



УДК 669.018.25.017

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-4-17-25>Научная статья
Research article

Экспериментальное исследование возможности получения материалов на основе метастабильной фазы Ti_2Fe с помощью взрывного прессования и термической обработки

А. В. Крохалев, В. О. Харламов [✉], Д. Р. Черников,
С. В. Кузьмин, В. И. Лысак

Волгоградский государственный технический университет
Россия, 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, 28

✉ harlamov_vo@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены основные закономерности формирования структуры и фазового состава материалов системы Fe–Ti, перспективных для хранения водорода, при уплотнении взрывом порошковых смесей титана и железа. Установлено, что при использовании режима нагружения, обеспечивающего давление ударно-волнового сжатия $P = 11,5$ ГПа и разогрев в падающей ударной волне до 777 °С, происходит уплотнение порошковой смеси до практически беспористого состояния за счет равномерного пластического растекания частиц в направлении, перпендикулярном направлению ударного сжатия. При более жестком нагружении ($P = 12,5$ ГПа и $t = 831$ °С) также достигается монолитное состояние, но характер деформации частиц компонентов порошковой смеси принципиально изменяется: пластическая деформация частиц локализуется в их поверхностных слоях и имеет ярко выраженный струйный характер с образованием специфических «завихрений». Обнаружено влияние механизма пластического деформирования частиц порошка на процесс образования метастабильной интерметаллидной фазы Ti_2Fe с повышенной водородной емкостью. Установлено, что сплошные прослойки Ti_2Fe толщиной до 20 мкм формируются на границах контактирования частиц железа и титана лишь в случае реализации струйных течений поверхностных слоев частиц. Показано, что причиной подобного эффекта является локальный разогрев приконтактных областей до температуры выше 1085 °С, являющейся, в соответствии с диаграммой состояния системы Ti–Fe, минимальной для существования в ней жидкой фазы. Показано, что эффективным методом получения материалов на основе Ti_2Fe является совмещение взрывного прессования смеси порошков Fe и Ti и последующей термической обработки с нагревом до 1100 °С (реакционное спекание в присутствии жидкой фазы).

Ключевые слова: прессование порошков взрывом, метастабильный интерметаллид Ti_2Fe , водородная емкость, термическая обработка, реакционное спекание в присутствии жидкой фазы

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке ВолгГТУ в рамках научного проекта № 6/464-22.

Для цитирования: Крохалев А.В., Харламов В.О., Черников Д.Р., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Экспериментальное исследование возможности получения материалов на основе метастабильной фазы Ti_2Fe с помощью взрывного прессования и термической обработки. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2024;18(4):17–25.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-4-17-25>

Experimental study of the feasibility of producing materials based on the metastable phase Ti_2Fe through explosive compaction and heat treatment

A. V. Krokhaliev, V. O. Kharlamov[✉], D. R. Chernikov,
S. V. Kuzmin, V. I. Lysak

Volgograd State Technical University
28 Lenin Prosp., Volgograd 400005, Russia

✉ harlamov_vo@mail.ru

Abstract. The primary regularities in the formation of the structure and phase composition of Fe–Ti system materials, which are promising for hydrogen storage under explosive compaction of titanium and iron powder mixtures, are considered. It has been established that under a loading regime ensuring shock-wave compression pressure $P = 11.5$ GPa and heating in the falling shock wave to 777 °C, the powder mixture is compacted to an almost non-porous state due to the uniform plastic flow of particles in a direction perpendicular to the direction of shock compression. Under more severe loading conditions ($P = 12.5$ GPa and $t = 831$ °C), a monolithic state is also achieved, but the deformation character of the powder mixture component particles changes fundamentally: plastic deformation of the particles is localised in their surface layers and has a pronounced jet character with the formation of specific “vortices”. The influence of the plastic deformation mechanism of powder particles on the formation process of the metastable intermetallic phase Ti_2Fe with increased hydrogen capacity has been discovered. It has been established that solid layers of Ti_2Fe up to 20 μm thick are formed at the contact boundaries of iron and titanium particles only in the case of jet flows of surface layers of particles. It has been shown that the cause of this effect is the local heating of the contact areas to a temperature above 1085 °C, which according to the phase diagram of the Ti–Fe system, is the minimum temperature for the existence of a liquid phase in it. It has been demonstrated that an effective method for producing materials based on Ti_2Fe is the combination of explosive compaction of Fe and Ti powder mixtures and subsequent heat treatment with heating to 1100 °C (reactive sintering in the presence of a liquid phase).

Keywords: explosive powder compaction, metastable intermetallic Ti_2Fe , hydrogen capacity, heat treatment, reactive sintering in the presence of a liquid phase

Acknowledgements: This research was supported by Volgograd State Technical University under the scientific project No. 6/464-22.

