

УДК 546;621.762;536.46

## ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СТРУКТУРА ПРОДУКТОВ СИНТЕЗА КАРБИДА ТИТАНА С НИКЕЛЕВОЙ СВЯЗКОЙ

© 2019 г. Б. С. Сеплярский<sup>1</sup>\*, Р. А. Кочетков<sup>1</sup>, Т. Г. Лисина<sup>1</sup>, Н. И. Абзалов<sup>1</sup>, М. И. Алымов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова  
Российской академии наук, ул. Академика Осипьяна, 8, Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия

\*e-mail: seplb1@mail.ru

Поступила в редакцию 15.02.2019 г.

После доработки 04.04.2019 г.

Принята к публикации 22.05.2019 г.

Исследованы фазовый состав и структура карбида титана с никелевой связкой, полученного методом СВС из гранулированной шихты с использованием порошков титана разных марок в спутном потоке инертного и активного газа. Установлено, что в отличие от порошковых смесей насыпной плотности продукты горения гранулированной шихты  $Ti + C + 25\% Ni$  в отсутствие продува газом и в потоке азота сохраняют структуру и размеры гранул и легко дробятся до порошка. Для порошковой шихты как при наличии, так и в отсутствие потока газа, а для гранулированной смеси в потоке аргона продукты горения представляли собой неразрушимые спеки независимо от марок титана. Изучение микроструктуры продуктов горения независимо от исходной смеси (гранулы или порошок насыпной плотности) показывает самопроизвольное диспергирование частиц титана в окружении никелевой связки. При этом фазовый состав продуктов синтеза зависит от дисперсности и морфологии частиц титана. Для титана марки ПТМ конечный продукт синтеза содержит фазы карбида титана и никеля. При сжигании смесей на основе порошка титана марки ПТМ-1 или смеси 50% ПТМ + 50% ПТМ-1 в конечном продукте наблюдаются фазы  $TiC$ ,  $Ni$  и интерметаллидов  $Ti_xNi_y$ . Обнаружено, что синтез в потоке азота изменяет фазовый состав продуктов горения смесей на основе порошков титана марки ПТМ-1 и смеси 50% ПТМ + 50% ПТМ-1, а именно, приводит к исчезновению фаз интерметаллидов. Для объяснения особенностей процесса горения предложен двухстадийный механизм взаимодействия  $Ti + C + 25\% Ni$ .

**Ключевые слова:** гранулы, карбид титана, микроструктура, никелевая связка, синтез, спек, фазовый состав

DOI: 10.1134/S0002337X19110113

### ВВЕДЕНИЕ

Материалы на основе карбида титана, благодаря их твердости и износостойкости, имеют широкий спектр применения: от абразивов и защитных покрытий до конструкционных трибологических сплавов. Для увеличения их пластичности в исходную шихту вводится металлическая связка, например никель [1, 2]. В настоящее время основным методом получения материалов из исходных порошков является спекание [1, 3]. Альтернативой спеканию является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [4], в процессе которого тепло, необходимое для получения конечного продукта, выделяется при взаимодействии исходных реагентов. Особенностью СВС является плавление наиболее легкоплавких компонентов в процессе горения, что обеспечивает растекание расплава и самодиспергирование исходных реагентов. Однако при добавлении металлической связки в результате синтеза получаются

прочные спеки, размол которых представляет большие трудности и требует значительных энергозатрат.

В работе [5], посвященной исследованию закономерностей горения гранулированных смесей порошков титана с сажей, показано, что после синтеза гранулы сохраняют свои размеры и не спекаются друг с другом.

В настоящей работе использовали гранулированную шихту вместо порошковой для синтеза карбида титана с металлической связкой с целью получения не прочного спека, а гранул размерами порядка 1 мм, размол которых до порошкообразного состояния окажется менее энергозатратным.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Используемые в данной работе исходные вещества и их краткие характеристики приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Применяемые вещества и реагенты

Компонент	Марка	Размеры частиц, мкм	
		до 50 мас. %	до 90 мас. %
Титан	ПТМ	<61	<107
Титан	ПТМ-1	<105	<169
Сажа	П-803	<2.5	<4
Никель		<100	<150
Поливинилбутираль			
Спирт этиловый технический 95%			

Гранулирование составов проводилось следующим образом: исходная смесь порошков титана, никеля и сажи перемешивалась в течение 4 ч в смесителе типа “пьяная бочка”. Затем к полученной смеси добавляли 4%-ный раствор поливинилбутираля в этиловом спирте. Полученная после смешения пастообразная масса протиралась через сито с размером ячейки 1.25 мм. Для придания полученным частицам сферической формы они окатывались на вращающейся горизонтальной поверхности. Затем частицы высушивались на воздухе в течение 10 ч и рассеивались на вибросите. В данной работе использовались гранулы с размерами 0.63–1.6 мм.

