

Научная статья
Original article

УДК 669.018.25.017

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-11-306-53-61

А. В. Крохалев, Д. Р. Черников, В. О. Харламов, С. А. Ганцев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак

СТРУКТУРА И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ «ТИТАН-ЖЕЛЕЗО» ПОСЛЕ ВЗРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

Автор, ответственный за переписку: Александр Васильевич Крохалев (kroch58@yandex.ru)

Аннотация: Изучены основные особенности морфологии и состава фаз материалов системы Fe-Ti, полученных в процессе уплотнения порошков титана и железа взрывом. Выявлено влияние механизма пластической деформации частиц порошка на процесс образования метастабильной интерметаллидной фазы Ti_2Fe , обладающей повышенной водородной емкостью.

Ключевые слова: Прессование порошков взрывом, метастабильный интерметаллид Ti_2Fe , водородная емкость

Для цитирования: Крохалев А. В., Черников Д. Р., Харламов В. О., Ганцев С. А., Кузьмин С. В., Лысак В. И. Структура и химический состав порошковых материалов системы «титан-железо» после взрывного прессования. Известия ВолгГТУ; 2025; 306(11):53–61.
<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-53-61>

A. V. Krokhaliev, D. R. Chernikov, V. O. Kharlamov, S. A. Gantsev, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak

STRUCTURE AND CHEMICAL COMPOSITION OF POWDERS IN THE "TITANIUM-IRON" SYSTEM AFTER EXPLOSIVE PRESSING

Volgograd State Technical University

The author responsible for the correspondence: Alexander Vasilyevich Krokhaliev (kroch58@yandex.ru)

Annotation: The main features of the morphology and phase composition of materials of the Fe-Ti system obtained during the compaction of titanium and iron powders by explosion have been studied. The effect of the mechanism of plastic deformation of powder particles on the formation of the metastable intermetallic phase Ti_2Fe , which has an increased hydrogen capacity, has been revealed.

Keywords: Explosive pressing of powders, metastable intermetallide Ti_2Fe , hydrogen capacity

To cite: Krokhaliev A. V., Chernikov D. R., Gantsev S. A., Kharlamov V. O., Kuzmin S. V., Lysak V. I. Structure and chemical composition of powders in the "titanium-iron" system after explosive pressing. Izvestia VSTU; 2025; 306(11):53–61.
<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-53-61>

Введение

В настоящее время наиболее перспективными для хранения водорода считаются сплавы, состоящие из интерметаллидов, которые могут удерживать его с высокой объемной плотностью при относительно низком давлении [1]. Среди них особое место занимают материалы на основе TiFe – соединения типа АВ, которое является одной из наиболее многообещающих для коммерческого применения интерметаллических фаз благодаря доступной цене и высокой водородной емкости [2].

У интерметаллида TiFe на поверхности имеются естественные оксидные пленки, препятствующие поглощению водорода. Для инициации процесса требуется предварительная термическая активация [3], включающая отжиг в вакууме или в водородной атмосфере, способствующий удалению оксидных слоёв и подготовке поверхности к поглощению водорода.

За последние несколько лет появились новые методы повышения водородной ёмкости TiFe, такие как легирование циркони-

ем или увеличение содержания титана сверх стехиометрического уровня [4-7].

