

К. В. Жданова, Л. Г. Смирнова, А. К. Смирнов,
А. С. Зиганшина

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО И ХИМИЧЕСКОГО НИКЕЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Ключевые слова: электрохимическое и химическое никелирование, толщина покрытия, алюминий, медь, сталь, электролиты, кинетика химического процесса, печатные платы.

Проведено исследование процессов электрохимического и химического никелирования изделий из алюминия, меди и стали. Разработаны методики подготовки поверхностей указанных подложек, включающие процессы обезжиривания, травления и активации. Экспериментально изучены механизмы образования покрытий, определены основные параметры, влияющие на качество осаждённого никеля, такие как плотность тока, pH электролита. Исследования показали высокую производительность и качественные характеристики покрытий, полученных электрохимическим методом, при оптимальной плотности тока 0,7 А/дм². Внешний вид всех исследуемых образцов характеризовался гладкой поверхностью серебристо-серого цвета, без матовых пятен и иных дефектов. Расчет коэффициента выхода по току позволил сравнить показатели, при заданной плотности (D = 0,7 А/дм²), эффективности никелирования: для алюминия — 90,67%, для меди — 92,07%, для стали — 90,77%. Проведен сравнительный анализ скоростей осаждения и толщины покрытий, полученных электрохимическим и химическим никелированием. Результаты исследования показали, что электролит гальванического осаждения металла является более стабильным для длительного использования, частых корректировок концентрации основных компонентов, в сравнении с раствором химического никелирования. Практическое значение исследования состоит в разработке эффективных технологий металлопокрытий никелем алюминия, меди и стали, позволяющих повысить надёжность и срок службы изделий в сложных условиях эксплуатации.

К. V. Zhdanova, L. G. Smirnova, A. K. Smirnov,
A. S. Ziganshina

STUDY OF THE PECULIARITIES OF ELECTROCHEMICAL AND CHEMICAL NICKELING OF METALS USED IN THE PRODUCTION OF PRINTED PLATES

Keywords: electrochemical nickel plating, coating thickness, aluminum, copper, steel, electrolytes, electrochemical process kinetics, printed circuit boards.

The processes of electrochemical and chemical nickel plating of aluminum, copper, and steel products have been studied. Methods for preparing the surfaces of these substrates, including degreasing, etching, and activation, have been developed. The mechanisms of coating formation have been experimentally studied, and the main parameters affecting the quality of the deposited nickel, such as current density and pH of the electrolyte, have been determined. The studies have shown high productivity and quality characteristics of the coatings obtained by the electrochemical method, with an optimal current density of 0.7 A/dm². The appearance of all the samples under study was characterized by a smooth, silver-gray surface, with no matte spots or other defects. The current yield coefficient showed that at a given current density (D = 0.7 A/dm²), the nickel plating efficiency was 90.67% for aluminum, 92.07% for copper, and 90.77% for steel. A comparative analysis of the deposition rates and thicknesses of coatings obtained by electrochemical and chemical nickel plating was conducted. The results of the study showed that the electrolyte of the galvanic coating is more stable for long-term use, without frequent adjustments of the concentration of the main components, compared to the solution of chemical nickel plating. The practical significance of the study lies in the development of effective technologies for metal coatings on aluminum, copper, and steel, which can improve the reliability and service life of products in challenging operating conditions.

Введение

Никель представляет собой металл, применяемый в самых разнообразных сферах деятельности человека. Он является важным стратегическим элементом, так как его физические химические свойства многообразны, поэтому его используют в промышленности, авиастроении, машиностроении, а также в медицине и фармацевтической химии [1,2].

Электрохимическое никелирование обладает рядом преимуществ, связанных с технологией получения покрытия: используемые электролиты в гальванических ваннах сохраняют стабильность длительное время при поддержании необходимого уровня pH, исключая необходимость частых корректировок раствора, поэтому чаще всего в состав

покрывающего электролита входят компоненты, которые при растворении всех солей, кислот и добавок образуют буферный электролит. Процесс получения, гальванического никеля протекает при температуре от 15 до 25 °С, что способствует повышению производительности, без потери качества покрытия. Осаждаемый электрохимическим способом элемент характеризуется такими свойствами, как высокая температура плавления, что позволяет его применять на деталях и в приборах, работающих при нагревании длительное время [1-9]. Устойчивость к износу и коррозии, данную характеристику используют в производстве печатных плат в качестве барьерного слоя для защиты омеднённой поверхности платы или

в качестве небольшой прослойки перед финишным иммерсионным золочением, серебрением [10-15]. Благодаря этому покрытия из никеля находят широкое применение в электронной промышленности, автомобильной отрасли и декоративном оформлении изделий.

