

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРОГРАММИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИКОМПОЗИЦИОННЫХ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ

В ходе проведения научных исследований установлены зависимости влияния параметров программируемых режимов электролиза на функциональные свойства поликомпозиционных никелевых покрытий. Покрытия, сформированные с использованием импульсных униполярного и реверсированного токов, превосходят по микротвёрдости осадки, полученные на постоянном токе.

Никелевые покрытия обеспечивают высокую коррозионную стойкость, твёрдость и износостойкость, защищая металл от агрессивных сред и механических повреждений. Также никелирование позволяет покрыть деталь любой конфигурации, что способствует широкому распространению этого покрытия. Проведенный анализ позволил выделить основные направления для возможного эффективного управления элементным составом и твёрдостью поликомпозиционных покрытий. В отличие от традиционных нестационарных режимов с жестко заданными параметрами, программируемый ток позволяет гибко изменять амплитуду, длительность и частоту импульсов в реальном времени. Управление параметрами поляризующего тока при осаждении позволяет получать мелкокристаллические структуры с различным составом и свойствами. В работе рассмотрено влияние условий электрохимического осаждения на функциональные свойства осадков [1, 2].

На рисунке 1а представлены снимки морфологии поверхностей, полученных при чередовании по 1 минуте постоянного и импульсного 3:7 мс токов, на рисунке 1б – при чередовании по 1 минуте постоянного и реверсированного 60:20 мс токов, в – при чередовании по 1 минуте постоянного и реверсированного 60:30 мс токов, г – при чередовании по 1 минуте постоянного и реверсированного 300:100 мс токов, д – при чередовании по 1 минуте постоянного и реверсированного 12:4 мс токов, е – при чередовании по 1 минуте реверсированного 0,6:0,2 мс и реверсированного 60:30 мс токов, ж – при чередовании по 1 минуте реверсированного 0,6:0,2 мс и реверсированного 60:30 мс токов, з – трехслойное покрытие: постоянный ток 10 мин., затем реверсированный 0,6:0,2 мс 20 минут и реверсированный 12:4 мс 10 мин.

Микротвёрдость никелевых покрытий измеряли с использованием микротвердомера Leica VMHT MOT по методу Кнуппа, который заключается во вдавливании удлинённой алмазной пирамиды в поверхность образца под нагрузкой менее 5 Н. Измерения проводились для каждого образца в трёх точках, что позволило получить усреднённые значения и оценить разброс характеристик. Так микротвёрдость образцов составила от 4,95 до 8,09 ГПа. Использование биполярного импульсного тока при соотношении длительности прямого и обратного импульсов 10:1, 7:1 и 5:1 привёл к её повышению, тогда как при соотношении 3:1 и ниже наблюдалось снижение этого показателя. В случае униполярного импульсного тока микротвёрдость оказывается выше, чем при осаждении на постоянном токе. Для поликомпозиционных никелевых покрытий характерны следующие значения микротвёрдости: 7,48 ГПа на постоянном токе, от 3,35 до 5,92 ГПа – на импульсном, от 3,83 до 7,54 ГПа – на реверсированном, и от 4,95 до 8,01 ГПа – с использованием программируемых токов.

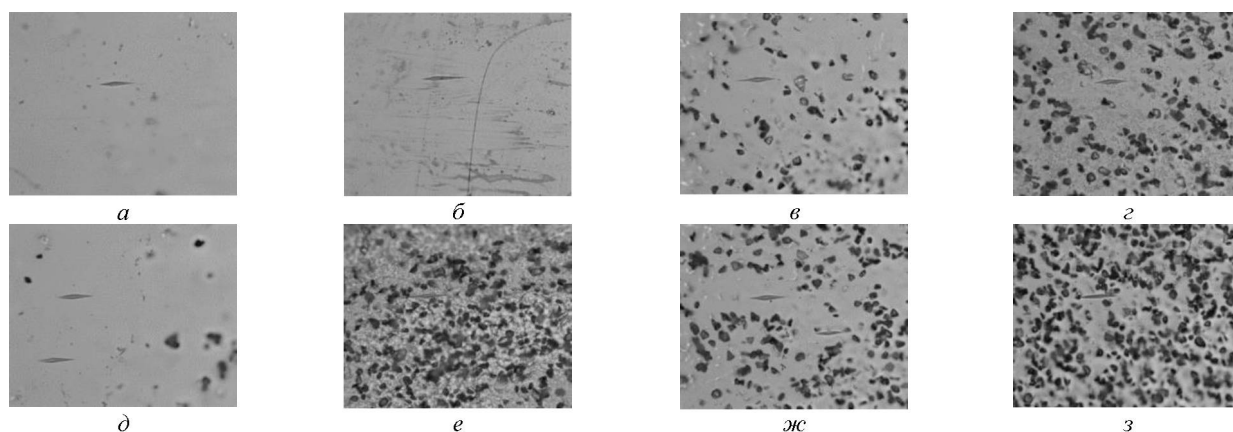


Рисунок 1 – Структура покрытий, сформированных при программном изменении электролиза, с отпечатком, полученным при измерении микротвердости методом Кнуппа (НК)