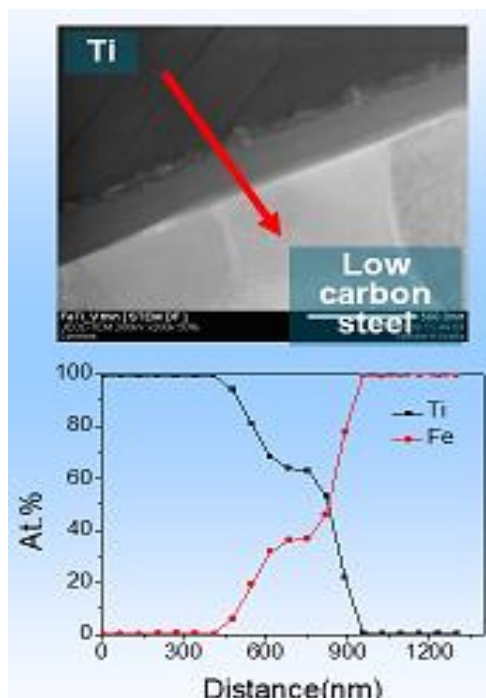
Двухфазные сплавы, состоящие из соединения TiFe и твердого раствора железа в β -титане, полученные путём плавки шихты с 66,6 ат.% титана и 33,4 ат.% железа и длительного отжига при 800 °С, способны поглощать до 2,5 мас.% водорода при температуре 150–350 °С [4], что является более высоким показателем в сравнении с гидридом интерметаллического соединения TiFe, имеющего весовую водородную емкость в ~1,9% [8].

Также известна модификация технологии, при которой для получения материала используют дуговое плавление с последующим отжигом при 1200 °С, что даёт трёхфазную структуру – TiFe, β -Ti и Ti_2Fe . Такой сплав способен поглощать водород без предварительной термической активации. Анализ поверхностного оксидного слоя по-

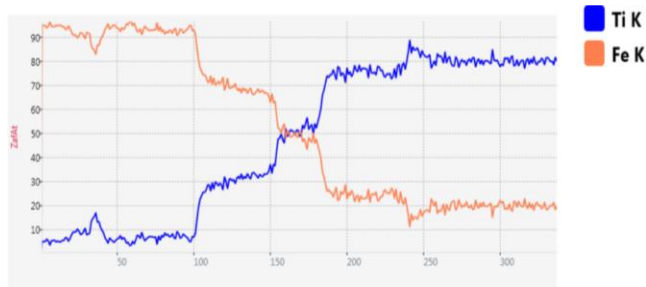
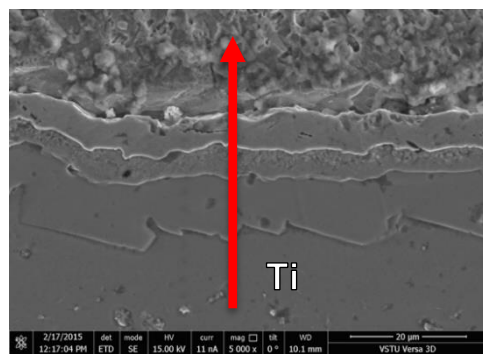
казывает, что концентрация титана в оксидах на поверхности β -Ti и Ti_2Fe выше, чем на TiFe, что ускоряет поглощение водорода [7]. Исследования подтверждают, что сплав с содержанием около 12 % Ti_2Fe и 30 % β -Ti способен при комнатной температуре поглотить 2,6 мас.% водорода [9].

Увеличение водородной емкости и повышение эффективности гидрирования обусловлены позитивным влиянием интерметаллидной фазы Ti_2Fe , которая, согласно «правилу обратной стабильности», должна иметь меньшую энтальпию образования гидридов по сравнению с TiFe и обеспечивать увеличение содержания водорода в гидридах до 2,08–3,09 мас. % [11].

Интерметаллидная фаза Ti_2Fe в системе Ti-Fe является метастабильной. Наибольший объем сведений о её формировании встречается в исследованиях сварки титана со сталью с помощью сварки взрывом (рис. 1, а)



а



б

Рис. 1. Образование слоя Ti_2Fe при сварке взрывом титана с низкоуглеродистой сталью (а) [6], и в процессе термической обработки сварных биметаллов титан-сталь, выполненных этим способом (б) [8]

[9], а также в работах, посвящённых термической обработке таких сварных соединений (рис. 1, б) [10].