Целями работы являлось изучение особенности процессов электрохимического и химического никелирования изделий из алюминия, меди и стали и процессов металлизации в зависимости от плотности тока методом металлографической микроскопии и рентгенофлуоресцентным исследовать поверхности покрытий.

Экспериментальная часть

Процесс металлизации начинается с подготовительной стадии обработки поверхности, предшествующей нанесению металлического покрытия. Основные этапы включают удаление смазочно-охлаждающей жидкости (обезжиривание), химическое растворение оксидной пленки (травление) и иницирование активности внешнего слоя металла (активация). Однако для каждого типа изделий необходим индивидуальный подход и особая специфика химического воздействия на поверхность.

Для предотвращения появления покрытий с дефектами, такими как отслоение, неполная металлизация, сколы и неровности, следует применять электролит (табл. 1), pH которого находится в диапазоне от 9 до 10. Поверхность обезжиривают, происходит удаление эмульсии, которая образуется во время металлообработки для снижения трения и нагрева инструментов и самого изделия, что позволяет избежать нежелательной деформации, при этом в кислой среде и нейтральной полного очищения поверхности не происходит.

Состав, применяемый для алюминиевых сплавов (табл.1), является более щадящим, так при pH более 10,5 поверхность алюминия начинает разрушаться. Признаком полного очищения, являлось отсутствие следов масла, жиров и эмульсии, поэтому образцы должны полностью смачиваться водой (отсутствие проблесков металла).

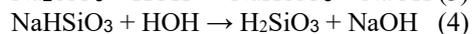
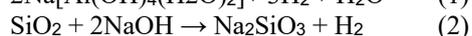
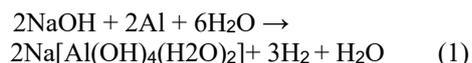
Таблица 1 – Электролит для химического обезжиривания алюминия

Table 1 – Electrolyte for chemical degreasing of aluminum

Компоненты раствора	Содержание г/л
Карбонат натрия	20-30
Тринарийфосфат	30-50
Синтанол ДС-10	3-5
Температуры	60–80 °С
pH	9-10

Обработка алюминиевых поверхностей методом травления осуществляется путем погружения образца в раствор 10%-го гидроксида натрия длительностью около 10–15 секунд. Это позволяет эффективно сгладить неровности и устранить заусенцы, образующиеся вследствие механической

обработки, такой как резка или штамповка. Предположительно, внутри электролитического раствора протекает реакция формирования аквакомплексов алюминия. Вместе с тем, важно учитывать наличие тонкого слоя оксида кремния на поверхности алюминия, который также вступает в реакцию с раствором NaOH, вызывая образование продуктов, показанных в реакциях 2–4. Таким образом, полная картина взаимодействия поверхности алюминия с реагентом включает одновременно два ключевых процесса: устранение механических дефектов и химические превращения присутствующих примесей.



При использовании электролита, содержащего щелочь, требуется несколько этапов промывки, сначала в воде, температура которой варьируется от 45°C до 50°C, а затем применяют двухкаскадную промывку комнатной температуры (20–25)°C [4].

Последующей операцией в процессе подготовки служит осветление. Необходимо подчеркнуть, что при обработке алюминиевых поверхностей методом травления формируется тёмный налёт, содержащий оксид магния и диоксид кремния. Вследствие этого, для достижения требуемого светлого оттенка поверхность алюминиевых сплавов типа Д16 и АД31 подвергали воздействию раствора, состоящего из азотной и фтороводородной кислот. Для легированных алюминиево-магниевого композиций (АМц, АМг2, АМг3) использовали исключительно азотнокислый раствор [3].

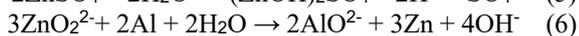
Подготовка алюминиевых пластин включает значимый этап нанесения слоя цинка путем контактного осаждения (табл. 2). Этот процесс осуществляется на предварительно качественно обработанной поверхности.

Таблица 2 – Электролит для контактного осаждения цинка на поверхность алюминия

Table 2 – Electrolyte for contact deposition of zinc on the surface of aluminum

Компоненты раствора	Содержание г/л
Цинк сернокислый,	20-30
Кислота фтористоводородная,	30-50
Карбамид	3-5
Температуры	15-25 °С
pH	3-4

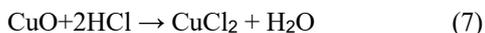
Процедура цинкатной обработки (реакции 5,6) осуществлялась в два этапа, включая промежуточное удаление сформированного металлического слоя. Завершением подготовительного цикла служило образование равномерной серой пленки, характеризующейся отсутствием визуально различимых тёмных либо белых пятен.



