как видно из рис. 2, медные покрытия, наносимые предложенным способом, получаются равномерными, полностью повторяют все неровности и изгибы алюминиевой подложки. Это приводит к тому, что видимая граница раздела отсутствует полностью и таким образом обеспечивается плотное прилегание медного покрытия к алюминиевой подложке. Стоит отметить, что в области соединения покрытия с подложкой, обнаруживается присутствие как частиц меди в подложке, так и частиц алюминия в покрытии. Это подтверждает предположение об их взаимном перемешивании материалов в жидкой фазе.

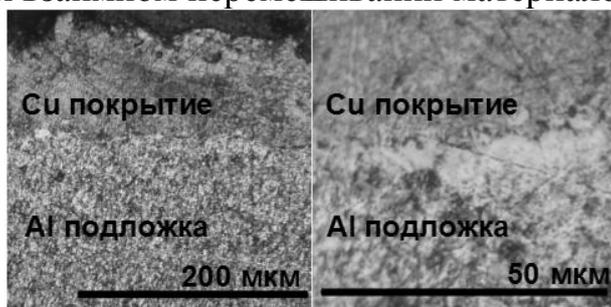


Рис. 7. Микрофотографии шлифов поперечного среза образца, полученного при расстоянии до мишени 225 мм

Одним из главных факторов, определяющих качество нанесенного покрытия, влияющее на продолжительность работы, является адгезия. Для образцов, которые используются в условиях с изменяющимися нагрузками, в данном случае зависящими от величины протекающего тока, этот параметр становится главным. Поэтому полученные образцы должны иметь достаточно высокую прочность сцепления, чтобы предотвратить возможные внештатные ситуации, которые могут произойти за счет отслаивания покрытия от подложки.

На рис. 3 представлены кривые, полученные при проведении скретч-теста для определения прочности сцепления для образца, а также SEM-снимок царапины, по которому определялось место, где покрытие отслоилось от подложки [3].

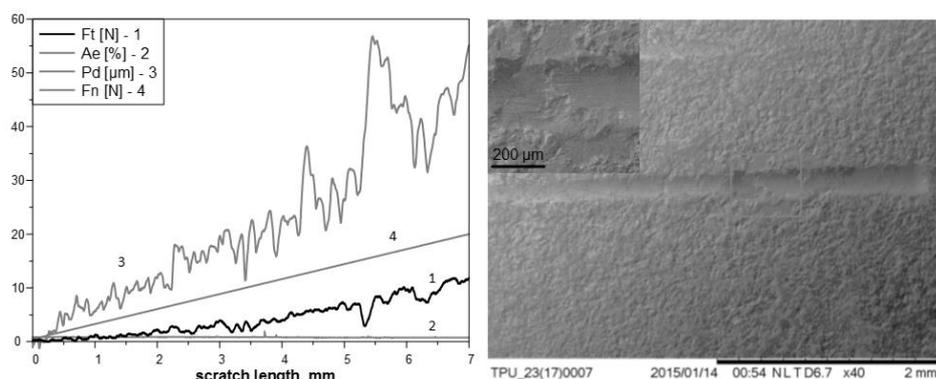


Рис. 8. Результаты скретч-теста: а) полученные кривые; б) SEM снимок царапины

В результате эксперимента была найдена величина плотности сцепления, которая равняется 2430 МПа. Стоит отметить, что получающаяся величина прочности сцепления значительно превышает прочность сцепления, достигаемую другими методами напыления меди на алюминий, так для способа холодного газодинамического напыления эта величина составляет 700 МПа [4].

Для качества полученных покрытий был подготовлен стенд для измерения величин переходного контактного сопротивления пар Cu-Cu, Cu-Al, Cu-Al<sub>Cu</sub>, полученных нашим методом.

В соответствии с полученными результатами, представленными на рис. 4, видно, что с увеличением усилия сжатия контактных элементов удельное переходное контактное сопротивление ожидаемо уменьшается. Это происходит вследствие увеличения площади касания контактов за счет смятия выступов, присутствующих на поверхности контактной пары медь-алюминий.

Сравнительный анализ эталонных характеристик контактных пар медь-медь и медь-алюминий без покрытия показал, что при непосредственном соединении меди с алюминием переходное контактное сопротивление приблизительно в 7 раз превышает величину сопротивления, получаемого при соединении меди с медью. Такое соотношение наблюдается при всех исследованных усилиях сжатия.

Исследование полученных контактных пар медь-алюминий с медным покрытием показало возможность уменьшения переходного сопротивления вплоть до ~ 2.8 раз относительно непосредственного соединения меди с алюминием при максимальной силе сжатия. Этот результат может оказаться

весьма важным в практическом отношении, т.к. в реальных сетях систем электроснабжения очень много болтовых контактных соединений алюминиевых шин.

