

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №4 (142). С. 3-10.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №4 (142). P. 3-10.

Научная статья

УДК 666.775-798.2

doi:

## Исследование возможности синтеза композиции «нитрид титана – силицид титана» по азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза

Людмила Александровна Кондратьева, д.т.н.

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

**Аннотация.** Приведены результаты исследования возможности синтеза композиции «нитрид титана – силицид титана» из смеси  $3\text{Na}_2\text{SiF}_6 + \text{Ti} + 12\text{NaN}_3$ . Получен продукт синтеза (порошок) со сферической формой частиц и средним размером – 150...250 нм. Установлен, фазовый состав синтезированного продукта, в котором кроме фаз  $\text{TiN}$ ,  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  и  $\text{TiN}_{0,30}$  в составе присутствуют дополнительные продукты синтеза –  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ ,  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{Si}$ .

**Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез, азид, галоидная соль, композиция, силицид титана, нитрид титана

**Для цитирования:** Кондратьева Л.А. Исследование возможности синтеза композиции «нитрид титана – силицид титана» по азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 4 (142). С. 3–10. doi:

## Investigation of possibility of synthesis of the composition «titanium nitride – titanium silicide» using self-propagating high-temperature synthesis azide technology

Lyudmila A. Kondratieva, D. Eng.

Samara State Technical University, Samara, Russia  
schiglou@yandex.ru

**Abstract.** The results of the study into the possibility of synthesis of the composition "titanium nitride - titanium silicide" from the mixture  $3\text{Na}_2\text{SiF}_6 + \text{Ti} + 12\text{NaN}_3$  are present-ed. The end- product (powder) with a spherical particle shape and an average size of 150...250 nm has been obtained. The phase composition of the synthesized product has been found where besides the phases  $\text{TiN}$ ,  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  and  $\text{TiN}_{0.30}$ , additional synthesis products such as  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ ,  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  and  $\text{Si}$  are included.

**Keywords:** self-propagating high-temperature synthesis, azide, halide, composition, titanium silicide, titanium nitride

**For citation:** Kondratieva L.A. Investigation of possibility of synthesis of the composition «titanium nitride – titanium silicide» using self-propagating high-temperature synthesis azide technology / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023. №4 (142). P. 3–10. doi:

### Введение

Керамические материалы на основе титана широко используются в качестве высоко-

температурных материалов благодаря их превосходным высокотемпературным свойствам, таким как высокая ползучесть и высокая

термостойкость. TiN обладает уникальными свойствами, такими как высокая коррозионная стойкость, высокая износостойкость и высокая температура плавления. Кроме того, сочетание титана с кремнием в таких соединениях как  $TiSi_2$  и  $Ti_5Si_3$ , позволяет получать материал с высокой стойкостью к окислению, высоким сопротивлением ползучести и высокой температурой плавления [1].

Силициды титана получают разными традиционными способами: реактивным спеканием, дуговой плавкой, горячим прессованием. Одним общим недостатком этих методов является увеличение зернистости готового продукта за счет высокой температуры и длительной обработки [2].

Синтез горением или самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) является альтернативой традиционным методам производства передовых материалов, таких как керамика, керамические композиты и интерметаллические соединения, т. к. СВС экономически выгоден и технологически прост в проведении синтеза продукта. СВС основан на способности сильно экзотермических реакций быть самоподдерживающимися и, следовательно, энергетически эффективными. Экзотермическая реакция начинается при температуре воспламенения и генерирует тепло, которое проявляется в максимальной температуре горения. При высокой температуре могут выделяться примеси с низкой темпера-

турой кипения, а следовательно, в результате этого получается более чистый продукт, чем тот, который получается традиционными методами [3, 4].

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 самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС-Аз) [5, 6].

### Материалы и методы

В качестве исходных реагентов для исследования возможности синтеза композиции «нитрид титана – силицид титана» были использованы порошки гексафторсиликата натрия (соль в виде кристаллов белого цвета чистотой 98,0 % масс.), титана (равноосный порошок черного цвета чистотой 99,5 % масс.) и азиды натрия (белые гексагональные кристаллы чистотой 98,7 % масс.).