Следует обратить внимание на тот факт, что при помещении алюминиевых пластин в электролитический раствор наблюдается интенсивное выделение газа. Во время первого погружения образуется крупнокристаллическое покрытие, отличающееся неоднородностью структуры, проявляющейся наличием белёсых участков на поверхности детали. В связи с этим, образовавшуюся плёнку удаляют посредством кратковременного воздействия слабым раствором азотной кислоты, после чего изделие повторно помещают в состав для контактного осаждения цинка. Второе погружение обеспечивает формирование тонкодисперсного цинкового слоя, придающего изделию характерный серый оттенок.

Предварительная обработка поверхности медных сплавов предусматривает использование специальных растворов для обезжиривания, травления и активации. Очистка заготовок от остатков смазочно-охлаждающих жидкостей выполняется в электролите, аналогичном представленном в таблице 1, однако имеется важное отличие: помимо традиционных компонентов (карбонат натрия, тринатрийфосфат и синтанол ДС-10), в состав включен гидроксид натрия (табл. 3) [3].

Ключевой процедурой последующего этапа подготовки медных сплавов к нанесению покрытий стало травление в среде соляной кислоты с концентрацией 100–150 г/л. В результате реакции окисленных слоев поверхности с HCl формировались характерные зеленовато-голубые стекания отложившихся солей (реакции 7,8).



Это придает раствору повышенную агрессивность по сравнению с составом, предназначенным для обезжиривания алюминиевых изделий (табл. 1).

Таблица 3 – Электролит для химического обезжиривания меди

Table 3 – Electrolyte for chemical degreasing of medical device

Компоненты раствора	Содержание г/л
Карбонат натрия	20-30
Тринатрийфосфат	30-50
Синтанол ДС-10	3-5
Гидроксид натрия	20-50
Температуры	60–80 °С
pH	11-13

Экспериментально выявленное время нахождения образцов в растворе для травления составило от 15 до 30 секунд. Увеличение продолжительности пребывания выше указанного интервала (свыше 35 секунд) приводит к чрезмерному разрушению поверхностного слоя материала. На рисунке 1 представлена фотография,

сделанная при увеличении в 1000 раз на металлографическом микроскопе IMM5000.

Он представляет собой специализированный оптический прибор, предназначенный для исследования микроструктуры металлических образцов.

На рисунке 1 видны неровности материала – основы (медной пластины), что характеризуется появлением небольших эрозионных участков, в процессе это можно заметить увеличением шероховатости и появлением неровностей при стекании воды.

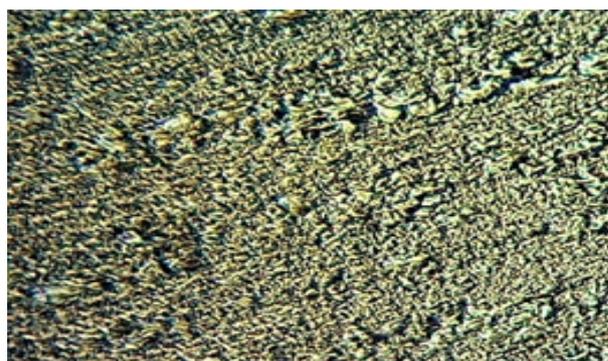


Рис. 1 – Поверхность образца из меди после выдержки в растворе травления более 35 секунд

Fig. 1 – Surface of a copper sample after exposure to an etching solution for more than 35 seconds

Активация поверхности образцов происходила в растворе хлороводородной кислоты два раза, с промежуточным промыванием в проточной воде.

Аналогичным образом происходила подготовка поверхности стальных пластин, однако в процессе были отличия в составе электролитов применяемых для данных образцов.

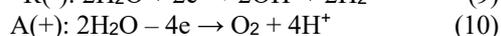
Первоначальным этапом подготовки стальной поверхности к процессу металлизации выступает её химическое обезжиривание. Данная процедура осуществляется путём погружения обрабатываемого изделия в специальный раствор, включающий следующие компоненты: карбонат натрия (20–30 г/л), тринатрийфосфат (30–50 г/л), поверхностно-активное вещество синтанол ДС-10 (3–5 г/л) и гидроксид натрия (20–50 г/л). Показатель pH такого электролита варьируется в пределах от 11 до 13, а рабочая температура поддерживается на уровне 60–80 °С.