Исследование закономерностей горения выполнено на оригинальной экспериментальной установке. Установка позволяет проводить синтез как без продува, так и с продувом газовым потоком, измерять расход и давление газа в процессе горения, а также получать видеозаписи про-

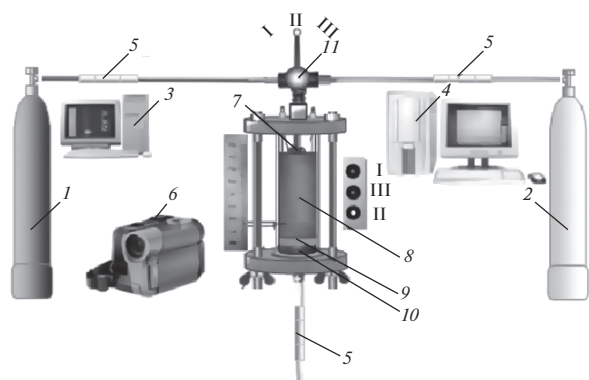
цесса горения (рис. 1). На основании покадровой обработки видеозаписей рассчитывается скорость фронта горения. Все описанные ниже результаты экспериментов в спутном потоке газа получены при перепаде давления между верхним и нижним торцом засыпки в 1 атм (давление на верхнем торце равно 1 избыточной атмосфере). Для исключения усадки несгоревшей части засыпки в процессе горения и получения стабильных результатов перед каждым опытом образец продували потоком аргона при таком же перепаде давления.

Исследования проводились для составов, где никель составлял 25% от массы всей смеси, что, по данным [6], обеспечивает прочное соединение карбида титана с изделиями при газоплазменном напылении.

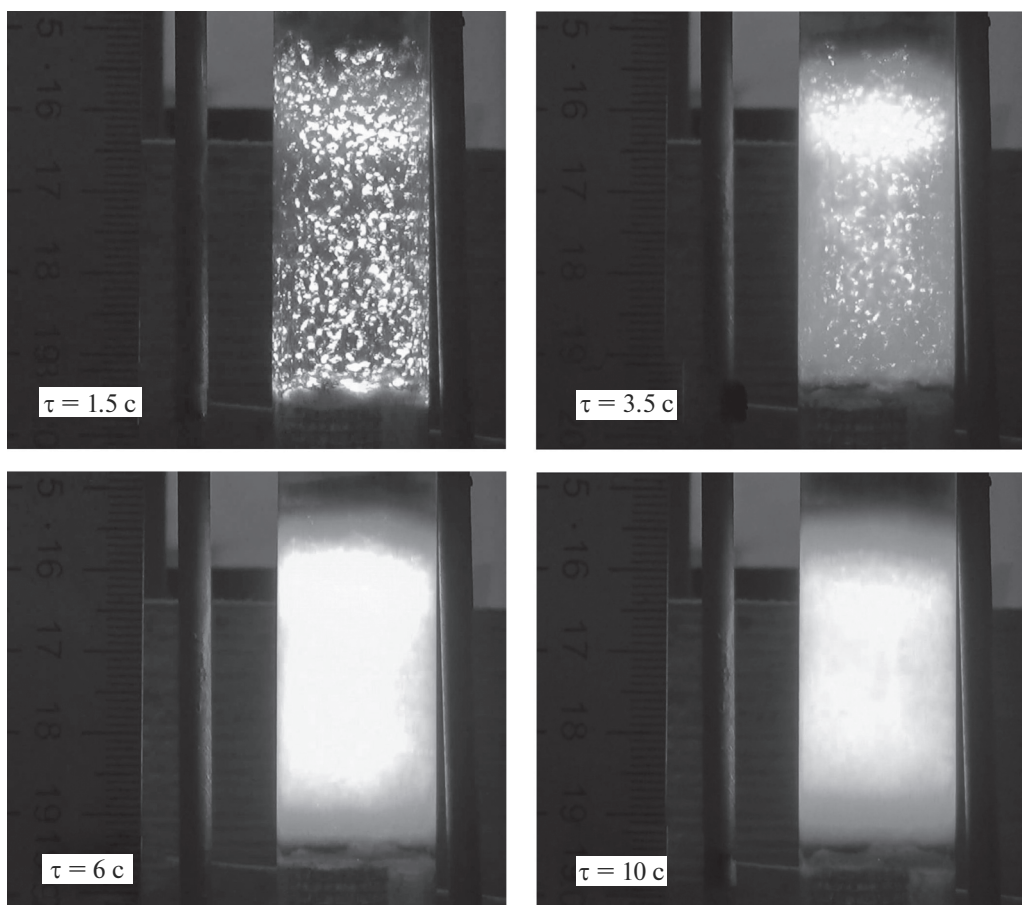
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что горение гранулированной СВС-смеси  $Ti + C + 25\% Ni$  с титаном марки ПТМ происходило в два этапа. Сначала по засыпке проходил фронт горения длительностью не более 3 с, после которого наблюдалось более яркое свечение продуктов (разгорание) в течение 6–8 с (см. рис. 2).

