



**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ  
ЗАЩИТЫ**

**MATERIALS AND EQUIPMENT FOR  
CORROSION PROTECTION**

Article type: original

Тип статьи: научная, оригинальная

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.116.2-2>

**Влияние природы соли никеля на коррозионную стойкость покрытий  
Ni-P осажденных на поверхности магниевого сплава МА2-1**

**В.С. Шендюков<sup>✉</sup>, С.С. Перевозников, Л.С. Цыбульская**

Учреждение Белорусского государственного университета  
«Научно-исследовательский институт физико-химических проблем»,  
Республика Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Ленинградская, д. 14

e-mail: [schendi@mail.ru](mailto:schendi@mail.ru)

**Аннотация.** Методами потенциометрии и сканирующей электронной микроскопии исследовано влияние составов растворов химического никелирования на устойчивость к коррозионным разрушениям покрытий *Ni-P*, осажденных на поверхности магниевого сплава МА2-1. Показано, что в зависимости от природы аниона соли никеля, покрытия *Ni-P* обладают различной коррозионной стойкостью, что связано с различиями в морфологии поверхности формируемых покрытий. Осажденные из сернокислого раствора никелирования покрытия *Ni-P*, являются более стойкими к коррозионным разрушениям, по сравнению с покрытиями, осажденными из уксуснокислого раствора. Об этом свидетельствует формирование мелкокристаллической структуры покрытия с размером зерен порядка 3...5 мкм из раствора, содержащего никель сернокислый. Наибольшей коррозионной стойкостью обладают покрытия *Ni-P*, осажденные из углекислого основного раствора никелирования, для них характерно наименьшее значение размера зерна, порядка 1...2 мкм, а также самая низкая плотность тока коррозии  $i_{корр} = 0,38 \times 10^{-5}$ , мА/см<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** химическое осаждение, покрытие *Ni-P*, магниевый сплав МА2-1, микроструктура, поляризационные кривые, коррозионная стойкость

**Для цитирования:** Шендюков В.С., Перевозников С.С., Цыбульская Л.С. Влияние природы соли никеля на коррозионную стойкость покрытий *Ni-P* осажденных на поверхности магниевого сплава МА2-1 // Практика противокоррозионной защиты. – 2025. – Т. 30, № 2. – С. 20-29. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.116.2-2>

Статья получена 21.02.2025. Принята к публикации 27.04.2025. Опубликовано 01.06.2025.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорганическая химия», проект 2.1.06.01

**The Influence of the Origin of Nickel Salt on the Corrosion Resistance of  
Ni-P Coatings Deposited on the Surface of Magnesium Alloy MA2-1**

**Vladislav S. Shendyukov<sup>✉</sup>, Sergey S. Perevznikov, Ludmila S. Tsybulskaya**

Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University,  
14, Leningradskaya str., Minsk, 220006, Republic of Belarus

e-mail: [schendi@mail.ru](mailto:schendi@mail.ru)

**Abstract.** By potentiometry methods and scanning electron microscopy the influence of the compositions of electroless nickel plating solution on the resistance to corrosion damage of *Ni-P* coatings deposited on the surface of magnesium alloy MA2-1 was studied. It has been shown that, depending on the origin of the nickel salt anion, *Ni-P* coatings have different corrosion resistance, which in turn is influenced by the morphology of the surface of the formed coating. *Ni-P* coatings deposited from a sulfuric acid nickel plating solution are more resistant to corrosion damage compared to coatings deposited from a solution containing nickel acetate. This is evidenced by the formation of a small-crystalline structure of the coating from a solution containing nickel sulfate, with a grain size of about 3...5 microns. The highest corrosion resistance is exhibited by *Ni-P* coatings deposited from a carbonic acid basic nickel plating solution; they are characterized by the lowest grain size of

about 1...2  $\mu\text{m}$  and the lowest corrosion current density  $i_{\text{corr}} = 0.38 \times 10^{-5}$ ,  $\text{mA}/\text{cm}^2$ .

**Keywords:** chemical deposition, Ni-P coating, magnesium alloy MA2-1, polarization curves, corrosion protection

**For citation:** Shendyukov, V. S., Perevoznikov, S. S. & Tsybul'skaya, L. S. (2025). The influence of the origin of nickel salt on the corrosion resistance of Ni-P coatings deposited on the surface of magnesium alloy MA2-1. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 30 (2), 20-29. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.116.2-2>

Received February 12, 2025. Accepted for publication April 27, 2025. Published June 01, 2025.

**Acknowledgments.** The work was carried out with the financial support of the State Program of Scientific Research of the Republic of Belarus "Chemical Processes, Reagents and Technologies, Bioregulators and Bioorganic Chemistry", project 2.1.06.01.

## Введение

Исследования способов защиты магниевых сплавов от коррозионных разрушений в последние десятилетия привлекают внимание большого количества исследователей [1-4]. Это связано с возможностью использовать магний как альтернативу более тяжелым и распространенным сплавам на основе алюминия. Однако для использования магниевых сплавов в различных отраслях промышленности необходимо защищать их поверхность от агрессивного воздействия среды, так как они обладают повышенной химической активностью и способны активно растворяться в кислых средах [4]. Существуют различные методы защиты магниевых сплавов от коррозионных разрушений. Известны работы, где рассматривают нанесение тонких конверсионных пленок на основе хроматов [5], фосфатов [6], фторцирконатов [7] и станатов [8]. Однако эти методы не позволяют в полной мере защитить поверхность магния от коррозионных разрушений из-за низкой механической прочности формируемых пленок. Данные способы защиты нашли применение, в основном, для хранения магниевого сырья. Существует способ, позволяющий формировать на поверхности магния гидридные покрытия [9]. Покрытия, сформированные данным способом, также являются механически непрочными и не нашли широкого применения. Плазменно-электрохимическая анодная обработка магниевых сплавов [10] позволяет получить толстые керамоподобные защитные покрытия, но значительная часть магния в процессе обработки данным способом переходит в керамическую и не проводящую ток матрицу, что является существенным недостатком технологии. Известны защитные покрытия, полученные методом термического напыления [11] и хи-

