

А.А. Белгибаева<sup>1</sup>, Р.Ш. Еркасов<sup>1</sup>, И.А. Курзина<sup>2</sup>, Н.И. Каракчиева<sup>2,3</sup>,  
В.И. Сачков<sup>2</sup>, Ю.А. Абзаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>3</sup> Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирского федерального  
научного центра агробиотехнологий Российской академии наук, Томск, Россия

<sup>1</sup> Томский Архитектурно-строительный Государственный Университет, Томск, Россия  
(E-mail: bayan\_05.06@mail.ru)

### Получение высокопрочных сплавов системы Ti-Al используя гидриды металлов

**Аннотация:** Рассмотрен метод получения материалов через синтез гидридов. Установлено увеличение твердости сплавов и формирование термодинамически стабильных интерметаллидных фаз. Полученные образцы сплавов представляют собой спеченные агломераты интерметаллидных фаз с размером области когерентного рассеяния (ОКР) до 100 нм. Разработан новый метод получения сплавов, который позволяет получать сложные полуфункциональные металлические композиции, с контролируемым содержанием дисперсных интерметаллидных фаз.

**Ключевые слова:** РЗМ; гидриды; система Ti-Al; интерметаллиды; рентгенофазовый анализ.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2019-126-1-21-28>

Известно, что решающую роль при использовании материалов, особенно при высоких температурах, играет их способность противостоять влиянию агрессивной среды. Влияние легирующих элементов на жаростойкость металлов и сплавов исследовано достаточно широко. На основе этих исследований создана теория жаростойкого легирования [1-3], которая помогает прогнозировать стойкость материала в агрессивной среде, но она не является универсальной и не имеет математической модели. Поэтому исследователям во время разработки новых материалов приходится изучать влияние легирующих элементов на разные сплавы.

В течение последних десятилетий проводятся разработки на основе упрочненных интерметаллидов. В качестве перспективных жаростойких сплавов на основе титана, наиболее широко изучены сплавы с высоким содержанием алюминия (> 11%) [4] и сплавы на основе TiAl [5], что связано со способностью интерметаллидов TiAl и Ti<sub>3</sub>Al характеризоваться высокой жаростойкостью, чем многокомпонентные α- и β-титановые сплавы [6,7].

Найдено, что благодаря высокой температуре плавления, низкой плотности (3800–4200 кг·м<sup>-3</sup>), высокой удельной прочности и хорошему сопротивлению ползучести при температурах 600–800 °С, а также хорошему сопротивлению окислению и низкой себестоимости, γ-TiAl сплавы являются альтернативой жаропрочным никелевым сплавам. Кроме того, интерметаллиды титана имеют большую удельную теплопроводность, чем керамика и керамические композиционные материалы, что обуславливает низкие термические напряжения в условиях термоциклирования [8,9].

Особенностью рассматриваемых сплавов является наличие в их структуре интерметаллических фаз титана с алюминием Ti<sub>3</sub>Al и TiAl [10] – прочных при умеренных до (900 – 950 °С) температурах и, тем самым, обеспечивающих им жаропрочность, но хрупких в нормальных условиях. Вторая основная структурная составляющая представлена твердым раствором на основе титана – это пластичная фаза, ответственная в сплаве за трещиностойкость.

Интерметаллидные сплавы могут использоваться в качестве конструкционных материалов для деталей газотурбинных двигателей, как материалы защитного покрытия, характеризующегося высокими механическими и антикоррозионными свойствами, а также как лигатуры, используемые для последующего получения специальных алюминиевых и

титановых сплавов. Одним из основных требований, предъявляемых к легатурам, является высокое содержание целевого компонента, что отражается на эффективности реализации процесса легирования.

В тоже время основными недостатками таких сплавов является высокая стоимость получения связанная с энергозатратным и трудоемким процессом синтеза фаз  $TiAl$  и  $Ti_3Al$ , а также низкая пластичность и сложность формообразования в связи с плохой обрабатываемостью резанием. Разработка технологий производства высокотемпературных титан-алюминиевых сплавов со специальной микроструктурой, упрочняющим и модифицирующим легированием и надежными защитными покрытиями позволит в будущем использовать их в наиболее экстремальных эксплуатационных условиях.

