

УДК 544.6

**ПОЛУЧЕНИЕ ПОКРЫТИЯ Ni–Pr МЕТОДОМ НАЛОЖЕНИЯ ЭДС
В ЭКВИМОЛЬНОМ РАСПЛАВЕ NaCl–KCl**© 2021 г. О. В. Чернова^{а, *}, С. В. Жуковин^а^аВятский государственный университет, Киров, Россия

*e-mail: olgavc_kirov@mail.ru

Поступила в редакцию 14.06.2021 г.

После доработки 03.07.2021 г.

Принята к публикации 11.07.2021 г.

Высокотехнологичные промышленные отрасли нуждаются в материалах, обладающих уникальными физико-химическими свойствами, а также низкой стоимостью самого материала. Как показывают исследования, использование редкоземельных металлов (РЗМ) в качестве легирующих добавок к ряду металлов позволяют получать сплавы, необходимые современной технике. Следует отметить перспективность использования РЗМ в качестве компонентов покрытий. В данной работе приведены результаты исследований процесса нанесения покрытия празеодимом на металлический никель методом наложения ЭДС. Для этого был реализован короткозамкнутый гальванический элемент с растворимым анодом из сплава свинца с натрием. Натрий в сплав вводили посредством электролиза до определенного содержания (10.5 Кл). При нанесении покрытий электролитом служила эквимольная смесь хлоридов натрия и калия с добавлением трихлорида празеодима 0.5–7 мас. %. Получение интерметаллических соединений проводилось в температурном интервале 1073–1173 К. насыщение никеля празеодимом проводили в течение 30 минут. Гравиметрическим методом получены зависимости удельного привеса никелевых образцов от температуры и концентрации хлорида празеодима в расплаве. Показано, что графические зависимости величин привеса образцов от концентрации PrCl_3 в электролите – криволинейны, а при концентрации хлорида празеодима 3–4 мас. % выходят на горизонтальный линейный участок. Это позволяет предположить, что при концентрации 3 мас. % и более, скорость диффузионного массопереноса остается практически неизменной. С ростом температуры удельный привес образцов увеличивается. Наличие прямолинейной зависимости удельного привеса от температуры дает основание предполагать, что лимитирующей стадией процесса насыщения является доставка ионов празеодима к поверхности электрода. В результате проведенных исследований предложен механизм и технологические рекомендации получения покрытия на никеле из эквимольного расплава NaCl–KCl с добавлением трихлорида празеодима способом наложения ЭДС. Для определения фазового состава полученные образцы анализировались с помощью порошкового рентгеновского дифрактометра XRD-7000S (Япония). Результаты анализа показали наличие интерметаллического соединения состава NiPr.

Ключевые слова: расплавы хлоридов, празеодим, никель, метод наложения ЭДС, интерметаллическое соединение

DOI: 10.31857/S0235010621060025

ВВЕДЕНИЕ

Сплавы и соединения редкоземельных металлов (РЗМ), в том числе празеодима, обладают физико-химическими свойствами, которые позволяют их эффективно использовать в металлургии, машиностроении, радиоэлектронике, химической и стекольной промышленности. РЗМ используют и при обработке отходов ядерного топ-

лива. Их присутствие в защитном слое повышает жаропрочность, жаростойкость, коррозионную устойчивость, а также придает металлам высокие каталитические и сорбционные свойства [1–5]. Например, сплав Ni–Pr используют при изготовлении оборудования для добычи газа и нефти [6].

Существует множество методов получения интерметаллических соединений (ИМС) на поверхности металла, таких как плазменная и вакуумная электродуговая обработка, электролиз в расплаве соли [7–10]. Наибольший интерес вызывает способ бестокового насыщения редкоземельными металлами за счет их самопроизвольного переноса на металл с более электроположительным потенциалом [11–13]. К недостаткам таких методов можно отнести использование чистых металлических РЗМ, которые удорожают и осложняют процесс. Учитывая перспективу использования сплава Ni–Pr, актуальной задачей является дальнейшее совершенствование методов получения ИМС никель–РЗМ.

Целью данного исследования явилось получение покрытия никель–празеодим из эквимольного расплава NaCl–KCl с использованием трихлорида празеодима методом короткозамкнутого гальванического элемента с растворимым анодом из сплава свинца с натрием.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования использовали методику [14]. Суть метода заключается в получении диффузионных покрытий редкоземельными металлами на никеле с использованием “жертвенного” анода в виде Na–Pb сплава. Для получения Pb, насыщенного Na, проводили электролиз расплава NaCl–KCl со свинцовым катодом. Растворимость натрия в жидком свинце (в диапазоне температур 423–673 К) составляет от 0.47 до 2.38 мас. % [15]. После получения сплава Na–Pb в эквимольный расплав NaCl–KCl добавляли хлорид празеодима и опускали никелевый электрод. Таким образом, после подключения электродов, в гальваническом элементе анодом служил сплав Na–Pb, катодом – никелевый образец.