мического осаждения из паровой фазы [12]. Их недостатком является неспособность получить удовлетворительного качества пленки на изделиях сложной конфигурации, а также в резьбовых и глухих отверстиях. Методы формирования на поверхности алмазоподобных углеродных пленок [13, 14] и плазменно-иммерсионная ионная имплантация [15] являются достаточно дорогостоящими и требуют значительного технического оснащения. Различного рода органические полимерные и лакокрасочные покрытия [4] можно относительно легко нанести на поверхность магниевого сплава, однако данные покрытия являются механически нестойкими, более того, они являются диэлектриками по отношению к основному металлу и не способны проводить электрический ток. Одним из наиболее простых и распространенных методов защиты поверхности магниевых сплавов от коррозионных разрушений является способ химического осаждения покрытий *Ni-P* из водных растворов. Данные покрытия являются механически стойкими к истиранию, твердыми, электропроводными, а увеличение содержания фосфора в покрытии способствует увеличению их коррозионной стойкости. Несмотря на то, что существует большое количество работ, посвященных изучению влияния составов растворов никелирования и условий осаждения на коррозионную стойкость покрытий *Ni-P*, осажденных на подложках из стальных и алюминиевых сплавов [16], информации об осаждении покрытий *Ni-P* на деформируемый сплав магния MA2-1 ограниченное количество. Таким образом, целью данной работы являлось исследование влияния составов растворов никелирования, в частности, природы аниона соли никеля, на стойкость полученных покрытий к образованию пор и их склонность к коррози-

онным разрушениям в среде 3,5% раствора  $NaCl$ .

### Методика экспериментов

В качестве подложки использовали деформируемый магниевый сплав МА2-1 состава, %<sub>вс.</sub>:  $Mg \sim 93,0$ ;  $Al \sim 5,5$ ;  $Zn \sim 1,2$ ;  $Mn \sim 0,3$ . Подложки были предварительно зачищены при помощи шлифовальной бумаги (400...2000 ед.), обезжирены в ультразвуковой ванне в течение 10 мин при температуре 65 °С, протравлены в хроматном травителе в течение 30 с при температуре 18...25 °С и механическом перемешивании со скоростью 250 об/мин магнитной мешалкой IKA C-MAG HS 7. Активацию поверхности проводили в растворе плавиковой кислоты при комнатной температуре и механическом перемешивании [17]. Осаждение покрытия  $Ni-P$  осуществляли из растворов, составы которых приведены в табл. 1.

Измерения зависимости потенциала разомкнутой цепи от продолжительности нахождения образцов в 3,5% растворе  $NaCl$  проводили при комнатной температуре 18...25 °С в двухэлектродной ячейке (объем 100 мл). В качестве электрода сравнения использовали насыщенный хлорсеребряный электрод, помещенный в капилляр Лuggина. Рабочий электрод представлял собой образец сплава магния с осажденным покрытием  $Ni-P$ , изолированный с обратной стороны химически стойким лаком, площадью 1 см<sup>2</sup>. Измерения осуществляли с помощью потенциостата-гальваностата ПИ-50 Pro, подключенного к компьютеру. Анодные и ка-

тодные поляризационные кривые также записывали на потенциостате-гальваностате ПИ-50 Pro в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 2 мВ/с для получения квазистационарных значений потенциала. Измерения выполняли в стеклянной трехэлектродной двухкамерной ячейке, оснащенной насыщенным хлорсеребряным электродом сравнения с капилляром Лuggина, вспомогательным платиновым электродом, и рабочим электродом, представляющим собой химически осажденное покрытие  $Ni-P$  толщиной  $\sim 10$  мкм на подложке магниевого сплава МА2-1 площадью 1 см<sup>2</sup>, изолированной со всех сторон химически стойким лаком. Потенциалы и плотности тока коррозии рассчитывали из анодных и катодных поляризационных кривых, путем экстраполяции линейных Тафелевских участков кривых. Толщину покрытий определяли гравиметрическим способом, взвешивая образцы до и после осаждения на аналитических весах с точностью  $1 \cdot 10^{-5}$  г. Исследование морфологии поверхности проводил с помощью электронного микроскопа LEO1455VP (Carl Zeiss, Германия), снабженного детектором обратно отраженных электронов, а также с использованием оптического микроскопа МВ-10.

### Экспериментальная часть

Известно, что магний обладает повышенной химической активностью в кислых средах из-за высокого отрицательного значения стандартного электродного потенциала (–2,37 В). Также, для придания магнию

**Таблица 1. Составы растворов и условия осаждения покрытий  $Ni-P$  на деформируемый сплав магния марки МА2-1**

**Table 1. Compositions of solutions and conditions for deposition of  $Ni-P$  coatings on deformable magnesium alloy grade MA2-1**

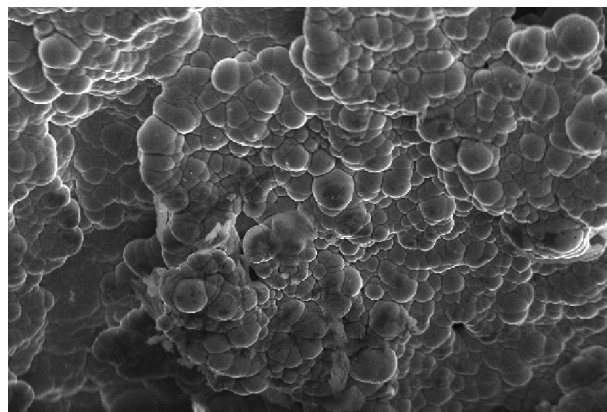
| № 1 (уксуснокислый)<br>/ № 1 (acetate)                                                                                                                                                                          | № 2 (сернокислый)<br>/ № 2 (sulfate)                                                                                                                                                                   | № 3 (углекислый основной)<br>/ № 3 (basic nickel carbonate)                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Ni(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$ – 18,9 г/л<br>$HF$ (47%) – 4,25 мл/л<br>$C_6H_8O_7$ – 5 г/л<br>$NH_4HF_2$ – 10 г/л<br>$NaH_2PO_2 \cdot H_2O$ – 20 г/л<br>Тиомочевина – 1 мг/л<br>$pH=6,0 \pm 0,2$ ; $t=80 \pm 2$ °С | $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ – 20 г/л<br>$HF$ (47%) – 10,2 мл/л<br>$C_6H_8O_7$ – 5 г/л<br>$NH_4HF_2$ – 10 г/л<br>$NaH_2PO_2 \cdot H_2O$ – 20 г/л<br>Тиомочевина – 1 мг/л<br>$pH=6,1 \pm 0,2$ ; $t=82 \pm 2$ °С | $NiCO_3 \cdot 3Ni(OH)_2 \cdot 4H_2O$ – 10 г/л<br>$HF$ (47%) – 6 мл/л<br>$C_6H_8O_7$ – 5,2 г/л<br>$NH_4HF_2$ – 10 г/л<br>$NaH_2PO_2 \cdot H_2O$ – 20 г/л<br>$pH=5,5 \dots 6,3$ ; $t=80 \pm 2$ °С |

