

УДК 621.793.09

DOI: 10.17223/00213411/63/10/151

*Е.В. ЯКОВЛЕВ<sup>1</sup>, А.Б. МАРКОВ<sup>1</sup>, Д.А. ШЕПЕЛЬ<sup>1</sup>, В.И. ПЕТРОВ<sup>1</sup>, А.А. НЕЙМАН<sup>2</sup>*

### **АДГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ Ni–Cu-ПОВЕРХНОСТНОГО СПЛАВА, СФОРМИРОВАННОГО С ПОМОЩЬЮ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА**

Проведены измерения адгезионной прочности Ni–Cu-поверхностного сплава на Cu-подложке для разной толщины переходного слоя покрытия. Поверхностный сплав формировался с помощью низкоэнергетического сильноточного электронного пучка микросекундной длительности, при этом толщина переходного слоя покрытия регулировалась толщиной напыляемой Ni-пленки. Многократные итерации напыление – облучение производились в едином вакуумном цикле. Исследование поперечных шлифов показало, что граница раздела покрытие – подложка (Ni–Cu-поверхностный сплав – Cu-подложка) имеет достаточно развитый криволинейный профиль. Установлено, что толщина переходного слоя покрытия уменьшается с увеличением толщины напыляемой пленки. Исследование адгезионной прочности методом скретч-теста показало, что Ni–Cu-поверхностный сплав обладает лучшими характеристиками по сравнению с магнетронным покрытием. Максимальная адгезионная прочность была получена для Ni–Cu-поверхностного сплава, сформированного осаждением Ni-пленки толщиной 0.125 мкм. Для этого случая трещинообразование и локализованное отслоение покрытия происходило при критических нагрузках 15 и 17 Н соответственно, в то время как полного разрушения покрытия не наблюдалось.

**Ключевые слова:** *низкоэнергетический сильноточный электронный пучок, поверхностный сплав, поверхностное легирование, адгезия.*

#### **Введение**

Адгезионная прочность характеризует эффективность сцепления покрытия с подложкой и поэтому является одной из важнейших характеристик. С тех пор как нанесение функциональных покрытий стало широко использоваться в промышленности, улучшение адгезии покрытий к подложкам представляет интересную и важную научно-техническую задачу. Высокий уровень адгезии необходим вне зависимости от функционального назначения покрытия: светоотражающего, декоративного, биосовместимого или коррозионностойкого. На адгезию оказывают влияния как структурные (материальные) особенности (состояние и шероховатость поверхности подложки, коэффициенты теплового расширения подложки и покрытия и др.), так и особенности, связанные с процессом нанесения покрытий (внутренние напряжения, толщина, температура, наличие примесей и структурных дефектов в покрытии и др.) [1]. Негативное влияние многих факторов можно исключить или минимизировать различными способами, так, например, для уменьшения внутренних напряжений в покрытиях используют нанесение дополнительных адгезионных прослоек (металлические/градиентные/нитридные слои) [2, 3]; для подготовки поверхности перед нанесением применяют различные методы плазменной, механической или химической очистки [4–8] и т.д. Кардинальным способом повышения адгезии покрытия к подложке является метод формирования поверхностных сплавов с помощью низкоэнергетического сильноточного электронного пучка (НСЭП) [9, 10]. Поверхностный сплав формируется путем чередующихся операций напыления пленки материала и ее последующего жидкофазного перемешивания с подложкой. Такой способ нанесения покрытия приводит к размытию границы раздела и образованию между покрытием и подложкой переходного слоя. В зависимости от режимов формирования поверхностных сплавов переходный слой может иметь толщину до нескольких микрометров. Однако в научной литературе практически отсутствует информация о влиянии толщины переходного слоя на адгезионные характеристики покрытий.

Цель данной работы – исследование влияния толщины переходного слоя на адгезионные характеристики поверхностного сплава, формируемого путем напыления пленок и их последующего перемешивания НСЭП. Исследования проводили для Cu–Ni-поверхностного сплава. Это сочетание материалов является хорошей модельной системой, поскольку медь и никель образуют непрерывный ряд твердых растворов, что важно с точки зрения формирования переходного слоя.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>