Кроме традиционного химического обезжиривания горячим раствором, применяется метод электрохимического обезжиривания. Его преимущество заключается в способности эффективно удалять тонкие слои жиров, снижать хрупкость верхнего слоя и предотвращать появление микроскопических трещин. Отличительной чертой данного метода является использование реверсивного тока, создающего двойной электрический слой, включающий в себя плотную и диффузионную части.

В процессе электрохимического обезжиривания одним из возможных факторов появления дефектов является насыщение поверхности стальных изделий водородом (реакция 9), что может привести к

снижению прочности и появлению хрупкости материала (появление заметных трещин).

Для предотвращения подобного эффекта, используется методика комбинированного обезжиривания, предусматривающая последовательное перемещение изделий сначала на катод, а затем на анод (реакция 10).

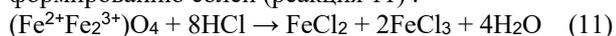


После успешного удаления смазочно-охлаждающей жидкости с поверхности металлических деталей следующим шагом стала операция травления. Этот этап проводился в растворе для холодной обработки стали, в состав которого входят хлороводородная кислота (428 г/л), йодистокислый калий (1 г/л), уротропин (10 г/л).

Важно заметить, что продолжительность пребывания металлической пластины в электролите составляла пятнадцать минут.

Критерием качественной обработки выступает визуальная оценка состояния поверхности, которая должна приобретать ровный, однотонный темно-серый оттенок, свободный от неравномерных цветовых изменений или контрастных пятен. Таким образом, достаточная степень травления определялась именно появлением равномерного цвета металла, подтверждающего полное устранение любых следов загрязнений и достижение оптимальных условий для последующих технологических процессов.

Находясь в электролите, предназначенном для холодного травления, деталь подвергается постепенному разрушению оксидной плёнки, покрывающей её поверхность. Этот процесс сопровождается образованием хлорида железа, поскольку атомы металла, входящие в состав исходной оксидной плёнки, вступают в реакцию с компонентами электролита, приводящая к формированию солей (реакция 11).



После длительного процесса нахождения в ванне, образец тщательно промывался в проточной воде, затем помещался в горячий электролит травления с составом: хлороводородная кислота (30-80 г/л), серная кислота (80-120 г/л), уротропин (3-6 г/л), синтанол ДС-10 (2-3 г/л). Данный раствор служит для растворения остаточных следов окалина, образующихся при термической обработке стали.

Кроме этого, электролит позволял устранить едва заметные следы ржавчины, формирующиеся при длительном пребывании металла во влажных условиях хранения или же при эксплуатации материалов, подверженных сильным механическим нагрузкам и температурным колебаниям.

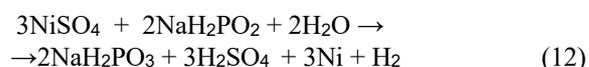
Травление проводилось методом двукратного погружения образца в электролит с обязательной промежуточной промывкой тёплой водой, что позволило предотвратить возможное возникновение мелких повреждений и трещинок на поверхности металла.

Активацию для стальных образцов выполняли с

применением хлороводородной кислоты, концентрация которой варьировалась в диапазоне от 100 до 150 г/л. В результате поверхность пластин приобретала однородный темно-серый оттенок, полностью очищенная от каких-либо следов смазочно-охлаждающей жидкости или масел. Данные экспериментальные условия позволили добиться оптимального состояния поверхности, обеспечивающего эффективное взаимодействие с последующим слоем покрытия.

Электрохимическое никелирование проводили в растворе состоящем из сульфата никеля (140 -200 г/л), сульфата магния (30-50 г/л), сульфата натрия (50-70 г/л), борной кислоты (25-30 г/л) и хлорида натрия (5-10 г/л). Указанный гальванический электролит характеризуется как стабильный и не требующий частых корректировок концентрации основных компонентов, однако следует измерять pH, он должен быть в пределах от 4,5 до 5,5. При увеличении значения в сторону нейтральной среды не происходило полноценной металлизации, появлялись непокрытые участки изделий. Однако, слишком кислая среда ($\text{pH} < 4,5$) вызвала точечную коррозию («питтинг»), образование наростов или увеличение шероховатости, что влияет на эксплуатационные свойства. Все эти дефекты характеризуются общим нарушением внешнего вида покрытия, визуально заметны пятна, неравномерный блеск, неоднородность цвета.