На сегодняшний день интерес к использованию редкоземельных металлов (РЗМ) для металлургического производства и создания новых материалов с исключительными свойствами неуклонно растет [11]. Микролегирование конструкционных материалов редкоземельными элементами является перспективным способом улучшения их свойств. Необходимое для этих целей количество РЗМ велико, но без их применения получить заданные свойства невозможно.

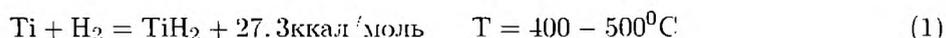
РЗМ вносят определенный вклад в изменение структуры и свойств титан-алюминиевых сплавов. Поскольку растворимость РЗМ в алюминии предельно мала, то в сплавы редко добавляют  $>0,5\%$  (по массе), но уже и эти малые добавки могут существенно повысить свойства этих сплавов. Также, РЗМ образуют тугоплавкие соединения с легкоплавкими примесями, улучшают структуру окисной пленки, что очень важно для высокопрочных (особенно для жаропрочных) конструкционных титановых сплавов. Кроме того, увеличивая поверхностное натяжение и создавая тонкие обволакивающие пленки на поверхности растущей фазы, РЗМ тормозят ее рост. Положительное влияние оказывают РЗМ и при сварке, улучшая качество сварных швов, что обусловлено их модифицирующим действием и уменьшением кислорода на границах и в приграничных зонах [12].

Целью работы является получение методом порошковой металлургии сплавов и/или интерметаллидов на основе системы Ti-Al, при вариации содержания Ti и Al с добавками редких и редкоземельных металлов.

**Экспериментальная часть.** Для получения интерметаллидных сплавов применили 3 последовательных стадий: получение гидридов титана и РЗМ (Sc, Y, Dy, Ta, Ho), прессование порошков полученных гидридов и алюминия с последующим отжигом при заданной температуре. Соотношение компонентов соответствовало стехиометрическим составам фазовой диаграммы системы с учетом эквивалентности Ti:Al=1:1 для получения интерметаллидных фаз  $\gamma$ -TiAl. Система Ti-Al [13] принята за основу сплава с добавками РЗМ не более 2 ат.%.

Навеску металлического порошка титана (ПТЭМ-1) и алюминия (АСД-4) дисперсностью 100-150 мкм, а также металлические РЗМ засыпали в кварцевую лодочку и отжигали в проточной печи в непрерывном потоке водорода в температурно-программированном режиме. Режим нагрева проводили исходя из справочных данных по температурам образования и разложения гидридов. Ниже приведены предполагаемые реакции гидрирования металлов и дегидрирования систем при получении сплавов:

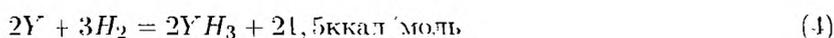
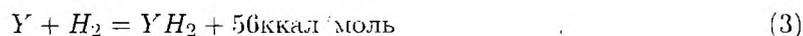
1. Непосредственное гидрирование титана:



2. Реакция образования гидридов скандия:



3. При реакции иттрия и водорода образуются гидриды различного состава:



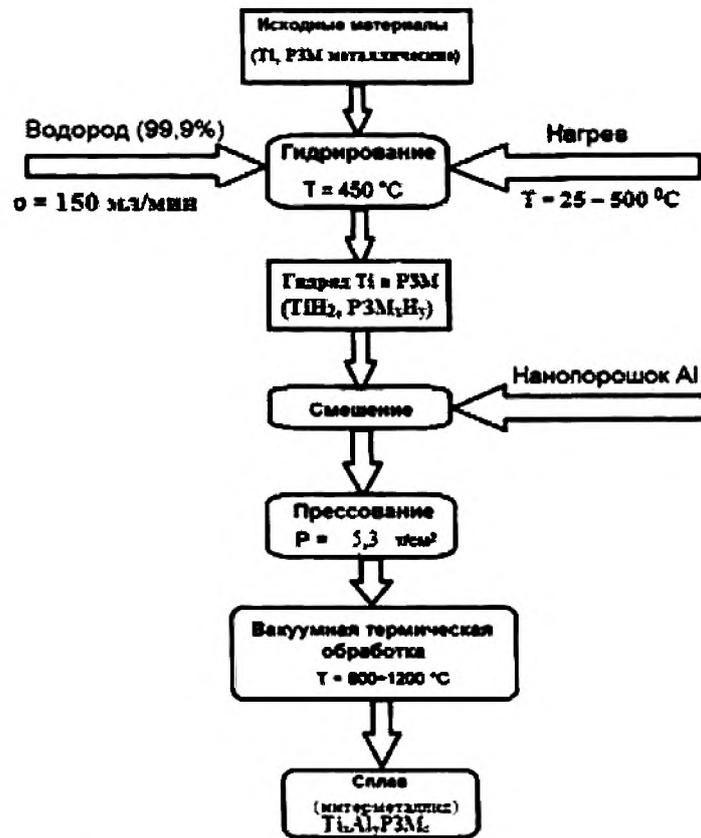
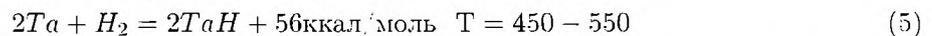


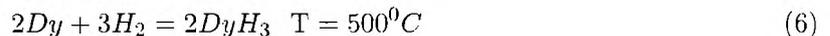
Рисунок 1 – Принципиальная схема методики получения интерметаллидных сплавов

4. Тантал слабо реагирует с водородом ниже 350 °С:



Выше этой температуры скорость реакции растет примерно до 450 °С. При этой температуре водород поглощается с максимальной скоростью и, кроме того, образуется химическое соединение — низкотемпературный гидрид тантала (TaH).

5. Реакция водорода и диспрозия при нагревании:

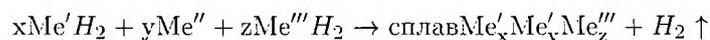


6. Реакция образования гидроксида гольмия:

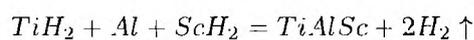


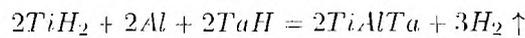
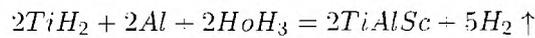
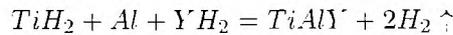
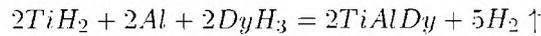
Полученные гидриды смешивали с нанодисперсным порошком алюминия (средний размер частиц  $(115 \pm 10)$  нм, значение удельной поверхности  $(19 \pm 3) \text{ м}^2/\text{г}$ , содержание алюминия  $-(80 \pm 0,6)$  и прессовали при нагрузке  $5,3 \text{ т/см}^3$ . На выходе заготовки формировали в форме таблетки с насыпной плотностью не более  $3 \text{ г/см}^3$  и отжигали в вакуумной установке в программированном температурном режиме от 830 до 1150 °С.

Предполагаемые процессы дегидрирования можно представить в виде следующей схемы:



$$x + y + z = 1$$





Измерение микротвердости образцов сплавов проводилось по методу Виккерса на приборе Микротвердомер ПМТ-3М. Суть методики заключается в том, что в исследуемый образец вдавливается индентор в форме четырехгранной алмазной пирамиды Виккерса. По размеру отпечатка оставленного индентором определяется значение микротвердости. При использовании пирамиды Виккерса микротвердость  $H_V$  вычисляется по формуле, связывающей  $H_v$  с отношением приложенной к индентору нагрузки  $P$  к квадрату диагонали  $d$  полученного отпечатка [14]:

$$H = \frac{1,854 \cdot P}{d^2}$$

На каждый образец нанесли по 30 отпечатков и рассчитали средние арифметические значения полученных значений микротвердости.