Ударно-волновое нагружение порошочной смеси, расположенной на стальной подложке, осуществлялось при помощи фрон-

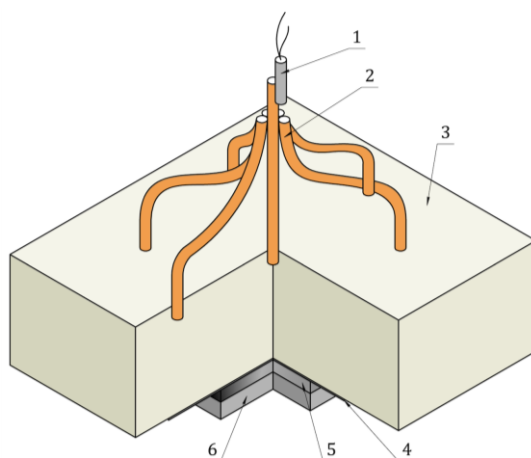


Рис. 2. Схема ударно-волнового нагружения порошковых смесей

Для исследования процессов формирования данного интерметаллида в условиях ударно-волновой обработки нами использовался метод взрывного прессования смесей порошков титана и железа. Этот подход имитирует условия сварки взрывом в области контакта частиц Ti и Fe и одновременно значительно увеличивает площадь контактной поверхности, что способствует снижению путей диффузии элементов при межфазных реакциях.

тально падающей детонационной волны, проходящей через стальную промежуточную прокладку (см. рис. 2). Режим прессования обеспечивал предельно высокое уплотнение исходного порошка вплоть до практически монолитного состояния [8].

Анализ структуры и состава фаз проводился с помощью растровой электронной микроскопии с использованием системы FEI Versa 3D LoVac, оснащенной встроенной системой микрорентгеноспектрального энергодисперсионного анализа EDAX ApolloX.

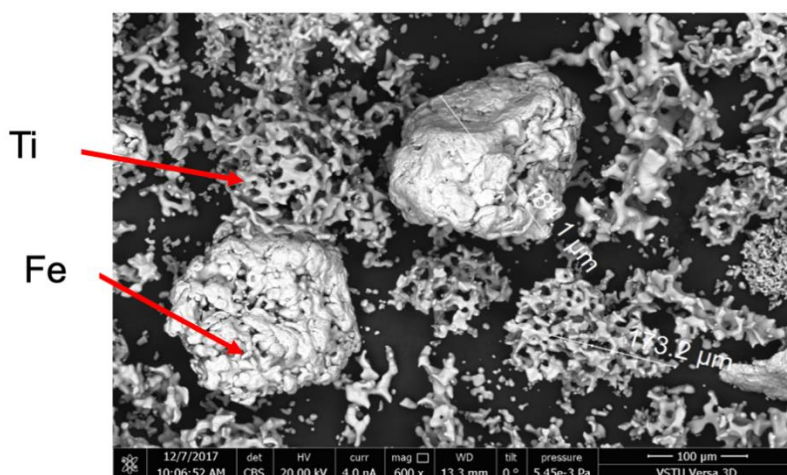


Рис. 3. Вид частиц Fe и Ti в исходной порошковой смеси

В работе использовались порошки коммерческого производства. Частицы порошка Ti имели губчатую форму, а Fe – округлую с ярко выраженным поликристаллическим строением (рис. 3). Состав компонентов в порошковой смеси был принят равным: 36 мас.% Fe и 64 мас.% Ti, что практически соответствует составу Ti_2Fe и обеспечивает одинаковое объемное содержание Fe и Ti в смеси и, соответственно, максимальную