Для приготовления эквимольных хлоридов натрия и калия квалификации “х. ч.” предварительно сушили под вакуумом, смешивали и переплавляли в кварцевой ячейке. Хлорид празеодима обезвоживали в парах тетрахлорида углерода согласно методике, описанной в работе [16]. После опыта концентрацию трихлорида празеодима в расплаве определяли комплексометрическим методом с использованием индикатора арсеназо I [17]. Разница между содержанием PrCl_3 перед опытом и в застывшем расплаве составляла около 2%, что значительно меньше погрешностей других измерений.

Для изучения фазового состава покрытий никель–празеодим использовали рентгенофазовый анализ с применением порошкового рентгеновского дифрактометра XRD-7000S.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Получение сплава никеля с празеодимом проводили в два этапа в ячейке из оптического кварца (рис. 1а).

Вначале проводили насыщение свинца натрием гальваностатическим методом, с помощью потенциостата-гальваностата Р-1501. В этом случае использовалась трехэлектродная ячейка, где рабочим электродом был свинец, находящийся в алундовом тигле, вспомогательным – стеклоуглерод (СУ-2000), электродом сравнения – свинцовый электрод; молибденовый токоподвод погружали в Pb/NaCl–KCl (эквимоль) + 2.56 мол. % PbCl_2 [18]. Температурная зависимость потенциала (E) свинцового электрода относительно хлорного электрода описывается [18]:

$$E = 1.768 \cdot 9.3 \cdot 10^{-4} \cdot T. \quad (1)$$

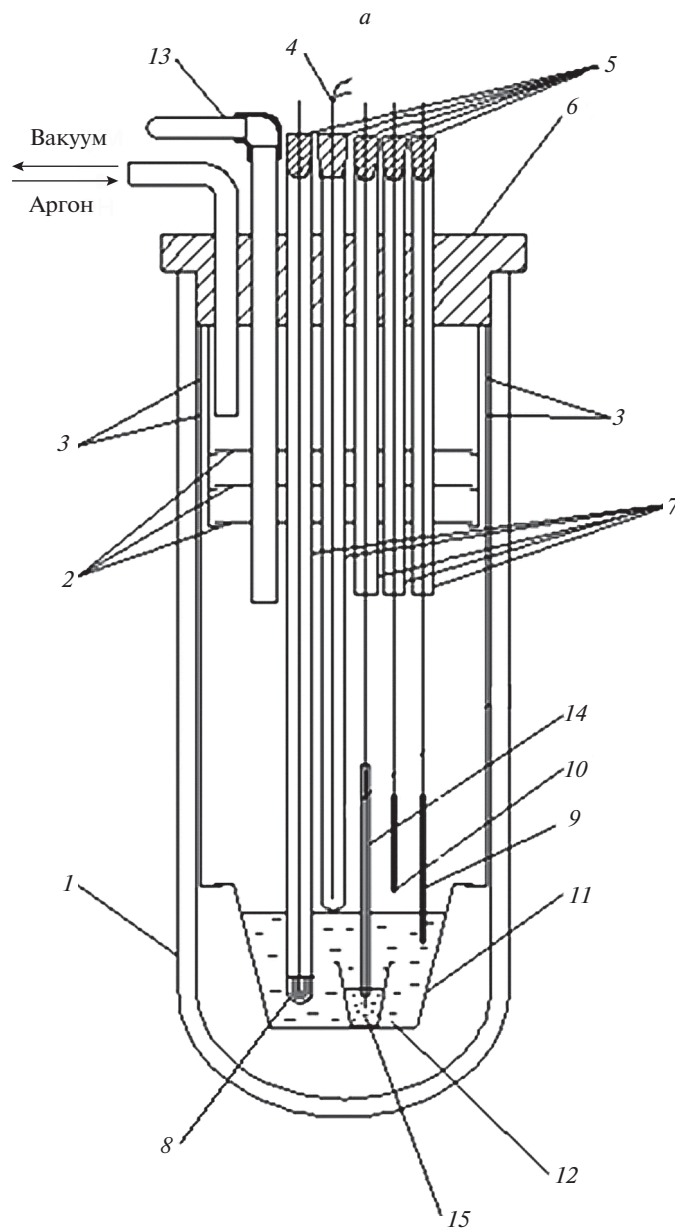


Рис. 1. (а) Схема подключения электродов в процессе получения интерметаллических покрытий методом короткозамкнутого элемента. 1 – пробирка из оптического кварца; 2 – экраны молибденовые; 3 – держатели молибденовые; 4 – термопара (хромель-алюмель); 5 – токоподводы молибденовые; 6 – пробка из вакуумной резины; 7 – кварцевые трубки; 8 – электрод сравнения свинцовый; 9 – вспомогательный электрод (стеклоуглерод); 10 – рабочий электрод (никель); 11 – тигель из стеклоуглерода; 12 – расплав; 13 – устройство для загрузки соли РЗМ; 14 – молибденовый токоподвод; 15 – тигель с расплавленным свинцом. (б) Шлюзовое устройство для загрузки PrCl_3 .

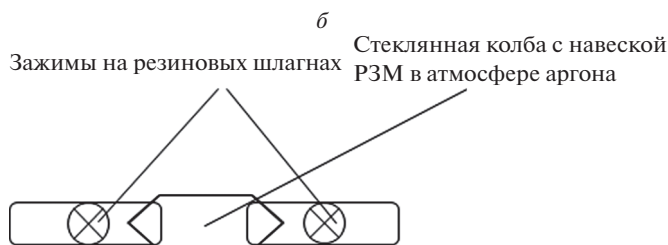


Рис. 1. Продолжение.

Рабочая плотность тока составила $5.5\text{--}6\text{ мА/см}^2$. Электролиз проводили до выхода потенциала свинцового электрода на постоянное значение. Количество пропущенного электричества равнялось 9.7 Кл/см^3 .

После насыщения свинца натрием в расплав опускали никелевый образец, добавляли хлорид празеодима и подключали электроды согласно схеме на рис. 1а. Таким образом, в гальваническом элементе никелевый электрод являлся катодом, анодом выступал расплавленный свинец, насыщенный натрием.

Для предотвращения разгерметизации системы при добавлении хлорида празеодима использовалось шлюзовое устройство (рис. 1б), которое подключается к загрузочному устройству (поз. 13 рис. 1а) и приводится в вертикальное положение. Загрузка РЗМ производится при избыточном давлении аргона.

Собранную ячейку перед экспериментом вакуумировали и заполняли очищенным аргоном. Очистка инертного газа осуществлялась прокачиванием его через геттер с циркониевой стружкой, нагретой до 1073 К , что обеспечивало минимальное присутствие кислорода в ячейке. Для нагрева ячейки использовали печь СШОЛ с автоматическим регулированием температуры. опыты проводили в диапазоне значений температур $1073\text{--}1173\text{ К}$ в течение 30 мин. Температуру расплава измеряли с помощью хромель-алюмелевой термопары (ХА), опущенной в расплав в защитном чехле из кварца.

Диапазон значений концентраций хлорида празеодима, мас. %: 0.5; 1; 3; 5 и 7. Для исключения образования оксихлоридов навеску хлоридов редкоземельных металлов взвешивали в закрытой пробирке. Хлорид празеодима в расплав вводили после заполнения аргоном и нагрева ячейки до температуры опыта.

После опыта никелевые образцы извлекали из ячейки, промывали, сушили и взвешивали. Определяли удельный привес образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость потенциала никелевого образца относительно свинцового электрода сравнения в процессе насыщения его празеодимом в исследуемом расплаве представлена на рис. 2. Видно, что потенциал никелевого электрода в первые 1–2 минуты насыщения празеодимом резко смещается в отрицательную область. При дальнейшем увеличении времени насыщения значение потенциала практически не изменяется. Наличие горизонтальной площадки на графике (рис. 2) свидетельствует о постоянстве концентрации празеодима в поверхностном слое никеля и позволяет предположить, что при диффузионном насыщении никеля празеодимом на поверхности образца образуется однофазное покрытие.

Зависимости потенциала никелевого электрода от концентрации хлорида празеодима в расплаве и температуры при времени насыщения 30 минут представлены на рис. 3 и 4, соответственно.

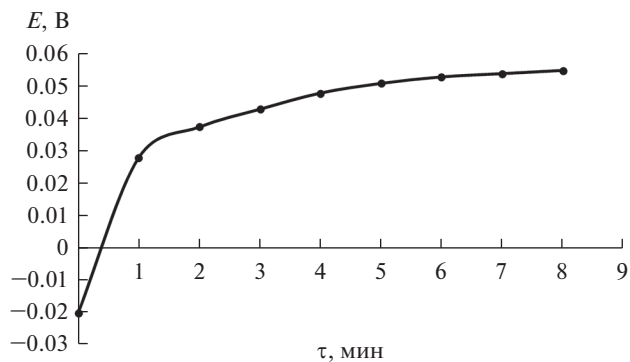


Рис. 2. Изменение потенциала никелевого электрода от времени при температуре $T = 1123$ К и концентрации хлорида празеодима $C = 3$ мас. %.

