

ЭЛЕКТРОХИМИЯ / ELECTROCHEMISTRY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.119>

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И МОРФОЛОГИЮ СИСТЕМЫ NI – IN

Научная статья

Самофалова А.С.^{1,*}, Звягинцева А.В.²^{1,2} Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (samofalova.94[at]bk.ru)

Аннотация

Структурные и морфологические изменения были осуществлены в электрохимической системе Ni-In для образования структурных ловушек в виде интерметаллидов индия.

Проведено исследование влияния базовых характеристик электролиза (состав структурных составляющих элементов электрохимической системы – Ni и In и плотность катодного тока) в направлении формирования топологии, морфологии, микроструктуры, в том числе и наноструктур, и их фазовых составляющих для обеспечения соответствующих свойств.

Показателем требуемой выстраиваемой структуры служило присутствие структурных ловушек в электрохимической системе Ni-In. В частности в исследуемой системе, реализован синтез интерметаллидов индия, выступающих в качестве ловушек для атомов водорода, в системе Ni-In, не предрасположенной к его накоплению.

Проанализированные и обобщенные сведения об комплексных структурных изысканиях покрытия позволили определить количественный состав электролита. По сути, в данной работе практически реализована концепция: формируемая структура системы – состав электролита никелирования по базовым структурным компонентам – необходимые свойства.

Одним из важнейших результатов изысканий в представленной статье можно считать:

1. Изученная кумуляция In в системе Ni-In составляет 15 мас. %. при возрастании $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ с 1 до 12 г/л в растворе.
 2. Выбрана концентрация $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3 = 4$ г/л в растворе для реализации электролиза Ni-In композитов.
 3. При концентрации $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3 = 4$ г/л генерируются интерметаллические фазы состава InNi_2 , InNi_3 , In_3Ni_2 и $\eta\text{-In}_{27}\text{Ni}_{10}$, зафиксированные дифрактометрическим подходом.
 4. Реализован синтез композита $\text{Ni}_{70}\text{In}_{30}$ из электролита с концентрацией $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3 = 4$ г/л, имеющий своей отличительной особенностью структуру, создающей условия для удерживания водорода, с потенциальным последующим легированием.
 5. Топологические изыскания покрытия $\text{Ni}_{70}\text{In}_{30}$ свидетельствуют о развитости его поверхности, обусловленной формированием островковых зародышей при росте пленки на первоначальной фазе формирования.
- Ключевые слова:** электрохимическое осаждение, морфология системы, электролит, электрохимический синтез, электроосаждение.

INFLUENCE OF ELECTROCHEMICAL DEPOSITION MODES ON THE STRUCTURE AND MORPHOLOGY OF THE NI – IN SYSTEM

Research article

Samofalova A.S.^{1,*}, Zvyagintseva A.V.²^{1,2} Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

* Corresponding author (samofalova.94[at]bk.ru)

Abstract

Structural and morphological changes were carried out in the Ni-In electrochemical system to form structural traps in the form of indium intermetallides.

The influence of the basic characteristics of electrolysis (the composition of the structural components of the elements of the electrochemical system – Ni and In and the density of the cathode current) in the direction of the formation of topology, morphology, microstructure, including nanostructures, and their phase components to ensure appropriate properties has been.

The presence of structural traps in the Ni-In electrochemical system served as an indicator of the required structure to be built. In particular, in the system under study, the synthesis of indium intermetallides acting as traps for hydrogen atoms was realized in the Ni-In system, which is not predisposed to its accumulation.

The analyzed and generalized information on complex structural studies of the coating allowed us to determine the quantitative composition of the electrolyte. In fact, in this work, the concept is practically implemented: the formed structure of the system – the composition of the nickel plating electrolyte according to the basic structural components – the necessary properties.

One of the most important results of the research in the presented article can be considered:

1. The studied accumulation of In in the Ni-In system is 15 wt. %. with an increase in $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ from 1 to 12 g/l in solution.
2. The concentration of $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3 = 4$ g/l in solution was selected for the implementation of electrosynthesis of Ni-In composites.

3. At a concentration of $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3 = 4 \text{ g/l}$, intermetallic phases of the composition InNi_2 , InNi_3 , In_3Ni_2 and $\eta\text{-In}_{27}\text{Ni}_{10}$ are generated, fixed by the diffractometric approach.

4. The synthesis of the $\text{Ni}_{70}\text{In}_{30}$ composite from an electrolyte with a concentration of $\text{In}^{2+}(\text{SO}_4)_3 = 4 \text{ g/l}$ has been realized, which has a distinctive feature of a structure that creates conditions for hydrogen retention, with potential subsequent doping.

