

## Материаловедение и технология материалов Materials science and materials technology

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 666.775-798.2

doi: 10.30987/2782-5957-2023-4-11-18

### САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ СИЛИЦИДА ТИТАНА В СИСТЕМЕ «КРЕМНИЙ-ГАЛОГЕНИД ТИТАНА-АЗИД НАТРИЯ»

Людмила Александровна Кондратьева✉

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия  
schiglou@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3940-9511>

#### Аннотация

Целью исследования являлось изучение возможности получения силицида титана по азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС-Аз) в системе «кремний-галогенид титана-азид натрия».

Задача, решению которой посвящена статья заключается в поиске оптимального состава шихты, при горении которой возможно получение силицида титана методом СВС-Аз.

Методы исследования: изучение процесса синтеза силицида титана в виде порошка осуществлялось в режиме твердопламенного горения в лабораторном реакторе СВС-Аз. Синтезированные порошковые продукты подвергались исследованиям, позволяющим установить фазовый состав и структуру. Исследования проводились с использованием дифрактометра и сканирующего электронного микроскопа.

Новизна работы заключалась в синтезировании силицида титана не только новым способом в

режиме высокотемпературного горения гетерогенной системы «кремний-галогенид титана-азид натрия», но и в получении порошкового продукта с близкими значениями к наноразмерному диапазону частиц.

Результаты исследования процесса получения силицида титана методом СВС-Аз из гетерогенной системы «кремний-галогенид титана-азид натрия» показали, что целевой продукт представляет собой тонкодисперсную смесь из частиц равноосной формы разного фазового состава:  $Ti_5Si_3$ ,  $TiSi_2$ ,  $TiN$ ,  $Si$ ,  $Ti$ . Средний размер частиц продукта равен 150-200 нм.

Выводы: было установлено, что силицид титана составов  $Ti_5Si_3$  и  $TiSi_2$  возможно получить в режиме горения методом СВС-Аз из системы «кремний-галогенид титана  $Na_2TiF_6$ -азид натрия».

**Ключевые слова:** силицид титана, галогенид, азид натрия, синтез.

Ссылка для цитирования:

Кондратьева Л.А. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез силицида титана в системе «кремний-галогенид титана-азид натрия» / Л.А. Кондратьева // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 04. – С. 11-18. doi: 10.30987/2782-5957-2023-4-11-18.

Original article

Open Access Article

### SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS OF TITANIUM SILICIDE IN SILICON-TITANIUM HALIDE-SODIUM AZIDE SYSTEM

Lyudmila Aleksandrovna Kondratieva✉

Samara State Technical University, Samara, Russia  
schiglou@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3940-9511>

#### Abstract

The objective is to study the possibility of obtaining titanium silicide using the azide technology of

self-propagating high-temperature synthesis (SHS-Az) in silicon-titanium halide-sodium azide system.

The task to which the paper is devoted is to find the optimal composition of the charge, which combustion gives the opportunity to obtain titanium halide by SHS-Az method.

Research methods: the study of the titanium silicide synthesis in powder is carried out in the mode of solid-flame combustion in SHS-Az laboratory reactor. The synthesized powders are subjected to studies allowing to define the phase composition and structure. The studies are carried out using a diffractometer and a scanning electron microscope.

The novelty of the work is in synthesizing titanium silicide not only by a new method in the mode of high-temperature combustion of the heterogeneous silicon-titanium halide-sodium azide system, but also

*Reference for citing:*

*Kondratieva LA. Self-propagating high-temperature synthesis of titanium silicide in silicon-titanium halide-sodium azide system. Transport Engineering. 2023; 4:11-18. doi: 10.30987/2782-5957-2023-4-11-18.*