For citation: Krokhaliev A.V., Kharlamov V.O., Chernikov D.R., Kuzmin S.V., Lysak V.I. Experimental study of the feasibility of producing materials based on the metastable phase Ti_2Fe through explosive compaction and heat treatment. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2024;18(4):17–25. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-4-17-25>

Введение

Развитие водородной энергетики выдвигает постоянно возрастающие требования к системам аккумуляции водорода [1]. Наиболее перспективным и безопасным способом его хранения считается использование гидридообразующих интерметаллидов [2]. Так, например, объемная плотность водорода в гидридах на основе интерметаллидов составляет от ~ 60 до ~ 100 kg/m^3 , тогда как в газообразном состоянии даже при давлении 400 бар это всего лишь ~ 20 kg/m^3 [3]. Столь высокие значения водородной емкости позволяют создавать анодные материалы для металлгидридных аккумуляторов с разрядной емкостью, достигающей 400 $mA \cdot ч/г$ [1].

Кроме наиболее распространенного в настоящее время интерметаллида $LaNi_5$ одним из наиболее привлекательных материалов для хранения водорода считается интерметаллид $TiFe$, отличительными

особенностями которого являются низкая стоимость и способность работать при низких давлениях и температурах окружающей среды [1].

В настоящее время внимание большого количества исследователей [4–11] привлекает изучение возможности решения проблемы «активации» этого материала [12–15]. Дело в том, что $TiFe$ очень чувствителен к воздуху и образует пассивирующий слой, препятствующий поглощению водорода. Классический способ активации – это термообработка, заключающаяся в циклическом воздействии повышенной и комнатной температур при высоком давлении водорода [16]. Однако в настоящее время более перспективными считаются другие методы, такие как механическая обработка (шаровая мельница, холодная прокатка, кручение под высоким давлением) [8; 17–20], использование повышенного (по сравнению со стехиометрическим) содержания Ti [5; 9], добавление легирующих элементов Mn , Cr , Zr , Y и др. [6; 10; 21–23].

При использовании избытка Ti и легировании было обнаружено [5; 6; 9; 10; 21–23], что в структуре материала кроме TiFe появляются твердый раствор на основе β -Ti (называемый в некоторых работах ВСС-фазой или фазой Ti_4Fe) и интерметаллид Ti_2Fe , которые действуют как своего рода «ворота» для водорода [6–8]. В ряде исследований [4; 5; 9–11] кроме этого эффекта отмечается также некоторое общее увеличение водородной емкости материалов при первичном гидрировании, что свидетельствует о поглощении водорода не только основной фазой TiFe, но и вторичными – β -Ti и Ti_2Fe . Проведенный статистический анализ данных, полученных разными авторами для трехфазных материалов на основе TiFe, не требующих активации и содержащих в своем составе избыточное количество Ti и/или Mn и Zr, показал, что их водородная емкость при первичном гидрировании подчиняется закону аддитивности и может быть описана уравнением [24; 25]

$$H = 0,01537[TiFe] + 0,03213[Ti_2Fe] + 0,03847[Ti_4Fe],$$

где H – водородная емкость материала, мас. %; [TiFe], [Ti_2Fe] и [Ti_4Fe] – содержания в его составе соответствующих фаз, мас. %.

Как следует из приведенного уравнения, водородная емкость фазы TiFe в многофазном материале $TiFe-Ti_2Fe-Ti_4Fe$ оказывается на уровне 1,54 мас. % H (что достаточно близко к приведенному в работе [10] экспериментальному ее значению для гидрида $TiFeH$, равному 1,7–1,85 мас. % H), емкость ВСС-твердого раствора Ti_4Fe соответствует 3,85 мас. % H (что незначительно превышает известную [9] емкость гидрида Ti_4FeH_8 , равную 3,7 мас. % H), а емкость Ti_2Fe оказывается на уровне 3,21 мас. % H (что также оказывается чуть выше теоретической оценки, сделанной в работе [9], – 3,09 мас. % H для гидрида $Ti_2FeH_{4,75}$). Интересно отметить, что в присутствии вторичных фаз β -Ti и Ti_2Fe основная фаза TiFe, по видимому, не образует гидрид $TiFeH_2$ с максимально возможной емкостью 1,80–1,98 мас. % H [10], что с лихвой компенсируется, однако, вкладом β -Ti и Ti_2Fe .

Вторым важным заключением, которое следует из статистического анализа [24; 25] и совпадает с выводами работы [9], является тот факт, что увеличение содержания β -Ti в структуре материалов на основе Ti и Fe приводит к уменьшению их обратимой водородной емкости, т. е. насыщение данной фазы водородом является необратимым. Способность отдавать накопленный водород интерметаллидом Ti_2Fe зависит от содержания в материале легирующих элементов: при их отсутствии или при легировании небольшим

количеством Mn насыщение водородом является обратимым [25], а при легировании Zr, обеспечивающим максимальное содержание Ti_2Fe в структуре материала, – необратимым [9; 25]. Это позволяет сделать вывод, что наиболее перспективным путем совершенствования материалов системы Ti–Fe, способным двукратно увеличить их обратимую водородную емкость, является поиск возможности без использования легирования повысить содержание Ti_2Fe в их структуре. Однако известные попытки решить эту проблему, основанные на сплавлении компонентов с последующим отжигом [16; 26; 27], закончились неудачей [5].