Для расчета количества каждого исходного реагента в реакционных шихтах были составлены стехиометрические уравнения химических реакций получения по технологии СВС-Аз композитного продукта, состоящего из нитрида кремния и нитрида титана, а также побочного продукта фторида натрия и выделившегося из твердых реагентов азота:

смесь №1:



смесь №2: с увеличением в системе реагента  $Na_2SiF_6$



смесь №3: с увеличением в системе реагента Ti



Исследования по получению композиции «нитрид титана – силицид титана» по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с применением азиды натрия  $NaN_3$  и галоидной соли гексафторсиликата натрия  $Na_2SiF_6$  проводились в лабораторном реакторе СВС-Аз постоянного давления (рис. 1). Технологический процесс синтеза состоял из следующих действий [7, 8]:

1. По отдельности взвесить на весах порции порошков исходных компонентов.

2. Перемешать исходные компоненты, получив реакционную шихту 15. Шихту 15 поместить, просто пересыпав, не уплотняя и не утрамбовывая в насыпном виде в кальковый стакан 14.

3. На предметной полочке 17 лабораторного реактора СВС-Аз разместить кальковый стакан 14 с шихтой 15.

4. В шихту 15 в кальковом стакане 14 сверху погрузить вольфрамовую спираль 11, которая присоединена электроконтактами 5 к системе воспламенения 3.

5. Для получения данных по выходным параметрам горения (температуре и скорости горения) в боковую стенку образца ввести две вольфрам-рениевые термопары 16.

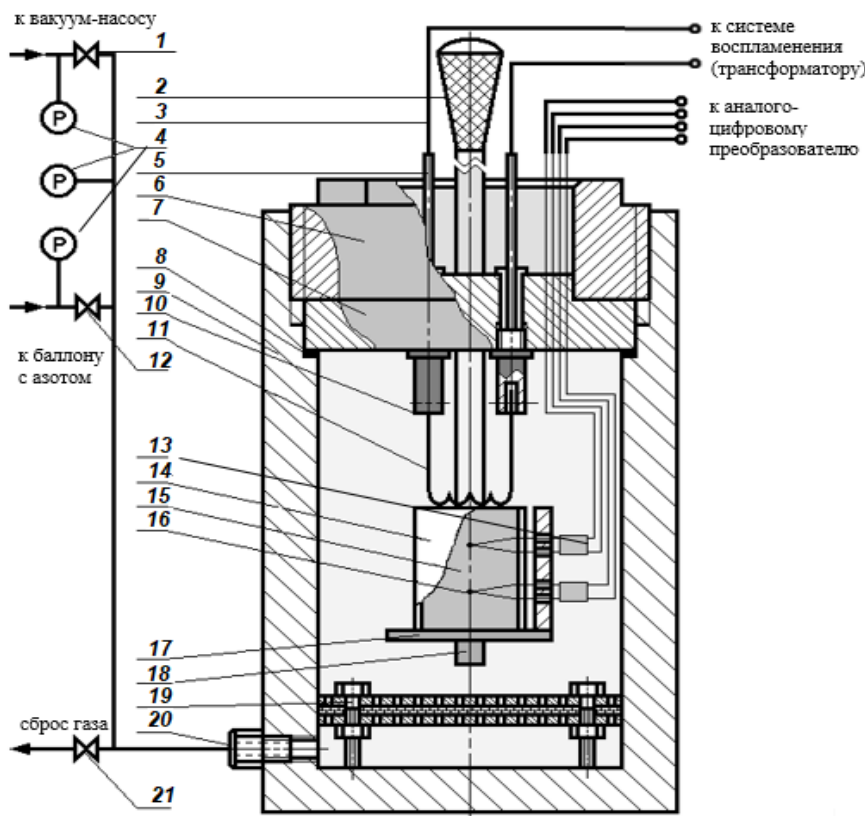


Рис. 1. Схема лабораторного реактора СВС-Аз постоянного давления:

1 – вентиль М-14 (к вакуум-насосу); 2 – ручка предметной полочки, на котором размещен образец; 3 – система воспламенения; 4 – приборы (вакуумметр, манометр); 5 – электроконтакт; 6 – опорная гайка; 7 – грибовый затвор; 8 – уплотнительное резиновое кольцо; 9 – корпус реактора; 10 – держатель спирали; 11 – вольфрамовая спираль; 12 – вентиль М-14 (для ввода газа); 13 – керамическая «соломка» из оксида алюминия; 14 – кальковый стакан; 15 – исходная шихта; 16 – вольфрам-рениевая термопара; 17 – предметная полочка; 18 – направляющая стойка; 19 – фильтр; 20 – штуцер М-24 (для ввода и сброса газа); 21 – вентиль М-24 (для сброса газа)

6. Предметную полочку реактора 17, с расположенным на ней образцом, опустить в лабораторный реактор СВС-Аз.