улучшенных физико-механических свойств, его легируют такими элементами, как алюминий, марганец, цинк и др., что может приводить к образованию интерметаллидов переменного состава. Все это является причиной неоднородности поверхностного потенциала на отдельных локальных участках магниевом сплава, в результате чего может нарушаться адгезионная прочность при последующем осаждении металлических покрытий. Получить сплошное и беспористое покрытие на поверхности магниевом сплава, которое будет обладать удовлетворительной коррозионной стойкостью, представляет собой непростую задачу. Для решения данной задачи, нами были выбраны три состава раствора химического осаждения покрытия  $Ni-P$ , отличающиеся между собой анионной группой соли никеля (табл. 1).

Из микроснимков, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии и представленных на рис. 1 видно, что морфология поверхности покрытий  $Ni-P$ , полученных из растворов, содержащих различные по природе соли никеля, существенно различается. Наиболее равномерное, мелкокристаллическое и плотноупакованное покрытие без выступов и неоднородностей с размером зерен порядка 1...2 мкм получено при осаждении из раствора, содержащего никель углекислый основной (рис. 1с). Для образца с покрытием  $Ni-P$  осажденным из раствора, содержащего никель сернокислый, характерна более неоднородная морфология поверхности с размерами зерен – порядка 3...5 мкм (рис. 1б).

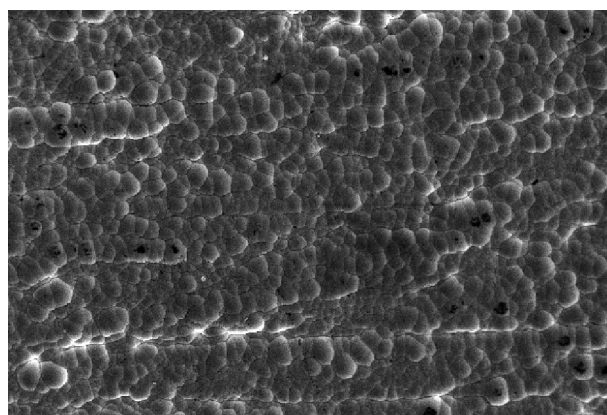
Морфология покрытия  $Ni-P$ , полученного из раствора, содержащего никель уксуснокислый – наиболее неоднородна, по сравнению с двумя предыдущими. Наблюдается рост кристаллов и формирование глобул как в направлении плоскости поверхности образца, так и в его объеме. Размер зерен увеличивается до 7...12 мкм, также можно наблюдать образование углублений в виде питтов на поверхности (рис. 1а). На рис. 2 представлена кривая изменения потенциала разомкнутой цепи сплава магния МА2-1 в среде 3,5%  $NaCl$ .

Известно, что коррозия магниевых сплавов в водной среде  $NaCl$  является многоста-



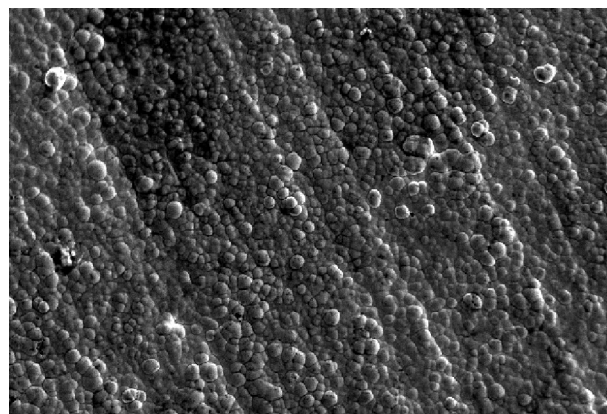
10  $\mu m$

a



10  $\mu m$

b



10  $\mu m$

c

Рис. 1. СЭМ изображения поверхности покрытий  $Ni-P$ , осажденных из растворов, содержащих: (а) – никель уксуснокислый; (б) – никель сернокислый; (с) – никель углекислый основной

Fig. 1. SEM images of  $Ni-P$  films deposited from the solution containing: (a) – nickel acetate; (b) – nickel sulfate; (c) – basic nickel carbonate