Перед процессом химического никелирования разных металлов – основ, производили подготовку поверхности по разработанному методикам, для дальнейшего сравнения результатов металлизации. Электролит осаждения никеля состоял из: сульфата никеля (20-30 г/л), ацетата натрия (10-20 г/л), гипофосфита натрия (20-25 г/л), мочевины (0,03-0,04 г/л), ледяной уксусной кислоты (6,3-10,5 г/л). Температура, при которой начинал происходить процесс восстановления основного металла, а именно Ni^{2+} на поверхности основ, поддерживалась в интервале от 82 до 86 С; Металлизация проходила при pH (4,3 – 5,0). В процессе химического никелирования происходило активное выделение паров воды и водорода (реакция 12).



При неоднократном использовании электролита проводили контроль содержания фосфитов, при концентрации 20 г/л, происходило появление на поверхности матовых пятен, что не соответствует требованиям, предъявляемым к поверхностям печатных плат

Обсуждение результатов

В рамках проведенного эксперимента наблюдалось систематическое извлечение одной пластины из рабочего раствора каждые десять минут. Пластина последовательно проходила несколько ванн промывки от остатков электролита на поверхности, в проточной воде и последующее размещение в сушильном шкафу для полного высыхания. По

окончанию сушки каждая пластина подвергалась процедуре точечного измерения толщины покрытия.

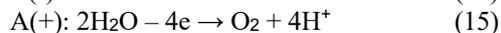
Количество осажденного металла оценивалось двумя различными способами: первым являлся неразрушающий рентгенофлуоресцентный метод анализа на специализированном оборудовании X-STRATA 920 (рис. 2); вторым — непосредственно разрушающий капельный метод, позволяющий оценить толщину покрытия прямым воздействием на образец.



Рис. 2 – Анализатор покрытий рентгенофлуоресцентный X-STRATA 920

Fig. 2 – X-STRATA 920 X-ray Fluorescence Coating Analyzer

В исследуемом растворе гальванического никелирования на электродах протекали следующие химические реакции:



Экспериментальные данные относительно толщины покрытия и скорости осаждения никеля на алюминии, меди и стали при плотности тока 0,7 А/дм² в сравнении с графиком осаждения никеля химическим методом представлены рисунках 3 и 4.

Вычисления значений скорости осаждения и толщины покрытия, рассчитывали по формулам 1,2, применяя закон Фарадея.

Находились скорость осаждения и толщина покрытия по формулам:

$$h = \frac{(m_2 - m_1) \times 10^4}{(S \times n \times d)} \quad (\text{мкм}) \quad (1)$$

где m_1 – масса детали до никелирования, г.; m_2 – масса детали после никелирования, г.; S – площадь одной детали, см²; n – количество деталей подвергшихся никелированию, шт.; d – плотность химически осажденного никеля, г/см³.

Определяли скорость осаждения по формуле:

$$v = \frac{(m_2 - m_1) \times 10^4}{S \times t \times d} \quad (\text{мкм/ч}) \quad (2)$$

где m_1 – масса детали до никелирования, г; m_2 – масса детали после никелирования, г.; S – площадь одной детали, см²; t – время проведения процесса, ч.; d – плотность химически осажденного никеля, г/см³.

Также была рассчитана величина ЭДС для протекания процесса химического никелирования:

Для реакции



расчет ЭДС проводился по следующей формуле:

$$ЭДС = E_{Ni^{2+}/Ni^0} - E_{H_2PO_3^-/H_2PO_2^-} \quad (3)$$

Потенциал металлического электрода, погруженного в раствор, содержащий одноименные катионы, выражается математически следующей формулой:

$$E_{Ni^{2+}/Ni^0} = E_{Ni^{2+}/Ni^0}^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{Ni^{2+}}}{a_{Ni^0}} \quad (4)$$

Для окислительно-восстановительной реакции с участием ионов водорода значение потенциала определяется формулой

$$E_{H_2PO_3^-/H_2PO_2^-} = E_{H_2PO_3^-/H_2PO_2^-}^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{H_2PO_3^-}^a \cdot a_{H^+}^m}{a_{H_2PO_2^-}^b} \quad (5)$$

E – электродный потенциал; E^0 – постоянная величина; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; n – число электронов, участвующих в реакции; F – число Фарадея; a , b , m – стехиометрические коэффициенты участвующих в реакции компонентов.

$$E_{H_2PO_3^-/H_2PO_2^-} = E_{H_2PO_3^-/H_2PO_2^-}^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{H_2PO_3^-}^a}{a_{H_2PO_2^-}^b} \quad (6)$$

Вычисленное значение ЭДС равно 1,40 В. Значение электродвижущей силы положительно, что свидетельствует о самопроизвольности протекания процесса.