5. Topological surveys of the $\text{Ni}_{70}\text{In}_{30}$ coating indicate the development of its surface due to the formation of insular nuclei during the growth of the film at the initial phase of formation.

Keywords: electrochemical deposition, morphology of the system, electrolyte, electrochemical synthesis, electrodeposition.

Введение

Легированные материалы и металлические композиции с индием демонстрируют разноплановую заинтересованность и потребность в них индустриальной сферы и техносферы разнообразной профильности.

Легирование никеля индием повышает его пластичность, износостойкость, предел прочности при растяжении, облегчает обрабатываемость, повышает коррозионную стойкость, придает способность к пайке и свариваемости с токопроводящими элементами [1], [2], [3]. Электрохимически синтезированные композиты Ni-In с содержанием индия менее 9 мас. % не склонны к накоплению водорода [2], [3]. При концентрации индия более 10 мас. % образуются интерметаллические фазы, которые могут действовать как структурные ловушки для атомов водорода, если фаза имеет некогерентное связывание с матрицей Ni через сетку дислокаций.

Основная стратегия работы заключается в изменении структуры и топологии электрохимических систем с целью формирования структурных и примесных ловушек для накопления водорода. Реализация такого утверждения осуществляется на системах, которые не склонны к поглощению водорода, в частности для композита Ni-In, синтезируемого гальваническим способом [4], [5].

Цель конкретной публикации заключается в отражении итогов изыскания взаимосвязи: формируемая структура и топология системы Ni-In – состав электролита никелирования по базовым структурным компонентам (Ni и In) – необходимые свойства (способность накапливать водород [4], [6]).

Методы и принципы исследования

Соединения Ni-In (далее электрохимические композиты) синтезировали из электролита с базовыми ингредиентами, г/л: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 140$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} = 20$, $\text{H}_2\text{Mal} = 52 \text{ г/л}$ (малоновая кислота); $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3 = 0; 0,5; 1; 2; 4; 8; 12$ и композицией добавок, гальваническим способом [4], [5]. Анод – Pt, катод – Cu.

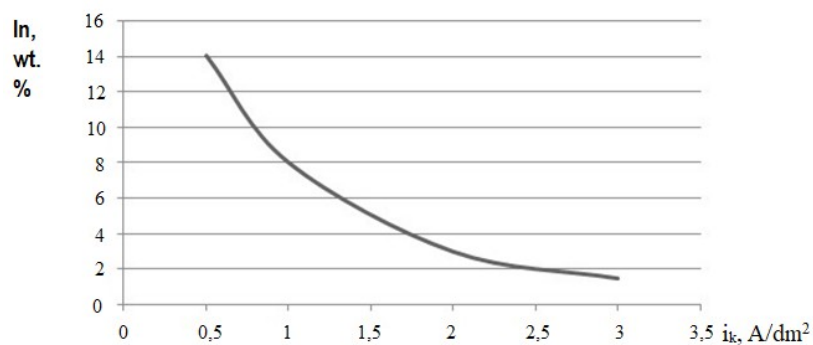
С точки зрения технологической практики наиболее целесообразные режимы электролиза Ni основы: плотность катодного тока, $i_k - 2-3 \text{ A/дм}^2$, температура электролита – $20 \text{ }^\circ\text{C}$, pH – 4,0-5,0. Приведенные технологические параметры удовлетворяют необходимым условиям электролиза: скорость роста (v) Ni-In-пленки, выход по току (BT_{Ni}), и предоставляют возможность синтеза однотипных, идентичных по толщине образцов при достаточной, соответствующей требованиям техпроцесса коррозионной стойкости и прочности. Для учета воздействия критериев электролиза по отдельности, то есть индивидуально на формирование пленки образца, менялась одна конкретная характеристика.

В конкретной публикации описано воздействие только i_k и $\text{CIn}_2(\text{SO}_4)_3$ (концентрация $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ в электролите). Основополагающий принцип изыскания – учет взаимовлияния базовых характеристик электролиза (состав структурных составляющих элементов электрохимической системы – Ni и In и i_k) в направлении формирования топологии, морфологии, микроструктуры, и их фазовых составляющих для обеспечения соответствующих свойств. Конечный итог изыскания – базовый состав раствора электролита по информации об исследованной структуре формируемого образца Ni-In.