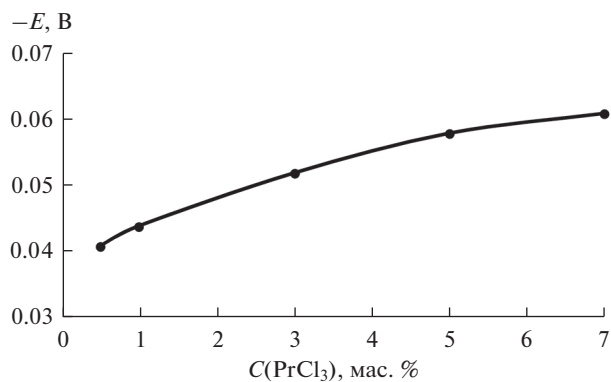


Рис. 3. Зависимость потенциала никелевого электрода от концентрации хлорида празеодима при температуре $T = 1123$ К.

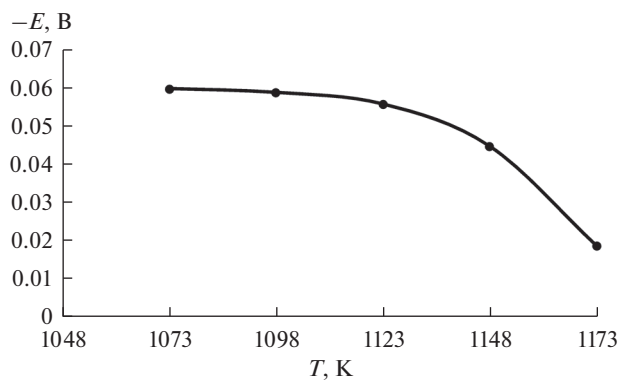


Рис. 4. Изменение потенциала никелевого электрода от температуры при концентрации хлорида празеодима $C = 3$ мас. %.

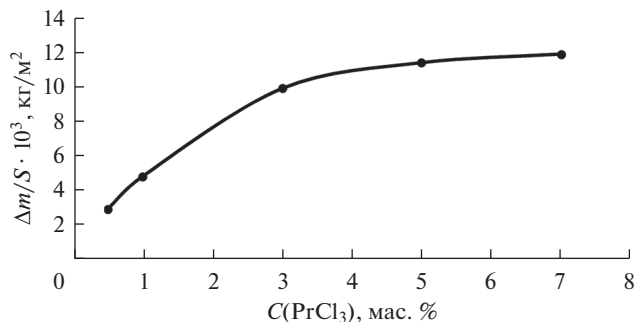


Рис. 5. Зависимость удельного привеса никелевого образца от концентрации хлорида празеодима при температуре $T = 1123$ К.

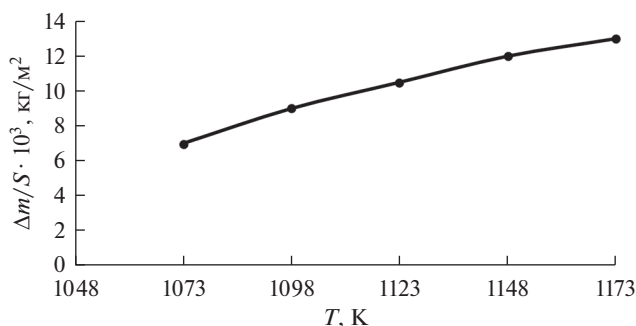


Рис. 6. Зависимость удельного привеса никелевого образца от температуры при концентрации хлорида празеодима $C = 3$ мас. %.

Смещение потенциала в отрицательную область при увеличении концентрации трихлорида празеодима можно объяснить повышением вязкости расплава (рис. 3), что приводит к уменьшению коэффициента диффузии. И наоборот, увеличение температуры снижает вязкость расплава, приводящее к уменьшению потенциала (рис. 4).

Получена зависимость удельного привеса никелевых образцов от концентрации хлорида празеодима в расплаве (рис. 5) и температуры (рис. 6).

Графическая зависимость величин привеса образцов от концентрации PrCl_3 в электролите — криволинейна с выходом на горизонтальный участок при 4–5 мас. % PrCl_3 . При концентрации хлорида празеодима 4 мас. % и выше, скорость диффузионного массопереноса остается практически неизменной. Наиболее вероятно наблюдаемый эффект связан с уменьшением разности потенциалов между сплавом свинца с натрием и покрываемым РЗМ никелевым образцом.