Рассчитанное значение электродвижущей силы составляет +1,40 В. Поскольку величина ЭДС положительна, это указывает на способность протекания химического никелирования самопроизвольно.

Получив данные по формула 1,2 были построены зависимости, анализируя их (рис. 3,4), мы наблюдаем равномерный характер кинетики процессов осаждения никеля на поверхностях медных, стальных и алюминиевых подложек, что означает о схожести механизмов формирования слоя при применении как электрохимической металлизации.

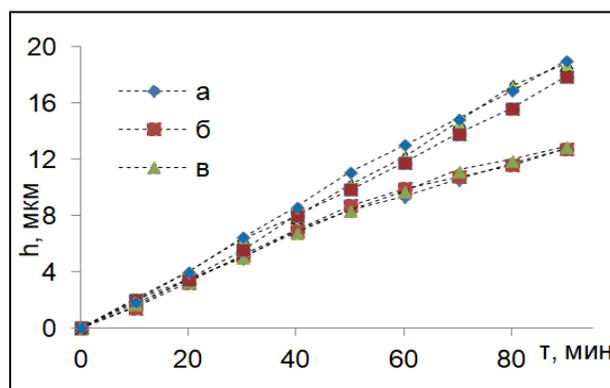


Рис. 3 – График зависимости толщины покрытия никеля от времени при плотности тока 0,7 А/дм² в сравнении с графиком осаждения никеля химическим методом на стали (а), меди (б) и алюминии (в)

Fig. 3 – Graph of the dependence of the nickel coating thickness on time at a current density of 0.7 A/dm², compared to the graph of chemical nickel deposition on steel (a), copper (b), and aluminum (c)

Однако в гальваническом электролите скорость осаждения оказалась ниже (рис. 4), из-за

особенностей распространения тока по изделию. Тем не менее, следует отметить, что в ходе исследований было установлено незначительное снижение производительности в данном растворе. Данный эффект обусловлен особенностями распределения электрического тока по поверхности изделия, что приводит к неравномерному распределению потенциала и, соответственно, снижению общей производительности процесса.

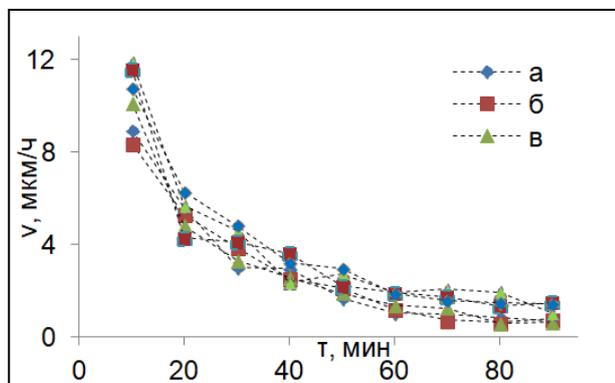


Рис. 4 – График зависимости скорости осаждения никеля от времени при плотности тока $0,7 \text{ А/дм}^2$ в сравнении с графиком осаждения никеля химическим методом на стали (а), меди (б) и алюминии (в)

Fig. 4 – Graph of the dependence of the nickel deposition rate on time at a current density of 0.7 A/dm^2 , compared to the graph of chemical nickel deposition on steel (a), copper (b), and aluminum (c)

Наблюдаемое различие в скоростях осаждения никеля на алюминиевых сплавах оказалось значительно выше и составило около 4 мкм/ч , а толщина покрытия $6 - 8 \text{ мкм}$. Такое значительное отклонение объясняется присутствием предварительной полученной цинкатной пленки, формируемой на поверхности изделий в процессе подготовки. Она оказывает существенное влияние на кинетику последующего никелирования, вызывая торможение ионных обменных реакций на границе раздела фаз металл-электролит, что непосредственно ведет к значительному уменьшению эффективности массопереноса и снижению итоговой скорости осаждения никелевого покрытия.

Исследование показало, что толщина Ni , полученного методом гальванического осаждения, характеризуется большей равномерностью и значительной толщиной по сравнению с покрытием, сформированным путем химического восстановления никеля на алюминии, меди и стали, что показано на рисунке 4. Такая разница обусловлена процессом обеднения раствора ионами Ni^{2+} в ходе металлизации без воздействия электрического тока на пластинки. По мере увеличения продолжительности процесса концентрация основного компонента (NiSO_4) снижается, что негативно сказывается на дальнейшем росте толщины покрытия и приводит к появлению неоднородностей.

Гальванический же способ позволяет

поддерживать оптимальные концентрации реагентов благодаря непрерывному подводу тока, что обеспечивает стабильную толщину.