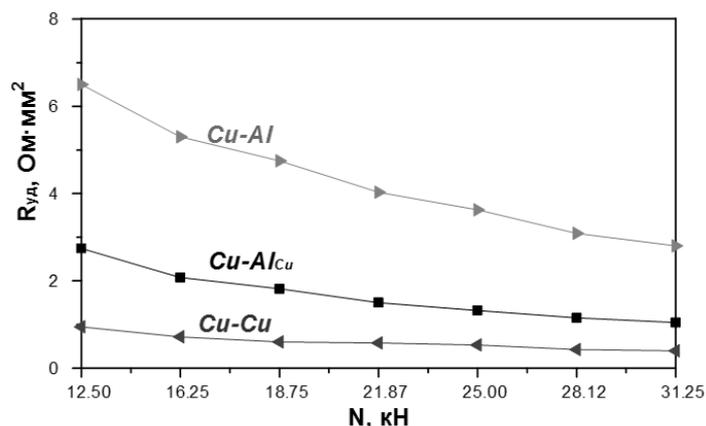


Рис. 9. Зависимость удельного переходного контактного сопротивления  $R_{уд}$  от усилия

На конкретном примере было рассмотрено влияние контактного сопротивления на величину отклонения напряжения. В качестве реального электроэнергетического объекта был принят магистральный шинопровод ШМА-5 сборочного цеха ОАО «Томский электроламповый завод», выполненный из алюминия, с большим количеством болтовых соединений, что является основным объектом электрических сетей, для которых возможно использование нанесения медных покрытий.

Были построены эпюры отклонения напряжения для цепочки линий от шин ГПП до зажимов одного наиболее мощного электроприемника для режима максимальных нагрузок, с учетом нанесения медного покрытия и без [5]. Результаты показали, что при использовании предложенной методики размах отклонения уменьшается, что способствует увеличению диапазона напряжения, на котором может работать данная часть энергосистемы. Также в ходе расчетов получено, что при использовании такой технологии возможно достигнуть экономии электроэнергии до 50% на контактных элементах.

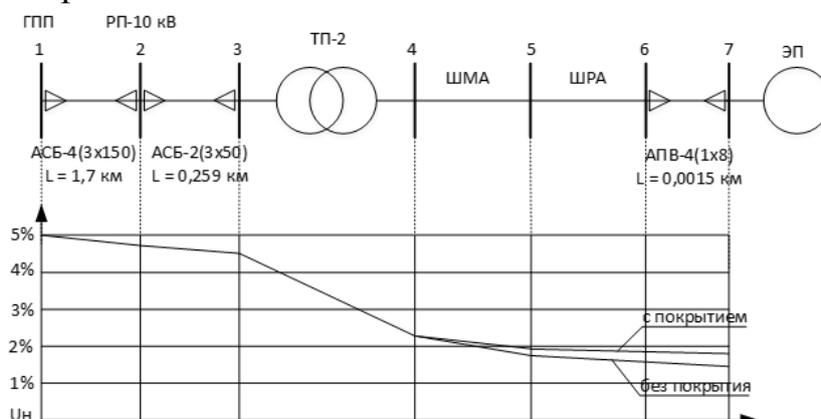


Рис. 10. Эпюры отклонения напряжения с использованием контактных  $Cu-Al$  и  $Cu-Al_{Cu}$

Таким образом, в работе представлены результаты, свидетельствующие о возможности совмещения меди и алюминия посредством нанесения медного

покрытия на алюминиевые подложки за счет использования высокоскоростной импульсной струи электроразрядной плазмы. Метод, представленный в работе, позволяет совместить не только медь и алюминий, но и снизить потери электроэнергии, а также получить покрытия с толщиной до 100 мкм и площадью до 220 см<sup>2</sup>. Полученные покрытия отличаются высокой адгезией и относительно низкой величиной переходного контактного сопротивления.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Antler M. Survey of contact fretting in electrical connectors // IEEE Transactions on components, hybrids, and manufacturing technology. – 1985. – CHMT-8(1). – P. 87-104.
2. Пат. 137443 РФ. МПК7 H05H 11/00. Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель / А.А Сивков, А.С. Сайгаш, Ю.Л. Колганова. Заявлено 24.09.2013; Опубл. 10.02.2014, Бюл. № 4. – 6с.
3. Swanson H.E. and Tatge E. Standard X-Ray Diffraction Powder Patterns // NBS Circular Natl. Bur. Stand. Circ. (US). – 1953. – № 1, 21. – p. 539.
4. Barradas S., Molins R., Jeandin M., Arrigoni M., Boustie M., Bolis C., Berthe L., Ducos M. Application of laser shock adhesion testing to the study of the interlamellar strength and coating–substrate adhesion in cold-sprayed copper coating of aluminum // Surface & Coatings Technology. – 2005. – 197(1). – P. 18– 27
5. Основы расчета систем внутризаводского электроснабжения: Учебное пособие / Л.П. Сумарокова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 119 с.

Научный руководитель: А.А. Сивков, д.т.н., профессор кафедры ЭПП ЭНИН ТПУ.

### **ЭЛЕКТРОННАЯ БАЗА ДАННЫХ - СРЕДСТВО МОНИТОРИНГА И ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВЫРАБАТЫВАЕМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

<sup>1</sup>Д.В. Волкова, <sup>2</sup>Н.Э. Вайсблат

<sup>1</sup>Томский политехнический университет  
ИПР, ОГЗ, группа 2У31

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский филиал «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», группа МГУ 151

В настоящее время большинство энергетических компаний сталкивается с такой проблемой, как перебои в поставке электроэнергии в лесном массиве из-за обрыва проводов воздушных линий электропередач (ВЛЭП) [1, 10].

Цель исследования: выявление решения проблемы повышения эффективности контроля над состоянием близко растущих к просеке высоких деревьев посредством ГИС для устранения перебоев электроэнергии.