

Научная статья
УДК 541.135
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.031

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ ТИТАН-НИКЕЛЬ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ БЕСТОКОВОГО ПЕРЕНОСА В СОЛЕВОМ РАСПЛАВЕ

**Максим Александрович Окунев¹, Антон Решатович Дубровский²,
Ольга Викторовна Палатникова³, Сергей Александрович Кузнецов⁴**

^{1–4}Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹*m.okunev@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7533-0157>*

²*a.dubrovskiy@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7517-1491>*

³*o.palatnikova@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3310-8830>*

⁴*s.kuznetsov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3578-6352>*

Аннотация

Приведены результаты синтеза интерметаллидов титан-никель методом бестокового переноса в солевом расплаве NaCl-KCl-K₂TiF₆ (20 мас. %). Полученные соединения идентифицированы методом РФА, морфология поверхности изучена методом оптической микроскопии.

Ключевые слова:

хранение водорода, интерметаллиды, титан, никель, бестоковый перенос

Благодарности:

статья выполнена при поддержке гранта в форме субсидии из областного бюджета некоммерческим организациям, не являющимся казенными учреждениями, на поддержку научно-исследовательских проектов молодых ученых Мурманской области в 2025 г. по соглашению № 35 от 31.01.25, проект «Синтез интерметаллических соединений на основе титана и циркония для хранения водорода из сырья Кольского полуострова».

Финансирование:

грант на поддержку научно-исследовательских проектов молодых ученых Мурманской области в 2025 г. по соглашению № 35 от 31.01.25.

Для цитирования:

Особенности формирования интерметаллидов титан-никель для хранения водорода, полученных методом бестокового переноса в солевом расплаве / М. А. Окунев [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 185–189. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.031.

Original article

THE FEATURES OF TITANIUM-NICKEL INTERMETALLICS FORMATION FOR HYDROGEN STORAGE OBTAINED BY CURRENTLESS TRANSFER METHOD IN MOLTEN SALT

Maksim A. Okunev¹, Anton R. Dubrovskiy², Olga V. Palatnikova³, Sergey A. Kuznetsov⁴

^{1–4}Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre
“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

¹*m.okunev@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7533-0157>*

²*a.dubrovskiy@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7517-1491>*

³*o.palatnikova@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3310-8830>*

⁴*s.kuznetsov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3578-6352>*

Abstract

The results of the synthesis of titanium-nickel intermetallics by the currentless transfer method in molten salt of the composition NaCl-KCl-K₂TiF₆ (20 wt. %) were presented. The obtained compounds were identified by the X-ray diffraction method, the surface morphology was studied using optical microscopy.

Keywords:

hydrogen storage, intermetallics, titanium, nickel, currentless transfer

Acknowledgments:

The article was supported by a grant in the form of a subsidy from the regional budget to non-profit organizations that are not state institutions, to support research projects of young scientists of the Murmansk region in 2025 under agreement No. 35 of 31.01.25, the project "Synthesis of intermetallic compounds based on titanium and zirconium for storage hydrogen from raw materials of the Kola Peninsula".

Funding:

Grant to support research projects of young scientists of the Murmansk region in 2025 under agreement No. 35 dated 31.01.25.

For citation:

The features of titanium-nickel intermetallics formation for hydrogen storage obtained by currentless transfer method in molten salt / M. A. Okunev [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 185–189. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.031.

Введение

Водород, признанный во всем мире самым эффективным и чистым энергоносителем, обладает огромным потенциалом использования в качестве топлива. Хранение водорода — одна из ключевых проблем в развитии водородной энергетики. В качестве перспективных материалов для его хранения особое внимание уделяется интерметаллическим соединениям [1–3].

Целью данной работы являлся синтез интерметаллидов состава титан-никель методом бестокового переноса в солевом расплаве. Из равновесной диаграммы (рис. 1) видно, что в системе титан-никель образуются три стабильные интерметаллические фазы, а именно: TiNi_3 , TiNi и Ti_2Ni . Среди этих соединений наибольшей емкостью по водороду обладает соединение Ti_2Ni [4].