## Введение

Силициды переходных металлов системы титан-кремний в последние годы привлекают к себе повышенное внимание в связи с их специфическими физическими и химическими свойствами. Силицид титана – это химическое соединение титана с кремнием, с массовой долей кремния 53,98 %. Силицид титана представляет собой кристаллики, имеющие форму плоских тетрагональных пирамидок и по цвету напоминающие железо (серого цвета с металлическим отблеском). Силициды титана характеризуются высокой жаропрочностью и, в отличие от других силицидов, высокой пластичностью при нормальных температурах. В фазовой диаграмме системы Ti–Si, присутствуют пять силицидов титана:  $Ti_3Si$ ,  $Ti_5Si_3$ ,  $Ti_5Si_4$ ,  $TiSi$ ,  $TiSi_2$ . Из них практический интерес представляют два силицида  $Ti_5Si_3$  и  $TiSi_2$ .  $Ti_5Si_3$  имеет самую высокую температуру плавления (2130 °C) по сравнению с другими силицидами титана, обладает низкой плотностью, отличным сопротивлением ползучести, хорошей прочностью при повышенных температурах, высокой стойкостью к окислению и является наиболее стабильным с теплотой образования - 579 кДж/моль [1].  $TiSi_2$  также обладает хорошей стойкостью к окислению в кислородной среде при высоких температурах.

Силицид титана используется в производстве интегральных схем в качестве контактов между полупроводниковым

by obtaining a powder with close values to the range of nanoparticles.

Study results of obtaining titanium silicide by SHS-Az method from the heterogeneous silicon-titanium halide-sodium azide system show that the target product is a finely dispersed mixture of particles of equal shape but of different phase composition:  $Ti_5Si_3$ ,  $TiSi_2$ ,  $TiN$ ,  $Si$ ,  $Ti$ . The average particle size is equal to 150-200 nm.

Conclusions: it is found that  $Ti_5Si_3$  and  $TiSi_2$  titanium silicides can be obtained in the combustion mode by SHS-Az method from silicon-titanium halide-sodium azide system.

**Keywords:** titanium silicide, halide, sodium azide, synthesis.

устройством и структурой, поддерживающей межсоединения.

Известны способы получения силицидов титана методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [2-4]. Для получения силицидов титана  $Ti_xSi_y$  исходные порошки Ti с чистотой 99,0 % и Si с чистотой 99,5 % в определенном соотношении смешивались в шаровой мельнице. После этого полученную смесь прессовали, придавая ей форму цилиндрической таблетки. Затем таблетку помещали в реактор, заполняли его аргоном и поджигали таблетку в верхней ее части с помощью раскаленной металлической спирали, по которой был пущен электрический ток. После завершения процесса синтеза таблетки охлаждали в реакторе в атмосфере аргона. Отрицательными свойствами данной технологии является использование дорогостоящих мелкодисперсных порошков титана и кремния высокой чистоты и очень тщательное перемешивание смеси исходных порошков [5].

В настоящее время основным направлением в материаловедении и технике является разработка материалов, обладающих улучшенными свойствами за счет использования энергоэффективных и экономичных технологий, которые также являются экологически чистыми. Такие материалы могут быть получены в режиме твердопламенного горения, так же имеющего название самораспространяющийся

высокотемпературный синтез (сокращенно СВС) [6]. Отличительной особенностью СВС является использование теплоты экзотермических реакций между реагентами в системах твердое-твердое и твердое-газ, повышения температуры таких систем до высоких значений и поддержание температуры до полного превращения реагентов в продукты синтеза в течении короткого времени [7, 8].

Одной из разновидностей метода СВС является способ получения продуктов в режиме горения с применением твердых азотирующих реагентов - азидов и дополнительных источников азотируемого элемента - галоидных солей. Такой способ получил название азидная технология са-

### Материалы и методы

Изучение возможности синтеза силицида титана проводилось в реакционных шихтах, представляющих собой смесь из трех компонентов: соль  $\text{Na}_2\text{TiF}_6$  с содержанием основного вещества 98,0 масс. %, порошок кремния с содержанием основного вещества 99,1 масс. % и порошок  $\text{NaN}_3$  с содержанием основного вещества 98,7 масс. %.

Исходные компоненты реакционной шихты брались, согласно уравнению химических реакций в стехиометрическом соотношении, сыпались в фарфоровую ступку и для формирования равномерного распределения компонентов в приготавливаемой шихте тщательно перемешивались. Шихта помещалась в стаканчик из кальки диаметром 30 мм, формируя тем самым экспериментальный образец с относительной плотностью 0,34. Экспериментальный образец размещали на предметной полочке внутри реактора СВС-Аз (объемом 4,5 литра). В реактор закачивался азот под давлением 4 МПа. В экспериментальном образце с помощью вольфрамой спирали инициировали реакцию горения [12]. В процессе горения образца с помощью вольфрам-рениевых термопар ВР5/20 измеряли значения скорости фронта горения и наибольшее значение температуры химической реакции взаимодействия исходных компонентов [13]. После прохождения фронта горения по экспериментальному

морастространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС-Аз). Азидная технология СВС является методом получения продуктов при невысоких температурах горения и образования большого количества газообразных продуктов, которые предотвращают объединение первоначальных частиц продуктов синтеза в агломераты, тем самым способствуя получению наноразмерного порошка [9-11].