7. Вакуумировать внутреннее пространство реактора и заполнить азотом до необходимого значения рабочего давления.

8. Подать напряжение постоянного тока для нагрева вольфрамовой спирали и воспламенения реакционной шихты.

9. После твердопламенного сгорания образца, получившийся продукт в течение

15...20 мин выдержать в реакторе без сброса давления.

10. В реакторе сбросить давление, разгерметизировать и извлечь остывший конечный продукт.

11. Продукт синтеза переложить в керамическую ступку и измельчить до сыпучего порошкообразного состояния.

12. Промыть продукт синтеза в воде, чтобы удалить фторид натрия.

13. Продукт синтеза просушить естественным способом на открытом воздухе.

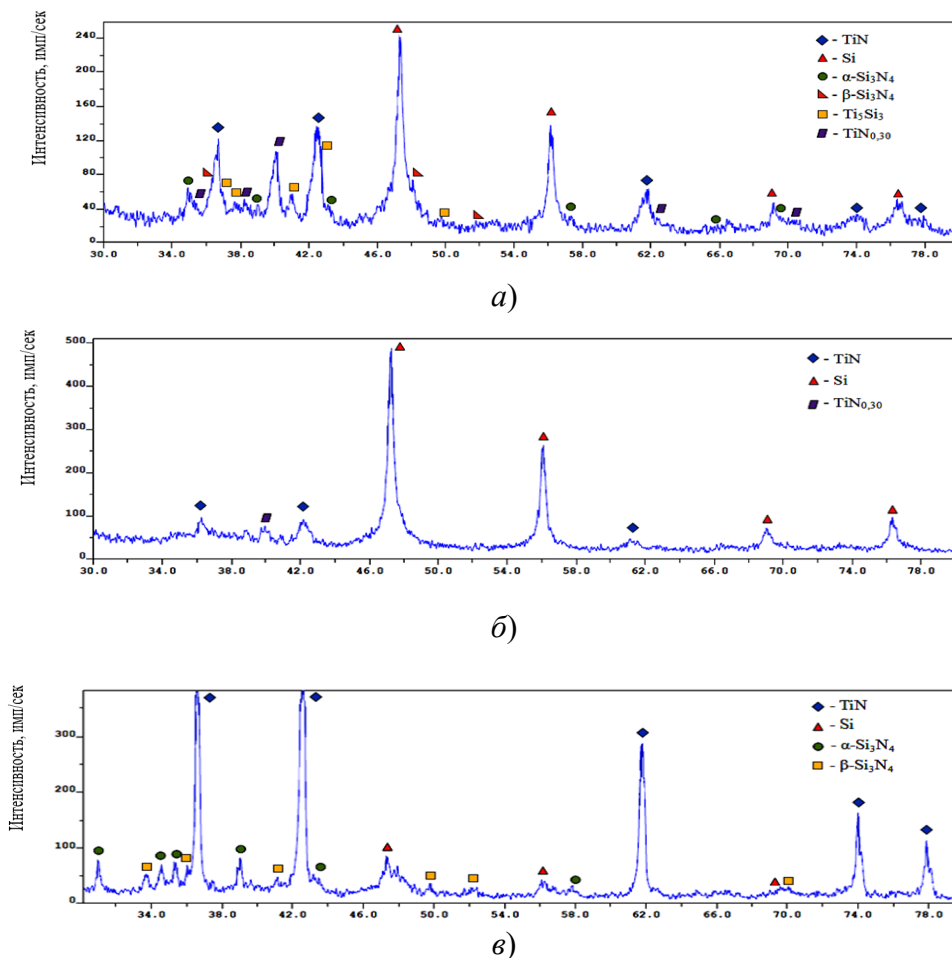
**Результаты**

Выходные параметры горения (температура горения  $T_T$  и скорость горения  $U_T$ ) и результаты исследования фазового состава про-