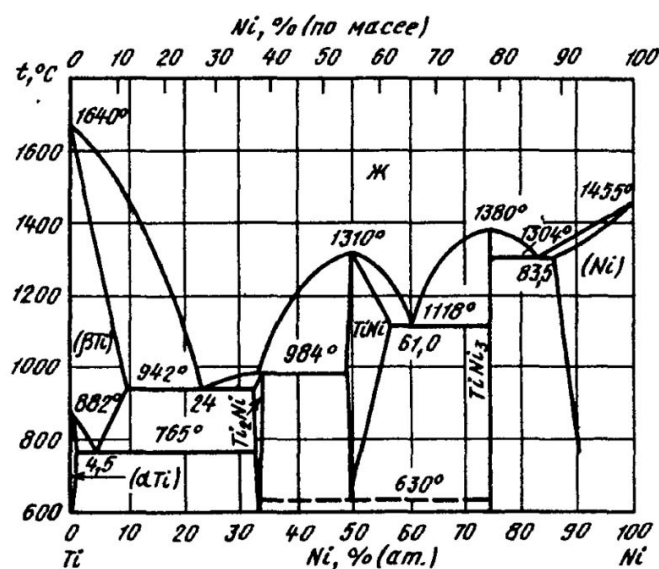


Рис. 1. Фазовая диаграмма системы титан-никель [5]

Результаты

Синтез соединений проводили в солевом расплаве $\text{NaCl-KCl-K}_2\text{TiF}_6$ (20 мас. %), находящемся в контакте с тиглем из титана. В качестве подложки использовали пористую губку из никеля (рис. 2, а). Эксперименты выполняли в интервале температур 750–850 °С в атмосфере аргона квалификации «ч». Время выдержки образцов в расплаве варьировалось в интервале 3–12 ч.

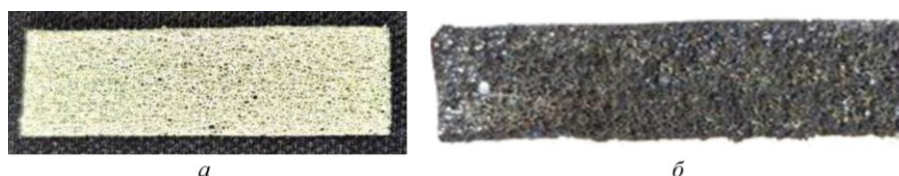


Рис. 2. Никелевая губка до (а) и после (б) выдержки в расплаве $\text{NaCl-KCl-K}_2\text{TiF}_6$ (20 мас. %) в течение 6 ч при температуре 850 °С, размер образца 20 × 8 × 0,1 мм

Морфология поверхности исходной никелевой губки представлена на рис. 3. Размер ячейки (см. рис. 3, *а*) составляет в среднем 300 мкм. Структура узла представлена на рис. 3, *б*. Ширина перемычки (см. рис. 3, *в*) 50 мкм. Размер зерен (см. рис. 3, *в*) около 8 мкм.

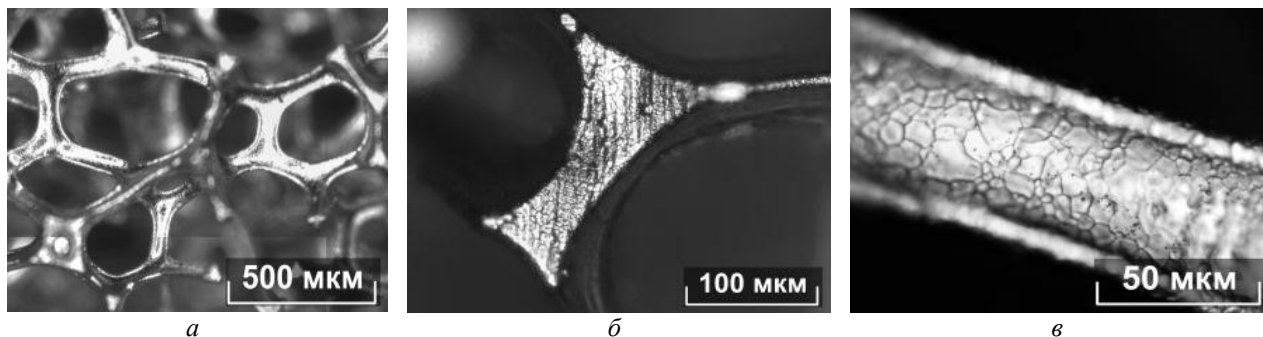


Рис. 3. Морфология поверхности исходной никелевой губки:
а — макроструктура ячейки; *б* — структура узла; *в* — микроструктура перемычки

Внешний вид никелевой губки после процесса бестокового переноса представлен на рис. 2, *б*. Морфология поверхности никелевой губки после выдержки в расплаве состава NaCl-KCl-K₂TiF₆ (20 мас. %) в течение 6 ч при температуре 850 °С представлена на рис. 4. Никелевая губка после выдержки в расплаве имеет покрытие (см. рис. 4, *а*, *в*) и агломерированные объемы порошка (см. рис. 4, *а*, *б*). Покрытие плотное (см. рис. 4, *в*), но не сплошное, дендритообразное. Размер кристаллитов составляет до 10 мкм.