Таким образом, целью работы являлось исследование возможности получения силицида титана в режиме горения по азидной технологии СВС из шихты, состоящей из порошков титана, галоидной соли  $\text{Na}_2\text{TiF}_6$  и азиды натрия.

образцу, для его постепенного охлаждения в среде азота, производилась его выдержка внутри реактора в течении 15-20 минут. Образец из реактора вынимался и подвергался механическому измельчению до порошкообразного состояния. После этого проводилась операция избавления продукта синтеза от фторида натрия, путем погружения порошкового продукта в емкость с водой, перемешивании и фильтрации на вакуумной воронке с целью лучшего удаления воды с частиц продукта. Далее продукт высушивался на открытом воздухе и отдавался на исследование фазового состава и структуры [14].

Рентгенофазовый анализ синтезируемых продуктов проводился на дифрактометре ARL X'trA-138, а с помощью растрового электронного микроскопа ARL X'trA-138 была исследована морфология и размер частиц конечного продукта.

**Результаты.** Результаты исследований по синтезу гетерогенного продукта из смеси « $\text{Si-Na}_2\text{TiF}_6\text{-NaN}_3$ » представлены в таблице. Гетерогенные продукты, получившиеся в результате химических реакций взаимодействия компонентов реакционной шихты, подвергались исследованиям на дифрактометре ARL X'trA-138 с получением рентгенограмм (рис. 1) и на растровом электронном микроскопе JSM-6390A с получением результатов в виде микрофотографий структуры (рис. 2).

Результаты исследований по синтезу гетерогенного продукта  
из смеси «Si-Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>-NaN<sub>3</sub>»

Table

*Study results on the synthesis of a heterogeneous product  
from Si-Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>-NaN<sub>3</sub> mixture*

№	Исходная смесь	Температура горения, T, °C	Скорость горения, U, см/с	Кислотно-щелочной баланс, pH	Фазовый состав продукта
1	3Si-Na <sub>2</sub> TiF <sub>6</sub> -12NaN <sub>3</sub>	900	0,8	9	TiN - 42 %; α-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> - 24 %; β-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> - 17 %; Si - 17 %
2	9Si-Na <sub>2</sub> TiF <sub>6</sub> -4NaN <sub>3</sub>	1000	1,0	9	TiN - 24 %; α-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> - 14 %; β-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> - 56 %; Si - 6 %
3	3Si-3Na <sub>2</sub> TiF <sub>6</sub> -12NaN <sub>3</sub>	1000	1,0	9	TiN - 45 %; Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> - 8 %; TiSi <sub>2</sub> - 21 %; Si - 8 %; Ti - 18 %

### Обсуждение

Результаты экспериментов, проведенные в лабораторном реакторе СВС-Аз, по синтезу силицида титана показали зависимость температуры и скорости горения от изменения количества исходных компонентов в шихте. Было установлено, что увеличение количества кремния (от 3 до 9 моль) или галогенида (гексафтортитаната натрия) (от 1 до 3 моль) приводит к увеличению значений температуры горения шихт от 900 до 1000 °C и увеличению значений скорости реакции от 0,80 до 1,00 см/с. Значение кислотно-щелочного баланса воды, при выполнении операции промывки гетерогенного твердофазного порошкового продукта, равно 9 и не меняется с изменением количества того или иного компонента в исходной шихте [15].

Проведенный рентгенофазовый анализ целевого гетерогенного продукта, полученного при горении смеси «3Si-Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>-4NaN<sub>3</sub>» позволил установить фазовый состав синтезированного продукта: 42 % TiN имеющего кубическую решетку, 24 % α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> имеющего тригональную решетку, 17 % β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> имеющего гексагональную решетку и 17% Si имеющего кубическую решетку (таблица, рис. 1а) [14].