С ростом температуры на 100 градусов удельный привес никелевых образцов увеличивается в два раза. Наличие прямолинейной зависимости удельного привеса от температуры говорит о том, что лимитирующей стадией при получении покрытия Ni–РЗМ является стадия доставки ионов празеодима к поверхности электрода [19].

Результаты зависимости изменения удельного привеса образцов из никеля от времени (τ) в исследуемом диапазоне температур приведены на рис. 7.

Сопоставимые значения удельного привеса были получены при диффузионном насыщении никеля в хлоридных расплавах, содержащих РЗМ [20].

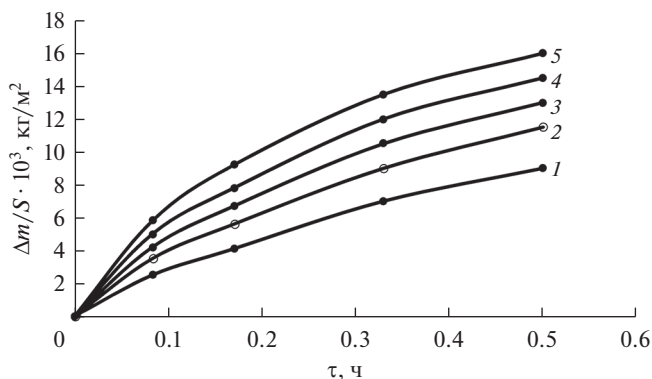


Рис. 7. Зависимость удельного привеса никелевых образцов в зависимости от времени насыщения и температуры: 1 – 1073; 2 – 1098; 3 – 1123; 4 – 1148; 5 – 1173 К.

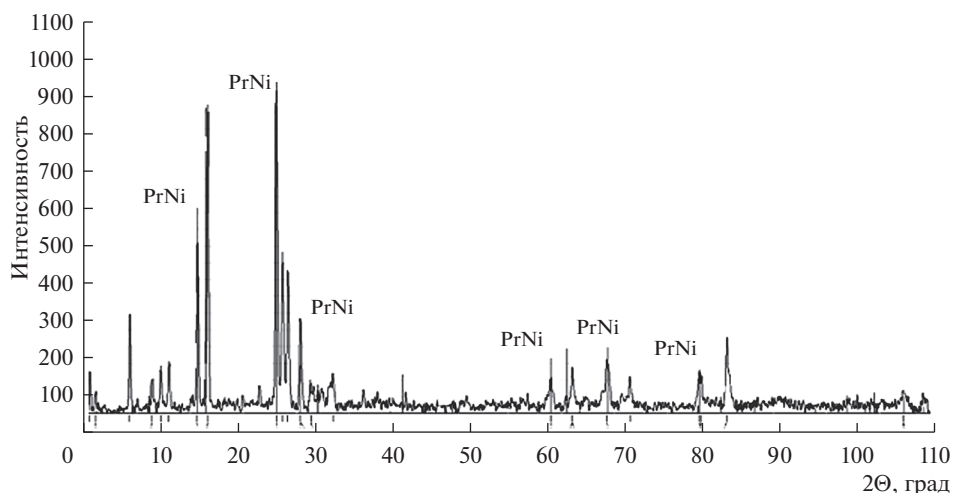


Рис. 8. Рентгенограмма покрытия Ni–Pr, полученного методом короткозамкнутого элемента, $\tau = 30$ мин, $T = 1173$ К.

Результаты эксперимента зависимости удельного привеса от концентрации и температуры аппроксимировали уравнениями вида:

$$m/S = a \cdot e^{b/C}, \quad (2)$$

$$m/S = c + d \cdot T. \quad (3)$$

Значения коэффициентов уравнений (2) и (3) представлены в табл. 1.

Состав полученных покрытий определялся методом рентгенофазового анализа. Расшифровка линий РФА (рис. 8) свидетельствует о наличии в диффузионных покрытиях соединений типа PrNi.

Сплавообразование никеля с празеодимом происходит по следующей реакции [21]:



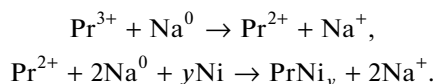
в режиме короткозамкнутого гальванического элемента, в котором катодной реакцией является восстановление празеодима на никеле, а анодной — ионизация натрия.