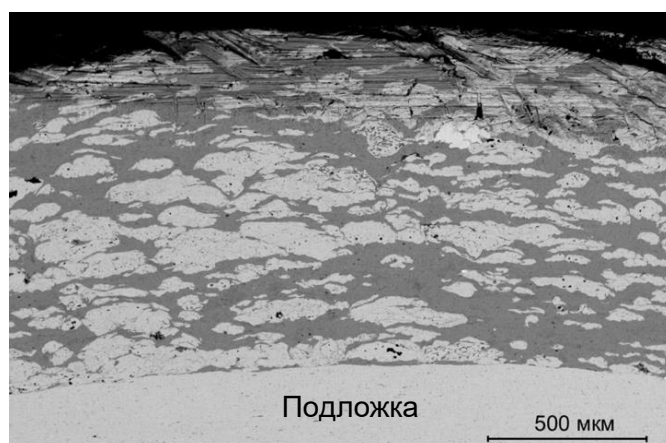
площадь межфазной поверхности Ti/Fe.

Для проведения исследования были выбраны параметры взрывного нагружения, приведенные в таблице.

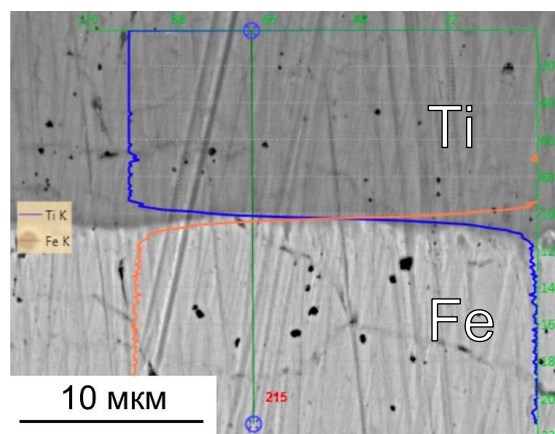
При использовании режима нагружения, обеспечивающего давление сжатия $P = 11,5$ ГПа, течение материала частиц при уплотнении порошка, по-видимому, носило ламинарный характер (рис. 4, а) и энергетического воздействия на границе фаз оказалось

Технологические параметры взрывного нагружения и расчетные значения условий ударно-волнового сжатия порошковой смеси

H, мм	h, мм	δ , мм	ВВ 100%	D, км/с	T, °C	P, ГПа
70	7,0	1,5	6ЖВ	4,2	777	11,5
85					831	12,5

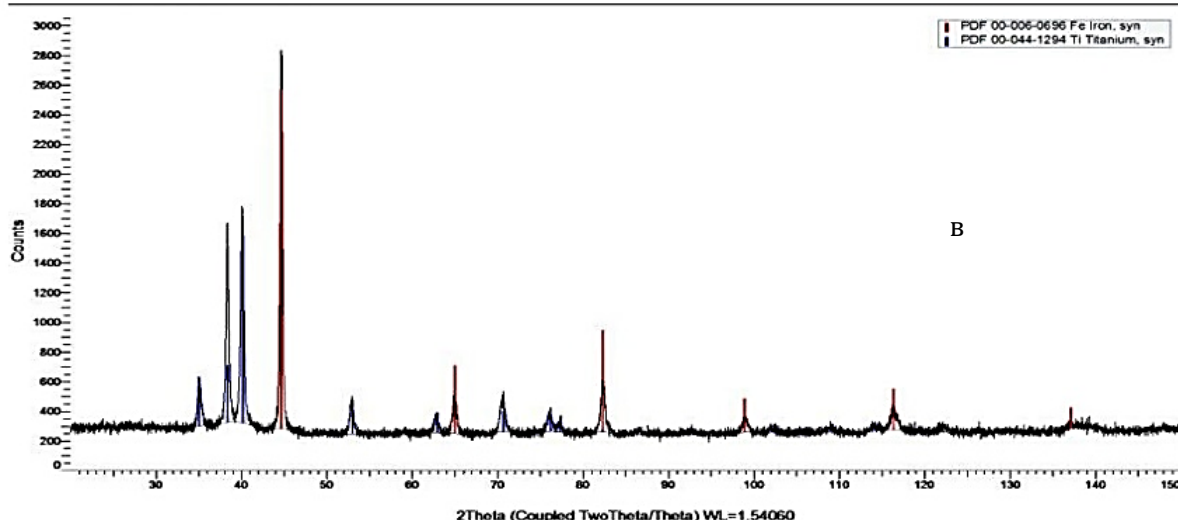


а



б

(Coupled TwoTheta/Theta)