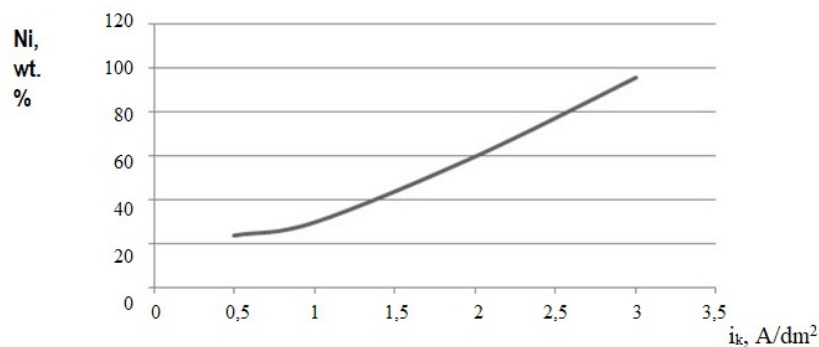
Микроструктура образцов на атомном уровне проверялась на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47 [7], [8], [9], [10]. Фазовый состав оценивался на приборе ДРОН 2.0 принципами рентгеновской дифракции [7], [8], [9], [10].

Результаты исследований

При варьировании i_k от 0,5 до 3 A/дм^2 , наблюдается уменьшение содержания In в системе от 14 до 1,5 вес. % (рис. 1а), а содержание Ni возрастает от 24 до 96 вес. % (рис. 1б). Полученная закономерность обусловлена большей скоростью разряда катионов Ni^{2+} , чем катионов In^{3+} , и соответственно различными наклонами парциальных кривых выделения Ni^{2+} и In^{3+} , согласно изысканиям в [1], [9].



(а)



(б)

Рисунок 1 - Зависимость элементного состава образцов Ni-In от i_k :
(а) – содержание In; (б) – содержание Ni
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.119.1>

Было обнаружено, что при изменении i_k с 0,5 до 3 A/dm^2 толщина покрытия увеличивается с 2,6 до 6 мкм (рис. 2). В режиме $i_k = 0,5 A/dm^2$ толщина покрытия (d) равна 2,72 мкм, при $i_k = 1 A/dm^2$ d = 3,54 мкм, при $i_k = 2 A/dm^2$ d = 4,63 мкм, при $i_k = 3 A/dm^2$ толщина достигает 5,99 мкм.

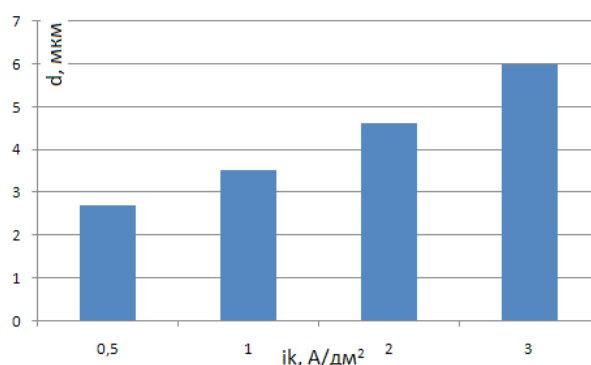
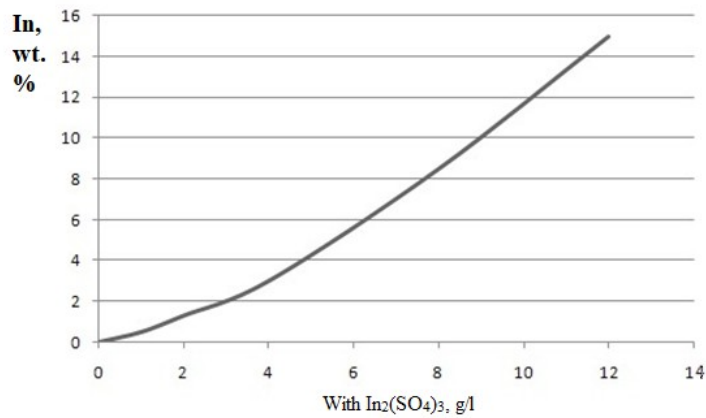


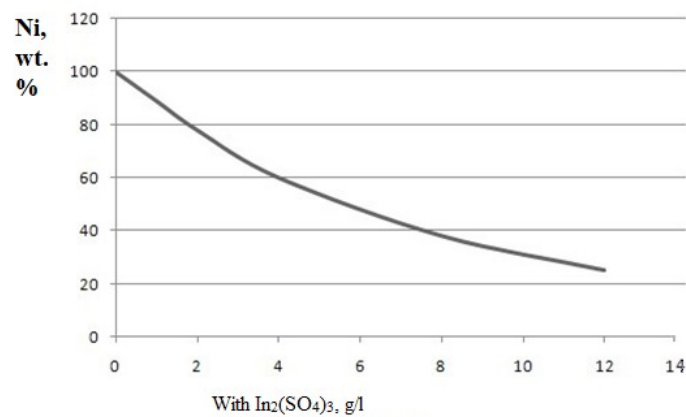
Рисунок 2 - Зависимость d от i_k
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.119.2>

Примечание: время электролиза 60 минут

Влияние содержания $In_2(SO_4)_3$ в растворе на элементный состав образцов Ni-In иллюстрирует рисунок 3 (а и б).