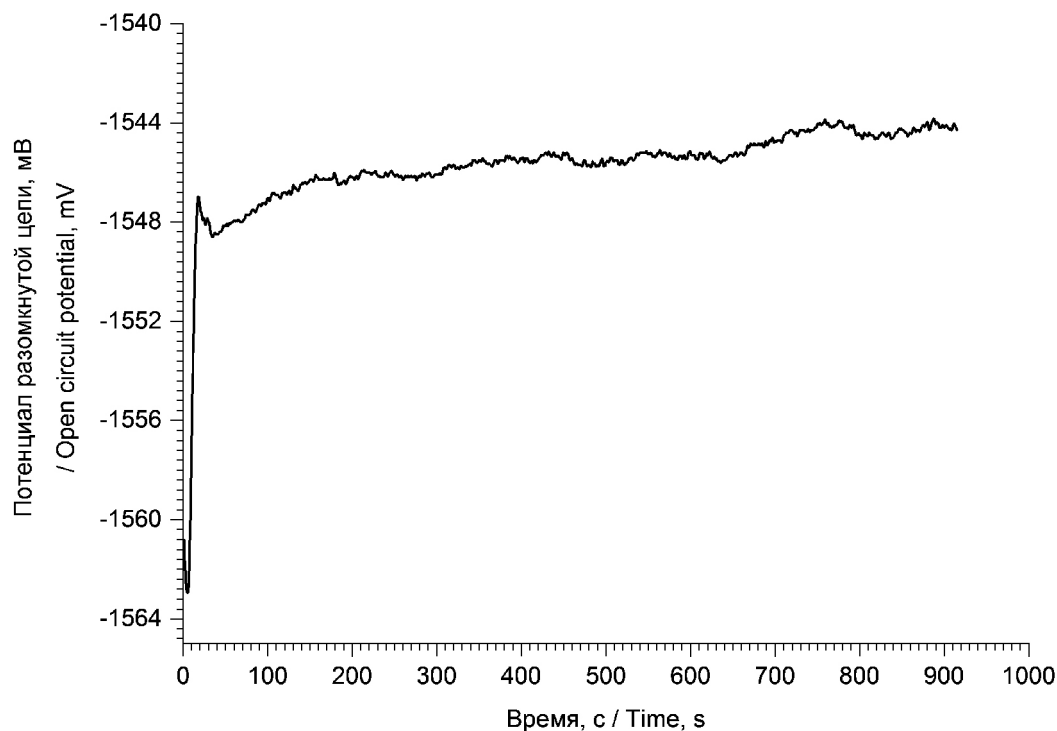


Рис. 2. Кривая зависимости потенциала разомкнутой цепи сплава магния МА2-1 от времени в 3,5% растворе  $NaCl$

Fig. 2. The dependence curve of the open circuit potential of the magnesium alloy MA2-1 on the time in a 3.5%  $NaCl$  solution

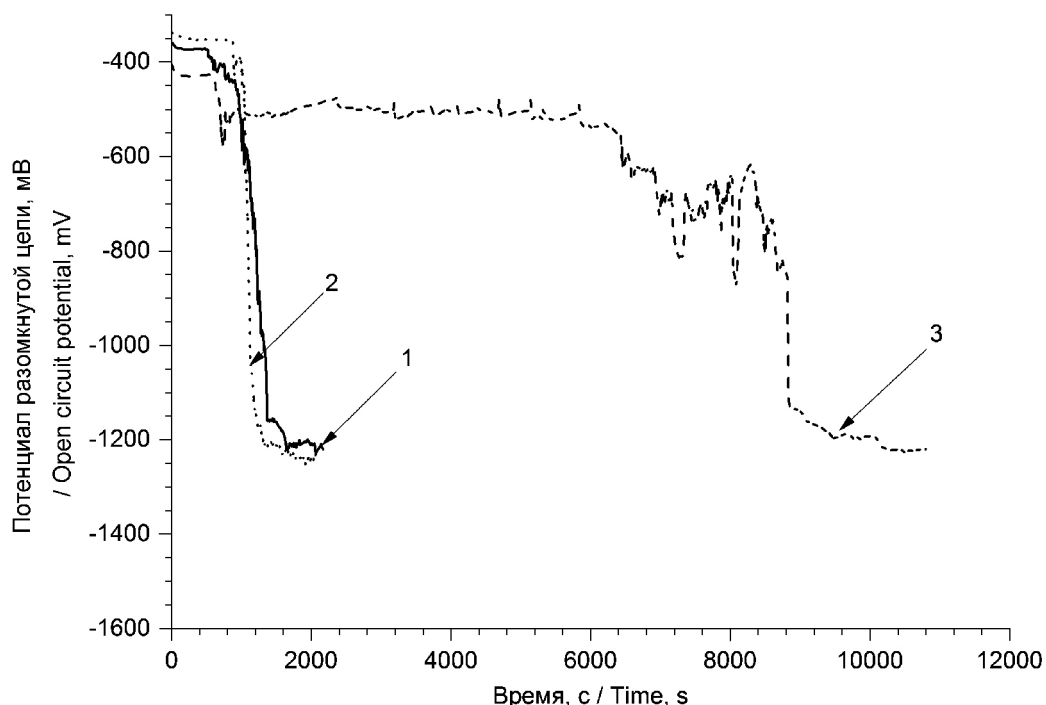


Рис. 3. Кривые изменения потенциала разомкнутой цепи в растворе 3,5%  $NaCl$  для химически осажденных на сплав магния МА2-1 покрытий  $Ni-P$  из уксуснокислого (1), сернокислого (2) и углекислого основного (3) растворов никелирования

Fig. 3. Curves of change in open circuit potential in 3.5%  $NaCl$  solution for chemically deposited  $Ni-P$  coatings on magnesium alloy MA2-1 on from acetic acid (1), sulfate (2) and carbonic acid basic (3) nickel plating solutions

дийным процессом [2]. В момент погружения магниевых образцов потенциал разомкнутой цепи поверхности составляет  $-1560$  мВ, далее наблюдается скачок потенциала в анодную область ( $-1547$  мВ), что указывает на наличие оксидных и гидроксидных пленок на поверхности магниевого сплава, которые препятствуют его активному растворению. Со временем оксидные слои под действием  $\text{NaCl}$  разрушаются, происходит образование пор в местах травления магния. Процесс сопровождается активным выделением водорода. Известно, что по мере увеличения продолжительности нахождения магния в растворе  $\text{NaCl}$  накапливаются продукты травления, которые могут адсорбироваться на поверхности подложки, блокировать ее и замедлять скорость дальнейшего травления.

На рис. 3 представлены кривые изменения потенциала разомкнутой цепи в растворе 3,5%  $\text{NaCl}$  для покрытий  $\text{Ni-P}$  нанесенных из различных по составу растворов, на подложку магниевого сплава МА2-1.