При горении гранулированных смесей такой эффект наблюдался впервые, в ранее исследованных нами гранулированных составах  $Ti + xC$  ( $0.5 \leq x \leq 1$ ) послесвечения не было. Послесвечение наблюдалось при горении прессованных образцов  $Ti + C + 20\% Ni$  [7]. Для проверки существования этого эффекта были проведены эксперименты по сжиганию порошковых смесей  $Ti + C + 25\% Ni$  насыпной плотности, которые показали, что эффект послесвечения в них также имеет место. Такой характер горения объясняется тем, что никель, имея более низкую температуру плавления (1726 К), чем титан (1933 К), плавится во фронте горения и растекается по частицам титана, препятствуя взаимодействию титана с сажей. Замедляющее горение действие слоя никеля на поверхности частиц титана при горении смеси  $Ti + C + 20\% Ni$  было показано в работе [8]. Однако из-за малого объемного содержания никеля в исследуемой смеси ( $\leq 8$  об. %) только часть частиц титана покрывается расплавом никеля. Остальные частицы титана плавятся в волне горения и растекаются по саже, образуя при взаимодействии карбид титана. Именно эта реакция была ведущей во фронте горения, т. к. волна горения в смеси  $Ti + Ni$  без предварительного нагрева не реализуется [9]. За фронтом горения происходит вытеснение углеродом никеля из его расплава с титаном с образованием карбида титана, сопровождающееся дополнительным выделением тепла, что и дает эффект послесвечения, который визуально воспринимается как разгорание. По



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – баллон с азотом, 2 – баллон с аргоном, 3 – компьютер для записи видеосигнала, 4 – компьютер для записи показаний датчиков через АПП, 5 – датчики расхода и давления, 6 – цифровая видеокамера, 7 – электрическая спираль, 8 – шихта, 9 – слой минеральной ваты, 10 – металлическая сетка, 11 – переключатель газа (положение I – азот, II – аргон, III – подача газа перекрыта).



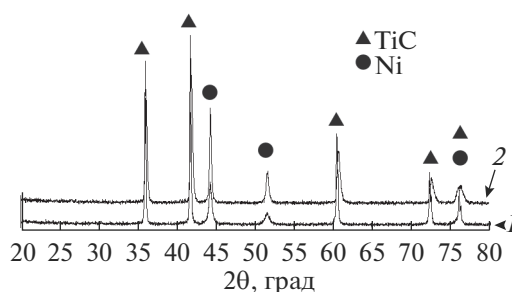
**Рис. 2.** Кадры видеосъемки процесса синтеза карбида титана с никелевой связкой из гранулированной смеси с титаном марки ПТМ в разные моменты времени (от момента поджига).

данном рентгенофазового анализа (**РФА**), конечный продукт, полученный как из порошковой, так и из гранулированной смесей, содержит фазы карбида титана и никеля (см. рис. 3), что совпадает с результатами термодинамических расчетов.