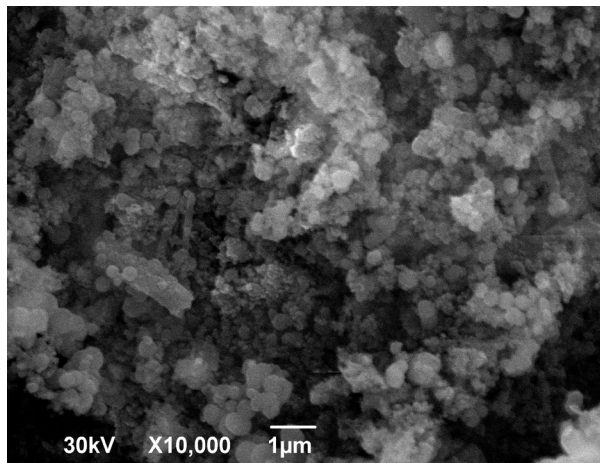
дуктов, образующихся при сжигании смеси  $x\text{Na}_2\text{SiF}_6 + y\text{Ti} + z\text{NaN}_3$  с разным соотношением исходных реагентов ( $x, y, z$ ) по уравнениям реакций (1) – (3) представлены в табл. 1.

**1. Выходные параметры горения ( $T_T$  и  $U_T$ ) смеси  $x\text{Na}_2\text{SiF}_6 + y\text{Ti} + z\text{NaN}_3$  и результаты исследования фазового состава продуктов**

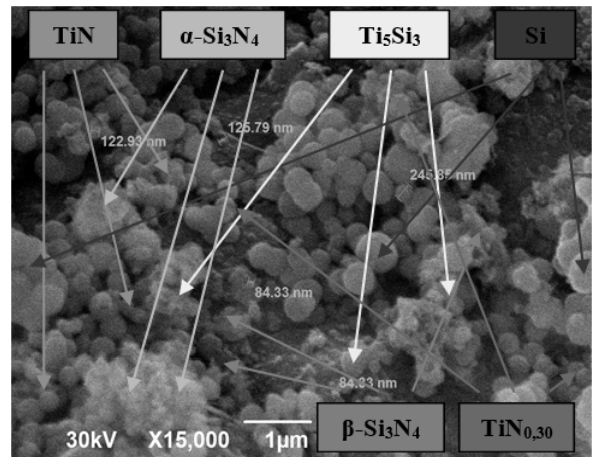
| № смеси | Количество исходных реагентов, моль                                                 | $T_T$ , °C | $U_T$ , см/с | $pH$ | Фазовый состав продукта        | Количество фазы в продукте, % |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------|------|--------------------------------|-------------------------------|
| 1       | $x_{\text{Na}_2\text{SiF}_6} = 3$<br>$y_{\text{Ti}} = 1$<br>$z_{\text{NaN}_3} = 12$ | 1000       | 0,33         | 9    | $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ | 9                             |
|         |                                                                                     |            |              |      | $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  | 10                            |
|         |                                                                                     |            |              |      | TiN                            | 21                            |
|         |                                                                                     |            |              |      | $\text{TiN}_{0,30}$            | 15                            |
|         |                                                                                     |            |              |      | $\text{Ti}_5\text{Si}_3$       | 9                             |
|         |                                                                                     |            |              |      | Si                             | 36                            |
| 2       | $x_{\text{Na}_2\text{SiF}_6} = 9$<br>$y_{\text{Ti}} = 1$<br>$z_{\text{NaN}_3} = 36$ | 1100       | 1,00         | 10   | TiN                            | 15                            |
|         |                                                                                     |            |              |      | $\text{TiN}_{0,30}$            | 13                            |
|         |                                                                                     |            |              |      | Si                             | 72                            |
| 3       | $x_{\text{Na}_2\text{SiF}_6} = 3$<br>$y_{\text{Ti}} = 3$<br>$z_{\text{NaN}_3} = 12$ | 1050       | 0,35         | 10   | $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ | 11                            |
|         |                                                                                     |            |              |      | $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  | 7                             |
|         |                                                                                     |            |              |      | TiN                            | 69                            |
|         |                                                                                     |            |              |      | Si                             | 13                            |
|         |                                                                                     |            |              |      |                                |                               |