Потенциал разомкнутой цепи всех образцов с покрытием в момент погружения составляет минус  $\sim -400$  мВ, что на  $1150$  мВ положительнее относительно потенциала разомкнутой цепи магниевого сплава (рис. 2). Для покрытия  $\text{Ni-P}$ , осажденного из уксуснокислого раствора никелирования, на протяжении первых  $500$  с измерения потенциал разомкнутой цепи практически не меняется. Это говорит об отсутствии сквозных пор на поверхности (рис. 3, кр. 1). После достижения потенциала ( $-373$  мВ) происходит его смещение в область отрицательных значений. На поверхности покрытия образуются поры, в которых коррозионные процессы ускоряются в результате образования гальванопар между магниевой подложкой и более электроположительным никелевым покрытием (рис. 4а, область б). При достижении потенциала  $\sim (-1200$  мВ), происходит травление непосредственно поверхности магниевого сплава вдоль плоскости осажденного покрытия, что приводит в дальнейшем к отслаиванию и вспучиванию покрытия от магниевой подложки (рис. 4а, область а). Аналогичная зависимость изменения потенциала разомкнутой цепи в среде 3,5% раствора  $\text{NaCl}$  наблюдается для

покрытия  $\text{Ni-P}$ , осажденного из сернокислого раствора никелирования.

Однако продолжительность стабильного состояния потенциала поверхности увеличивается в два раза ( $1000$  с) по сравнению с потенциалом покрытия, полученным из уксуснокислого раствора (рис. 3, кр. 1, 2). После  $1000$  с наблюдается резкое смещение потенциала в область отрицательных значений (рис. 3, кр. 2), на поверхности покрытия образуются сквозные поры (рис. 4б). Повышение коррозионной стойкости покрытия  $\text{Ni-P}$ , полученного из раствора, содержащего сульфат ионы по сравнению с покрытием, осажденным из уксуснокислого раствора, может быть связано, в первую очередь, с формированием более мелкокристаллической и плотноупакованной структуры поверхности. Также из сернокислого раствора никелирования формируется покрытие с меньшей степенью дефектности вдоль междолин кристаллитной границы, что также положительно может сказываться на улучшенных коррозионных свойствах (рис. 1). Для покрытий  $\text{Ni-P}$ , осажденных из углекислого основного раствора никелирования, потенциал разомкнутой цепи остается практически неизменным на протяжении более  $6000$  с измерения в среде 3,5% раствора  $\text{NaCl}$ , что свидетельствует о стабильном состоянии поверхности покрытия  $\text{Ni-P}$ . По достижении потенциала  $\sim (-595$  мВ) появляются единичные поры в покрытии, и потенциал устремляется в область отрицательных значений. По достижении потенциала  $\sim -1200$  мВ происходит активное травление магниевой подложки, сопровождающееся выделением водорода с поверхности образца и отслоением покрытия  $\text{Ni-P}$  от магниевой основы (рис. 4с). Длительное пассивное состояние поверхности образца с покрытием в области потенциалов  $\sim -400 \dots -450$  мВ свидетельствует о более высокой защитной способности покрытий, осажденных из углекислого основного раствора никелирования, в сравнении с сернокислым и уксуснокислым растворами. Морфология поверхности осаждаемого из данного раствора покрытия характеризуется наименьшим размером зерен (рис. 1).

Для количественной оценки скорости коррозионных разрушений покрытий  $\text{Ni-P}$ , полученных из различных растворов никелирова-