в

Рис. 4. Структура (а), химический (б) и фазовый состав (в) прессовок, полученных на режиме нагружения:
 $t = 777$ °C, $P = 11,5$ ГПа

недостаточно для химического взаимодействия.

Рентгеноструктурный фазовый анализ полученного спрессованного материала, проведенный на дифрактометре Bruker D8 Advance, показал, что его фазовый состав после взрывного нагружения соответствует первоначальному составу используемой порошковой смеси (рис. 4, в). Даже в непосредственной близости от межфазных границ химический состав фаз практически не изменяется (рис. 4, б).

При более жестком режиме нагружения ($P = 12,5$ ГПа), была обеспечена локализация пластической деформации частиц в их по-

верхностных слоях, приведшая к ярко выраженному струйному (турбулентному) характеру течения частиц с образованием специфических «завихрений» (рис. 5, а) и, как следствие, интенсивному трению по их поверхностям. В результате, на границах образовались слои интерметаллического соединения толщиной до 20 мкм (рис. 5, б), которое по химическому составу и кристаллическому строению (рис. 5, в) может быть идентифицировано как метастабильная фаза Ti_2Fe .

Детальное исследование микроструктуры зоны взаимодействия показало ее неоднородность с равномерными периодическими

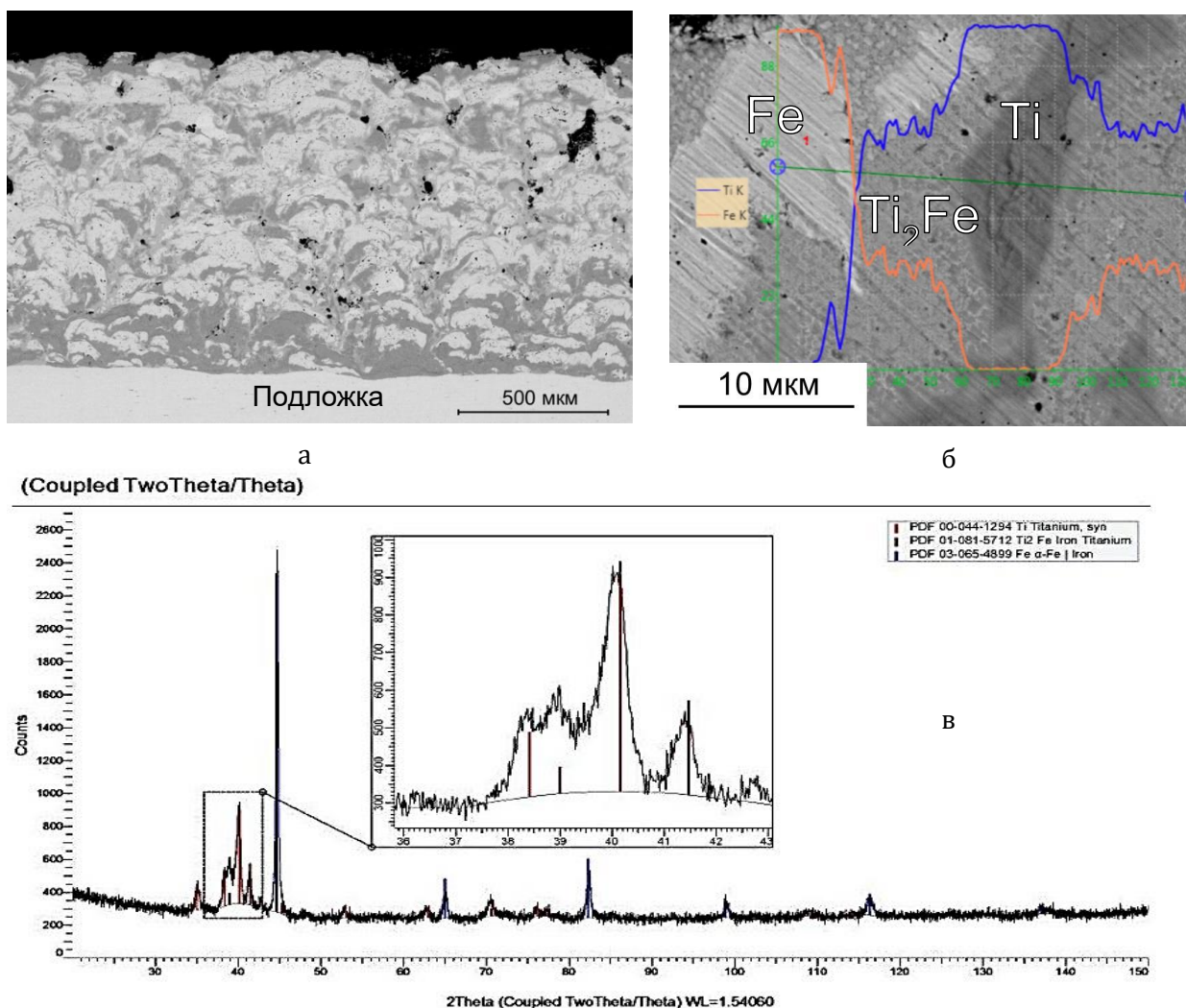


Рис. 5. Структура (а), химический (б) и фазовый состав (в) прессовок, полученных на режиме нагружения:
 $t = 830$ °C, $P = 12,5$ ГПа

колебаниями состава (рис. 6). При этом отклонения составили до 7 %.

Полученные в результате проведенных исследований данные указывают, что механизм пластического деформирования частиц титана и железа при взрывном прессовании существенно влияет на процесс образования метастабильной фазы Ti_2Fe . Можно высказать несколько предположений о природе этого влияния. Наиболее правдоподобной выглядит гипотеза о том, что интерметаллид образуется в том случае, когда при ударно-волновой обработке в материале образуется жидкая фаза. Данное суждение, прежде всего, не противоречит опыту сварки взрывом титановых сплавов и сталей.

Поскольку температура контактного плавления в системе Ti-Fe невысока и составляет в соответствии с диаграммой состояния системы 1085 °С, то ее достижение на границах частиц в случае взрывного прессования в режимах, обеспечивающих среднюю расчетную температуру разогрева 831 °С, при наличии струйных течений металла и крайней неоднородности температурного поля, является вполне вероятным. Неоднородность слоя образовавшегося интерметаллида в этом случае может быть ре-

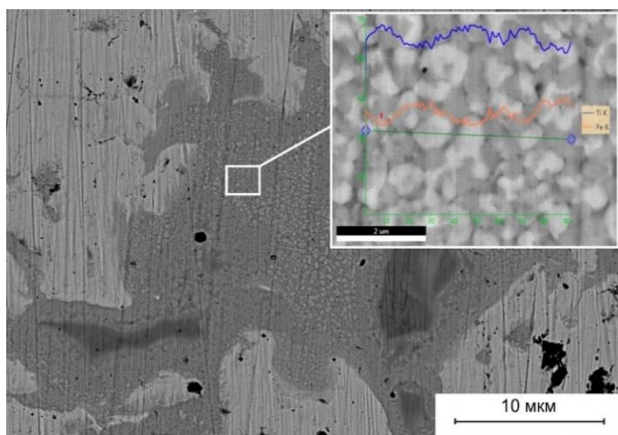
зультатом одновременного роста его зерен из достаточно большого числа центров кристаллизации в объеме жидкой фазы в условиях быстрого охлаждения за счет теплоотвода в «холодные» участки структуры и металлическую подложку.