Исследование трибологических характеристик, а именно коэффициента трения, выполняли на микротрибометре МТ 4.05 по схеме сфера-плоскость, где плоский образец с покрытием приводился в возвратно-поступательное движение под закрепленным шариком при строго контролируемой нормальной нагрузке в диапазоне от 10 мН до 1 Н и скорости скольжения 0,1–10 мм/с, при этом электромагнитный привод обеспечивал минимизацию вибраций и механического шума, искажающих результаты. В процессе испытаний датчики непрерывно регистрировали силу трения, а коэффициент трения рассчитывался как отношение этой силы к приложенной нормальной нагрузке, причём для каждого образца измерения проводились как вдоль, так и поперек линии прокатки подложки для исключения влияния анизотропии свойств материала. Коэффициент трения варьируется от 0,141 до 0,432 и зависит от состава покрытия и шероховатости поверхности. Влияние условий электроосаждения на коэффициент трения поликомпозиционных никелевых покрытий представлено на рисунке 2, где 1 – постоянный ток; 2 – импульсный ток (отношение длительности импульса к длительности паузы  $\tau_{\text{имп}} : \tau_{\text{паузы}} = 3:7$  мс), 3 – при программном изменении (чередование по 1 минуте (постоянного тока и импульсного с соотношением  $\tau_{\text{имп}} : \tau_{\text{паузы}} = 3:7$  мс)

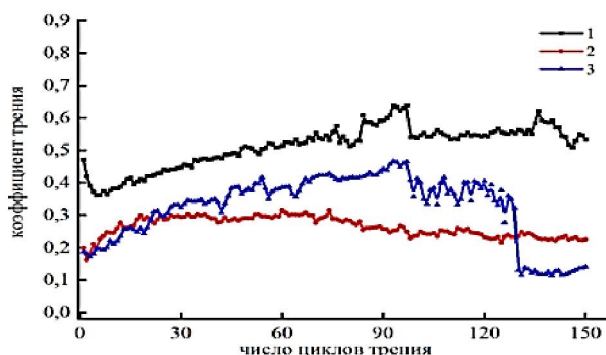


Рисунок 2 – Влияние условий электроосаждения на коэффициент трения поликомпозиционных никелевых покрытий

Использование комбинированных токов позволяет значительно уменьшить коэффициент трения, что придает никелевому покрытию большую износостойкость. Коэффициент трения варьируется от 0,53 при электроосаждении на постоянном токе до 0,44–0,77 на импульсном, 0,26–0,33 на реверсированном и 0,14–0,43 на программируемых токах, что подтверждает эффективность применения сложных режимов электролиза для управления трибологическими свойствами покрытий.

Покрытия толщиной 6,0 и 30,0 мкм наносились на латунные подложки. Коррозионные испытания проводились в течение 8 (восьми) суток в 30-процентном растворе NaCl гравиметрическим методом и заключались в определении потери массы образцов после экспозиции. скорость саморастворения находится в диапазоне 0,0228–0,0478 г/м<sup>2</sup>·ч. Перед и после испытаний образцы промывали дистиллированной водой, сушили и взвешивали. В результате видимые повреждения выявлены не были. Основным недостатком гальванического никеля является его пористость, обусловленная кристаллической неоднородностью, поверхностными дефектами, высокими внутренними напряжениями и питтингом. Решением проблемы может стать чередование микрослоёв, осажденных с помощью программируемых источников импульсного тока: взаимное перекрытие слоев ком-

пенсрует дефекты, характерные для однослойных покрытий. Варьирование параметрами поляризирующего тока позволило получить покрытия без видимых очагов коррозии, а скорость коррозии снизилась в 1,2–2,8 раза по сравнению с покрытиями, осажденными на постоянном токе. Предложенные условия способствуют улучшению защитных характеристик покрытий.

В результате получили, что по сравнению с покрытиями, осажденными на постоянном токе, они обладают более высокой микротвердостью, гладкой мелкозернистой поверхностью и улучшенными электрическими характеристиками. Таким образом, нестационарный электролиз является эффективным методом получения покрытий с заданными улучшенными свойствами для радиоэлектронной промышленности.

#### *Список литературы*

1. Импульсное электроосаждение и свойства композиционных покрытий никель-оксид графена / В. Н. Целуйкин [и др.] // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 305–309.
2. Шушков, Р. В. Влияние режима электролиза на свойства никелевых покрытий / Р. В. Шушков, Н. Д. Соловьева // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т. 21, № 10. – С. 29–33.

In the course of scientific research, the dependences of the influence of the parameters of programmable electrolysis modes on the functional properties of polycomposite nickel coatings have been established. Coatings formed using pulsed unipolar and reversed currents are superior in microstability to precipitation obtained with direct current.

*Ордо София Витальевна*, студентка 3 курса Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, [ssfiaordo29@gmail.com](mailto:ssfiaordo29@gmail.com).

Научный руководитель – *Кузьмар Инна Иосифовна*, кандидат технических наук, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, [kuzmar@bsuir.by](mailto:kuzmar@bsuir.by).