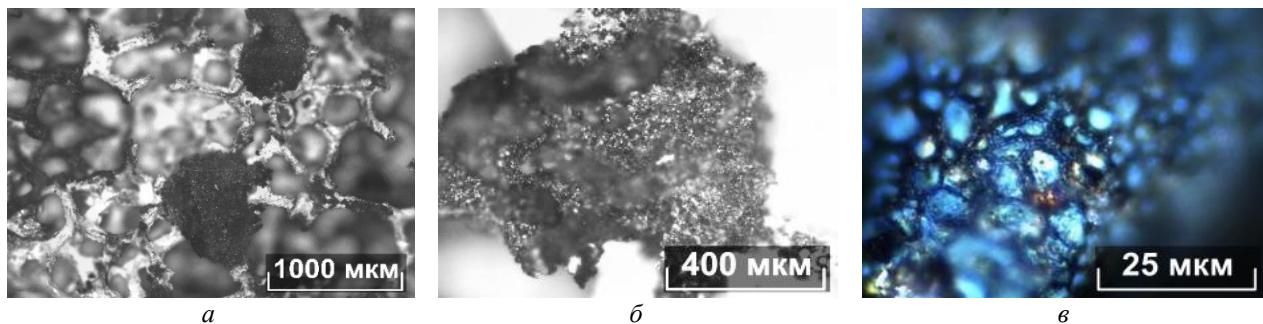
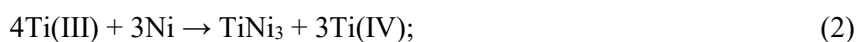


Рис. 4. Морфология поверхности никелевой губки после выдержки в расплаве:
а — макроструктура покрытия с порошком; *б* — агломерация порошка; *в* — микроструктура покрытия

Интерметаллиды никеля с титаном формировались вследствие явления бестокового переноса, который состоит в следующем: титан в расплаве реагирует с комплексами Ti(IV), что приводит к образованию комплексов Ti(III) по реакции:



Комплексы Ti(III) диффундируют к никелевой подложке и диспропорционируют на ее поверхности с образованием интерметаллидов по реакциям:



Движущей силой реакций диспропорционирования является образование интерметаллических соединений. Параметры синтеза и состав соединений представлены в таблице.

Состав полученных интерметаллидов по данным рентгенофазового анализа

Температура t , °C	Время τ , ч	РФА
750	3	TiNi ₃ , TiNi
	6	TiNi ₃ , TiNi
	12	TiNi ₃ , TiNi
800	3	TiNi ₃ , TiNi
	6	TiNi ₃ , TiNi
	12	TiNi, Ti ₂ Ni
850	3	TiNi ₃ , TiNi
	6	Ti ₂ Ni, Ti
	12	Ti ₂ Ni, Ti

Таким образом, сначала образуется слой TiNi₃, поскольку энергия Гиббса образования этого соединения имеет наибольшее отрицательное значение по сравнению с интерметаллидами другого состава [6]. Как видно из таблицы, с увеличением температуры до 850 °C и времени процесса (6 ч) происходит формирование фазы, обладающей наибольшей емкостью по водороду, а именно интерметаллида Ti₂Ni (рис. 5).

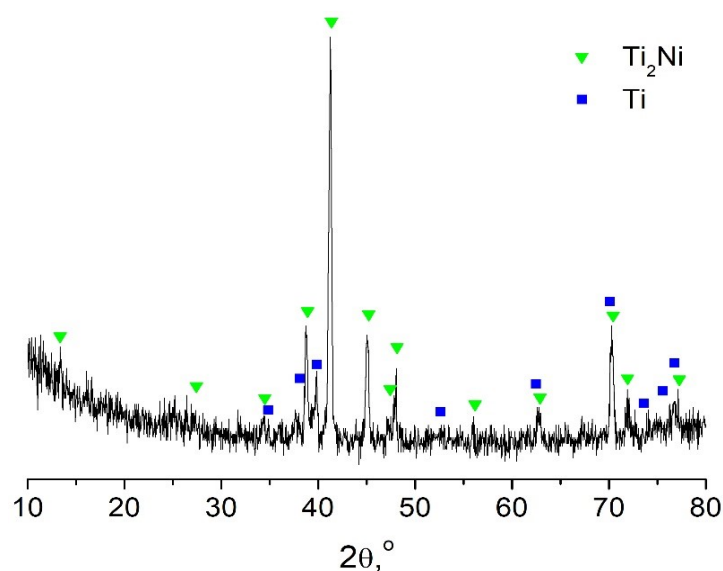


Рис. 5. Дифрактограмма никелевой губки после выдержки в расплаве состава NaCl-KCl-K₂TiF₆ (20 мас. %) в течение 6 ч при температуре 850 °C

Выводы

Рассмотрен механизм образования интерметаллидов титан-никель методом бестокового переноса в расплаве NaCl-KCl-K₂TiF₆ (20 мас. %)-Ti.