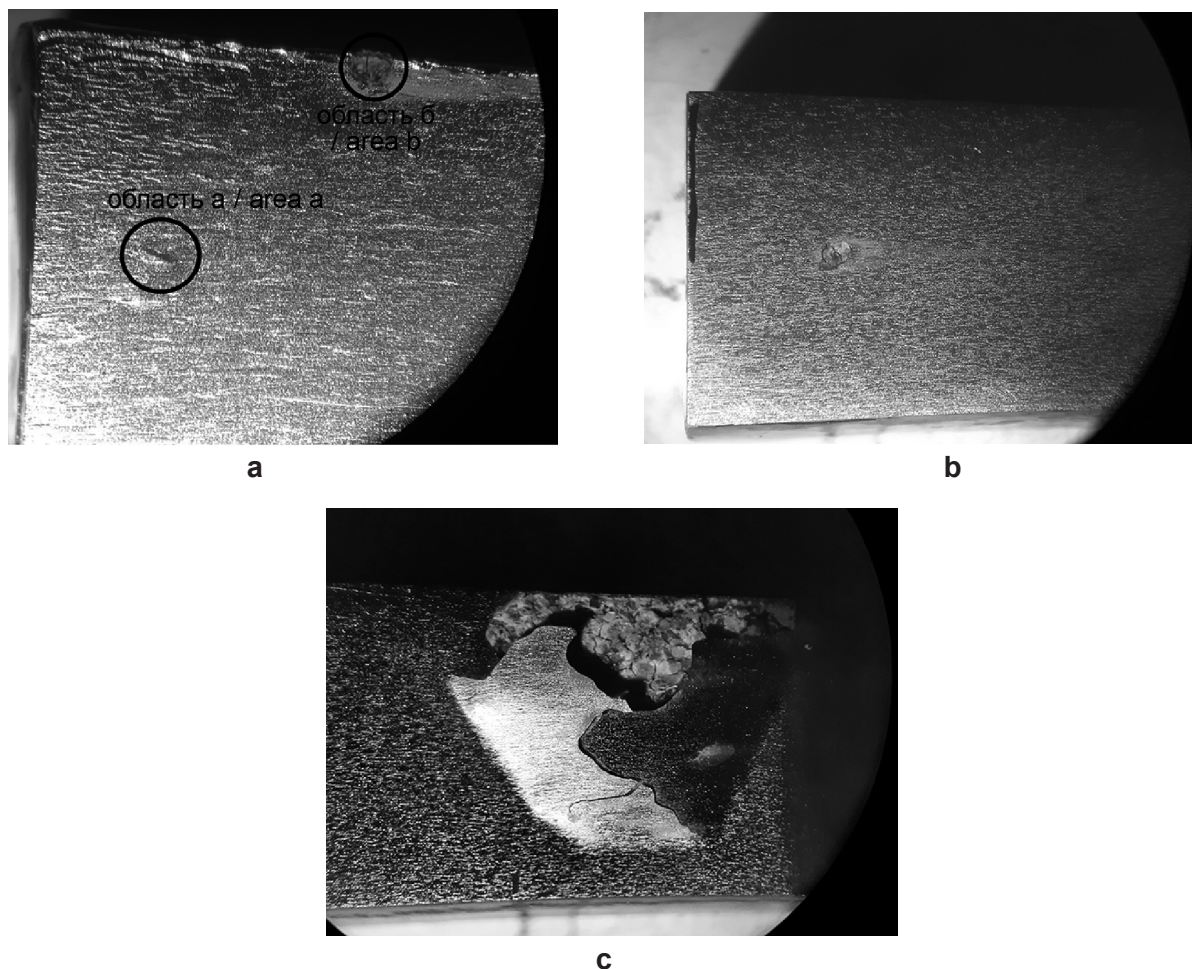


Рис. 4. Снимки оптической микроскопии поверхности образцов магния с покрытием *Ni-P*, осажденным из уксуснокислого – (а); сернокислого – (b); углекислого основного растворов – (с) после испытаний в 3,5% растворе *NaCl*: область (а) – вздутие, область (b) – пора  
Fig. 4. Optical microscopy images of the surface of a magnesium samples with a *Ni-P* coating deposited from a solution containing nickel acetate – (a); nickel sulfate – (b); basic nickel carbonate – (c) after testing to a 3.5% *NaCl* solution: area (a) – swelling, area (b) – pore

Таблица 2. Потенциал и плотность тока коррозии образцов магниевого сплава МА2-1 без покрытия и с покрытием *Ni-P*, осажденным из различных растворов никелирования  
Table 2. Potential and current density of corrosion of magnesium alloy MA2-1 samples without coating and with *Ni-P* coating deposited from various nickel plating solutions

| Образец / Раствор<br>/ Sample / Solution                                               | $E_{корр.}, \text{ мВ} / E_{corr.}, \text{ mV}$ | $\frac{i_{корр}}{i_{корр}} \times 10^{-5}, \text{ мА/см}^2$<br>$/ i_{корр} \times 10^{-5}, \text{ мА/см}^2$ |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (сплав магния МА2-1) № 4<br>/ (magnesium alloy MA2-1) №4                               | $-1251,5 \pm 0,2$                               | 1,58                                                                                                        |
| <i>Ni-P</i> / (уксуснокислый) №3<br><i>Ni-P</i> / (acetate) №3                         | $-392,7 \pm 0,6$                                | 0,50                                                                                                        |
| <i>Ni-P</i> / (сернокислый) № 2<br>/ <i>Ni-P</i> / (sulfate) № 2                       | $-345,09 \pm 4,0$                               | 0,42                                                                                                        |
| <i>Ni-P</i> / (углекислый основной) № 1<br>/ <i>Ni-P</i> / (basic nickel carbonate) №1 | $-340,64 \pm 1,1$                               | 0,38                                                                                                        |

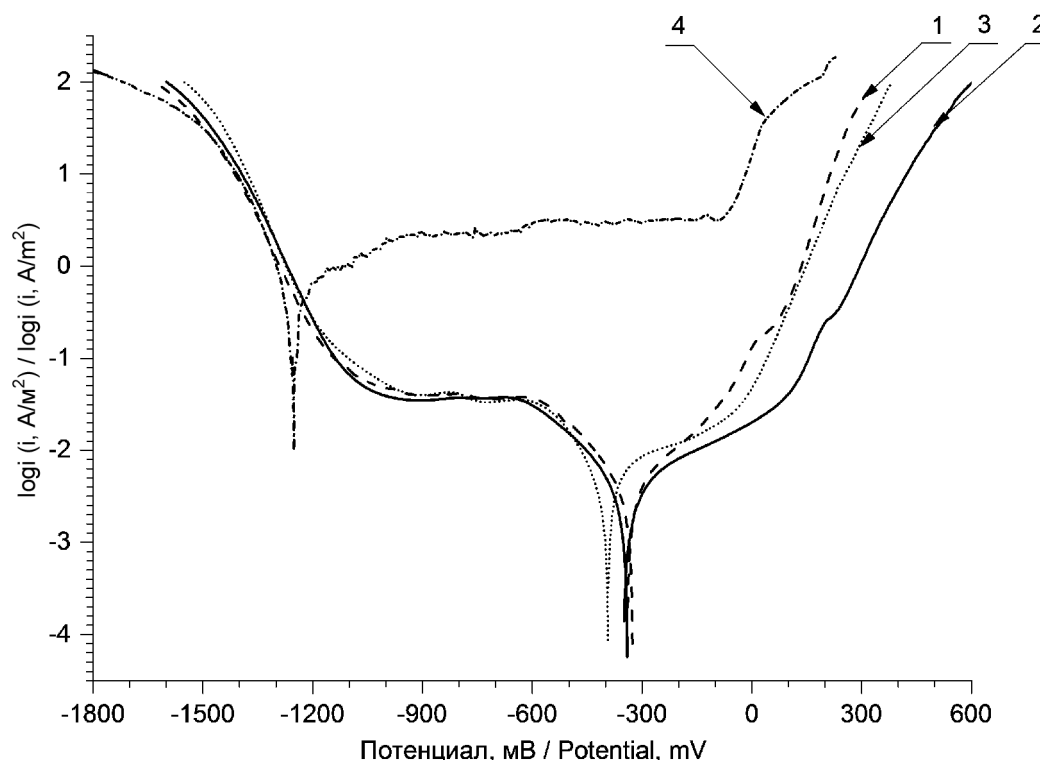


Рис. 5. Катодные и анодные поляризационные кривые, снятые в 3,5% растворе  $NaCl$  для подложки – магниевого сплава МА2–1 (4), и осажденных на нее покрытий  $Ni-P$  из уксуснокислого (3), сернокислого (2) и углекислого основного (1) растворов

Fig. 5. Cathode and anodic polarization curves taken in a 3.5%  $NaCl$  solution for the substrate – magnesium alloy MA2-1 (4), and  $Ni-P$  coatings deposited on she containing: nickel acetate (3), nickel sulfate (2) and basic nickel carbonate (1)

ния, были записаны потенциодинамические поляризационные кривые (рис. 5), из которых были рассчитаны потенциалы ( $E_{корр}$ ) и плотности тока коррозии ( $i_{корр}$ ) (табл. 2).