Повышение в смеси «Si-Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>-NaN<sub>3</sub>» содержания кремния Si (от 3 до 9

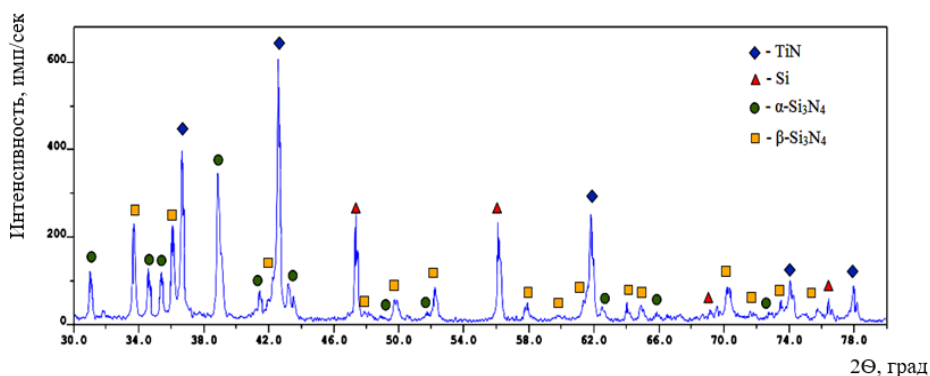
моль) приводило к увеличению в целевом продукте количества фазы β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (от 17 до 56 %) и снижению количества фаз TiN (от 42 до 24 %), α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (от 24 до 14 %) и Si (от 17 до 6 %) (таблица, рис. 1б) [15].

Повышение в смеси «Si-Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>-NaN<sub>3</sub>» содержания гексафтортитаната натрия Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> (от 1 до 3 моль) приводило к снижению в целевом продукте количества фазы Si (с 17 до 8 %), увеличению количества фазы TiN (от 42 до 45 %) и получению двух фаз силицида титана: гексагонального Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> в количестве 8 % и орторомбического TiSi<sub>2</sub> в количестве 21 % (таблица 1, рис. 1в). Фазы нитрида кремния α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и в продукте обнаружены не были, но появилась фаза гексагонального титана Ti в количестве 18 % [15].

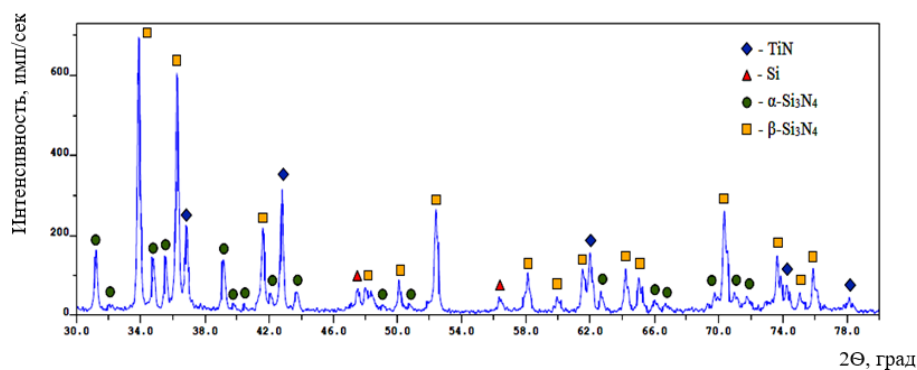
Результаты исследований на растровом электронном микроскопе структуры исследуемого образца позволили установить морфологию и размеры частиц гетерогенного порошкового продукта синтеза. Известно [16], что частицы α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> могут иметь равноосную, удлиненную форму или быть в виде волокон, а продукт, состоящий из β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> представляет собой порошок с частицами столбчатой формы. На основании этого можно утверждать, что частицы синтезированного из системы

« $3\text{Si}+\text{Na}_2\text{TiF}_6+4\text{NaN}_3$ » продукта имели столбчатую (игольчатую), волокнистую и равноосную форму (рис. 2а и 2б). Средний размер столбчатых частиц в диаметре составлял 400-500 нм, средний размер волокнистых и равноосных частиц продукта - 80-130 нм. Частицы синтезированного из системы « $9\text{Si}+\text{Na}_2\text{TiF}_6+4\text{NaN}_3$ » продукта также имели разнообразную форму: столбчатые, волокнистые и равноосные (рис. 2в и 2г). Средний размер столбчатых