Внешний вид всех исследуемых образцов характеризуется гладкой поверхностью серебристо-серого цвета, без матовых пятен и иных дефектов. При длительной металлизации рекомендуется периодически (каждые двадцать минут) производить лёгкое встряхивание пластин, что позволяет исключить риск возникновения точечной коррозии («питтинга»). Анализ средних значений коэффициентов выхода по току показал, что при заданной плотности тока ($D = 0,7 \text{ А/дм}^2$) эффективность никелирования составила: для алюминия — $90,67\%$, для меди — $92,07\%$, для стали — $90,77\%$.

Заключение

В проведенной исследовательской работе, разработана методика подготовки поверхностей алюминия, стали и меди.

Изучена кинетика процессов гальванического и химического никелирования изделий, определены значения скорости осаждения никеля и толщины покрытия.

Исследованы особенности никелирования гальваническим способом в зависимости от плотности тока. Установлено, что оптимальное его значение соответствует $0,7 \text{ А/дм}^2$, при этом полученные образцы характеризуются гладкой поверхностью, серебристо-серого цвета, без матовых пятен и иных дефектов.

Методом металлографической микроскопии и методом рентгенофлуоресцентным исследованы полученные никелированные поверхности изделий из алюминия, меди и стали.

Литература

1. Moreira Marques, N. Role of Metallic Nanoparticles in Vaccinology: Implications for Infectious Disease Vaccine Development / N. Moreira Marques // *Frontiers in Immunology*. – 2017. – Т. 239, № 8. – С. 1-10.
2. Остеев М. В. Особенности процесса химического никелирования изделий из ковара: направление подготовки 04.03.01 Химия (Нефтехимия): студент/ Остеев М. В.; Марий. гос. ун-т. – Йошкар-Ола, 220. – 61 с.
3. Жданова К. В. Особенности электрохимического и химического никелирования изделий из алюминия, меди и стали 04.04.01 Химия (Фармацевтическая химия): магистр/ Жданова К. В.; Марий. гос. ун-т. – Йошкар-Ола, 2024. – 80 с.
4. Zhang P. et al. Electroless nickel plating on alumina ceramic activated by metallic nickel as electrocatalyst for sulfur evolution reaction // *Catalysis Communications*. – 2021. – Т. 143. – С. 102-123.
5. Cadet E. Donnes recentes sur metabolisme du fer: un etat de transition / [E. Cadet, M. Gadenne, D. Capront, J. Rochette] // *La revue de medecine interne*. — 2005. — Vol. 26. — P. 315—324.
6. Zhang A. Iron Homeostasis: Recently identified proteins provide insight into novel control mechanisms / A. Zhang, A. Caroline // *J Biol Chem*. — 2009. — Vol. 284. — P. 711—715.
7. Yang M.L., Zhang Z.J., Hu Z.B., Li J.H. Differential pulse anodic stripping voltammetry detection of metallothionein at bismuth film electrodes // *Talanta*. – 2006. –v. 69. – P.1162-1172.