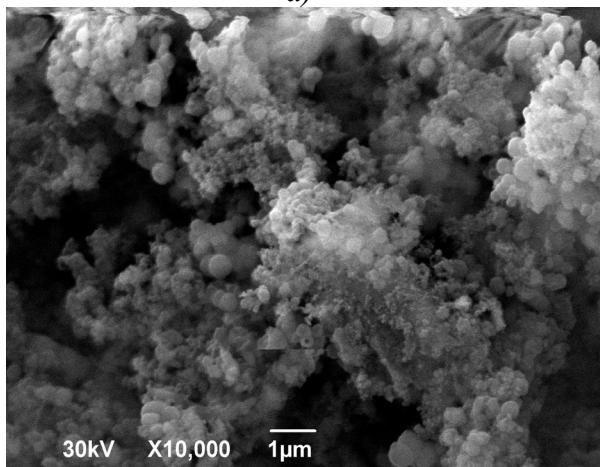
**Рис. 2. Рентгенограммы продуктов, полученные при сжигании:**  
 а – смеси  $3\text{Na}_2\text{SiF}_6 + \text{Ti} + 12\text{NaN}_3$  (№ 1); б – смеси  $9\text{Na}_2\text{SiF}_6 + \text{Ti} + 36\text{NaN}_3$  (№ 2);  
 в – смеси  $3\text{Na}_2\text{SiF}_6 + 3\text{Ti} + 12\text{NaN}_3$  (№ 3)



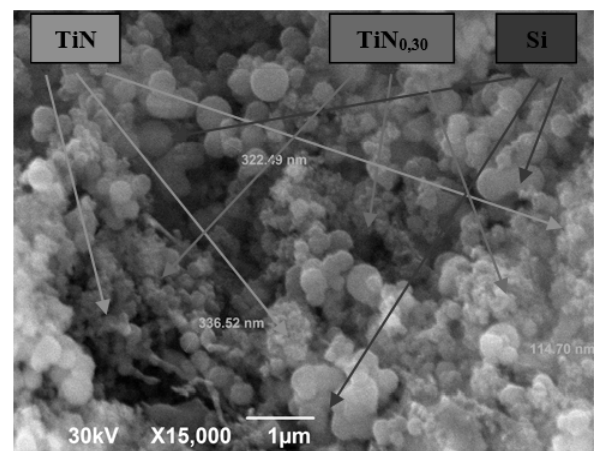
а)



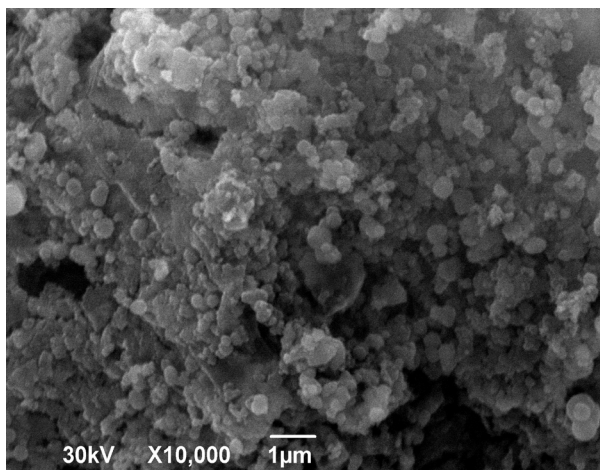
б)



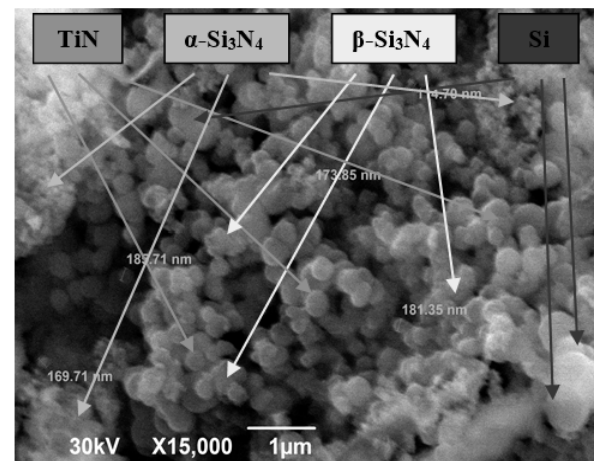
в)



г)



д)



е)

**Рис. 3. Морфология частиц продукта, полученного при сжигании:**

а и б – смеси  $3\text{Na}_2\text{SiF}_6 + \text{Ti} + 12\text{NaN}_3$  (№1); в и г – смеси  $9\text{Na}_2\text{SiF}_6 + \text{Ti} + 36\text{NaN}_3$  (№ 2);  
д и е – смеси  $3\text{Na}_2\text{SiF}_6 + 3\text{Ti} + 12\text{NaN}_3$  (№ 3)

Все синтезированные в режиме горения целевые продукты были подвергнуты рентгенофазовому анализу на дифрактометре ARL X'trA-138 и энергодисперсионному анализу на сканирующем электронном

микроскопе JSM-6390A. Рентгенограммы продуктов, полученные при сжигании реакционных смесей представлены на рис. 2.