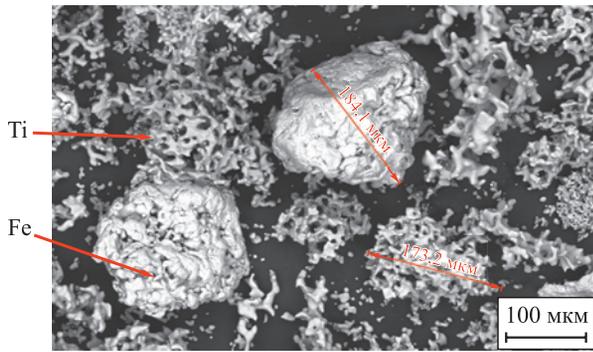
В данной работе рассмотрена возможность использования для этой цели взрывного прессования смеси порошков железа и титана. Отправным пунктом выбора указанного метода послужил общеизвестный факт достаточно частого образования интерметаллидов при сварке взрывом сталей и титановых сплавов [28; 29], а также тот факт, что при взрывном компактировании порошков и сварке взрывом область интенсивной пластической деформации на поверхности соединяемых компонентов формируется схожим образом [30; 31]. При этом использование порошка позволяет многократно увеличить площадь этой поверхности в объеме материала, а также уменьшить эффективные пути диффузии элементов при межфазном взаимодействии.

Методика исследования

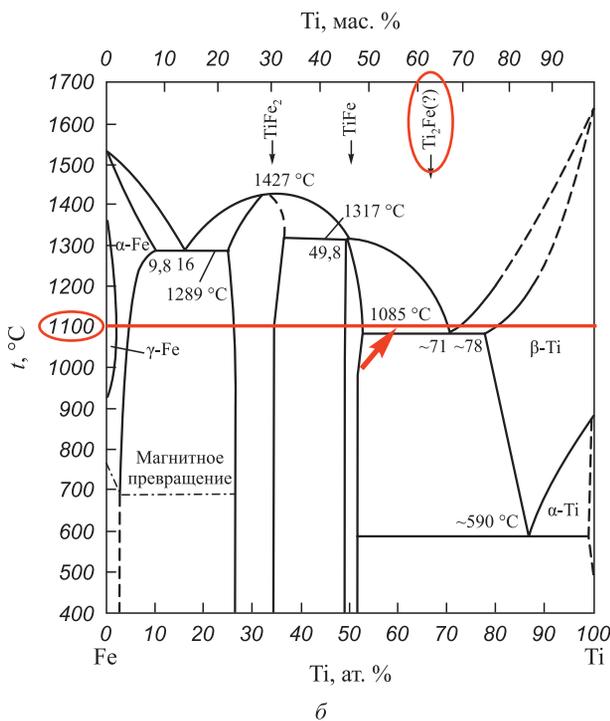
Для получения материалов использовали порошки титана марки ПТМ-1 и железа ПЖВ3 с размером частиц до 200 мкм коммерческого производителя в состоянии поставки. Частицы порошка Ti имели губчатую форму, а Fe – округлую с ярко выраженным поликристаллическим строением (рис. 1, а). Содержание компонентов в порошковой смеси составляло 36 мас. % Fe и 64 мас. % Ti, что практически совпадает со стехиометрическим составом Ti_2Fe (см. рис. 1, б) и обеспечивает одинаковое объемное содержание Fe и Ti в смеси.

Взрывное прессование осуществлялось путем размещения исходной порошковой смеси на поверхности стальной подложки и ее нагружения плоской нормально падающей детонационной волной через промежуточную прокладку, отделяющую продукты детонации от порошка (рис. 2). Расчет физических параметров сжатия, реализуемых в опытах, производился методом (P, U)-диаграмм [33]. Результаты расчетов представлены в таблице.

Исследование фазового состава, структуры и химического состава фаз полученных образцов проводили методами рентгеновского фазового анализа с помощью рентгеновского дифрактометра



а



б

Рис. 1. Вид частиц Fe и Ti в исходной порошковой смеси (а) и диаграмма (б) стабильного фазового равновесия в системе Fe–Ti [32]

Fig. 1. View of Fe and Ti particles in the initial powder mixture (a) and phase equilibrium diagram (b) in the Fe–Ti system [32]

D8 Advance («Bruker Optik GmbH», Германия) и растровой электронной микроскопии с использованием микроскопа Versa 3D (FEI, Чехия) с интегрированной системой микрорентгеноспектрального энергодисперсионного анализа Apollo-X (EDAX, США).

Параметры ударно-волнового сжатия порошковой смеси Parameters of shock-wave compression of powder mixture

Высота заряда, мм	Высота слоя порошка, мм	Толщина прокладки, мм	Скорость детонации взрывчатого вещества, км/с	Температура разогрева порошка, °C	Давление в отраженных волнах, ГПа
70	7,0	1,5	4,2	777	11,5
85				831	12,5

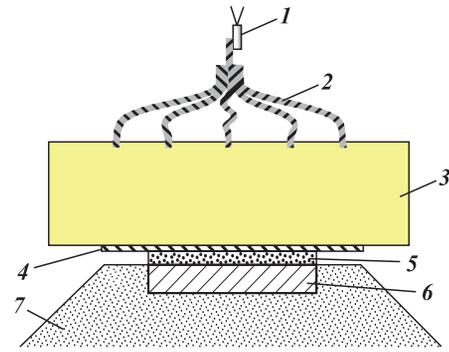


Рис. 2. Схема взрывного нагружения [33]

