

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

Ю.Н. Половинкина, Ю.Л. Шаненкова, А.С. Сайгаш

Научный руководитель: доцент, к.т.н. А.С. Сайгаш

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: ynp2@tpu.ru

**DEPOSITION COPPER COATING ON ALUMINUM SURFACE WITH HIGH ADHESION
STREIGHTH**

Y.N. Polovinkina, Y.L. Shanenkova, A.S. Saygash

Scientific Supervisor: PhD, A.A Saygash

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: ynp2@tpu.ru

***Abstract.** In the article, there has been method about the possibility of the copper coating deposition on the aluminum contact surface using the high-speed plasma jet generated by the coaxial magneto plasma accelerator. XRD-diffraction, optical micrographs and scratch test were carried out in this work.*

Низкая величина удельного сопротивления обуславливает повсеместное использование меди и алюминия, как главных материалов в электроэнергетике. Непосредственное их соединение значительно увеличивает величину переходного контактного сопротивления, что является следствием увеличения потерь электроэнергии и ухудшения качества контакта [1]. В работе предлагается новый метод совмещения контактной пары медь-алюминий путем нанесения медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности с помощью высокопоточного коаксиального магнитоплазменного ускорителя с медными электродами (рисунок 1) [2]. В отличие от других существующих методик, данный способ является достаточно простым (не требует предварительной подачи и обработки наносимого материала), процесс нанесения покрытий достаточно быстрый (порядка 1 мс), низкая энергоемкость процесса.

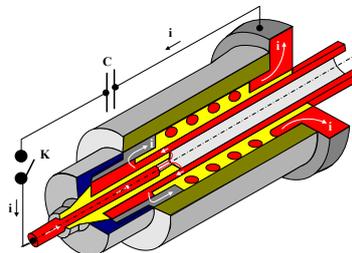


Рис. 1. Схема КМПУ

Полученные образцы первоначально без предварительной обработки были исследованы методом рентгеновской дифрактометрии. Типичная рентгенограмма полученного покрытия и изображения получаемых образцов представлены на рисунке 2. По дифрактограмме видно, что основной фазой в покрытие ожидаемо является медь (карточка 85-1326PDF4) [3]. Также находят отражения рефлексы алюминия на углах 2θ , равных $38,5^\circ$; $44,5^\circ$; 78° . Появление этих отражений может быть обусловлен как

малой толщиной покрытия, так и попаданием его частиц в материал покрытия в процессе гидродинамического перемешивания материалов. Плазма высокой температуры при достижении поверхности подложки плавит ее верхний слой. Таким образом, алюминий и медь, находясь в жидком состоянии, локально могут перемешиваться под воздействием высокоскоростной хвостовой части импульсного потока, после чего в процессе кристаллизации образуют однородную структуру.

Толщина покрытий исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии. Было установлено, что для всех образцов толщина покрытия варьируется от 50 до 100 мкм. Как видно из рис.3, медные покрытия, наносимые предложенным способом, получаются равномерными, однако плотность их прилегания к подложке значительно отличается. Так, покрытие, полученное в опыте 1 (рис.3а), полностью повторяет неровности и изгибы алюминиевой подложки. Это приводит к тому, что видимая граница раздела отсутствует полностью и таким образом обеспечивается плотное прилегание. Стоит отметить, что в области соединения покрытия с подложкой, обнаруживается присутствие как частиц меди в подложке, так и частиц алюминия в покрытии. Это также подтверждает предположение о их взаимном перемешивании материалов в жидкой фазе.