Заключение

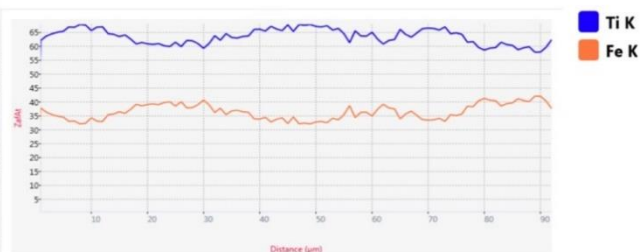
На режимах взрывного прессования, обеспечивающих равномерную деформацию частиц порошка без струйных течений, смеси порошков Fe и Ti сохраняют фазовый состав, соответствующего составу исходной порошковой смеси.

При прессовании металлических порошков Fe и Ti на режимах с локализованной пластической деформацией и струйными течениями материала частиц, наблюдается образование термодинамически неравновесного и химически неоднородного интерметаллида Ti_2Fe . При этом его содержание в структуре явно недостаточно для обеспечения возможности использования спрессованного материала в качестве аккумулятора водорода, тем более что в структуре остается достаточно большое количество непрореагировавших фаз – титана и железа.

Использование последующей термиче-



а



б

Рис. 6. Микроструктура (а) и химический состав (б) зоны взаимодействия Ti и Fe

ской обработки прессовок с практически нулевой пористостью, развитой сеткой межфазных поверхностей и прочной связью между зернами структурных компонентов, создающих благоприятные условия для развития диффузионных процессов, выглядит весьма перспективным возможным путем решение этой проблемы.

Библиографический список

1. Проблемы аккумуляции и хранения водорода / В. Н. Фатеев, О. К. Алексеева, С. В. Коробцев, Е. А. Серегина, Т. В. Фатеева, А. С. Григорьев, А. Ш. Алиев // *Kimya Problemleri*. – 2018. – №4. – С. 453-483.
2. EBSD microstructural analysis of AB-type TiFe hydrogen storage alloys / S. I. Lee, T. Ha, Y. S. Lee, D.-I. Kim, J.-Y. Suh, Y. W. Cho, B. H., J. L., J.-H. Shim // *Materials Characterization*. – 2021. – Vol. 178. – Pp. 111276. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111276>
3. Водородсорбционные свойства интерметаллического соединения TiFe с нанесенным защитным полимерным покрытием / М. Ю. Задорожный, Д. В. Стругова, К. В. Геодакян, Л. К. Олифинов, Г. С. Миловзоров, В. Ю. Задорожный // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 5.
4. Manna, J. First hydrogenation kinetics of Zr and Mn doped TiFe alloy after air exposure and reactivation by mechanical treatment / J. Manna, B. Tougas, J. Huot // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2020. – Vol. 45. – Iss. 20. – P. 11625-11631. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.043>
5. Lv, P. Effect of high zirconium content on hydrogenation properties and anti-poisoning ability of air-exposed TiFe alloy / P. Lv, Z. Liu // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2019. – Vol. 8. – Iss. 6. – P. 5972-5983. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.072>
6. Manna, J. Mechanical activation of air exposed TiFe + 4 wt% Zr alloy for hydrogenation by cold rolling and ball milling / J. Manna, B. Tougas, J. Huot // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2018. – Vol. 43. – Iss. 45. – P. 20795-20800. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.096>
7. Ulate-Kolitsky, E. First Hydrogenation of TiFe with Addition of 20 wt.% Ti / E. Ulate-Kolitsky, B. Tougas, J. Huot // *Hydrogen*. – 2022. – Vol. 3. – Iss. 4. – P. 379-388. <https://doi.org/10.3390/hydrogen3040023>
8. Enhanced initial hydrogenation of TiFe-based hydrogen storage alloys containing C / K. Hwang, T. Ha, S. Lee, S.-W. Jin, Y.-K. Lee, Y.-S. Lee, Y. Kim, J.-H. Shim // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2025. – Vol. 1040. – Pp. 183716. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.183716>
9. Hierarchical microstructure of explosive joints: Example of titanium to steel cladding / J. Song, A. Kostka, M. Veehmayer, D. Raabe // *Materials Science and Engineering: A*. – 2011. – Vol. 528. – Iss. 6. – Pp. 2641-2647. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.092>
10. Шморгун, В. Г. Химический состав диффузионной зоны в титаностальном композите / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, Р. Е. Новиков // *Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении*. – Волгоград, 2015. – № 5 (160). – С. 32-35.
11. Fundamental hydrogen storage properties of TiFe-alloy with partial substitution of Fe by Ti and Mn. / E. M. Dematteis, D. M. Dreistadt, G. Capurso, J. Jepsen, F. Cuevas, M. Latroch // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – Vol. 874. – P. 159925. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159925>