1 – электродетонатор; 2 – детонирующий шнур; 3 – заряд взрывчатого вещества; 4 – промежуточная прокладка; 5 – порошок; 6 – подложка; 7 – песчаная подушка

Fig. 2. Scheme of explosive loading [33]

1 – electric detonator; 2 – detonating cord; 3 – explosive charge; 4 – intermediate gasket; 5 – powder; 6 – substrate; 7 – sand pad

Результаты экспериментов

Исследование полученных взрывным прессованием материалов показало, что при использовании этого метода, обеспечивающего давление ударно-волнового сжатия на уровне $P = 11,5$ ГПа и температуру разогрева до 777 °C, порошковая смесь уплотняется до практически монолитного материала (рис. 3, а). При этом деформация частиц происходит за счет равномерного пластического течения, в результате которого они заметно сплющиваются по ходу ударного сжатия и раздаются в поперечном направлении. Следов изменения первоначального фазового состава обнаружить не удалось (рис. 3, в). Даже в непосредственной близости от межфазных границ химический состав фаз практически не изменился (рис. 3, б).

На более жестких режимах ударно-волнового сжатия ($P = 12,5$ ГПа и $t = 831$ °C) характер деформации частиц компонентов порошковой смеси принципиально меняется. Пластическая деформация локализуется в их поверхностных слоях и приобретает ярко выраженный струйный характер с образованием специфических «завихрений», подробно описанных в работах [33; 35].

При этом на межфазных поверхностях образуются сплошные прослойки интерметаллида толщиной до 20 мкм (рис. 4, б), который по химическому

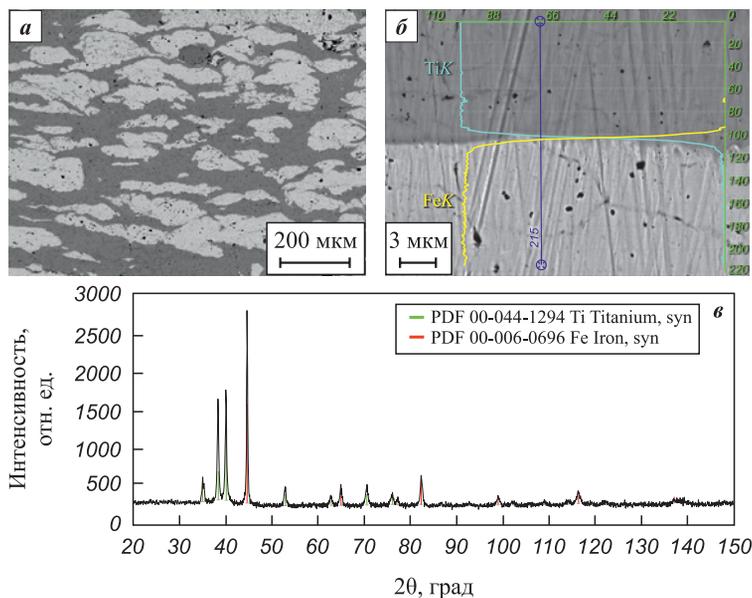


Рис. 3. Структура (а), химический (б) и фазовый (в) составы материалов, полученных в режиме нагружения: $t = 777\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 11,5\text{ ГПа}$

Fig. 3. Structure (a), chemical composition (b), and phase composition (c) of materials obtained under loading conditions: $t = 777\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 11.5\text{ GPa}$

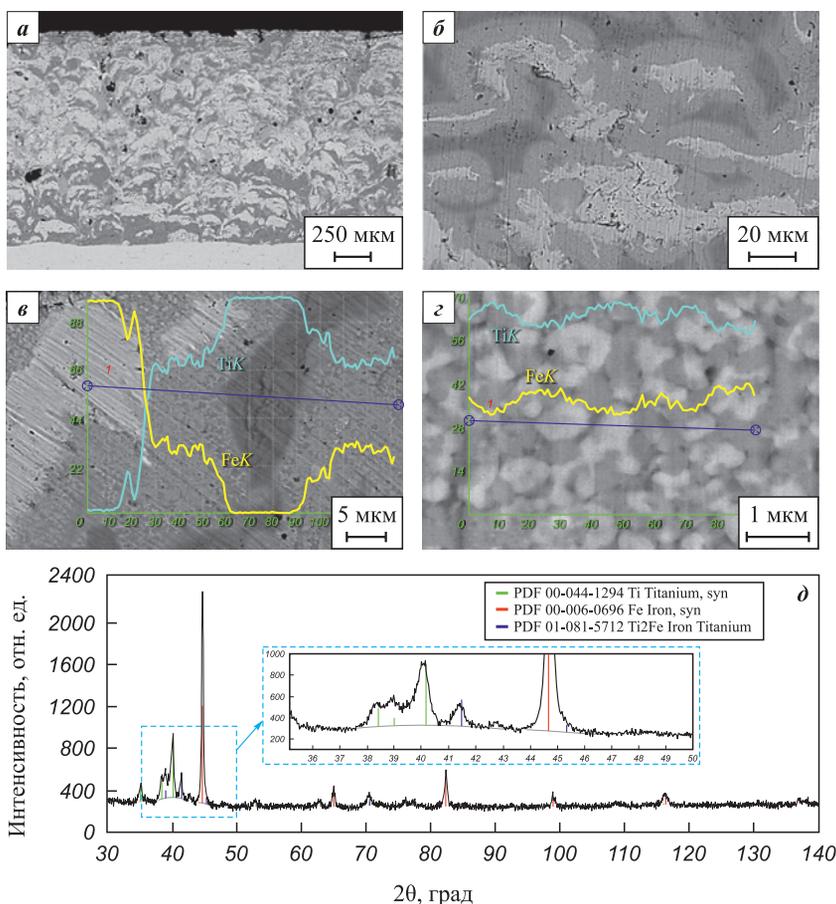


Рис. 4. Структура (а, б), химический (в, г) и фазовый (д) составы материалов, полученных в режиме нагружения: $t = 831\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 12,5\text{ ГПа}$