Значения микротвердости сплавов различного состава при нагрузке 200 г показаны в таблице 1. В табл. 1 для сравнения изменения значений микротвердости после микролегирования РЗМ представлена также средняя величина микротвердости сплава системы Ti:Al=1:1.

Системы	АТ	АТГ	АТД	АТС	АТИ	АТТ
$H_V$ , ГПа	1.234	1.47	1,607	1,656	1,749	2.144

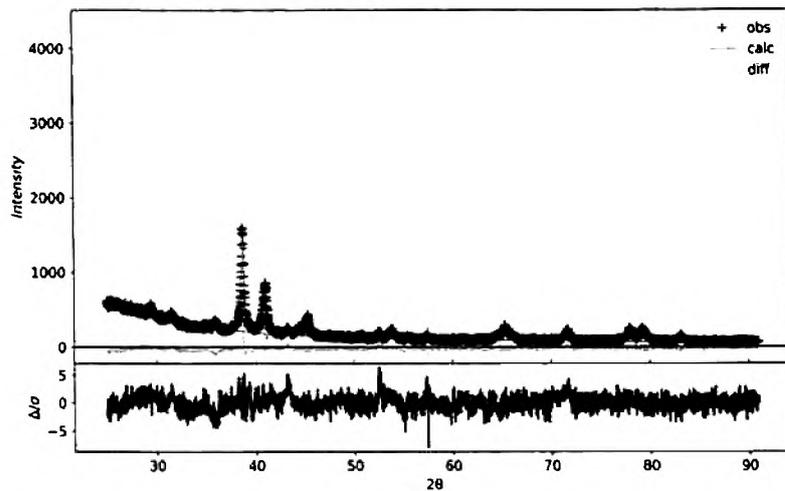
Таблица 1 – Микротвердость титановых сплавов в зависимости от нагрузки

Согласно результатам микротвердости, установлено, что сплавы АТС, АТИ и АТТ имеют наибольшую твердость  $H_v = 1,656$  ГПа,  $H_v = 1,749$  ГПа и  $H_v = 2,15$  ГПа соответственно. Вероятнее всего, увеличение значения твердости этих сплавов связано с образованием интерметаллидных фаз, так как уменьшается средний размер зерна и происходит упрочнение сплава. Также из литературных данных известно, что Sc, Y, Ta является основными и перспективными РЗМ и обеспечивают увеличение механических свойств на 10-50% [12,15,16].

Рентгеноструктурные исследования образцов проводились на ДРОН4 – 07, который был модифицирован к цифровой обработке сигнала. Съёмки производились на медном излучении (К $\alpha$ ) по схеме Брегга - Бретано с шагом 0.020, временем экспозиции в точке 1 сек и в угловом диапазоне 24 – 92 $^{\circ}$ . Напряжение на рентгеновской трубке составляло 30 кВ, ток пучка 25 мА. Идентификацию дифракционных максимумов проводили с помощью кристаллографической базы данных COD [17] в программном комплексе GSAS.

На рис. 2 приведены результаты наблюдаемой и расчётной интенсивностей исходного интерметаллидного сплава АТС, а также их разность, величина которой ( $R_{вр}$  9.856) свидетельствует об удовлетворительной сходимости. Вклады отдельных фаз в расчётную интенсивность оценивались методом Ритвельда.

Результаты рентгенофазового анализа показали, что основными термодинамически устойчивыми фазами металлической части были интерметаллические соединения TiAl $_3$ , TiAl и на рентгенограмме их пики чётко фиксируются. Сплавы с интерметаллическими фазами Ti $_3$ Al и TiAl характеризуются прочностью и жаростойкостью при умеренных до (900 - 950 $^{\circ}$ С) температурах [10]. Весовая доля фаз TiAl и Ti $_3$ Al составляет наибольшую часть состава полученного композиционного материала, 41,5% и 26,2% соответственно. Также, в таблице 2 приведены кристаллографические данные всех фаз, составляющих систему АТГ.