(а)



(б)

Рисунок 3 - Зависимость кумуляции Ni и In от концентрации в электролите $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$, г/л:
 (а) – процентное содержание In; (б) – процентное содержание Ni
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.119.3>

Вариация концентрации $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ с 1 до 12 г/л способствует повышению In до 15 вес. % (рис. 2а). Соответственно изменение содержания Ni в полученных пленках носит иной характер (рис. 2б). Здесь при увеличении концентрации $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ в электролите содержание Ni в сплаве уменьшается от 100 до 25 вес. %. Полученный эксперимент связан с модификацией поверхности (рельеф, размер кристаллитов) при формировании образцов Ni-In. Закономерность обусловлена меньшей скоростью разряда катионов Ni^{2+} , чем катионов In^{3+} с повышением их концентрации и соответственно различными наклонами парциальных кривых выделения Ni^{2+} и In^{3+} , согласно изысканиям в [1], [9].

Зависимость изменения толщины покрытия при следующем режиме осаждения: концентрация $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ варьируется от 0 до 12 г/л, $i_k = 2 \text{ A/дм}^2$, время электролиза 1 час (рис. 4).

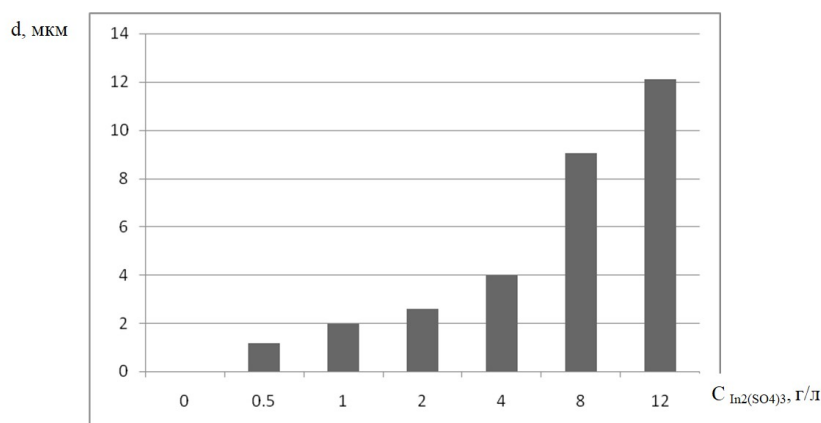


Рисунок 4 - Зависимость d от концентрации $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ в электролите
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.119.4>

Таким образом, аналогичная ситуация наблюдается и с толщиной покрытия Ni-In, она увеличивается от 1 до 12 мкм при повышении содержания $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$. При $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3 = 0,5$ г/л $d = 1,18$ мкм, при $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3 = 1$ г/л $d = 1,99$ мкм, при $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3 = 2$ г/л $d = 2,61$ мкм, при $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3 = 4$ г/л.

Топологические исследования показаны на примере состава с $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3 = 8$ г/л на рисунке 5.

Из результатов исследования следует, что топология поверхности полученных пленок развитая, каковая связана с островковыми зародышами в начальные моменты времени. Напряженность электрического поля на выступающих участках - островками выше, чем над свободными участками от осадка катода. Рост катодной пленки в островковой части начинает опережать рост основной пленки, что приводит к появлению развитой поверхности. Закономерность размера кристаллитов Ni-In от содержания $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ проиллюстрирована на рис. 6. Максимального размер кристаллитов 75-170 нм, то есть формируется мелкодисперсная структура наноразмера. Установленная зависимость представляет собой результирующую огибающую кривую, согласно данным трехмерной топологической диаграммы поверхности пленок Ni-In.