Информация об авторах

Александр Васильевич Крохалев – доктор технических наук, декан факультета технологии конструкционных материалов, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0001-7677-0288>

e-mail: kroch58@yandex.ru

Дмитрий Романович Черников – учебный мастер кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-2388-020X>

e-mail: chernikovdr@yandex.ru

Валентин Олегович Харламов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», ведущий инженер Центра коллективного пользования «Физико-химические методы исследования» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0002-5039-4592>

e-mail: harlamov_vo@mail.ru

Сергей Алексеевич Ганцев – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0009-0001-9774-1934>

e-mail: sergej.gantsev@yandex.ru

Сергей Викторович Кузьмин – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, первый проректор ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>

e-mail: weld@vstu.ru

Владимир Ильич Лысак – академик РАН, доктор технических наук, профессор, научный руководитель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Information about the authors

Alexander V. Krokhalev – Doctor of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Structural Materials Technology, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0001-7677-0288>

e-mail: kroch58@yandex.ru

Dmitry Romanovich Chernikov – Educational Master of the Department of Welding Production Equipment and Technology, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-2388-020X>

e-mail: chernikovdr@yandex.ru

Valentin O. Kharlamov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding Equipment and Technology, Senior Engineer at the Center for Collective Use of Physico-Chemical Research Methods, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0002-5039-4592>

e-mail: harlamov_vo@mail.ru

Sergey A. Gantsev is a Master's student at the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0009-0001-9774-1934>

e-mail: sergej.gantsev@yandex.ru

Sergey V. Kuzmin – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice-Rector of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>

e-mail: weld@vstu.ru

Vladimir I. Lysak – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Вклад авторов

А. В. Крохалев – анализ экспериментальных данных, написание текста статьи

Д. Р. Черников – анализ экспериментальных данных, получение исследуемых материалов

В. О. Харламов – проведение исследований методами электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа

С. А. Ганцев – подготовка образцов к микроструктурному исследованию

С. В. Кузьмин – расчеты параметров взрывного прессования, участие в обсуждении результатов

В. И. Лысак – определение цели работы, участие в обсуждении результатов

Contribution of the authors

A. V. Krokhalev – analysis of experimental data, writing the article

D. R. Chernikov – conducting experiments on heat treatment of compacts

V. O. Kharlamov – conducting studies using electron microscopy and X-ray structural analysis

S. A. Gantsev – preparation of samples for microstructural examination

S. V. Kuzmin – calculations of explosive pressing parameters, participation in discussion of results

V. I. Lysak – defining the purpose of the work, participation in discussion of results

*Статья поступила в редакцию 15.10.2025, доработана 10.11.2025,
подписана в печать 21.11.2025*

*The article was submitted 15.10.2025, revised 10.11.2025,
accepted for publication 21.11.2025*