Риснок 2 – Дифрактограмма полученного металлического композиционного материала АТС

Состав	Пространственная группа	Сингония	Размер ОКР, нм	Весовая доля, %	Параметры репешетки, нм		
					a	b	c
TiAl	$P4/mmm$	тетрагональная	$33 \pm 5$	26,2	2.8295	2.8295	4.0696
Ti <sub>3</sub> Al	$R\bar{6}3/mmc$	тетрагональная	$134 \pm 5$	41,5	5.7619	5.7619	4.6497
Ti <sub>1,5</sub> Al <sub>2,5</sub>	$P/mmm$	ромбическая	$65 \pm 5$	10,9	4.1083	4.0005	3.9522
Ti <sub>2</sub> Al <sub>5</sub>	$P4/mmm$	тетрагональная	$430 \pm 5$	4,5	3.8331	3.8331	29.2450
Ti <sub>5</sub> Al <sub>11</sub>	$P/mmm$	ромбическая	$265 \pm 5$	3,7	3.9096	3.9096	17.3119
TiAl <sub>2</sub>	$C/mmm$	ромбическая	$171 \pm 5$	2,7	8.8929	4.1529	4.6380
$\alpha$ -Ti	$R\bar{6}3/mmc$	гексагональная	$31 \pm 5$	2,4	2.9278	2.9278	4.6006
$\beta$ -Ti	$I m\bar{3}m$	кубическая	$38 \pm 5$	1,4	3.3687	3.3687	3.3687
Al	$Fm\bar{3}m$	кубическая	$59 \pm 5$	1,7	3.8818	3.8818	3.8818
Sc	$P4/mmm$	тетрагональная	$69 \pm 5$	1,8	4.7092	4.7092	3.1032

Таблица 2 – Кристаллографические данные фаз в системе АТС

Исходя из результатов РФА, после микролегирования сплавов металлами Sc, Ta и Dy массовая доля фаз Ti<sub>3</sub>Al и TiAl значительно увеличивается (> 52%) и они присутствуют в виде дисперсных слоев. Появление отмеченных фаз связано с термодинамическими характеристиками; формирование данных фаз характеризуется минимумом стандартной энергии Гиббса образования [18].

Таким образом, предложен новый метод получения материалов на основе системы Ti-Al-PЗМ. Результаты рентгеноспектрального анализа позволили доказать получение в  $\gamma$ -TiAl сплаве трехфазной структуры преимущественно с интерметаллидными фазами TiAl, Ti<sub>3</sub>Al и TiAl<sub>2</sub>. Установлено увеличение твердости сплавов и формирование термодинамически стабильных интерметаллидных фаз Ti<sub>3</sub>Al, TiAl, TiAl<sub>2</sub>. Данный факт показывает, что выбранным методом можно получать сложные полуфункциональные металлические композиции, содержащие дисперсные интерметаллидные фазы системы Ti-Al.

### Список литературы

- 1 Эванс Ю.Р. Коррозия и окисление металлов. – М.: Машгиз. 1962. – 856 с.
- 2 Кофстад П.О. Высокотемпературное окисление металлов. – М.: Мир. 1969. – 312 с.
- 3 Томашов Н.Д. Высокотемпературное окисление (газовая коррозия) металлических сплавов // Итоги науки техн. ВИНТИ. Сер. Коррозия и защита от коррозии – 1997. – С. 120.
- 4 Оришич И.В., Порядченко Н.Е., Хмельок Н.Д. Исследование поведения при окислении новых титановых сплавов, легированных кремнием, алюминием и цирконием // Физико-химическая механика материалов. – 2005. № 2. – С. 82-89.