Fig. 4. Structure (a, b), chemical composition (c, g) and phase (d) composition of materials obtained under loading conditions: $t = 831\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 12.5\text{ GPa}$

составу (рис. 4, в) и кристаллическому строению (рис. 4, д) может быть идентифицирован как метастабильная фаза Ti_2Fe .

Детальное рассмотрение микроструктуры зоны взаимодействия компонентов исходной порошковой смеси указывает (рис. 4, з) на ее химическую неоднородность, выражающуюся в периодических (с периодом 1,5–2,0 мкм) колебаниях состава интерметаллида. При этом отклонение от среднего стехиометрического соотношения компонентов доходит до 7 %.

Обсуждение результатов

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 [28; 29; 36].

Поскольку температура контактного плавления в системе $Ti-Fe$ невысока и составляет в соответ-

ствии с диаграммой состояния системы $1085\text{ }^\circ\text{C}$ (см. рис. 1), то ее достижение на границах частиц в случае взрывного прессования в режимах, обеспечивающих среднюю расчетную температуру разогрева $831\text{ }^\circ\text{C}$, при наличии струйных течений металла и крайней неоднородности температурного поля, является вполне вероятным. Неоднородность слоя образовавшегося интерметаллида в этом случае может быть результатом 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.

Для проверки высказанной гипотезы прессовки, полученные в режиме нагружения, обеспечивающем равномерное пластическое течение материала частиц, и не имеющие в своем составе интерметаллидной фазы, подвергли нагреву до $1100\text{ }^\circ\text{C}$ в вакууме с выдержкой в течение 1 ч с последующим охлаждением в потоке аргона. В результате исходные компоненты прессовок полностью прореагировали друг с другом и сформировалась структура, состоящая из интерметаллидов $TiFe$ и Ti_2Fe (рис. 5, а, б).

Сопутствующие примеси внедрения – углерод, кислород и азот – оказались связанными в оксикарбонитриды титана (рис. 5, в), которые в результате коагуляции и коалесценции в жидкой фазе образо-

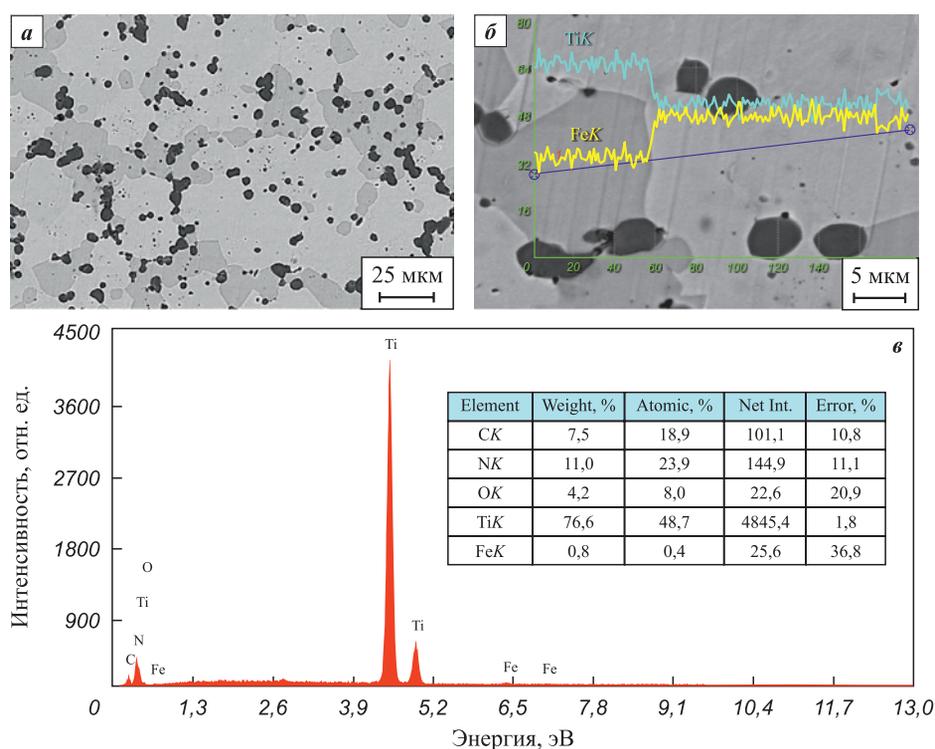


Рис. 5. Структура (а), химический состав интерметаллидных фаз (б) и оксикарбонитридных включений (в) материалов, полученных термической обработкой прессовок

Fig. 5. Structure (a), chemical composition of intermetallic phases (b) and oxycarbonitride inclusions (v) of materials obtained by heat treatment of compacts

вали достаточно крупные включения, равномерно распределенные в объеме материала (рис. 5, а, б). Переход части Ti в эти включения, по всей видимости, послужил основной причиной того, что кроме интерметаллидной фазы Ti_2Fe в структуре материала образовалась фаза TiFe. Решение этой проблемы требует увеличения (сверх стехиометрического) содержания Ti в исходной смеси порошков.