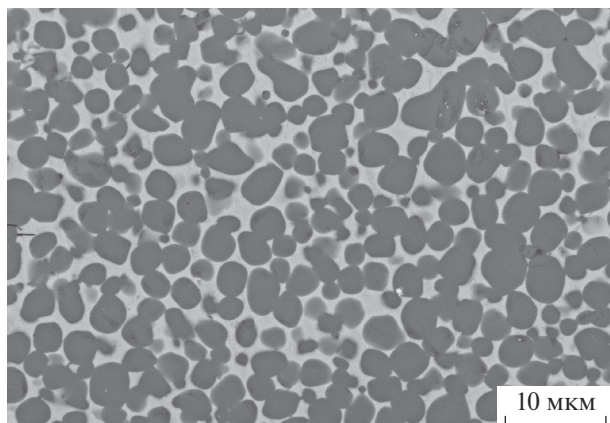
Эксперименты показали, что при горении гранулированных смесей  $Ti + C + 25\% Ni$  гранулы сохраняют свои размеры и не спекаются друг с другом. Однако для порошковых смесей  $Ti + C + 25\% Ni$  продукты горения представляют собой прочный спек. Этот результат является аргументом в пользу применения гранулированных смесей вместо порошковых для получения керамических материалов с металлической связкой, т.к. в этом случае значительно снижаются энергозатраты и время на дальнейший размол продуктов синтеза и уменьшается загрязнение конечного продукта веществом мельящих тел.

Микроструктура полученных конденсированных продуктов (гранул) исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии (**СЭМ**) на микроскопе Ultra Plus фирмы Carl Zeiss. На рис. 4 приведена микрофотография гранул  $Ti + C + 25\% Ni$  после синтеза. Видно, что средний

размер зерен карбида титана составляет 2–4 мкм, что на порядок меньше исходных размеров частиц титана (70 мкм), т.е. в процессе горения происходило диспергирование частиц титана, а никелевая связка препятствовала росту зерен карбида титана после синтеза. Обращает на себя внимание тот факт, что, несмотря на малую объемную долю



**Рис. 3.** Результаты РФА продуктов горения гранулированной смеси  $Ti + C + 25\% Ni$  из титана марки ПТМ: 1 – без потока газа, 2 – в потоке азота (перепад давлений 1 атм).



**Рис. 4.** Микроструктура гранулы  $Ti + C + 25\% Ni$  после синтеза (светлые области – никель, темные – карбид титана).

в шихте, никель равномерно распределен по грануле после синтеза.

Известно, что спутный потока газа является эффективным управляющим фактором для горения СВС-смесей [10, 11], поэтому закономерно возник вопрос, какое влияние окажет поток газа на характеристики горения, фазовый состав и структуру продуктов синтеза.

Видеосъемка процесса горения гранулированной смеси  $Ti + C + 25\% Ni$  в спутном потоке инертного (аргон) и активного (азот) газа показала, что эффект послесвечения, связанный с присутствием никеля, сохранился. Скорость фронта горения в потоке газа повысилась по сравнению с горением без потока с 27 до 36 мм/с для аргона и до 47 мм/с для азота. (Погрешность измерения скорости фронта составляла 10%.)

При горении в потоке аргона гранулированной шихты  $Ti + C + 25\% Ni$  происходила усадка засыпки на 30%. Продукт горения представлял собой прочный спек, который не разделялся на отдельные гранулы и не поддавался измельче-

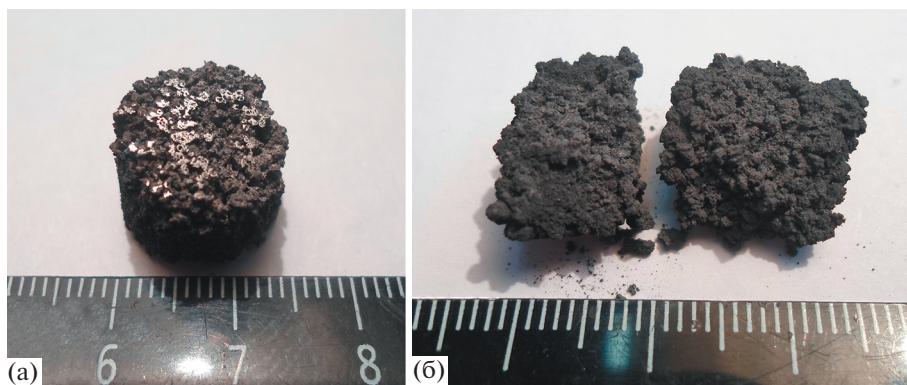
нию. Фотография поперечного среза образца после синтеза представлен на рис. 5а.