Таблица 1. Значения коэффициентов уравнений (2) и (3)

PrCl_6^{3-}	$a \cdot 10^{-3}$	b	$-c \cdot 10^3$	$d \cdot 10^6$
	1.3	-0.87	6.1	6.4

Щелочной металл, растворенный в свинце, корродирует в расплав, а восстановленный лантаноид на катоде образует интерметаллическое соединение. Процесс протекает до тех пор, пока потенциал никелевого образца не сравнивается с потенциалом свинцового анода.

Однако, не исключено, что процесс насыщения никеля происходит с участием ионов РЗМ низшей степени окисления [19] по следующей схеме:



ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований, разработан способ нанесения покрытий электроотрицательных металлов на электроположительные с использованием в качестве растворимого анода сплава свинца с натрием. Такой способ позволяет за относительно короткий отрезок времени (30 мин) получать покрытия Ni–Pr методом наложения ЭДС.

На основании анализа полученных данных установлено, что лимитирующей стадией насыщения никеля празеодимом в расплаве NaCl–KCl–PrCl₃ является стадия доставки ионов празеодима к поверхности электрода.

По результатам рентгенофазового анализа установлено, что образующееся покрытие состоит из одной структурной фазы – PrNi.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гилярова А.А. Редкоземельные металлы: применение в Ni-Tech и потенциал Кольского полуострова // Экономика и бизнес: теория и практика. 2018. № 3. С. 40–45.
2. Петров И.М., Наумов А.В. Современное состояние мирового рынка редкоземельных металлов и российские перспективы на этом рынке // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2012. № 2. С. 61–71.
3. Lewin R.G., Harrison M.T. // Cambridge: Woodhead Publishing. 2015. P. 373–414. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-212-9.00015-0>
4. Кузнецов С.А. Электрохимия редкоземельных, редких металлов в солевых расплавах и синтез новых соединений и материалов функционального назначения на их основе // Тез. докл. XIV Всеросс. конф. по физической химии и электрохимии ионных расплавов и твердых электролитов. М.: Екатеринбург ИВЭ УрО РАН. 2007. 1. С. 110.
5. Ажажа В.М., Борц Б.В., Ванжа А.В., Рыбальченко Н.Д., Шевякова Э.П. Возможности применения редкоземельных элементов при создании конструкционных материалов для атомной промышленности Украины // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. 2008. № 1. С. 195–201.
6. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 52–57.
7. Mattox D.M. Commercial applications of overlay coating techniques. // Thin Solid Films, 1981. 84. № 4. P. 361–365.
8. Bunshah R.F. Overview of coating techniques for scale metallurgical, optical and electronic applications // J. Vac. Sci. and Technol. 1984. 2. № 4. P. 789–799.
9. Мовчан Б.А., Малашенко И.С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. Киев.: Наукова думка, 1983.
10. Андреев Ю.Я., Кобзева Н.П., Исаев Н.И. Повышение жаростойкости никеля и его сплавов гальванодиффузионным насыщением лантаном и неодимом из солевого расплава // Защита металлов. 1984. 20. № 6. С. 957–959.
11. Mei Li, Ting-ting Sun, Wei Han, Shan-Shan Wang, Milin Zhang, Yongde Yan, Zhang Meng. Electrochemical preparation of Ho–Ni intermetallic compounds in LiCl–KCl eutectic melts // Chinese journal of inorganic chemistry. 2015. 31. № 1. P. 177–182.

12. Han W., Sheng Q., Zhang M., Li M., Sun T., Liu Y., Ye K., Yan Y., Wang Y. The electrochemical formation of Ni–Tb intermetallic compounds on a nickel electrode in the LiCl–KCl eutectic melts // *Metallurgical and Materials Transactions*. 2014. **45**. P. 929–935.
13. Yamamoto H., Kuroda K., Ichino R., Okido M. Potential response during the formation of the La–Ni alloy after molten salt electrolysis // *Electrochemistry*. 2000. **68**. № 7. P. 591–595.
14. Жуковин С.В., Бушуев А.Н., Чернова О.В. Способ получения диффузионного бестокового покрытия на основе редкоземельного металла на детали из никеля или никелевого сплава. Патент РФ, № 2547585, 2015.
15. Хансен М., Андерко К. Структура двойных сплавов. М.: Металлургия. 1962. II.
16. Ревзин Г.Е. Безводные хлориды редкоземельных элементов и скандия. Методы получения химических реактивов и препаратов: сборник. М.: ИРЕА. 1967. **16**. С. 124–129.
17. Рябчиков Д.И., Рябухин В.А. Аналитическая химия редкоземельных элементов и иттрия. М.: Наука, 1966.
18. Смирнов М.В. Электродные потенциалы в расплавленных хлоридах. М.: Наука, 1973.
19. Илющенко Н.Г., Анфиногенов А.И., Шуров Р.И. Взаимодействие металлов в ионных расплавах. М.: Наука. 1991.
20. Толстобров И.В., Елкин О.В., Бушуев А.Н., Кондратьев Д.А., Козвонин В.А. Получение интерметаллических соединений иттрия на поверхности медных образцов в расплаве NaCl–KCl // *Расплавы*. 2018. № 4. С. 452–462.
21. Ковалевский А.В., Сорока В.В. Реакционная емкость галогенидных расплавов, выдержанных в контакте с металлами // *Расплавы*. 1988. **2**. № 6. С. 28–32.