Вторым фактором, определившим наличие интерметаллида TiFe в структуре прессовок, полученных термической обработкой, явилось, вероятно, существенное увеличение длительности процесса межфазного взаимодействия при переходе от чисто взрывной обработки к сочетанию взрывной и термической, в результате чего вероятность образования стабильной фазы TiFe и растворения метастабильной фазы Ti_2Fe возросла.

Выводы

1. В условиях взрывного прессования смесей порошков железа и титана, обеспечивающих равномерную деформацию исходных частиц без струйных течений, наблюдается их уплотнение до практически беспористого состояния и сохранение исходного фазового состава смеси.

2. При использовании режимов прессования с локализованной пластической деформацией и струйными течениями материала частиц исходной порошковой смеси образуется химически неоднородный метастабильный интерметаллид Ti_2Fe в виде сплошных прослоек между частицами железа и титана.

3. Эффективным методом получения материалов с высоким содержанием метастабильного интерметаллида Ti_2Fe является совмещение взрывного прессования смеси порошков Fe и Ti с последующей термической обработкой в межкритическом интервале температур (реакционное спекание в присутствии жидкой фазы).

Список литературы / References

- Cuevas F., Amdisen M.B., Baricco M., Buckley C.E., Cho Y.W., De Jongh P., Latroche M. Metallic and complex hydride-based electrochemical storage of energy. *Progress in Energy*. 2022;4(3):032001. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac665b>
- Tarasov B.P., Fursikov P.V., Volodin A.A., Bocharnikov M.S., Shimkus Y.Y., Kashin A.M., Lototskiy M.V. Metal hydride hydrogen storage and compression systems for energy storage technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(25):3647–13657. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.085>
- Yartys V.A., Lototskiy M.V. Laves type intermetallic compounds as hydrogen storage materials: a review. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;916:65219.
- Guéguen A., Latroche M. Influence of the addition of vanadium on the hydrogenation properties of the compounds $TiFe_{0.9}V_x$ and $TiFe_{0.8}Mn_{0.1}V_x$ ($x = 0, 0.05$ and 0.1). *Journal of Alloys and Compounds*. 2011; 509(18):5562–5566. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.02.036>
- Ulate-Kolitsky E., Tougas B., Huot J. Hydrogenation of Ti_xFe_{2-x} -based alloys with overstoichiometric Ti ratio ($x = 1.1, 1.15$ and 1.2). *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(77): 38363–38369. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.077>
- Manna J., Tougas B., Huot J. First hydrogenation kinetics of Zr and Mn doped TiFe alloy after air exposure and reactivation by mechanical treatment. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(20):11625–11631. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.043>
- Lv P., Liu Z. Effect of high zirconium content on hydrogenation properties and anti-poisoning ability of air-exposed TiFe alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019;8(6):5972–5983. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.072>
- Manna J., Tougas B., Huot J. Mechanical activation of air exposed TiFe + 4 wt% Zr alloy for hydrogenation by cold rolling and ball milling. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018;43(45):20795–20800. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.096>
- Ulate-Kolitsky E., Tougas B., Huot J. First hydrogenation of TiFe with addition of 20 wt.% Ti. *Hydrogen*. 2022;3(4):379–388. <https://doi.org/10.3390/hydrogen3040023>
- Patel A.K., Duguay A., Tougas B., Schade C., Sharma P., Huot J. Microstructure and first hydrogenation properties of TiFe alloy with Zr and Mn as additives. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(1):787–797. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.239>
- Dematteis E.M., Capurso G., Jepsen J., Cuevas F., Latroche M. Fundamental hydrogen storage properties of TiFe-alloy with partial substitution of Fe by Ti and Mn. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;874:159925. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159925>
- Schober T., Westlake D.G. Activation of FeTi for hydrogen storage: a different view. *Scripta Metallurgica*. 1981;15(8): 913–918. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(81\)90277-5](https://doi.org/10.1016/0036-9748(81)90277-5)
- Silva B.H., Almeida J.M.P., Hernandez A.C., Gonçalves R.V., Zepon G. Pulsed laser activation method for hydrogen storage alloys. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;53:885–890. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.143>
- Salman M.S., Lai Q., Luo X., Prathana C., Rambhujun N., Costalin M., Wang T., Sapkota P., Liu W., Grahame A., Tupe J., Aguey-Zinsou K.-F. The power of multifunctional metal hydrides: A key enabler beyond hydrogen storage. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;920:165936. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165936>
- Lai Q., Sun Y., Wang T., Modi P., Cazorla C., Demirci U.B., Fernandez J.R.A., Leardini F., Aguey-Zinsou K.-F. How to design hydrogen storage materials? Fundamentals, synthesis, and storage tanks. *Advanced Sustainable Systems*. 2019;3(9):1900043. <https://doi.org/10.1002/adsu.201900043>