В соответствии с теорией фильтрационного горения, причиной такого влияния инертного газа на характеристики горения и свойства продуктов является повышение температуры в волне горения [5]. В свою очередь, повышение температуры горения приводит к увеличению доли жидкой фазы в продуктах, повышению их текучести и, как следствие, к консолидации гранул под действием перепада давления.

При сжигании гранулированной смеси в потоке азота усадка образца была меньше и составляла 15–20%, а скорость горения была выше, чем в потоке аргона. Продукт горения представлял собой пористый непрочный образец из слабо спеченных гранул, который при разрезании крошился, поэтому пригодный для съемки поперечный срез образца сделать не удалось. На рис. 5б приведена фотография излома сгоревшего образца.

По данным термодинамических расчетов по программе THERMO [4], при горении смеси  $Ti + C + 25\% Ni$  продуктами реакции должны быть только стехиометрический карбид титана и никель, т.е. азот должен вести себя как инертный газ, следовательно, как и в потоке аргона, должен был получиться прочный спек. Однако полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что азот ведет себя не так, как инертный газ. Этот результат находится в соответствии с выводами работ [5, 10], согласно которым поток азота поджигает с поверхности гранулы, формируя тугоплавкую корку из нитрида титана на их поверхности. Эта корка препятствует прочному спеканию гранул под действием перепада давления и высокой температуры, несмотря на наличие никелевой связки.

Таким образом, получены дополнительные свидетельства неравновесного механизма горения гранулированных смесей на основе титана в спутном потоке азота, когда последовательность химических



**Рис. 5.** Поперечный срез продукта синтеза гранул  $Ti + C + 25\% Ni$  в потоке газа: а – в потоке аргона, б – в потоке азота.

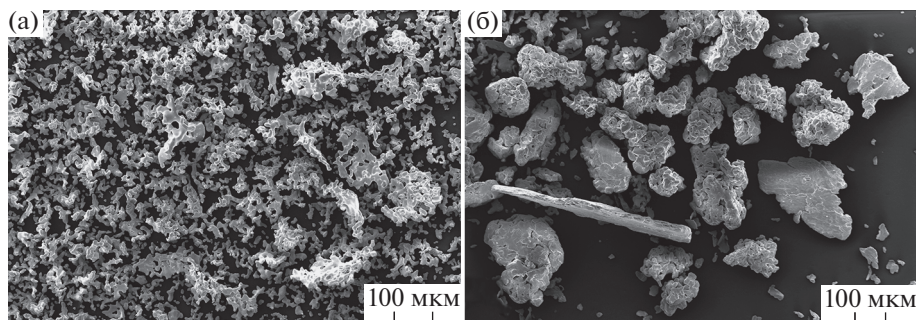


Рис. 6. Микрофотографии порошков титана ПТМ (а) и ПТМ-1 (б).

реакций в волне горения определяется кинетическими особенностями взаимодействия титана с азотом и углеродом [12].

Отметим, что для порошковой смеси  $Ti + C + 25\% Ni$  продукты горения независимо от условий проведения экспериментов (в потоке или без потока газа) представляют собой спек, который обладает пластичностью и практически не поддается дроблению в лабораторных условиях.

По данным химического анализа, продукты горения смесей  $Ti + C + 25\% Ni$  в потоке азота содержат 2.5–3 мас. % азота. Однако, согласно результатам РФА, в составе продуктов синтеза смеси  $Ti + C + 25\% Ni$  в потоке азота и без потока наблюдались фазы карбида титана (основная фаза) и никеля (см. рис. 3). Возможной причиной этого кажущегося противоречия является наличие фазы  $TiC_xN_{(1-x)}$ , угловые положения пиков которой на рентгенограмме близки к пикам карбида титана [13]. Наличие фазы  $TiC_xN_{1-x}$  проявляется в том, что пики основной фазы на рентгенограмме продуктов (рис. 3), полученных при горении в потоке азота, смещены вправо и уширены. Фазовый состав продуктов синтеза смеси  $Ti + C + 25\% Ni$  в потоке аргона изучить не удалось, так как продукт не поддавался измельчению.