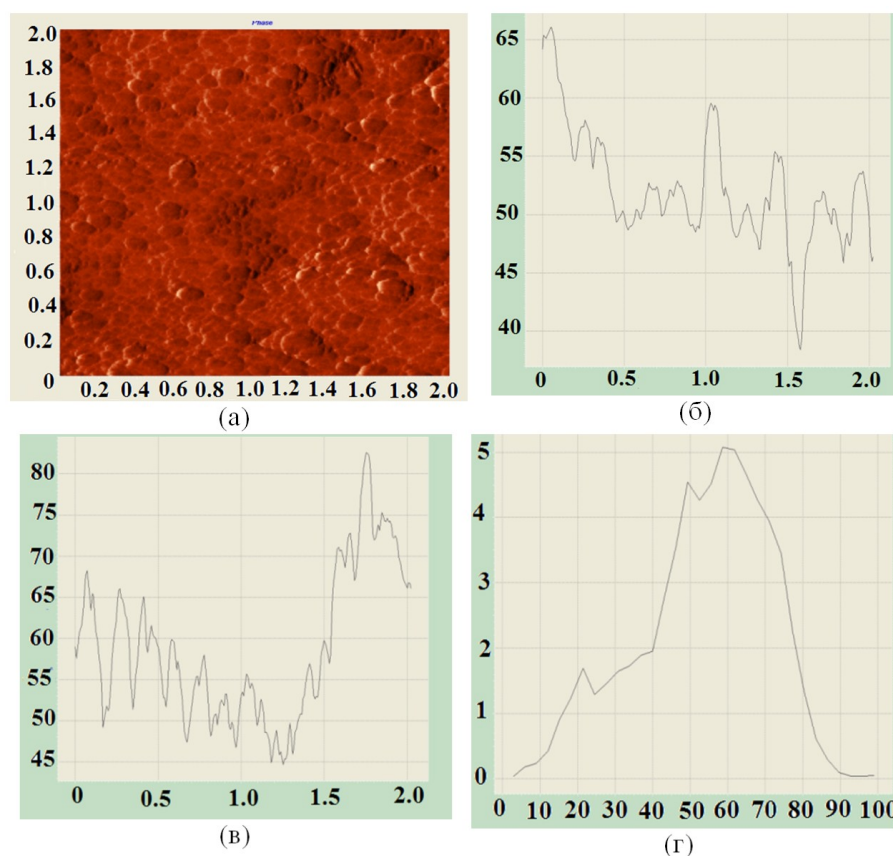


Рисунок 5 - Профилограммы поверхности покрытия Ni-In:

(а) – изображение поверхности в виде фазового контраста; (б) – профилограмма поверхности по оси x; (в) – профилограмма поверхности по оси y; (г) – гистограмма распределения неровностей поверхности

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.119.5>

На рисунке 6 показано, что при отсутствии в электролите $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$, максимальный размер зерен составляет 130 нм. Размер кристаллитов составляет 105, 75, 70, 100, 170 нм при введении соответственно $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ 1, 2, 4, 8, 12 г/л. Более подробные исследования морфологии и топологии поверхности композитов Ni-In в следующих публикациях.

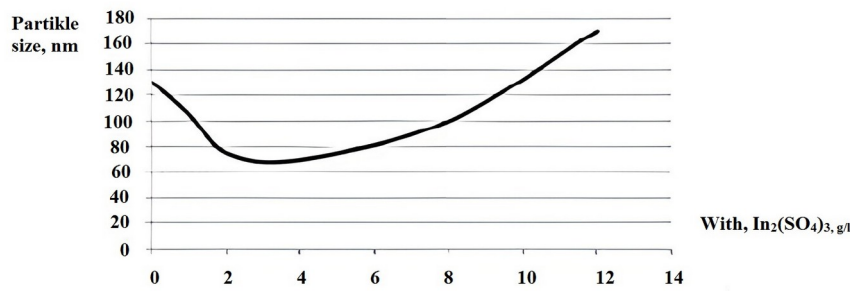


Рисунок 6 - Зависимость размера частиц от концентрации In₂(SO₄)₃ в электролите
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.119.6>

Концентрация In₂(SO₄)₃ = 4 г/л была выбрана из изученных составов электролитов. В композите Ni–In формируются интерметаллические фазы состава InNi₂, InNi₃, In₃Ni₂ и η–In₂₇Ni₁₀ [7], [8].

Таким образом, результаты эксперимента выявили, что из всех изученных составов электролита, оптимальной концентрацией является In₂(SO₄)₃ = 4 г/л.

Электролит никелирования с данным содержанием сульфата индия (III) позволяет получать зернистые и более однородные по размеру кристаллитов Ni–In покрытия, это обеспечивает лучшие физико-механические свойства (свариваемость, коррозионную стойкость), более подробно в работе [1], [11], [12].