16. Reilly J.J., Wiswall R.H. Formation and properties of iron titanium hydride. *Inorganic Chemistry*. 1974;13(1): 218–222. <https://doi.org/10.1021/ic50131a042>
17. Lv P., Guzik M.N., Sartori S., Huot J. Effect of ball milling and cryomilling on the microstructure and first hydrogenation properties of TiFe+4 wt.% Zr alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019; 8(2):1828–1834. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.12.013>
18. Guo F., Namba K., Miyaoka H., Jain A., Ichikawa T. Hydrogen storage behavior of TiFe alloy activated by different methods. *Materials Letters: X*. 2021;9:100061. <https://doi.org/10.1016/j.mlblux.2021.100061>
19. Ulate-Kolitsky E., Tougas B., Neumann B., Schade C., Huot J. First hydrogenation of mechanically processed TiFe-based alloy synthesized by gas atomization. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021; 46(10):7381–7389. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.237>
20. Oliveira V.B., Beatrice C.A.G., Leal Neto R.M., Silva W.B., Pessan L.A., Botta W.J., Leiva D. R. Hydrogen absorption/desorption behavior of a cold-rolled TiFe intermetallic compound. *Materials Research*. 2021;24(6):e20210204. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0204>
21. Yang T., Wang P., Xia C., Liu N., Liang C., Yin F., Li Q. Effect of chromium, manganese and yttrium on microstructure and hydrogen storage properties of TiFe-based alloy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45(21):12071–12081. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.086>
22. Park K.B., Ko W.S., Fadonougbo J.O., Na T.W., Im H.T., Park J.Y., Park H.K. Effect of Fe substitution by Mn and Cr on first hydrogenation kinetics of air-exposed TiFe-based hydrogen storage alloy. *Materials Characterization*. 2021;178:111246. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111246>
23. Faisal M., Suh J.Y., Lee Y.S. Understanding first cycle hydrogenation properties of Ti–Fe–Zr ternary alloys. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(5): 4241–4251. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.025>
24. Крохалев А.В., Черников Д.Р., Харламов В.О., Тузиков О.О., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Анализ влияния фазового состава материалов системы «титан–железо» на водородную емкость при первичном гидрировании. *Известия ВолгГТУ. Сер. Металлургия*. 2023;7(278):7–13. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-7-278-7-13>
 Krokhaliev A.V., Chernikov D.R., Kharlamov V.O., Tuzhikov O.O., Kuz'min S.V., Lysak V.I. Analysis of the influence of the phase composition of materials of the titanium-iron system on the hydrogen capacity during primary hydrogenation. *Izvestiya VolgGTU. Ser. Metallurgiya*. 2023;7(278):7–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-7-278-7-13>
25. Крохалев А.В., Черников Д.Р., Харламов В.О., Тузиков О.О., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Анализ влияния фазовых составляющих на водородную емкость материалов системы «титан–железо». *Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении*. 2023; 6(277):47–51. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-6-277-47-51>
 Krokhaliev A.V., Chernikov D.R., Kharlamov V.O., Tuzhikov O.O., Kuz'min S.V., Lysak V.I. Analysis of the influence of phase components on the hydrogen capacity of materials in the titanium-iron system. *Izvestiya VolgGTU. Ser. Problemy materialovedeniya, svarki i prochnosti v mashinostroyeni*. 2023;6(277):47–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-6-277-47-51>
26. Fokin V.N., Fokina E.E., Korobov I.I., Tarasov B.P. Phase transformations in the systems Ti₂Fe–H₂ and Ti₂Fe–NH₃. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2016;61(7): 891–895. <https://doi.org/10.1134/S0036023616070044.pdf>
27. Park K.B., Na T.W., Do Kim Y., Park J.Y., Kang J.W., Kang H.S., Park K., Park H.K. Characterization of microstructure and surface oxide of Ti_{1,2}Fe hydrogen storage alloy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(24): 13082–13087. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.105>
28. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. М.: Машиностроение-1, 2005. 544 с.
29. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Шморгун В.Г. Титаностальные композиты и соединения: Монография. Волгоград: ВолгГТУ, 2013. 344 с.
30. Бондарь М.П. Компактирование взрывом: тип микроstructures контактных границ, созданный при образовании прочной связи. *Физика горения и взрыва*. 2004;40(4):131–140. <https://www.sibran.ru/upload/iblock/226/226d77740cc650ef83c74b864d672f61.pdf>
 Bondar' M.P. Explosive compaction: the type of microstructure of contact boundaries produced by formation of a strong bond. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2004;40(4):489–497. <https://doi.org/10.1023/B:CESW.0000033573.06708.d2>
31. Бондарь М.П. Исследование соединений на контактах металлических поверхностей, созданных динамическими методами. *Физическая мезомеханика*. 2001;4(6):67–75. <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-soedineniy-na-kontaktah-metallicheskih-poverhnostey-sozdannyh-dinamicheskimi-metodami/viewer>
 Bondar M.P. Study of joint formation at the contact of metallic surfaces under dynamic deformation. *Physical Mesomechanics*. 2001;4(6):61–69. <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-soedineniy-na-kontaktah-metallicheskih-poverhnostey-sozdannyh-dinamicheskimi-metodami/viewer>
32. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т. 2. Под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1997. 1024 с.
33. Лысак В.И., Крохалев А.В., Кузьмин С.В., Рогозин В.Д., Каунов А.М. Прессование порошков взрывом: Монография. М.: Машиностроение-1, 2015. 252 с.
34. Пай В.В., Кузьмин Г. Е, Яковлев И.В. Приближенная оценка параметров нагружения в композиционных материалах для случая сильных ударных волн. *Физика горения и взрыва*. 1995;31(3):134–138. <https://www.sibran.ru/upload/iblock/964/964eec0cb0286a94463d7162037900b3.pdf>