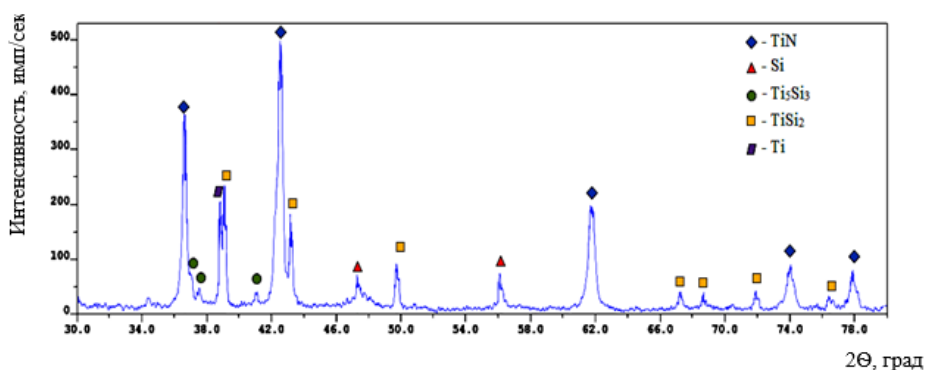
и нитевидных кристаллов в диаметре составлял 200-300 нм, средний размер равноосных элементов продукта - 130-160 нм. Форма и средний размер частиц, синтезированного из системы « $3\text{Si}+3\text{Na}_2\text{TiF}_6+12\text{NaN}_3$ » продукта, показаны на рис. 2д и 2е и представляют собой равноосные, близкие к сферической форме частицы среднего размера - 150-200 нм [17, 18].



а)



б)



в)

Рис. 1. Фазовый состав гетерогенного продукта синтеза, полученный из систем: а - « $3\text{Si}+\text{Na}_2\text{TiF}_6+4\text{NaN}_3$ »; б - « $9\text{Si}+\text{Na}_2\text{TiF}_6+4\text{NaN}_3$ »; в - « $3\text{Si}+3\text{Na}_2\text{TiF}_6+12\text{NaN}_3$ »  
 Fig. 1. Phase composition of a heterogeneous synthesis product obtained from systems: а - « $3\text{Si}+\text{Na}_2\text{TiF}_6+4\text{NaN}_3$ »; б - « $9\text{Si}+\text{Na}_2\text{TiF}_6+4\text{NaN}_3$ »; с - « $3\text{Si}+3\text{Na}_2\text{TiF}_6+12\text{NaN}_3$ »