- 5 Поварова К.Б., Антонова А.В., Батных И.О. Высокотемпературное окисление сплавов на основе TiAl. *Металлы*. – 2003. № 5. – С. 61-72.
- 6 Зелеников П.А., Мартыничук Е.Н. *Металлофизика*. – К.: Наук. Думка, 1972. – Вып. 42, 63-67 с.
- 7 Ппатов Д.В., Корпилов З.Н., Лазарев Э.М. *Высокотемпературная коррозия и методы защиты от нее*. – М.: Наука, 1973. – 48 с.
- 8 Dimiduk D.M. Gamma titanium aluminide alloys – an assesment within the competition of aerospace structural materials // *Material Science and Engeneering* – 1999. V. A 263. P. 281-288.
- 9 Appel F., Ohring M., Paul J.D.H., and Loreuz U. In *Proceedings of the 2nd International Symposium «Structural Intermetallics»*, eds.Henker K.J. et al., the Minerals, Metals & Mater.Soc. – 2001. P. 63-72.
- 10 V. Imaev, T. Oleneva, R. Imaev, H.-J. Christ, H.-J. Fecht. *Microstructure and mechanical properties of low and heavy alloyed  $\gamma$ -TiAl+ $\alpha$  2-Ti<sub>3</sub>Al based alloys subjected to different treatments* *Intermetallics* – 2012. V. 26. P. 91.
- 11 Каблов Е.П., Осипенчикова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Труды ВИАМ* – 2013; №2. – С.34.
- 12 Ю.Ю. Ключкова, О.Е. Грушко, Л.Н. Панцова и др. Освоение в промышленном производстве полуфабрикатов из перспективного алюминийлитиевого сплава В-1469 // *Авиационные материалы и технологии*. – 2011. №1, – С. 8-12.
- 13 *Диаграммы состояния двойных систем : справочник : в 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. Т. 1. 992 с.*
- 11 Боярская Ю.С. Деформирование кристаллов при испытаниях на микротвердость. Кншинев: Штиинца, 1972. 235 с.
- 15 Оглодков М.С., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.Н. и др. Влияние термомеханической обработки на свойства и структуру сплава системы Al-Cu-Mg-Li-Zn // *Авиационные материалы и технологии*. – 2010. №1. С. 7-12.
- 16 Рт Хосеп, Ри Э.Х., Химухин С.Н., Калугин М.Е. Влияние температурных режимов плавки и легирования сплавов алюминия на свойства отливок // *Литейное производство* – 2010. №8. С. 7-8.
- 17 <http://www.crystallography.net/cod>
- 18 Курзина И.А. Градиентные поверхностные слои на основе наноразмерных металлических частиц: синтез, структура, свойства: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Барнаул, 2011. 402 с.

А.Ә. Белгібаева<sup>1</sup>, Р.Ш. Еркасов<sup>1</sup>, И.А. Курзина<sup>2</sup>, Н.И. Каракчиева<sup>23</sup>, В.И. Сачков<sup>2</sup>, Ю.А. Абзаев<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

<sup>2</sup> Ұлттық ғылыми Томск мемлекеттік университеті, Томск, Ресей

<sup>3</sup> Сібір ауыл шаруашылығы мен шығысқазақстан ғылыми зерттеу институты - Ресей ғылым академиясының Сібір федеральді агробиотехнология ғылыми орталығының Федеральді мемлекеттік бюджеттік ғылыми мекемесінің филиалы, Томск, Ресей

<sup>4</sup> Томск сәулет-құрылыс мемлекеттік университеті, Томск, Ресей

#### Металдардың гидридтерін қолданып Ti-Al жүйесіндегі беріктігі жоғары құймалардың алынуы

**Аннотация:** Гидридтер синтезі арқылы материалдар алудың әдісі қарастырылды. Микрорақттылық пен рентгенфазалық анализ нәтижесінде құймалардың қаттылығының артуы мен термодинамикалық қалыпты интерметалдық фазаларының түзілуі анықталды. Синтезделген үлгілері КШО өлшемі 100 нм-ге дейін интерметалдық фазалардың қақталған агломераттарын білдіреді. Осылайша, жасақталған әдіс арқылы дисперстік интерметалдық фазаларының бақыланбалы мөлшерімен күрделі полифункциональді металдық композициялар алуға болады.