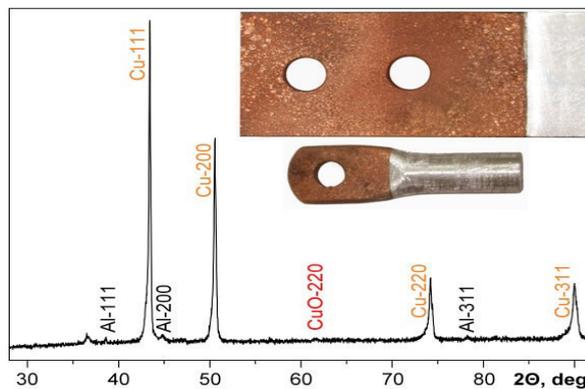


Рис. 2. Типичная рентгеновская дифрактограмма и фотография Al образцов с Cu покрытием

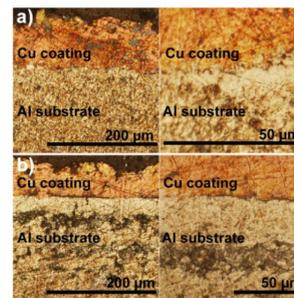


Рис. 3. Микрофотографии шлифов поперечного среза образцов полученных при расстоянии до мишени 225 мм и 300 мм

Для образца, полученного в опыте №2 (рис 3б), характерно наличие явно заметной границы между покрытием и подложкой. Ее формирование обусловлено удалением мишени от среза ствола КМПУ, что влияет на конечную скорость, с которой медь-содержащая плазма достигает алюминиевого образца. За время движения в рабочей камере, плазменный поток существенно теряет свою температуру и кинетическую энергию, что обуславливает отсутствие зоны взаимного перемешивания материалов и неравномерное сопряжение покрытия с подложкой. Полученный результат позволяет судить о том, что скорость, с которой плазменный поток достигает алюминиевой подложки, непосредственным образом влияет на качество получаемого покрытия. Более высокая скорость плазменной струи позволяет получить покрытие, которое полностью повторяет все неровности профиля подложки и обеспечивает плотное прилегание покрытия. 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 рисунке 4 представлены кривые, полученные при проведении скретч-теста для определения прочности сцепления для образца №1, а также SEM снимок царапины, по которому определялось место, где покрытие отслоилось от подложки.

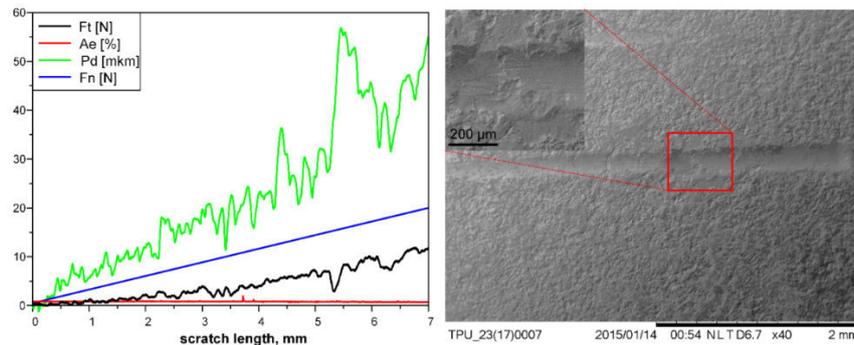


Рис. 4. Результаты скретч-теста а) полученные кривые; б) SEM снимок царапины

Для образца №1 первоначально прочность сцепления определялась по микроснимку царапины. Используя SEM изображение, было определено место, в котором покрытие отошло от подложки. Принимая во внимание ширину царапины 224 μm и скорость движения индентора 1 мм/мин, была найдена величина плотности сцепления, которая равнялась 2430 МПа. Величина плотности сцепления, найденная по графику проникновения индентора в этой точке, оказалось приблизительно равной 2480 МПа. Как видно из полученных результатов, оба метода дают приблизительно одинаковые величины и данный метод расчета может рассматриваться как приемлемый для оценки прочности сцепления при проведении скретч-теста. Тем не менее, стоит отметить, что получающиеся величины прочности сцепления значительно превышают прочность сцепления, достигаемую другими методами напыления меди на алюминий, так для способа холодного газодинамического напыления эта величина составляет 700 МПа [4].

В работе представлены результаты, свидетельствующие о возможности совмещения меди и алюминия путем нанесения медного покрытия на алюминиевые подложки за счет использования высокоскоростной импульсной струи электроразрядной плазмы. Предложенный в работе метод позволяет не только совместить медь и алюминий, но и достичь высокой адгезии за счет наличия области взаимного перемешивания материалов, которая определяет их прочное сцепление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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