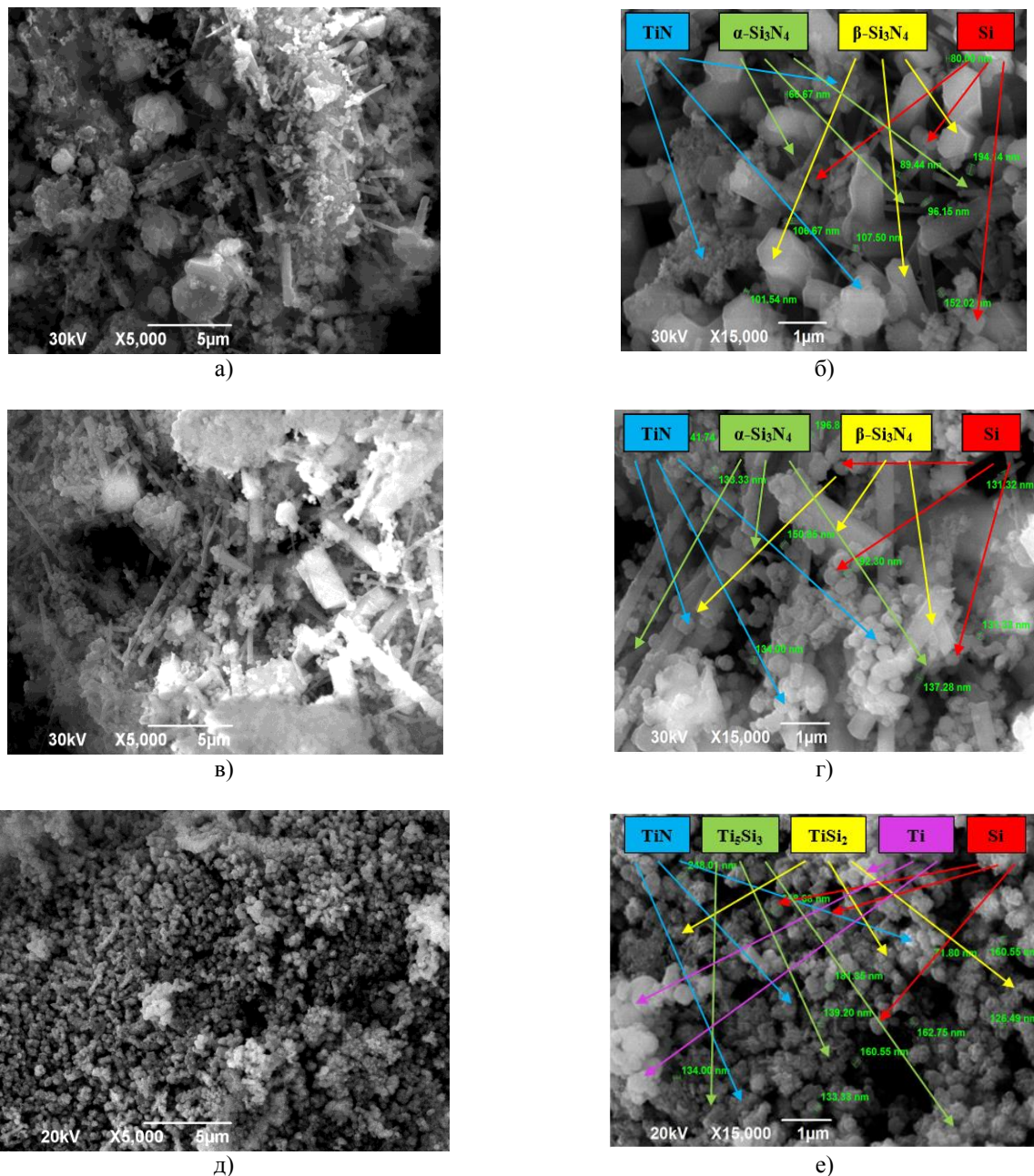


Рис. 2. Структура гетерогенного продукта синтеза, полученного из систем:  
 а и б -  $\langle 3Si + Na_2TiF_6 + 4NaN_3 \rangle$ ; в и г -  $\langle 9Si + Na_2TiF_6 + 4NaN_3 \rangle$ ; д и е -  $\langle 3Si + 3Na_2TiF_6 + 12NaN_3 \rangle$   
 Fig. 2. Structure of a heterogeneous synthesis product obtained from systems:  
 a) and b)  $\langle 3Si + Na_2TiF_6 + 4NaN_3 \rangle$ ; c) and d)  $\langle 9Si + Na_2TiF_6 + 4NaN_3 \rangle$ ; e) and f)  $\langle 3Si + 3Na_2TiF_6 + 12NaN_3 \rangle$

### Заключение/Выводы

Таким образом, на основании проведенных исследований, заключающихся в синтезе методом СВС-Аз шихты, состоящей из кремния, азида натрия и гексафторсиликата натрия, и последующего рентгенофазового анализа синтезируемых продуктов было установлено, что получить силицид титана методом СВС-Аз удалось только из системы  $\langle 3Si + 3Na_2TiF_6 + 12NaN_3 \rangle$  с повышен-