Образцы с покрытием  $Ni-P$  имеют более положительные значения потенциала коррозии ( $E_{корр} = -340 \dots -392$  мВ) по сравнению с потенциалом для чистого сплава магния МА2-1 ( $E_{корр} = -1251,5$  мВ). Плотность тока коррозии у чистого сплава магния МА2-1 на порядок выше, чем у образцов с покрытием  $Ni-P$  (табл. 2). Наименьшим значением плотности тока коррозии ( $i_{корр} = 0,38 \cdot 10^{-5}$  мА/см<sup>2</sup>) и наиболее положительным значением потенциала коррозии ( $E_{корр} = -340$  мВ) обладает покрытие  $Ni-P$ , осажденное из раствора, содержащего никель углекислый основной. Данное покрытие характеризуется наилучшей коррозионной стойкостью в агрессивной среде 3,5% раствора  $NaCl$  по сравнению с покрытиями, осажденными из растворов, содержащих сернокислый и уксуснокислый никель.

## Выводы

Показано, что защитная способность покрытий  $Ni-P$ , химически осажденных на магниевый сплав МА2-1, может быть оценена по измерению потенциала разомкнутой цепи в агрессивной среде 3,5% раствора  $NaCl$ . Коррозионный процесс с химически осажденным покрытием  $Ni-P$  протекает многостадийно: сначала наблюдается область пассивного состояния; при появлении сквозных пор – резкий рост потенциала в область электроотрицательных значений; при достижении потенциала  $\sim$  минус 1200 мВ происходит увеличение площади травления магниевой подложки и отслоение покрытия в этих местах.

Установлено, что состав раствора никелирования оказывает существенное влияние на микроструктуру формируемого покрытия  $Ni-P$  и его коррозионную стойкость. Наиболее равномерное, плотное и однородное покрытие с наименьшими размерами

зерен получено из углекислого основного раствора никелирования. Эти покрытия проявляют также и наиболее высокую коррозионную стойкость. Для них характерны наиболее низкие токи коррозии и наибольшее смещение потенциала коррозии в область электроположительных значений.

### Литература

1. Zhao C., Wang X., Yu B., Cai M., Yu Q., Zhou F. Research Progress on the Wear and Corrosion Resistant Plasma Electrolytic Oxidation Composite Coatings on Magnesium and Its Alloys // *Coatings*. – 2013. – Vol. 13, № 7. – P. 1189. <https://doi.10.3390/coatings13071189>
2. Van Phuong. N., Park Min-Sik, Dong Yim. C., Sun You B., Moon Sungmo. Corrosion protection utilizing Ag layer on Cu coated AZ31 Mg alloy // *Corrosion Science*. – 2018. – Vol. 136. – P. 201-209. <https://doi.10.1016/j.corsci.2018.03.006>
3. Osipenko M. A., Kasach A. A., Adamiec J., Zimowska M., Kurilo I. I., Kharytonau D. S. Corrosion inhibition of magnesium alloy AZ31 in chloride-containing solutions by aqueous permanganate // *Journal of Solid State Electrochemistry*. – 2023. – Vol. 27. – P. 1847-1860. <https://doi.10.1007/s10008-023-05472-3>
4. Gray J.E., Luan B. Protective coatings on magnesium and its alloys — a critical review // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2002. – Vol. 336. – P. 88-113. [https://doi.10.1016/s0925-8388\(01\)01899-0](https://doi.10.1016/s0925-8388(01)01899-0)
5. Hagans P.L., Haas C.M. Chromate conversion coatings // *ASM Handbook. Surface Engineering*. – 1994. – Vol. 5. – P. 405-411. <https://doi.10.1361/asmhba0001275>
6. Skar J.I., Albright D. Phosphate permanganate: a chrome free alternative for magnesium pretreatment // *International Congress Magnesium Alloys and their Applications*. – 2006. <https://doi.10.1002/3527607552.ch75>
7. Guerri G., Mus C., Stewart K. Surface treatments for large automotive magnesium components // *International Congress Magnesium Alloys and their Applications*. – 2006. <https://doi.10.1002/3527607552.ch77>
8. Gonzalez-Nunez M.A., Skeldon P., Thompson G.E., Karimzadeh H. Kinetics of the development of a nonchromate conversion coating for magnesium alloys and magnesium-based metal matrix composites // *The Journal of Science and Engineering. Corrosion*. – 1999. – Vol. 55, № 12. – P. 1136-1143. <https://doi.10.5006/1.3883951>
9. Yang J., Cui F., Lee In S. Surface modification of magnesium alloys for biomedical applications // *Annals of Biomedical Engineering*. – 2011. – № 7. – P. 1857-1871. <https://doi.10.1007/s10439-011-0300-y>
10. Hilmar von Camp, Dietmar Liedtke, Berthold Schum, WoJorg. Method and device for forming a layer by plasma-chemical process. Patent US 4915978. – 1990. (in USA).
11. Cotell C.M., Sprague J.A., Jr. Smidt F.A. Thermal spray coatings // *ASM Handbook. Surface Engineering*. – 1994. – Vol. 5. – P. 497-509.
12. Stephen D.C., Jr. Bernard S.C. CVD/PVD Coatings // *ASM Handbook. Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*. – 2003. – Vol. 13A. – P. 759-762. <https://doi.10.31399/asm.hb.v13a.a0003685>
13. Hamdy A.S. Corrosion Protection Performance via Nano-Coatings Technologies // *Recent Patents on Materials Science*. – 2010. – Vol. 3. – P. 258-267.
14. Matsufumi T. Coating of surface of magnesium alloy. Patent JP 8109476. – 1996. (Japan).
15. Moller W. Plasma based ion implantation // *Advanced Technologies Based on Wave and Beam Generated Plasmas*. – 1999. – Vol. 67. – P. 191-244.
16. Цыбульская Л.С., Перевозников С.С., Шендюков С.С. Состав, структура и свойства химически осажденного покрытия никель-фосфор-медь // *Журнал Белорусского Государственного Университета. Химия*. – 2019. – № 2. – С. 62-68. <https://doi.10.33581/2520-257X-2019-2-62-68>
17. Шендюков С.С., Перевозников С.С., Цыбульская Л.С. Никелевые покрытия с улучшенными адгезионными свойствами, осажденные на поверхности магниевого сплава МА2-1 // *Журнал Белорусского Государственного Университета. Химия*. – 2023. – № 2. – С. 42-51.