Таким образом, при горении гранулированной шихты  $Ti + C + 25\% Ni$  на основе титана марки ПТМ в спутном потоке азота получен карбид титана с никелевой связкой, легированный азотом.

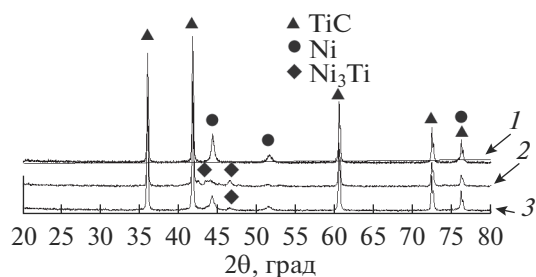
Многолетний опыт изучения СВС-процессов показал, что изменение марки исходных реагентов может оказать существенное влияние на закономерности горения и фазовый состав получаемых продуктов. Поэтому были выполнены исследования закономерностей синтеза и состава получаемых продуктов смеси  $Ti + C + 25\% Ni$  с порошком титана другой марки (ПТМ-1). Химический состав порошков титана этих марок практически не отличается, поэтому внимание было обращено на различия в размерах и форме частиц титана. Микрофотографии порошков титана разных марок представлены на рис. 6. Видно, что ча-

стицы порошков титана разных марок отличаются формой и размером. Частицы титана марки ПТМ-1 были примерно в полтора раза больше (табл. 1), имели плоскую форму и менее развитую поверхность. Удельная поверхность порошка титана марки ПТМ-1, которая определялась на приборе Sorbi-M, составляла  $0.35 \text{ м}^2/\text{г}$ , для порошка титана марки ПТМ –  $0.59 \text{ м}^2/\text{г}$ . Распределение частиц по размерам определяли на анализаторе частиц MicroSizer-201.

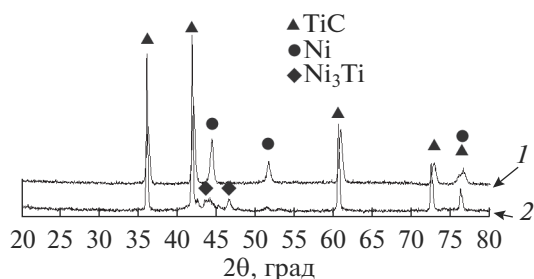
Предварительно было проверено, влияет ли марка порошка титана на скорость распространения фронта и фазовый состав продукта при горении стехиометрической смеси  $Ti + C$ . Как показали результаты экспериментов, скорость горения порошковой смеси на основе порошка титана ПТМ-1 уменьшилась в 2 раза по сравнению со смесью на основе порошка титана марки ПТМ и составила 8 мм/с. Скорость горения гранулированной смеси также упала от 75 до 22 мм/с. Однако фазовый состав продуктов, полученных как из порошковой, так и из гранулированной смеси на основе титана ПТМ-1, как и для титана марки ПТМ, согласно результатам РФА, представлял собой стехиометрический карбид титана.

Оказалось, что добавка 25% никеля в смесь  $Ti + C$  для порошка титана марки ПТМ-1 приводила к изменению характера горения и состава продуктов по сравнению со смесью на основе порошка титана марки ПТМ. При горении гранулированной смеси не наблюдалась стадия послесвечения, а скорость горения уменьшилась от 27 мм/с (для смеси с порошком титана марки ПТМ) до 11 мм/с. По данным РФА, продукты горения имели более сложный состав и включали интерметаллиды  $Ti_xNi_y$ . На рис. 7 приведены результаты РФА продуктов горения гранулированных смесей  $Ti + C + 25\% Ni$  на основе титана разных марок. Гранулы смеси  $Ti + C + 25\% Ni$  на основе порошка титана ПТМ-1 сохраняют свои размеры после синтеза и не спекаются друг с другом.

Для проверки гипотезы, что замена части порошка титана марки ПТМ-1 может привести к



**Рис. 7.** Результаты РФА продуктов горения гранулированных шихт  $Ti + C + 25\% Ni$  без потока газа на основе титана ПТМ (1), ПТМ-1 (2) и их смеси в равных долях (3).