ным содержанием гексафтортитаната натрия. При горении данной системы формировался гетерогенный продукт, состоящий из силицидов титана состава  $Ti_5Si_3$  (8%),  $TiSi_2$  (21%) и еще трех компонентов:  $TiN$  (45%),  $Si$  (8%),  $Ti$  (18%). Продукт синтеза представлял собой тонкодисперсный (субмикроструктурный) порошок с округлой и равноосной формой частиц.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yeh C.L., Wang H.J., Chen W.H. A comparative study on combustion synthesis of Ti–Si compounds. *Journal of Alloys and Compounds*. 450 (2008). PP. 200–207.
2. Yeh C.L., Chen W.H., Hsu C.C. Formation of titanium silicides  $Ti_5Si_3$  and  $TiSi_2$  by self-propagating combustion synthesis. *Journal of Alloys and Compounds*. 2007. 432 (2007). PP. 90–95.
3. Чумакова Ю.А., Князева А.Г., Прибыткова Г.А. Влияние избытка титана в реакционной смеси Ti–Si на синтез композита в волне горения. *Теоретические основы химической технологии*. 2021. Т. 55. №3. С. 375–389.
4. Прибытков Г.А., Криницын М.Г., Коржова В.В. Синтез и структура СВС композитов  $Ti_5Si_3+Ti$  связка. *Химическая физика и мезоскопия*. 2002. Т. 22. №3. С.269–280.
5. Патент № 2629121 Российская Федерация, МПК C23C 16/42 (2006.01), C23C 16/44 (2006.01). Способ получения силицидов титана : №2016129333 : заявл. 18.07.2016 : опубл. 24.08.17 / Кустов А.Д., Парфенов О.Г.; заявитель ФИЦ КНЦ СО РАН. - 6 с.
6. Левашов Е.А., Рогачев А.С., Курбаткина В.В., Максимов Ю.М., Юхвид В.И. Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза: учебное пособие. - М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. 377 с. ISBN: 978-5-87623-463-6.
7. Мержанов А.Г. Процессы горения и синтез материалов. – Черногловка: ИСМАН, 1998. 512 с. ISBN 5-900829-01-4.
8. Мержанов А.Г., Мукасян А.С. Твердопламенное горение. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007. 336 с. ISBN 978-5-94588-053-5.
9. Амосов А.П., Бичуров Г.В. Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридов: монография. М.: Машиностроение-1, 2007. 526 с. ISBN 978-5-94275-344-3.
10. Бичуров Г.В., Шиганова Л.А. (Кондратьева Л.А.), Титова Ю.В. Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридных композиций: монография. - М.: Машиностроение, 2012. 519 с. ISBN 978-5-94275-658-1.
11. Кондратьева Л. А. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез порошков нитридных композиций  $Si_3N_4-TiN$ ,  $Si_3N_4-AlN$ ,  $Si_3N_4-BN$ ,  $AlN-BN$ ,  $AlN-TiN$ ,  $BN-TiN$  с применением азиды натрия и галоидных солей: специальность 01.04.17 «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества»: дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук / Кондратьева Людмила Александровна; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2018. 881 с. Библиогр.: с. 365-401.
12. Кондратьева Л.А. Роль вольфрамовой спирали в азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. *Журнал технических исследований*. 2019. Т. 5. №4. С. 40-42.
13. Кондратьева Л.А. Термопары BP5/20 для самораспространяющегося высокотемпературного синтеза азотсодержащих продуктов. *Журнал естественнонаучных исследований*. 2019. Т. 4. №3. С. 2-6.
14. Кондратьева Л.А. Схема азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза порошков нитридов. *Журнал технических исследований*. 2020. Т.6. №4. С.3-9.
15. Кондратьева Л.А. Композиции «нитриды кремния, титана – силицида титана», синтезированные по азидной технологии СВС. *Современные материалы, техника и технологии*. 2019. №5(26). С. 55-61.
16. Загоржевский В.В. Разработка СВС-технологий порошков нитридов Al, Si, Zr, Ti и композиций на их основе: специальность 1.3.17 «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества»: дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук / Загоржевский Владимир Вячеславович; ИСМАН. Черногловка, 2022. 300 с. Библиогр.: с. 264-289.
17. Кондратьева Л.А. Исследование морфологии и размера порошкового продукта, полученного в режиме горения из кремний-титансодержащих систем. *Современные материалы, техника и технологии*. 2019. №5(26). С. 50-54.
18. Кондратьева Л.А., Керсон И.А., Бичуров Г.В. Композиция  $Si_3N_4-TiN$ , синтезированная в системе «Si-Na $N_3$ -Na $_2$ TiF $_6$ » в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. *Тенденции развития науки и образования: сб. науч. тр. XVI Междунар. науч. конф., 31 июля 2016 г. Часть 2*. Изд. НИЦ «Л-Журнал». Самара, 2016. С. 30-32.