Морфология частиц конечного продукта, синтезированного при горении смесей № 1,

№ 2 и № 3, изучалась по микрофотографиям, сделанным на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390A (рис. 3).

### Обсуждение результатов

Результаты исследований по синтезу композиции «нитрид титана – силицид титана» из смеси  $x\text{Na}_2\text{SiF}_6 + y\text{Ti} + z\text{NaN}_3$  (см. табл. 1) в режиме СВС-Аз показали, что если в стехиометрическом уравнении химической реакции (1) увеличивать количество молей галоидной соли  $x$  от  $3\text{Na}_2\text{SiF}_6$  до  $9\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , как в стехиометрическом уравнении химической реакции (2), то температура горения  $T_{\text{Г}}$  и скорость горения  $U_{\text{Г}}$  возрастают от  $T_{\text{Г}} = 1000\text{ }^\circ\text{C}$  и  $U_{\text{Г}} = 0,33\text{ см/с}$  при  $x = 3$  моль до  $T_{\text{Г}} = 1100\text{ }^\circ\text{C}$  и  $1,00\text{ см/с}$  при  $x = 9$  моль.

А если в стехиометрическом уравнении химической реакции (1) увеличивать количество молей титана  $y$  от  $1,0\text{Ti}$  до  $3,0\text{Ti}$ , как в стехиометрическом уравнении химической реакции (3), то температура горения  $T_{\text{Г}}$  и скорость горения  $U_{\text{Г}}$  возрастают от  $T_{\text{Г}} = 1000\text{ }^\circ\text{C}$  и  $U_{\text{Г}} = 0,33\text{ см/с}$  при  $y = 1$  моль до  $T_{\text{Г}} = 1050\text{ }^\circ\text{C}$  и  $0,35\text{ см/с}$  при  $y = 3$  моль.

Значения кислотно-щелочного баланса  $pH$  промывной воды, после промывки конечного продукта синтеза, при изменении количества молей в исходных смесях незначительно меняется с сторону увеличения степени щелочности от 9 (слабо щелочная) до 10 (щелочная).

Конечный продукт, получившийся при сжигании смеси  $3\text{Na}_2\text{SiF}_6 + \text{Ti} + 12\text{NaN}_3$  (№ 1) состоял из нескольких химических соединений (см. табл. 1, рис. 2, а) [9], которые по процентному соотношению можно распределить следующим образом:  $\text{Si} > \text{TiN} > \text{TiN}_{0,30} > \beta\text{-Si}_3\text{N}_4 > \alpha\text{-Si}_3\text{N}_4 = \text{Ti}_5\text{Si}_3$ , где:

- кубический кремний – Si (36 %);
- кубический нитрид титана – TiN (21 %);
- гексагональный нитрид титана –  $\text{TiN}_{0,30}$  (15 %);
- гексагональный нитрид кремния –  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  (10 %);
- тригональный нитрид кремния –  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  (9 %);
- гексагональный силицид титана –  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  (9 %).

В смеси  $9\text{Na}_2\text{SiF}_6 + \text{Ti} + 36\text{NaN}_3$  (№ 2), при повышенном содержании галоидной соли  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  при  $x = 9$  моль, в конечном продукте происходило изменение количества получив-

шихся химических соединений по сравнению с продуктом синтеза, полученным из смеси № 1:

- снижалось ↓ количество нитрида титана TiN от 21 до 15 %;
- снижалось ↓ количество нитрида титана  $\text{TiN}_{0,30}$  от 15 до 13 %;
- повышалось ↑ количество кремния Si от 36 до 72 %.

Фазы нитридов кремния  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  (0 %) и  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  (0 %), а также силицида титана  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  (0 %) в конечном продукте, полученного из смеси № 2 были не обнаружены (см. табл. 1, рис. 2, б) [9].