**Түйін сөздер:** СЖМ; гидридтер; Ti-Al жүйесі; интерметаллдітер; рентгенфазалық анализ

A.A. Belgibaeva<sup>1</sup>, R.Sh. Erkasov<sup>1</sup>, I.A. Kurzina<sup>2</sup>, N.I. Karakchieva<sup>23</sup>, V.I. Sachkov<sup>2</sup>, Yu.A. Abzaev<sup>4</sup>

<sup>1</sup> L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

<sup>2</sup> National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>3</sup> Siberian Research Institute of Agriculture and peat is a branch of the Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences

<sup>4</sup> Tomsky State Architectural and Construction University, Tomsk, Russia

#### Receiving highly strong alloys of Ti-Al system by using metal hydrides

**Abstract:** The method of obtaining materials based on the synthesis of hydrides is considered. From the results of microhardness and X-ray phase analysis, an increase in the hardness of the alloys and the formation of thermodynamically stable intermetallic phases was established. The synthesized samples are sintered agglomerates of intermetallic phases with OCD size up to 100 nm. Thus, the developed method can be used to obtain complex semi-functional metal compositions with controlled content of dispersed intermetallic phases.

**Keywords:** rare-earth metals; hydrides; Ti-Al system; intermetallic compounds; X-ray phase analysis.

## References

- 1 Evans Yu.R. Korrozii i okisleniia metallov [High-temperature oxidation of metals] (Mashgiz, Moscow, 1962).
- 2 Kofstad P.O. Vysokotemperaturnoe okislenie metallov [High-temperature oxidation of metals] (Mir, Moscow, 1969).
- 3 Tomashov N.D. Vysokotemperaturnoe okislenie (gazoaiakorroziia) metallicheskih splavov [High-temperature oxidation (gas corrosion) of metal alloys], Itoginauchno-tekhnicheskogo VINITI. Seria. Korrozii i zashchitotkorrozii – Results of science techn. VINITI. Seria Corrosion and corrosion protection, 120 (1997). [in Russian].
- 1 Orishlich I.V., Porvadchenko N.E., Pimchuk N.D. Issledovanie povedeniia priokisleniimovyhtitanovyh splavov, legirovannyh kremniem, alyuminium I tsirkoniem [Study of the behavior of the oxidation of new titanium alloys alloyed with silicon, aluminum and zirconium]. *Phiziko-khimicheskaya mekhanika materialov – Physico-chemical mechanics of materials*, 2, 82-89 (2005). [in Russian]
- 5 Povarova K.B., Antonova A.V., Baniyly I.O. Vysokotemperaturnoe okislenie splavov na osnove TiAl [High-temperature oxidation of alloys based on TiAl], *Metally [Metals]*, 5, 61-72 (2003). [in Russian]
- 6 Zelenkov I.A., Martynchuk E.N. *Metallofizika [Metal Physics]* (Nauk. Dumka, Kiev, 1972).
- 7 Ignatov D.V., Kornilov Z.I., Lazarev E.M. Vysokotemperaturnoe korrozii i metody zashchitotucei [High temperature corrosion and methods of protection against it] (Nauka, Moscow, 1973).
- 8 Dimiduk D.M. Gamnua titanium aluminide alloys – an assessment within the competition of aerospace structural materials. *Material Science and Engineering*, A 263, 281-288 (1999).
- 9 Appel F., Ohring M., Paul J.D.H., and Lorenz U. In Proceedings of the 2nd International Symposium «Structural Intermetallics», eds. Henker K.J. et al., the Minerals, Metals & Mater. Soc. 63-72 (2001).
- 10 V. Imayev, T. Oleneva, R. Imayev, H.-J. Christ, H.-J. Fecht., Microstructure and mechanical properties of low and heavy alloyed  $\gamma$ -TiAl -  $\alpha$ 2-Ti3Al based alloys subjected to different treatments *Intermetallics*, 26, 91 (2012).
- 11 Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally I redkozemelnye element – materialy sovremennyh I buduchih vysokikh tekhnologii [Rare metals and rare earth elements - materials of modern and future high technologies]. *Trudy VIAM – Proceedings of VIAM*, 2 (2013) [in Russian]
- 12 Klochikova Yu.Yu., Grushko O.E., Lantsova L.P. Osvoenie v promyshlennom proizvodstve polufabrikatov iz perspektivnogo alyuminilitiyevogo splava V-1469 [Mastering in industrial production semi-finished products from promising aluminum-lithium alloy V-1469]. *Aviatsonnye materialy I tekhnologii – Aviation materials and technologies*, 1, 8-12 (2011). [in Russian]
- 13 Lyakishev N.P. Diagramny sostoyaniya dvoynyh sistem [Binary system state diagrams] (Mashinostroenie, Moscow, 1996).
- 14 Boyarskaya Yu.S. Deformirovanie kristallov pri ispytaniyakh na microtverdost [Deformation of crystals when tested for microhardness]. (Shtiintsa, Chisinau, 1972).
- 15 Oglodkov M.S., Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I. Vliyanie termomekhanicheskoi obrabotki na svoystva I struktur u splava sistemy Al-Cu-Mg-Li-Zn [The influence of thermomechanical processing on the properties and structure of the Al – Cu – Mg – Li – Zn system alloy]. *Aviatsonnye materialy I tekhnologii – Aviation materials and technologies*, 1, 7-12 (2010). [in Russian]
- 16 Ri Khynsen, Ri E. Kh., Khymukhin S.N., Kalugin M.E. Vliyanie temperaturnykh rezhimov plavki I legirovaniya na svoystva otlivok [Influence of temperature conditions of melting and alloying of aluminum alloys on the properties of castings]. *Liteinoe proizvodstvo – Foundry*, 8, 7-8 (2010). [in Russian]
- 17 <http://www.crystallography.net> cod (accessed 15 december 2018).
- 18 Kurzina I.A. Gradientnye poverkhnostnye sloi na osnove nanorazmernykh metallicheskih chastits [Gradient surface layers based on nanoscale metal particles: synthesis, structure, properties]. *dis. ... Dr. Phys.-Mat. sciences*. Barnaul, 2011. 402 p.