Анализ результатов показывает, что при содержании In₂(SO₄)₃ менее 2 г/л на катоде осаждается только Ni пленка. При увеличении содержания In₂(SO₄)₃ до 2 г/л на катоде осаждаются чистый Ni и интерметаллиды: InNi₂, InNi₃, In₃Ni₂, η–In₂₇Ni₁₀ [10], [11].

В осажденных электролитическим способом пленках с содержанием In₂(SO₄)₃ – 8 г/л появляется дополнительная фаза ε–InNi. Увеличение содержания сульфата индия (III) до 12 г/л полностью связывает никель в химические соединения; линия, соответствующая чистому никелю, отсутствует.

Диаграммы состояния равновесия [7], [8] не содержат фазу η–In₂₇Ni₁₀, однако, согласно американской международной добровольной организации, разрабатывающей стандарты для материалов ASTM (Американское общество испытаний и материалов), в системе Ni–In указана интерметаллическая фаза η–In₂₇Ni₁₀ с тетрагональной решеткой [13]. Более подробно рентгенофазовые исследования в других публикациях.

Рентгеноструктурный анализ выявил данную фазу в системах, синтезированных в электролитах с содержанием In₂(SO₄)₃ от 2 г/л и более. По-видимому, зафиксированная фаза носит неравновесный характер, и, ее присутствие зависит от способа изготовления сплава Ni–In. В представленном материале система Ni–In синтезировалась электролитическим путем при комнатной температуре. Отсутствие высоких температур при синтезе композита Ni–In, очевидно способствует стабилизации фазы η–In₂₇Ni₁₀. Можно предположить, что η – фаза должна образовываться при любых методах синтеза, исключая нагрев [14], [15], [16].

Заключение

Основываясь на экспериментальных результатах, можно сделать выводы:

1. Толщина композита Ni–In пропорциональна содержанию In₂(SO₄)₃ в электролите и i_k .
2. Топология поверхности и размер зерен имеют сложную взаимосвязь от содержания сульфата индия (III) в электролите.

3. Выявлено присутствие фазы η–In₂₇Ni₁₀, ее существование отражено в таблицах ASTM, но она не представлена на диаграммах равновесного состояния системы Ni–In. Ее отсутствие можно объяснить тем фактом, что зафиксированная фаза является метастабильной.

Можно отметить еще одну особенность: согласно данным работы [2], [9], синтезирован электрохимический композит Ni–In с фазовым составом – Ni₇₀In₃₀, с микроструктурой и топологией поверхности, обеспечивающей удержание водорода с возможным дальнейшим его допированием.

Содержание водорода в экспериментальных образцах композита Ni(x) – In(y) – H(z), определенное методом термодесорбции, составляет 5,3 мас. %, что подтверждает, что гальванический композит обладает способностью накапливать водород и в дальнейшем сохранять его в виде металлических гидридов [17], [18]. Конечно, не стоит говорить о массовом использовании никель–индиевых композитов для накопления водорода, в соответствии с его индексом Кларка. Речь идет о потенциальной способности электрохимических систем, даже тех, которые не склонны к накоплению водорода, гибко изменять свою структуру по отношению к содержанию в них водорода [19].