**Рис. 8.** Результаты РФА продуктов горения гранулированной шихты  $Ti + C + 25\% Ni$  на основе смеси титана марок ПТМ-1 и ПТМ в равных долях без потока газа (1) и их в потоке азота (2).

снижению содержания интерметаллидов в продуктах, были проведены эксперименты по сжиганию порошковых и гранулированных смесей  $Ti + C + 25\% Ni$ , в которых 50% порошка титана марки ПТМ-1 было заменено на порошок титана марки ПТМ. Исследования показали, что для этой смеси процесс горения идет с послесвечением. Скорость горения такой гранулированной смеси (титан ПТМ/ПТМ-1) 20 мм/с была промежуточной между скоростями горения составов с порошками титана каждой из марок (27 мм/с для смеси с ПТМ и 11 мм/с — с ПТМ-1). РФА показал наличие интерметаллидов в продуктах, но в меньшем количестве, чем для смеси на основе порошка титана марки ПТМ-1.

Затем было выполнено исследование влияния потока инертного и активного газа на характеристики горения и фазовый состав продуктов синтеза для шихт на основе порошка титана ПТМ-1 и смеси порошков ПТМ и ПТМ-1 в равных долях. Скорость фронта горения гранулированной шихты в потоке газа (перепад давлений 1 атм) повысилась по сравнению с горением без потока: в потоке аргона от 11 до 23 мм/с для шихты с порошком марки ПТМ-1 и от 20 до 30 мм/с для смеси порошков ПТМ и ПТМ-1, в потоке азота — от 11 до 30 мм/с для смеси с порошком ПТМ-1 и от 20 до 42 мм/с для смеси порошков ПТМ и ПТМ-1.

При горении в потоке азота для гранулированных шихт на основе порошка ПТМ-1 и смеси порошков ПТМ и ПТМ-1 наблюдалось послесвечение, а продукты имели небольшую усадку. Продукт синтеза представлял собой пористый непрочный образец из слабо спеченных гранул, который при разрезании крошился. Особенно следует отметить, что продувом азота удалось изменить состав продуктов горения шихт на основе порошка ПТМ-1 и смеси порошков ПТМ и ПТМ-1, которые, по данным РФА, не содержали интерметаллидов (см. рис. 8). Таким образом, проведенное исследование показало, что гранулирование смеси с последующим сжиганием в потоке азота позволяет нивелировать влияние марки титана на фазовый состав конечных продуктов синтеза.

При горении в потоке аргона шихт на основе порошка ПТМ-1 и смеси порошков ПТМ и ПТМ-1 продукты синтеза представляли собой прочный спек с заметной усадкой, дробление спека было невозможно (поэтому данные РФА для продуктов синтеза в потоке аргона отсутствуют).

Сводные данные по влиянию потока газа на скорость распространения фронта волны горения в гранулированных смесях на основе титана разных марок и фазовый состав продуктов синтеза приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Скорость фронта и фазовый состав продуктов горения гранулированных смесей  $Ti + C + 25\% Ni$  для титана разных марок

Поток газа	Скорость фронта, $10^{-3}$ м/с	Фазовый состав	Скорость фронта, $10^{-3}$ м/с	Фазовый состав	Скорость фронта, $10^{-3}$ м/с	Фазовый состав
	ПТМ		ПТМ-1		50% ПТМ + 50% ПТМ-1	
Без потока	27	TiC, Ni	11	TiC, Ni, $Ti_xNi_y$	20	TiC, Ni, $Ti_xNi_y$
Аргон	36	—	23	—	30	—
Азот	47	TiC, Ni	30	TiC, Ni	42	TiC, Ni

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы фазовый состав и структура карбида титана с никелевой связкой, полученного методом СВС из гранулированной шихты Ti + C + 25% Ni. Установлено, что в отличие от порошковых смесей при горении гранулированной шихты Ti + C + 25% Ni в отсутствие продува газом и при наличии продува азотом гранулы сохраняют свои размеры, не спекаются друг с другом и дробятся до порошка. Методом СЭМ для продуктов горения указанных смесей показано, что в процессе синтеза происходит т.н. самопроизвольное диспергирование частиц титана, при этом никелевая связка препятствует росту зерен карбида титана.