В смеси  $3\text{Na}_2\text{SiF}_6 + 3\text{Ti} + 12\text{NaN}_3$  (№3), при повышенном содержании Ti при  $y = 3$  моль, в конечном продукте происходило изменение количества получившихся химических соединений по сравнению с продуктом синтеза, полученным из смеси № 1:

- повышалось ↑ количество нитрида титана TiN от 21 до 69 %;
- повышалось ↑ количество нитрида кремния  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  от 9 до 11 %;
- снижалось ↓ количество нитрида кремния  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  от 10 до 7 %.
- снижалось ↓ количество кремния Si от 36 до 13 %.

Фазы нитрида титана  $\text{TiN}_{0,30}$  (0 %) и силицида титана  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  (0 %) в конечном продукте, полученного из смеси №3 были не обнаружены (см. табл. 1, рис. 2, в) [9].

По экспериментальным результатам (см. табл. 1) можно судить, что температуры горения  $1000\dots 1100\text{ }^\circ\text{C}$  были не велики, а значит реакции азотирования с образованием нитрида и силицида проходили не полностью. Об этом можно судить по результатам рентгенофазового анализа (см. рис. 2). Однако, при горении смеси  $3\text{Na}_2\text{SiF}_6 + \text{Ti} + 12\text{NaN}_3$  (№ 1) была синтезирована композиция «нитрид титана – силицид титана» (см. рис. 2, а).

Морфология частиц порошкового продукта, полученного при сжигании реакционной смеси  $3\text{Na}_2\text{SiF}_6 + \text{Ti} + 12\text{NaN}_3$  (№ 1) представлена на микрофотографиях виде порошка сферической формы со средним диаметром –  $150\dots 250\text{ нм}$  (см. рис. 3, а) [10]. Изменение соотношения компонентов в шихте приводило к изменению размера частиц синтезированного порошкового продукта:

– при увеличении количества  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  (до 9 моль) в шихте (смесь  $9\text{Na}_2\text{SiF}_6 + \text{Ti} + 36\text{NaN}_3$  (№ 2)) средний размер частиц равен 300...400 нм (см. рис. 3, б);

– при увеличении количества  $\text{Ti}$  (до 3 моль) в шихте (смесь  $3\text{Na}_2\text{SiF}_6 + 3\text{Ti} + 12\text{NaN}_3$  (№ 3)) средний размер частиц равен 150...200 нм (см. рис. 3, в) [10].

Изменение соотношения компонентов в исходной шихте не влияет на морфологию синтезированного порошкового продукта. Частицы синтезированного продукта из смеси № 2 с увеличением исходного количества  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  и смеси № 3 с увеличением исходного количества  $\text{Ti}$  имеют также сферическую форму (см. рис. 3, б и в).

### Заключение

Было установлено, что горение смесей  $x\text{Na}_2\text{SiF}_6 + y\text{Ti} + z\text{NaN}_3$  (с разным соотношением исходных компонентов) приводит к получению целевого продукта, состоящего из нескольких фаз:  $\text{TiN}$ ,  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{TiN}_{0,30}$ ,  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ ,  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{Si}$ . При этом только в продукте, синтезированном из смеси  $3\text{Na}_2\text{SiF}_6 + \text{Ti} + 12\text{NaN}_3$  (№ 1) был обнаружен силицид титана  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  с содержанием не менее 9 % масс. Конечный продукт являлся порошком сферической формы со средним диаметром частиц 150...250 нм. Порошки такого размера, согласно классификации порошковых продуктов, можно отнести к тонкодисперсным (субмикроструктурным).

Таким образом, синтезировать чистую композицию «нитрид титана – силицид титана» из смеси «гексафторсиликат натрия – титан – азид натрия» в режиме горения по технологии СВС-Аз без дополнительных продуктов реакции (таких как  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ ,  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Si}$ ) не удалось.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Derakhshandeha M.R., Soleymani Naeinib M., Ghasalia E., Jama A., Fazilia A., Alizadeha M., Kazemzadeha A., Ebadzadeha T. Preparation of in-situ formed  $\text{TiN}_{0,3}\text{-Ti}_5\text{Si}_3\text{-TiN}$  composites through reactive spark plasma sintering of  $\text{Ti}$  and  $\text{Si}_3\text{N}_4$  // *Ceramics International*. 2019. № 45 (2019). P. 6477–6483.

2. Kasraee K., Yousefpour M., Tayebifard S. Microstructure and mechanical properties of  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  fabricated by spark plasma sintering // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. № 779 (2019). P. 942–949.