OBTAINING Ni–Pr COATING BY EMF SUPPLEMENTATION IN EQUIMOLOUS NaCl–KCl MELT

O. V. Chernova¹, S. V. Zhykovin¹

¹*Vyatka State University, Kirov, Russia*

High-tech industrial sectors need materials with unique physical and chemical properties, as well as a low cost of the material itself. As studies show, the use of rare earth metals (REM) as alloying additions to a number of metals makes it possible to obtain alloys required by modern technology. It should be noted that the use of rare earth metals is promising as components of coatings. This paper presents the results of studies of the process of coating with praseodymium on metallic nickel by the method of applying EMF. For this, a short-circuited galvanic cell with a soluble lead-sodium alloy anode was implemented. Sodium was introduced into the alloy by electrolysis to a certain content (10.5 C). During the deposition of coatings, the electrolyte was an equimolar mixture of sodium and potassium chlorides with the addition of praseodymium trichloride 0.5–7 wt %. The preparation of intermetallic compounds was carried out in the temperature range 1073–1173 K. The saturation of nickel with praseodymium was carried out for 30 minutes. The dependences of the specific weight gain of nickel samples on the temperature and concentration of praseodymium chloride in the melt were obtained by the gravimetric method. It is shown that the graphical dependences of the sample weight gain on the PrCl₃ concentration in the electrolyte are curvilinear, and at a praseodymium chloride concentration of 3–4 wt % go to a horizontal linear section. This allows us to assume that at a concentration of 3 wt % and more, the rate of diffusion mass transfer remains practically unchanged. With increasing temperature, the specific weight gain of the samples increases. The presence of a linear dependence of the specific weight gain on temperature suggests that the limiting stage of the saturation process is the delivery of praseodymium ions to the electrode surface. As a result of the studies, a mechanism and technological recommendations for obtaining a coating on nickel from an equimolar NaCl–KCl melt with the addition of praseodymium trichloride by applying an EMF were proposed. To determine the phase composition, the obtained samples were analyzed using an XRD-7000S X-ray powder diffractometer (Japan). The results of the analysis showed the presence of an intermetallic compound of the composition NiPr.

Keywords: chlorides metals, praseodymium, nickel, EMF superposition method, intermetallic compound