Установлено, что интерметаллид Ti₂Ni, обладающий наибольшей емкостью по водороду, можно синтезировать методом бестокового переноса в расплаве NaCl-KCl-K₂TiF₆ (20 мас. %) при 850 °C в течение 6 ч.

Проведена идентификация полученных интерметаллических соединений методом РФА, исследована морфология их поверхности с использованием оптической микроскопии.

Список источников

1. Osman A. I., Ayati A., Farrokhi M., Khadempir S., Rajabzadeh A. R., Farghali M., Krivoschapkin P., Tanhaei B., Rooney D. W., Yap P.-S. Innovations in hydrogen storage materials: Synthesis, applications, and prospects // *J. Energy Storage*. 2024. Vol. 95. P. 112376.
2. Huang L. J., Lin H. J., Wang H., Ouyang L. Z., Zhu M. Amorphous alloys for hydrogen storage // *J. Alloys Compd.* 2023. Vol. 941. P. 168945.
3. Schneemann A., White J. L., Kang S., Jeong S., Wan L. F., Cho E. S., Heo T. W., Prendergast D., Urban J. J., Wood B. C., Allendorf M. D., Stavila V. Nanostructured metal hydrides for hydrogen storage // *Chem. Rev.* 2018. Vol. 118, № 22. P. 10775–10839.
4. Balcerzak M., Jurczyk M. Influence of gaseous activation on hydrogen sorption properties of TiNi and Ti₂Ni alloys // *J. Mater. Eng. and Perform.* 2015. Vol. 24, № 4. P. 1710–1717.
5. Банных О. А., Будберг П. Б., Алисова С. П. и др. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа. М.: Металлургия, 1979. 440 с.
6. Von Barner J. H., Noye P., Barhoun A., Lantelme F. Influence of oxide and alloy formation on the electrochemistry of Ti deposition from the NaCl-KCl-NaF-K₂TiF₆ melt reduced by metallic Ti // *J. Electrochem. Soc.* 2005. Vol. 152, № 1. P. C20–C26.

References

1. Osman A. I., Ayati A., Farrokhi M., Khadempir S., Rajabzadeh A. R., Farghali M., Krivoschapkin P., Tanhaei B., Rooney D. W., Yap P.-S. Innovations in hydrogen storage materials: Synthesis, applications, and prospects. *J. Energy Storage*, 2024, vol. 95, p. 112376.
2. Huang L. J., Lin H. J., Wang H., Ouyang L. Z., Zhu M. Amorphous alloys for hydrogen storage. *J. Alloys Compd.*, 2023, vol. 941, p. 168945.
3. Schneemann A., White J. L., Kang S., Jeong S., Wan L. F., Cho E. S., Heo T. W., Prendergast D., Urban J. J., Wood B. C., Allendorf M. D., Stavila V. Nanostructured metal hydrides for hydrogen storage. *Chem. Rev.*, 2018, vol. 118, no. 22, pp. 10775–10839.
4. Balcerzak M., Jurczyk M. Influence of gaseous activation on hydrogen sorption properties of TiNi and Ti₂Ni alloys. *J. Mater. Eng. and Perform.*, 2015, vol. 24, no. 4, pp. 1710–1717.
5. Bannyh O. A., Budberg P. B., Alisova S. P. et al. *Diagrammy sostojanija dvojnyh i mnogokomponentnyh sistem na osnove zheleza* [State diagrams of double and multicomponent iron-based systems]. Moscow, Metallurgija, 1979, 440 p. (In Russ.).
6. Von Barner J. H., Noye P., Barhoun A., Lantelme F. Influence of oxide and alloy formation on the electrochemistry of Ti deposition from the NaCl-KCl-NaF-K₂TiF₆ melt reduced by metallic Ti. *J. Electrochem. Soc.*, 2005, vol. 152, no. 1, pp. C20–C26.

Информация об авторах

М. А. Окунев — младший научный сотрудник;

А. Р. Дубровский — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

О. В. Палатникова — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

С. А. Кузнецов — доктор химических наук, Chief Research Scientist.

Information about the authors

M. A. Okunev — Junior Researcher;

A. R. Dubrovskiy — PhD (Technology), Senior Researcher;

O. V. Palatnikova — PhD (Technology), Senior Researcher;

S. A. Kuznetsov — DSc (Chemistry), Chief Researcher.

Статья поступила в редакцию 16.07.2025; одобрена после рецензирования 06.08.2025; принята к публикации 20.08.2025.
The article was submitted 16.07.2025; approved after reviewing 06.08.0000; accepted for publication 20.08.2025.