3. Мержанов А.Г. Процессы горения и синтез материалов. Черноголовка: ИСМАН. 1998. 512 с.

4. Мержанов А.Г., Мукасян А.С. Твердопламенное горение. М.: ТОРУС ПРЕСС. 2007. 336 с.

5. Амосов А.П., Бичуров Г.В. Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридов: монография. М.: Машиностроение-1, 2007. 526 с.

6. Бичуров Г.В., Шиганова (Кондратьева) Л.А., Титова Ю.В. Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридных композиций: монография. М.: Машиностроение, 2012. 519 с.

7. Кондратьева Л.А. Процесс синтеза азотсодержащих продуктов по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Сборник научных трудов 9-й Международной научно-практической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития». 2020. Т. 1. С. 235–239.

8. Кондратьева Л.А. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез порошков нитридных композиций  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-AlN}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-BN}$ ,  $\text{AlN-BN}$ ,  $\text{AlN-TiN}$ ,  $\text{BN-TiN}$  с применением азидов натрия и галоидных солей: диссертация докт. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2018. 881 с.

9. Кондратьева Л.А. Композиции «нитриды кремния, титана – силициды титана», синтезированные по азидной технологии СВС // *Современные материалы, техника и технологии*. 2019. № 4 (26). С. 55–61.

10. Кондратьева Л.А. Исследование морфологии и размера порошкового продукта, полученного в режиме горения из кремний-титансодержащих систем // *Современные материалы, техника и технологии*. 2019. № 4 (26). С. 50–54.

### REFERENCES

1. Derakhshandeha M.R., Soleymani Naeinib M., Ghasalia E., Jama A., Fazilia A., Alizadeha M., Kazemzadeha A., Ebadzadeha T. Preparation of in-situ formed  $\text{TiN}_{0,3}\text{-Ti}_5\text{Si}_3\text{-TiN}$  composites through reactive spark plasma sintering of  $\text{Ti}$  and  $\text{Si}_3\text{N}_4$  // *Ceramics International*. 2019. № 45 (2019). P. 6477–6483.

2. Kasraee K., Yousefpour M., Tayebifard S. Microstructure and mechanical properties of Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> fabricated by spark plasma sintering // Journal of Alloys and Com-pounds. 2019. № 779 (2019). P. 942–949.

3. Merzhanov A.G. Combustion processes and materials synthesis. Chernogolovka: ISMAN, 1998, 512 p.

4. Merzhanov A.G., Mukasyan A.S. Solid-Flame Combustion, Moscow: Torus Press, 2007, 336 pp.

5. Amosov A.P., Bichurov G.V. Azide technology of self-propagating high-temperature synthesis of micro- and nanopowders of nitrides: monograph. Moscow: Mashinostroenie-1, 2007, 526 p.

6. Bichurov G.V., Shiganova (Kondratieva) L.A., Titova Yu.V. Azide technology of self-propagating high-temperature synthesis of micro- and nanopowders of nitride compositions: monograph. Moscow: Mashinostroenie, 2012, 519 p.

7. Kondratieva L.A. The process of synthesis of nitrogen-containing products according to the technol-

ogy of self-propagating high-temperature synthesis // Proceedings of scientific papers of the 9th International Scientific and Practical Conference «Technique and technology: ways of innovative development», 2020, vol. 1, pp. 235–239.

8. Kondratieva L.A. Self-propagating high-temperature synthesis of powders of nitride compositions Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-AlN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN, AlN-BN, AlN-TiN, BN-TiN using sodium azide and halide salts: doctoral dissertation. tech. Sciences. Samara: SamGTU, 2018, 881 p.

9. Kondratieva L.A. Compositions «silicon nitrides, titanium – titanium silicides» synthesized by the SHS azide technology // Modern materials, techniques and technologies, 2019, no. 4 (26), pp. 55–61.

10. Kondratieva L.A. Investigation of morphology and size of powder product obtained in combustion regime from silicon-titanium-containing systems // Modern materials, techniques and technologies, 2019, no. 4 (26), pp. 50–54.

Статья поступила в редакцию 22.11.2022; одобрена после рецензирования 26.12.2022; принята к публикации 11.01.2023.

The article was submitted 22.11.2022; approved after reviewing 26.12.2022; assepted for publication 11.01.2023.