Показано, что фазовый состав продуктов горения зависит от марки порошка титана. При использовании титана марки ПТМ конечный продукт синтеза содержит фазы карбида титана и никеля. При сжигании шихт Ti + C + 25% Ni на основе порошка титана марки ПТМ-1 или смеси 50% ПТМ + 50% ПТМ-1 в конечном продукте наблюдаются TiC, Ni и интерметаллиды  $Ti_xNi_y$ . Обнаружено, что синтез в потоке азота изменяет фазовый состав продуктов горения шихт на основе порошков титана марки ПТМ-1 и смеси 50% ПТМ + 50% ПТМ-1, а именно, приводит к исчезновению фаз интерметаллидов.

При изучении горения гранулированных и порошковых шихт насыпной плотности Ti + C + 25% Ni (кроме смеси на основе порошка титана ПТМ-1) впервые наблюдались две стадии процесса синтеза: за стадией прохождения фронта горения фиксировалось послесвечение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Купарисов С.С., Левинский Ю.В., Петров А.П.* Карбид титана: получение, свойства, применение. М.: Металлургия, 1987. 215 с.
2. *Zhang X.-H., Han J.-C., He X.-D., Kvanin V.L.* Combustion Synthesis and Thermal Stress Analysis of TiC–Ni Functionally Graded Materials // *J. Mater. Synth. Process.* 2000. V. 8. № 1. P. 29–34. <https://doi.org/10.1023/A:1009469610918>
3. *Гузман И.Я.* (ред.). Химическая технология керамики. Учеб. пособие для вузов. М.: Стройматериалы, 2003. 496 с.
4. *Мержанов А.Г., Мукасян А.С.* Твердопламенное горение. М.: Торус Пресс, 2007. 336 с.
5. *Seplyarskii B.S., Kochetkov R.A., Vadchenko S.G.* Burning of the Ti + xC ( $1 > x > 0.5$ ) Powder and Granulated Mixtures // *Combustion, Explosion Shock Waves.* 2016. V. 52. № 6. P. 665–672. <https://doi.org/10.1134/S001050821606006X>
6. *Dunmead S.D., Readey D.W., Semler C.E., Hol J.B.* Kinetics of Combustion Synthesis in the Ti–C and Ti–C–Ni Systems // *J. Am. Ceram. Soc.* 1989. V. 72. № 12. P. 2318–2324. <https://doi.org/10.1111/j.11512916.1989.tb06083.x>
7. *Rogachev A.S., Shkiro V.M., Chausskaya I.D., Shvetsov M.V.* Gasless Combustion in the System Titanium–Carbon–Nickel // *Combustion, Explosion Shock Waves.* 1988. V. 24. № 6. P. 720–726. <https://doi.org/10.1007/BF00740417>
8. *Kochetov N.A., Rogachev A.S., Pogozhev Yu.S.* The Effect of Mechanical Activation of a Reaction Mixture on the Velocity of the Wave Propagation of SHS Reactions and Microstructure of the TiC–Ni Hard Alloy // *Russ. J. Non-Ferrous Met.* 2010. V. 51. № 2. P. 177–181.
9. *Seplyarskii B.S.* The Nature of the Anomalous Dependence of the Velocity of Combustion of “Gasless” Systems on the Sample Diameter // *Dokl. Phys. Chem.* 2004. V. 396. № 4–6. P. 130–133. <https://doi.org/10.1023/B:DOPC.0000033505.34075.0a>
10. *Сеплярский Б.С., Тарасов А.Г., Кочетков Р.А.* Экспериментальное исследование горения “безгазового” гранулированного состава Ti + 0.5C в спутном потоке аргона и азота // *Физика горения и взрыва.* 2013. № 5. С. 55–63.
11. *Итин В.И., Монасевич Т.В., Братчиков А.Д.* Влияние механоактивации на закономерности самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в системе титан–никель // *Физика горения и взрыва.* 1997. № 5. С. 48–51.
12. *Сеплярский Б.С., Кочетков Р.А.* Исследование закономерностей горения порошковых и гранулированных составов Ti + xC ( $x > 0.5$ ) в спутном потоке газа // *Хим. физика.* 2017. Т. 36. № 9. С. 21–31.
13. *Сеплярский Б.С., Тарасов А.Г., Кочетков Р.А., Ковалев И.Д.* Закономерности горения смеси Ti + TiC в спутном потоке азота // *Физика горения и взрыва.* 2014. № 3. С. 61–67.