### Сведения об авторах:

*Belgibayeva A.A.* – PhD докторант химической кафедры, Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, ул. Саунаева, 2, Астана, Казахстан.

*Erkasov P.Sh.* – доктор химических наук, профессор химической кафедры, Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, ул. Саунаева, 2, Астана, Казахстан.

*Kurzina I.A.* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры "Физическая и коллоидная химия", Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, Россия.

*Karakchisva P.Sh.* – кандидат химических наук, Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, Россия, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и горфа – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий Российской академии наук, ул. Гагарина, 3, Томск, Россия.

*Sachkov V.I.* – доктор химических наук, доцент кафедры "Химическая технология", Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, Россия.

*Abzasov Yu.A.* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры "Химическая технология", Томский архитектурно-строительный государственный университет, ул.Соляная, 2, Томск, Россия.

*Belgibayeva A.A.* - PhD of the chemical department, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Saipayev st. 2, Astana, Kazakhstan

*Erkasov P.Sh.* - Doctor of Chemical Sciences, Professor of Chemical Department, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Saipayev st. 2, Astana, Kazakhstan.

*Kurzina I.A.* - Doctor of Physics and Mathematics, Professor of the Department of Physical and Colloid Chemistry, National Research Tomsk State University, Lenin ave. 36, Tomsk, Russia.

*Karakchieva N.I.* - PhD in Chemistry, 2National Research Tomsk State University, Lenin ave. 36, Tomsk, Russia. Siberian Research Institute of Agriculture and peat is a branch of the Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Gagarin str.3. Tomsk, Russia.

*Sachkov V.I.* - Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor of Chemical Technology, National Research Tomsk State University, Lenin ave. 36, Tomsk, Russia.

*Abzayev Yu.A.* - Doctor of Physics and Mathematics, professor of chemical technology, Tomsky State Architectural and Construction University, Solyanaya square 2, Tomsk, Russia.

*Поступила в редакцию 22.02.2019*