Pai V.V., Kuz'min G.E., Yakovlev I.V. Approximate evaluation of loading parameters in composite materials with strong shock waves. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 1995;31(3):390–394.

<https://doi.org/10.1007/BF00742686>

35. Рогозин В.Д. Взрывная обработка порошковых материалов. Волгоград: РПК «Политехник», 2002. 135 с.
36. Кузьмин Е.В., Королев М.П., Лысак В.И., Кузьмин С.В., Зарубин М.С., Петрушкин П.А., Львов В.А. Особенности формирования соединения композита титан–сталь при сварке взрывом с воздействи-

ем ультразвука. *Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений*. 2020; 11(246):19–23.

<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-11-246-19-23>

Kuz'min E.V., Korolev M.P., Lysak V.I., Kuz'min S.V., Zarubin M.S., Petrushkin P.A., L'vov V.A. Features of the formation of a titanium-steel composite joint during explosion welding under the influence of ultrasound. *Izvestiya VolgGTU. Ser. Svarka vzryvom i svoystva svarnykh soedinenij*. 2020;11(246):19–23. (In Russ.).

<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-11-246-19-23>

Сведения об авторах



Information about the Authors

Александр Васильевич Крохалев – д.т.н., декан факультета технологии конструкционных материалов, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)

ORCID: 0000-0001-7677-0288

E-mail: kroch@vstu.ru

Валентин Олегович Харламов – к.т.н., доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», вед. инженер Центра коллективного пользования «Физико-химические методы исследования», ВолгГТУ

ORCID: 0000-0002-5039-4592

E-mail: harlamov_vo@mail.ru

Дмитрий Романович Черников – аспирант кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», ВолгГТУ

ORCID: 0000-0003-2388-020X

E-mail: chernikovdr@yandex.ru

Сергей Викторович Кузьмин – д.т.н., чл.-корр. РАН, профессор кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», первый проректор ВолгГТУ

ORCID: 0000-0003-2802-8497

E-mail: weld@vstu.ru

Владимир Ильич Лысак – д.т.н., академик РАН, проф., зав. кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства», научный руководитель ВолгГТУ

ORCID: 0000-0003-3066-058X

E-mail: lysak@vstu.ru

Aleksander V. Krokhalev – Dr. Sci. (Eng.). Dean of the Faculty of Structural Materials Technology, Volgograd State Technical University (VSTU)

ORCID: 0000-0001-7677-0288

E-mail: kroch@vstu.ru

Valentin O. Kharlamov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at the Department “Equipment and Technology of Welding Production”, Senior Engineer at the Shared Use Center “Physico-chemical research methods”, VSTU

ORCID: 0000-0002-5039-4592

E-mail: harlamov_vo@mail.ru

Dmitry R. Chernikov – Postgraduate Student at the Department “Equipment and Technology of Welding Production”, VSTU

ORCID: 0000-0003-2388-020X

E-mail: chernikovdr@yandex.ru

Sergey V. Kuzmin – Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of the RAS, Professor at the Department “Equipment and Technology of Welding Production”, First Vice-Rector of VSTU

ORCID: 0000-0003-2802-8497

E-mail: weld@vstu.ru

Vladimir I. Lysak – Dr. Sci. (Eng.), Academician of the RAS, Professor, Head of the Department “Equipment and Technology of Welding Production”, Scientific Director of VSTU

ORCID: 0000-0003-3066-058X

E-mail: lysak@vstu.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

A. V. Krokhalev – анализ экспериментальных данных, написание текста статьи.

V. O. Kharlamov – проведение исследований методами электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа, участие в обсуждении результатов.

D. R. Chernikov – проведение экспериментов по прессованию взрывом и термической обработке.

S. V. Kuzmin – расчеты параметров взрывного прессования, участие в обсуждении результатов.

V. I. Lysak – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

A. V. Krokhalev – analyzed the experimental data, wrote the article.

V. O. Kharlamov – conducted research using electron microscopy and X-ray diffraction analysis, participated in the discussion of the results.

D. R. Chernikov – conducted experiments on explosive compaction and heat treatment.

S. V. Kuzmin – carried out calculations of explosive compaction parameters, participated in the discussion of the results.

V. I. Lysak – determined the purpose of the work, participated in the discussion of the results.

Статья поступила 25.10.2023 г.
Доработана 10.04.2024 г.
Принята к публикации 15.04.2024 г.

Received 25.10.2023
Revised 10.04.2024
Accepted 15.04.2024