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Звягинцева А. В. Электроосаждение покрытий никель – индий из сульфатно–хлоридного электролита / А. В. Звягинцева, А. И. Фаличева // Гальванотехника и обработка поверхности. — 1994. — № 5. — С. 47–51.
2. Hydrogen storage in nickel based solid-state: materials in the collection AIP Conference Proceedings. Ser. «VII International Young Researchers» Conference – Physics, Technology, Innovations, PTI 2020», Yekaterinburg, May 18-22, 2020. — Yekaterinburg, 2020. — P. 060020.
3. Перельгин Ю. П. Электроосаждение, свойства и область применения индия и его двойных сплавов / Ю. П. Перельгин. — Пенза : Изд-во Пензенского политехнического института. — 1993. — 84 с.
4. Звягинцева А. В. Математическая модель процесса управления водородной проницаемостью металлов с внутренними напряжениями с учетом образования и распада неподвижных комплексов / А. В. Звягинцева // Известия Российской академии наук. Серия: физическая. — 2020. — Т. 84. — № 9. — С. 1290–1292.
5. Блешинский В. П. Химия In / В. П. Блешинский, В. Ф. Абрамова. — Фрунзе : Изд-во АН Кирг. ССР. — 1958. — 163 с.
6. Звягинцева А. В. Определение водородной емкости структурных дефектов / А. В. Звягинцева // Альтернативная энергетика и экология. Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. — 2015. — № 21(185). — С. 145–149.
7. Лякишев Н. П. Диаграммы состояний двойных металлических систем / Н. П. Лякишев // Справочник. — Москва, 2000. — Т. 3. — С. 448.
8. Вол А. Е. Строение и свойства двойных металлических систем : справочное руководство / А. Е. Вол. — Москва : Физматгиз, 1959. — 814 с.
9. Zvyagintseva A. V. Hybrid functional materials forming the metal structure with optimal imperfection for storage of hydrogen in hydride form / A. V. Zvyagintseva // International Journal of Hydrogen Energy. — 2020. — Vol. 45. — No. 46. — С. 24991–25001.
10. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учеб. пособ. для ст. к. ВУЗов / В. Л. Миронов. — Нижний Новгород : Российская академия наук институт физики микроструктур, 2004. — С. 114.
11. Звягинцева А. В. Физико-механические и коррозионно-электромеханические свойства никелевых покрытий, легированных индием / А. В. Звягинцева, А. И. Фаличева // Гальванотехника и обработка поверхности. — 1994. — Т. 3 — № 5. — С. 52–54.
12. Звягинцева А. В. Структурно-фазовые изменения в электрохимических системах Ni-Jn / А. В. Звягинцева // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия «Биология, химия». — 2013. — Т. 26. — № 3. — С. 253–260.
13. Американское международное общество по испытаниям и материалам. — Москва, 2011. — URL: https://emk24.ru/wiki/astm_standarty (дата обращения: 21.12.2019).
14. Schlapbach L. Hydrogen-Storage Materials for Mobile Applications / L. Schlapbach, A. Zuttel // Nature. — 2001. — P. 353–358.
15. Belov M. P. Ab initio lattice dynamics of CoH and NiH / M. P. Belov, E. I. Isaev, Yu. Kh. Vekilov // Journal of Alloys and Compounds. — 2011. — Vol. 509. — P. 857–859.
16. Ghigo G. A theoretical study of the exited states of CrH: Potential energies, transition moments, and lifetimes / G. Ghigo, B. O. Roos, P. C. Stancil [et al.] // J. Chem. Phys. — 2004. — No. 17. — P. 8194–8200.
17. Неклюдов Л. М. Водородная диагностика структурных состояний стали X18H10T, подвергнутой различного рода структурным воздействиям / Л. М. Неклюдов, О. М. Морозов, В. Г. Кулиш [и др.] // Международный журнал водородной энергетики. — 2010. — № 8(88). — С. 112–116.
18. Morozov O. Structural transformations in austenitic stainless steel induced by deuterium implantation: irradiation at 295 K / O. Morozov, V. Zhurba, I. Neklyudov [et al.] // Nanoscale research letters. — 2016. — Vol. 11. — No. 1. — P. 1–13.
19. Патент РФ 2684268. Ударное ядро с зажигательным эффектом / Звягинцева А. В., Артемьева А. О., Голодяев А. И. и др.; заявл. 15.01.2018; опубл. 04.04.2019.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Zvyagintseva A. V. Jelektroosazhdenie pokrytij nikel' – indij iz sul'fatno–hloridnogo jelektrolita [Electrodeposition of nickel–indium coatings from sulfate–chloride electrolyte] / A. V. Zvyagintseva, A. I. Falicheva // Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti [Electroplating and surface treatment]. — 1994. — No. 5. — P. 47–51. [in Russian]
2. Hydrogen storage in nickel based solid-state: materials in the collection AIP Conference Proceedings. Ser. «VII International Young Researchers» Conference – Physics, Technology, Innovations, PTI 2020», Yekaterinburg, May 18-22, 2020. — Yekaterinburg, 2020. — P. 060020.