## REFERENCES

1. Yeh CL, Wang HJ, Chen WH. A comparative study on combustion synthesis of Ti–Si compounds. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008;450:200–207.
2. Yeh CL, Chen WH, Hsu CC. Formation of titanium silicides  $Ti_5Si_3$  and  $TiSi_2$  by self-propagating combustion synthesis. *Journal of Alloys and Compounds*. 2007;432:90-95.
3. Chumakova YuA, Knyazev AA, Pribytkova GA. Influence of excess titanium in Ti–Si reaction mixture on the composite synthesis in the combustion wave. *Teoreticheskie Osnovi Khimicheskoy Tekhnologii*. 2021;55(3):375-389.
4. Pribytkov GA, Krinitsyn MG, Korzhova VV. Synthesis and structure of SHS composites in  $Ti_5Si_3+Ti$ . *Chemical Physics and Mesoscopy*. 2002;22(3):269-280.

5. Kustov AD, Parfenov OG. Patent No. 2629121 Russian Federation, МПК C23C 16/42 (2006.01), C23C 16/44 (2006.01). Method for obtaining titanium silicides: No. 2016129333. 2017 Aug 24.
6. Levashov EA, Rogachev AS, Kurbatkina VV, Maksimov YuM, Yukhvid VI. Advanced materials and technologies of self-propagating high-temperature synthesis: textbook. Moscow: MISIS Publishing House; 2011.
7. Merzhanov AG. Combustion processes and synthesis of materials. Chernogolovka: ISMAN; 1998.
8. Merzhanov AG, Mukasyan AS. Solid flame combustion. Moscow: TORUS PRESS; 2007.
9. Amosov AP, Bichurov GV. Azide technology of self-propagating high-temperature synthesis of micro- and nanopowders of nitrides: monograph. Moscow: Mashinostroye-1; 2007.
10. Bichurov GV, Shiganova LA (Kondratieva LA), Titova YuV. Azide technology of self-propagating high-temperature synthesis of micro- and nanopowders of nitride compositions: monograph. Moscow: Mashinostroye; 2012.
11. Kondratieva LA. Self-propagating high-temperature synthesis of powders of  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-AlN}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-BN}$ ,  $\text{AlN-BN}$ ,  $\text{AlN-TiN}$ ,  $\text{BN-TiN}$  nitride compositions with the use of sodium azide and halide salts [dissertation]. [Samara (RF)]; Samara State Technical University; 2018.
12. Kondratieva LA. The role of tungsten helix in azide technology of self-propagating high-temperature synthesis. Journal of Technical Research. 2019;5(4):40-42.
13. Kondratieva LA. BP5/20 thermocouples for self-propagating high-temperature synthesis of nitrogen-containing products. Journal of Natural Science Research. 2019;4(3):2-6.
14. Kondratieva LA. Scheme of azide technology for self-propagating high-temperature synthesis of nitride powders. Journal of Technical Research. 2020;6(4):3-9.
15. Kondratieva LA. Silicon nitrides, titanium – titanium silicide compositions synthesized by SHS azide technology. Modern Materials, Equipment and Technologies. 2019;5(26):55-61.
16. Zakorzhevsky VV. Development of SHS technologies of Al, Si, Zr, Ti nitride powders and compositions based on them [dissertation]. [Chernogolovka (RF)]; ISMAN; 2022.
17. Kondratieva LA. Morphology and size study of the powder product obtained in combustion mode from silicon-titanium-containing systems. Modern Materials, Equipment and Technologies. 2019;5(26):50-54.
18. Kondratieva LA, Kerson IA, Bichurov GV.  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$  composition synthesized in  $\text{Si-NaN}_3\text{-Na}_2\text{TiF}_6$  system in the mode of self-propagating high-temperature synthesis. Collection of Scientific Papers of the XVI International Scientific Conference, 2016 July 31: Trends in the development of science and education; Samara: L-Magazine publishing house: 2016. p. 30-32.

#### Информация об авторе:

**Кондратьева Людмила Александровна** – доцент, доктор технических наук, 8927-200-26-60, профессор.

**Kondratieva Lyudmila Aleksandrovna** – Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor; phone: 8927-200-26-60.

**Статья опубликована в режиме Open Access.  
Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 19.12.2022; одобрена после рецензирования 15.01.2023; принята к публикации 27.03.2023. Рецензент – Химухин С.Н., доктор технических наук, профессор Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, член редколлегии журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 19.12.2022; approved after review on 15.01.2023; accepted for publication on 27.03.2023. The reviewer is Khimukhin S.N., Doctor of Technical Sciences, Professor of Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.**