REFERENCES

1. Giliarova A.A. Redkozemel'nye metally: primenenie v Hi-Tech i potentsial Kol'skogo poluostrova [Rare earth metals: application of Hi-Tech and potential of Kola peninsula] // *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika*. 2018. № 3. P. 40–45. [In Russian].
2. Petrov I.M., Naumov A.V. Sovremennoe sostoianie mirovogo rynka redkozemel'nykh metallov i rossiiskie perspektivy na etom rynke [The current state of the global market for rare earth metals and Russian prospects in this market] // *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2012. № 2. P. 61–71. [In Russian].
3. Lewin R.G., Harrison M.T. // *Cambridg: Woodhead Publishing*. 2015. P. 373–414. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-78242-212-9.00015-0>
4. Kuznetsov S.A. Elektrokhiimiya redkozemel'nykh, redkikh metallov v solevykh rasplavakh i sintez novykh soedinenii i materialov funktsional'nogo naznacheniia na ikh osnove [Electrochemistry of rare-earth, rare metals in salt melts and the synthesis of new compounds and functional materials based on them] // *Tez. dokl. KHIV Vseross. konf. po fizicheskoy khimii i elektrokhiimii ionnykh rasplavov i tverdykh elektrolitov*. M.: Yekaterinburg IVE UB RAS. 2007. 1. P. 110. [In Russian].
5. Azhazh V.M., Borts B.V., Vanzha A.V., Rybalchenko N. D., Shevyakova E.P. Vozmozhnosti primeneniia redkozemel'nykh elementov pri sozdanii konstruktсионnykh materialov dlia atomnoi promyshlennosti Ukrainy [Possibilities of the use of rare-earth elements in the creation of structural materials for the atomic industry of Ukraine] // *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Vakuuum, chistyie materialy, sverkhprovodniki*. 2008. № 1. P. 195–201. [In Russian].
6. Lomberg B.S., Ovsepiian S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. Vysokotemperaturnye zharoprochnye nikellevye splavy dlia detalei gazoturbinykh dvigatelei [High-temperature heat-resistant nickel alloys for gas turbine engine parts]. *Aviation materials and Technologies*. 2012. № 5. P. 52–57. [In Russian].
7. Mattox D.M. Commercial applications of overlay coating techniques. // *Thin Solid Films*, 1981. **84**. № 4. P. 361–365.
8. Bunshah R.F. Overview of coating techniques for scale metallurgical, optical and electronic applications // *J. Vac. Sci. and Technol.* 1984. **2**. № 4. P. 789–799.
9. Movchan B.A., Malashenko I.S. Zharostoikiie pokrytiia osazhdaemye v vakuume [Heat-resistant coatings deposited in vacuum]. Kiev.: Naukova dumka, 1983. [In Russian].
10. Andreev Iu.Ia., Kobzeva N.P., Isaev N.I. Povyshenie zharostoikosti nikelia i ego splavov gal'vano-diffuzionnym nasyshcheniem lantanom i neodimom iz solevogo rasplava [Improving the heat resistance of nickel and its alloys by galvanodiffusion saturation with lanthanum and neodymium from a salt melt] // *Zashchita metallov*. 1984. **20**. № 6. P. 957–959. [In Russian].
11. Mei Li, Ting-ting Sun, Wei Han, Shan-Shan Wang, Milin Zhang, Yongde Yan, Zhang Meng. Electrochemical preparation of Ho–Ni intermetallic compounds in LiCl–KCl eutectic melts // *Chinese journal of inorganic chemistry*. 2015. **31**. № 1. P. 177–182.
12. Han W., Sheng Q., Zhang M., Li M., Sun T., Liu Y., Ye K., Yan Y., Wang Y. The electrochemical formation of Ni–Tb intermetallic compounds on a nickel electrode in the LiCl–KCl eutectic melts // *Metallurgical and Materials Transactions*. 2014. **45**. P. 929–935.
13. Yamamoto H., Kuroda K., Ichino R., Okido M. Potential response during the formation of the La–Ni alloy after molten salt electrolysis // *Electrochemistry*. 2000. **68**. № 7. P. 591–595.
14. Zhukovin S.V., Bushuev A.N., Chernova O.V. Sposob polucheniia diffuzionnogo bestokovogo pokrytiia na osnove redkozemel'nykh metallov na detali iz nikelia ili nikellevogo splava [A method for producing a diffusive clueless coating based on a rare earth metal on a nickel or nickel alloy part]. Patent RF, № 2 547 585, 2015. [In Russian].
15. Khansen M., Anderko K. Struktura dvoynykh splavov [The structure of double alloys]. M.: Metallurgy. 1962. **II**. [In Russian].
16. Revzin G.Ye. Bezvodnye khlорidy redkozemel'nykh elementov i skandiia. Metody polucheniia khimicheskikh reaktivov i preparatov: sbornik [Anhydrous chlorides of rare-earth elements and scandium. Methods of obtaining chemical reagents and preparations: a collection]. M.: IREA. 1967. **16**. P. 124–129. [In Russian].
17. Riabchikov D.I., Riabukhin V.A. Analiticheskaiia khimiia redkozemel'nykh elementov i ittriia [Analytical chemistry of rare earth elements and yttrium]. M.: Nauka, 1966. [In Russian].
18. Smirnov M.V. Elektroodnyye potentsialy v rasplavlennykh khlорidakh [Electrode potentials in molten chlorides]. Moscow: Nauka Publ. 1973. [In Russian].
19. Iliushchenko N.G., Anfinogenov A.I., Shurov R.I. Vzaimodeistvie metallov v ionnykh rasplavakh [Interaction of metals in ionic melts]. M.: Nauka. 1991. [In Russian].
20. Tolstobrov I.V., El'kin O.V., Bushuev A.N., Kondrat'ev D.A., Kozvonin V.A. Poluchenie intermetallicheskikh soedinenii ittriia na poverkhnosti medny'x obraztsov v rasplave NaCl–KCl // *Rasplavy*. 2018. № 4. P. 452–462. [In Russian].
21. Kovalevskii A.V., Soroka V.V. Reaktsionnaia emkost' galogenidnykh rasplavov, vyderzhannykh v kontakte s metallami [Reaction capacity of halide melts kept in contact with metals]. *Rasplavy*. 1988. **2**. № 6. P. 28–32. [In Russian].