### References

1. Zhao, C., Wang, X., Yu, B., Cai, M., Yu, Q. & Zhou, F. (2013). Research Progress on the Wear and Corrosion Resistant Plasma Electrolytic Oxidation Composite Coatings on Magnesium and Its Alloys. *Coatings*, 13(7),

1189. <https://doi.10.3390/coatings13071189>

2. Van Phuong, N., Park Min-Sik, Dong Yim, C., Sun You, B. & Moon Sungmo. (2018). Corrosion protection utilizing Ag layer on Cu coated AZ31 Mg alloy. *Corrosion Science*, 136, 201-209. <https://doi.10.1016/j.corsci.2018.03.006>

3. Osipenko, M. A., Kasach, A. A., Adamiec, J., Zimowska, M., Kurilo, I. I. & Kharytonau, D. S. (2023). Corrosion inhibition of magnesium alloy AZ31 in chloride-containing solutions by aqueous permanganate. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 27, 1847-1860. <https://doi.10.1007/s10008-023-05472-3>

4. Gray, J. E., Luan, B. (2002). Protective coatings on magnesium and its alloys — a critical review. *Journal of Alloys and Compounds*, 336, 88-113. [https://doi.10.1016/s0925-8388\(01\)01899-0](https://doi.10.1016/s0925-8388(01)01899-0)

5. Hagans, P. L., Haas, C. M. (1994). Chromate conversion coatings. *ASM Handbook. Surface Engineering*, 5, 405-411. <https://doi.10.1361/asmhba0001275>

6. Skar, J. I., Albright, D. (2006). Phosphate permanganate: a chrome free alternative for magnesium pretreatment. *International Congress Magnesium Alloys and their Applications*. <https://doi.10.1002/3527607552.ch75>

7. Guerici, G., Mus, C., Stewart, K. (2006). Surface treatments for large automotive magnesium components. *International Congress Magnesium Alloys and their Applications*. <https://doi.10.1002/3527607552.ch77>

8. Gonzalez-Nunez, M. A., Skeldon, P., Thompson, G. E., Karimzadeh, H. (1999). Kinetics of the development of a nonchromate conversion coating for magnesium alloys and magnesium-based metal matrix composites. *The Journal of Science and Engineering. Corrosion*, 55(12), 1136-1143. <https://doi.10.5006/1.3883951>

9. Yang, J., Cui, F., & Lee In, S. (2011). Surface modification of magnesium alloys for biomedical applications. *Annals of Biomedical Engineering*, (7), 1857-1871. <https://doi.10.1007/s10439-011-0300-y>

10. Hilmar von Cample, Dietmar Liedtke, Berthold Schum, WoJorg. (1990). Method and device for forming a layer by plasma-chemical process. Patent. (in USA).

11. Cotell, C. M., Sprague, J. A., Jr. Smidt, F. A. (1994). Thermal spray coatings. *ASM Handbook. Surface Engineering*, 5, 497-509.

12. Stephen, D. C., Jr. Bernard, S. C. (2003). CVD/ PVD Coatings. *ASM Handbook. Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*, 13A, 759-762. <https://doi.10.31399/asm.hb.v13a.a0003685>

13. Hamdy, A. S. (2010). Corrosion Protection Performance via Nano-Coatings Technologies. *Recent Patents on Materials Science*, 3, 258-267.

14. Matsufumi, T. (1996). Coating of surface of magnesium alloy. *Patent JP 8109476*. (Japan).

15. Moller, W. (1999). Plasma based ion implantation. *Advanced Technologies Based on Wave and Beam Generated Plasmas*, 67, 191-244.

16. Tsybul'skaya, L. S., Perevoznikov, S. S., & Shendyukov, V. S. (2019). Composition, structure and properties of electroless deposited nickel – phosphorus – copper coatings. *Journal of the Belarusian State University. Chemistry*, (2), 62-68. doi: <https://doi.10.33581/2520-257X-2019-2-62-68>. (In Russ.)

17. Shendyukov, V. S., Perevoznikov, S. S., & Tsybul'skaya, L. S. (2023). The nickel coatings with improved adhesive properties deposited on the surface of magnesium alloy MA2-1. *Journal of the Belarusian State University. Chemistry*, (2), 42-51. (In Russ.)

#### Информация об авторах

**Шендюков Владислав Сергеевич**, н.с., Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем» (НИИ ФХП БГУ), г. Минск, Республика Беларусь

**ПЕРЕВОЗНИКОВ Сергей Сергеевич**, с.н.с., НИИ ФХП БГУ, г. Минск, Республика Беларусь

**Цыбульская Людмила Сергеевна**, к.х.н., в.н.с., НИИ ФХП БГУ, г. Минск, Республика Беларусь

#### Information about authors

**Vladislav S. Shendyukov**, researcher, Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University (RI PCP BSU), Minsk, Belarus

**Sergey S. Perevoznikov**, senior researcher, RI PCP BSU, Minsk, Belarus

**Ludmila S. Tsybul'skaya**, Cand. Sci. in Chemistry, leading researcher, RI PCP BSU, Minsk, Belarus