8. Привалов А.С. Влияние температуры раствора на скорость протекания процесса нанесения покрытий химическим методом на примерах практически применяемых составов // Молодежь и наука: шаг к успеху. - 2020. - №5. - С. 121-126.
9. Лукомский О. Я. Физико – химические основы электрохимии / О. Я. Лукомский, Ю. Д. Гамбург. // Интеллект. - 2008. - С. 424.
10. Легкая Д. А., Соловьева Н.Д. Влияние предварительной обработки стали в потенциостатическом режиме на свойства электроосаждения никеля // Тамбов – 2017 - С. 60.
11. Семенычев В.В. Никелирование стали методом электронатирания // Гальванотехника и обработка поверхности. - 2017. - №1. - С. 23-27.
12. А.А. Абрашов, Н.С. Григорян, Т.А. Ваграмян, К.Н. Смирнов. Методы контроля и испытания электрохимических и конверсионных покрытий: учеб.пособие / М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2016. 212 с.
13. Истомина Н.В., Сосновская Н.Г., Полякова А.О. Блестящее никелирование: проблемы и перспективы // Вестник АГТА. - 2014. - №8. - С. 77-80.
14. El Tall O., Beh D., Jaffrezic-Renault N., Vittori O. Electroanalysis of some nitro-compounds using bulk bismuth electrode // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2010. – v.90. – No1. – P. 40-48.
15. Медведев А., Семенов П., Набатов Ю., Шкундина С. Иммерсионное золочение под пайку // Технологии в электронной промышленности. - № 2. – 2010. – С. 6-8.
4. Zhang P. et al. Electroless nickel plating on alumina ceramic activated by metallic nickel as electrocatalyst for sulfur evolution reaction //Catalysis Communications. – 2021. – Т. 143. – С. 102-123.
5. Cadet E. Donnes recentes sur metabolisme du fer: un etat de transition / [E. Cadet, M. Gadenne, D. Capront, J. Rochette] // La revue de medecine interne. — 2005. — Vol. 26. — P. 315—324.
6. Zhang A. Iron Homeostasis: Recently identified proteins provide insight into novel control mechanisms / A. Zhang, A. Caroline // J Biol Chem. — 2009. — Vol. 284. — P. 711—715.
7. Yang M.L., Zhang Z.J., Hu Z.B., Li J.H. Differential pulse anodic stripping voltammetry detection of metallothioncin at bismuth film electrodes // Talanta. – 2006. –v. 69. – P.1162-1172.
8. Privalov, A.S. The Effect of Solution Temperature on the Rate of the Chemical Coating Process Using Practically Used Compositions. Molodezh i Nauka: Shag k Uspekhu, 2020, no. 5, pp. 121-126.
9. Lukomsky, O. Ya. Physical and Chemical Foundations of Electrochemistry / O. Ya. Lukomsky, Yu. D. Gamburg. // Intellect. - 2008. - P. 424.
10. Legkaya D. A., Solovyova N. D. Influence of pre-treatment of steel in the potentiostatic mode on the properties of nickel electrodeposition // Тамбов – 2017 - P. 60.
11. Semenychev V.V. Nickel plating of steel by the method of electro-rubbing // Galvanotechnics and surface treatment. - 2017. - No. 1. - Pp. 23-27.
12. A.A. Abrashov, N.S. Grigoryan, T.A. Vagranyan, K.N. Smirnov. Methods of Control and Testing of Electrochemical and Conversion Coatings: Textbook / Moscow: D.I. Mendeleev Russian Chemical Technological University, 2016. 212 p.m
13. Istomina N.V., Sosnovskaya N.G., Polyakova A.O. Brilliant Nickel Plating: Problems and Prospects // Vestnik AGTA. - 2014. - No. 8. - Pp. 77-80.
14. El Tall O., Beh D., Jaffrezic-Renault N., Vittori O. Electroanalysis of some nitro-compounds using bulk bismuth electrode // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2010. – v.90. – No1. – P. 40-48.
15. Medvedev A., Semenov P., Nabatov Yu., Shkundina S. Immersion Gold Plating for Soldering // Technologies in the Electronic Industry. - No. 2. – 2010. – Pp. 6-8.

References

1. Moreira Marques, N. Role of Metallic Nanoparticles in Vaccinology: Implications for Infectious Disease Vaccine Development / N. Moreira Marques // Frontiers in Immunology. – 2017. – Т. 239, № 8. – С. 1-10.
2. Oosteev M. V. Features of the Chemical Nickel Plating Process for Kovar Products: Field of Study 04.03.01 Chemistry (Petrochemistry): Student/ Oosteev M. V.; Mari State University. – Yoshkar-Ola, 2020. – 61 p.
3. Zhdanova K. V. Features of electrochemical and chemical nickel plating of aluminum, copper, and steel products 04.04.01 Chemistry (Pharmaceutical Chemistry): Master's degree/ Zhdanova K. V.; Mari State University. – Yoshkar-Ola, 2024. – 80 p.

© **К. В. Жданова** – аспирант по специальности «Физическая химия» института естественных наук и фармации, кафедра Химии, Марийский государственный университет (МарГУ), Йошкар-Ола, Россия, zhdan4r@yandex.ru; **Л. Г. Смирнова** – к.х.н., доцент кафедры Химии, МарГУ, smirnova_lg@mail.ru; **А. К. Смирнов** – к.х.н., доцент кафедры Химии МарГУ, aksmi@yandex.ru; **А. С. Зиганшина** – к.х.н., доцент кафедры ТПМ, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия, aygul.ziganshina.89@mail.ru.

© **K. V. Zhdanova** – PhD-student in Physical Chemistry at the Institute of Natural Sciences and Pharmacy, Department of Chemistry, Mari State University (MarSU), Yoshkar-Ola, Russia, zhdan4r@yandex.ru; **L. G. Smirnova** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor of the department of Chemistry, MarSU, smirnova_lg@mail.ru; **A. K. Smirnov** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor of the department of Chemistry, MarSU, aksmi@yandex.ru; **A. S. Ziganshina** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia, aygul.ziganshina.89@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 19.01.26

Дата принятия рукописи в печать – 29.01.26