3. Perelygin Yu. P. Jelektroosazhdenie, svojstva i oblast' primenenija indija i ego dvojnih splavov [Electrodeposition, properties and scope of indium and its double alloys] / Yu. P. Perelygin. — Penza : Publishing house of the Penza Polytechnic Institute. — 1993. — 84 p. [in Russian]
4. Zvyagintseva A. V. Matematicheskaja model' processa upravlenija vodorodnoj pronicaemost'ju metallov s vnutrennimi naprjazhenijami s uchetom obrazovanja i raspada nepodviznyh kompleksov [Mathematical model of the process of controlling the hydrogen permeability of metals with internal stresses, taking into account the formation and decay of fixed complexes] / A. V. Zvyagintseva // Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Serija: fizicheskaja [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series: physical]. — 2020. — Vol. 84. — No. 9. — P. 1290–1292. [in Russian]
5. Bleshinsky V. P. Himija In [Chemistry In] / V. P. Bleshinsky, V. F. Abramova. — Frunze : Publishing House of the Academy of Sciences of the Kyrgyz SSR. — 1958. — 163 p. [in Russian]
6. Zvyagintseva A. V. Opredelenie vodorodnoj emkosti strukturnyh defektov [Determination of the hydrogen capacity of structural defects] / A. V. Zvyagintseva // Al'ternativnaja jenergetika i jekologija. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaja jenergetika i jekologija [Alternative energy and ecology. International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology]. — 2015. — No. 21(185). — P. 145–149. [in Russian]
7. Lyakishev N. P. Diagrammy sostojanij dvojnih metallicheskih sistem [Diagrams of states of double metal systems] / N. P. Lyakishev // Spravochnik [Handbook]. — Moscow, 2000. — Vol. 3. — P. 448. [in Russian]
8. Vol A. E. Stroenie i svojstva dvojnih metallicheskih sistem [The structure and properties of double metal systems] : a reference guide / A. E. Vol. — Moscow : Fizmatgiz, 1959. — 814 p. [in Russian]
9. Zvyagintseva A. V. Hybrid functional materials forming the metal structure with optimal imperfection for storage of hydrogen in hydride form / A. V. Zvyagintseva // International Journal of Hydrogen Energy. — 2020. — Vol. 45. — No. 46. — C. 24991–25001.
10. Mironov V. L. Osnovy skanirujushhej zondovoj mikroskopii [Fundamentals of scanning probe microscopy]: textbook guide for senior students of higher education institutions / V. L. Mironov. — Nizhny Novgorod : Russian Academy of Sciences Institute of Physics of Microstructures, 2004. — P. 114. [in Russian]
11. Zvyagintseva A. V. Fiziko-mehaničeskie i korrozionno-jelektromehaničeskie svojstva nikelovyh pokrytij, legirovannyh indiem [Physico-mechanical and corrosion-electromechanical properties of nickel coatings alloyed with indium] / A. V. Zvyagintseva, A. I. Falicheva // Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti [Electroplating and surface treatment]. — 1994. — Vol. 3 — No. 5. — P. 52–54. [in Russian]
12. Zvyagintseva A. V. Strukturno-fazovye izmenenija v jelektrohimičeskijh sistemah Ni-Jn [Structural and phase changes in Ni-Jn electrochemical systems] / A. V. Zvyagintseva // Učenyje zapiski Tavricheskogo nacional'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Serija «Biologija, himija» [Scientific Notes of V. I. Vernadsky Tauride National University. The series "Biology, chemistry"]. — 2013. — Vol. 26. — No. 3. — P. 253–260. [in Russian]
13. Amerikanskoe mezhdunarodnoe obshhestvo po ispytaniyam i materialam [American International Society for Testing and Materials]. — Moscow, 2011. — URL: https://emk24.ru/wiki/astm_standarty (accessed: 21.12.2019). [in Russian]
14. Schlapbach L. Hydrogen-Storage Materials for Mobile Applications / L. Schlapbach, A. Züttel // Nature. — 2001. — P. 353–358.
15. Belov M. P. Ab initio lattice dynamics of CoH and NiH / M. P. Belov, E. I. Isaev, Yu. Kh. Vekilov // Journal of Alloys and Compounds. — 2011. — Vol. 509. — P. 857–859.
16. Ghigo G. A theoretical study of the excited states of CrH: Potential energies, transition moments, and lifetimes / G. Ghigo, B. O. Roos, P. C. Stancil [et al.] // J. Chem. Phys. — 2004. — No. 17. — P. 8194–8200.
17. Neklyudov L. M. Vodorodnaja diagnostika strukturnyh sostojanij stali H18N10T, podvergnutoj razlichnogo roda strukturnym vozdeystvijam [Hydrogen diagnostics of structural states of steel X18N10T subjected to various kinds of structural influences] / L. M. Neklyudov, O. M. Morozov, V. G. Kulish [et al.] // Mezhdunarodnyj zhurnal vodorodnoj jenergetiki [International Journal of Hydrogen Energy]. — 2010. — № 8(88). — P. 112–116. [in Russian]
18. Morozov O. Structural transformations in austenitic stainless steel induced by deuterium implantation: irradiation at 295 K / O. Morozov, V. Zhurba, I. Neklyudov [et al.] // Nanoscale research letters. — 2016. — Vol. 11. — No. 1. — P. 1–13.
19. Patent of the Russian Federation 2684268. Udarное jadro s zazhigatel'nyj jeffektom [An incendiary impact core] / Zvyagintseva A.V., Artemyeva A. O., Golodyaev A. I. et al.; appl. 15.01.2018; publ. 04.04.2019. [in Russian]