

УДК 536.46

**ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ НИКЕЛЯ И МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ
НА ГОРЕНИЕ В СИСТЕМЕ $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$** © 2024 г. Н. А. Кочетов^{1*}, И. Д. Ковалев¹¹Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова
Российской академии наук, Черноголовка, Россия

*E-mail: kolyan_kochetov@mail.ru

Поступила в редакцию 20.12.2022;
после доработки 13.02.2023;
принята в печать 20.03.2023

В системе $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ методами самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и механосинтеза синтезированы интерметаллидные сплавы. Проведено исследование влияния содержания никеля на морфологию, размер и выход композитных частиц после механической активации (МА) смесей. Изучены зависимости максимальных температур и скоростей горения, фазового состава, морфологии и удлинения образцов продуктов синтеза от содержания никеля для исходных и МА-смесей. В условиях экспериментов, проводившихся в данной работе, процесс горения удалось реализовать, и при этом образцы сгорали полностью при содержании никеля от 10 до 60 мас. % в системе $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$. После МА образцы из смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si}$ сгорели до конца, а в процессе активации смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si} + 40\%$ Ni произошел механохимический синтез. Установлено, что с увеличением содержания никеля температура горения убывает, а скорость горения ведет себя немонотонно. Размер композитных частиц возрастает и уменьшается выход смеси после механической активации. Последняя практически не повлияла на максимальные температуры горения смесей $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$. Зафиксировано многократное (от 0.7 до 2.9 см/с) увеличение скорости горения образцов из МА-смесей с возрастанием содержания Ni от 20 до 30 мас. %. Показано, что возрастание содержания никеля приводит к увеличению содержания тройных фаз и количества расплава в продуктах синтеза смесей $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$.

Ключевые слова: горение, механическая активация, интерметаллидный сплав, система Ti + Si + Ni, фазовый состав продуктов, механохимический синтез, примесное газовыделение

DOI: 10.31857/S0207401X24030086 EDN: VFXJED

ВВЕДЕНИЕ

Новый класс материалов – сплавы с памятью формы, в частности на основе никелида титана, находят широкое применение в медицине и технике [1–3]. Многие работы посвящены исследованию горения гетерогенных систем [4, 5]. В нормальных условиях при комнатной температуре не удается реализовать процесс послойного горения системы Ti–Ni. Для реализации горения этой системы используется предварительный нагрев [6–8]. Альтернативой нагреву является предварительная механическая активация (МА) порошковой смеси [6, 9–11].

Силицид титана (Ti_5Si_3) обладает следующими показателями: высокими стойкостью к окислению, температурой плавления (2120°C), сопро-

тивлением ползучести и удельной прочностью, что делает его достаточно перспективным материалом [12]. Многие исследования посвящены изучению синтеза этого соединения [12–14]. Основным ограничением для применения Ti_5Si_3 является низкая вязкость разрушения. Добавление в состав легирующего элемента и уменьшение размера зерна повышают трещиностойкость материала при комнатной температуре [15–17]. Добавление в состав материала металла приводит к уменьшению размера кристаллитов, увеличению чистоты продукта и является эффективным способом улучшения физических и механических свойств этого соединения [17–20]. Никель является одним из возможных кандидатов среди металлов, используемых для улучшения свойств материала на основе Ti_5Si_3 .

В литературе сообщается о шести соединениях в тройной системе Ti–Si–Ni: $Ni_{16}Ti_6Si_7$, Ni_3Ti_2Si , $Ni_{49}Ti_{14}Si_{37}$, $Ni_4Ti_4Si_7$, $NiTiSi$ и Ti_6Ni_5Si [21–27]. Среди опубликованных работ практически нет исследований, посвященных влиянию содержания никеля и механической активации на процесс горения в системе Ti–Si–Ni. В данной работе была поставлена цель получить интерметаллидные сплавы на основе системы $5Ti + 3Si + xNi$ и экспериментально выявить влияние содержания Ni и МА на процесс горения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали титановый порошок марки ПТС (средний размер частиц – 55 мкм), порошок кремния марки КР0 (средний размер частиц – 50 мкм) и карбонильный никель марки ПНК (чистота 99.9 мас. %, средний размер частиц – 10 мкм). Смеси порошков $5Ti + 3Si + xNi$ готовили путем перемешивания исходных компонентов в фарфоровой ступке в заданном количестве (значение x менялось от 0 до 70 мас. %).

Механическая активация смесей порошков осуществлялась в механоактиваторе АГО-2 [8, 11, 13, 14] с водяным охлаждением в воздушной атмосфере при ускорении 90 g в течение 5 мин. Соотношение массы шаров к массе смеси составляло 20:1.

Из исходной и активированной смесей методом двухстороннего холодного прессования получали цилиндрические образцы высотой 13–15 мм и диаметром 10 мм. Масса образцов изменялась в зависимости от содержания никеля в смеси и составляла 2.5–4 г, высота – 13–15 мм. Давление прессования образцов из исходных смесей составляло 130 кг/см^2 , а из активированных смесей – $110\text{--}130 \text{ кг/см}^2$. Различия в давлении прессования обусловлены изменением прессуемости смесей после МА.

Процесс горения спрессованных образцов осуществлялся в камере постоянного давления в инертной среде аргона при давлении 760 Торр [8, 11, 13, 14]. Видеозапись велась на видеокамеру через смотровое стекло. Для обеспечения стабильных условий зажигания синтез инициировался с верхнего торца образца через поджигающую таблетку состава $Ti + 2W$ нагретой вольфрамовой спиралью. Максимальная температура измерялась вольфрам-рениевой термопарой ВР5/ВР20 с тол-

щиной спая 0.2 мм. Термопара вводилась с нижнего торца образца по его оси на расстояние 5 мм.

В процессе МА часть порошковой смеси налипает (наклепывается) на поверхность шаров и стенки барабанов активатора [28, 29]. За выход смеси после МА принималось отношение массы неналипшей активированной смеси, которую можно легко извлечь после МА из барабана, к массе исходной порошковой смеси, закладываемой в барабан перед МА [29]. Отношение высоты сгоревших образцов к высоте исходных принималось за относительное удлинение образцов.

Значения максимальной температуры, скорости горения, относительного удлинения образцов и выхода смеси после МА определяли, как среднее по результатам нескольких экспериментов с погрешностью в пределах 10%. Морфологию частиц смесей исследовали методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе Ultra Plus фирмы Carl Zeiss (Germany).

Рентгенофазовый анализ (РФА) активированных смесей, а также продуктов синтеза исходных и активированных смесей осуществлялся с помощью дифрактометра “Дрон-3М” (Буревестник, Россия) на медном излучении, в диапазоне углов 2θ от 20° до 90° . Полученные данные анализировали с использованием базы данных PDF-2.

Фракционный состав и распределение частиц смеси по размеру определяли по стандартной методике на лазерном анализаторе размера частиц “Микросайзер-201С”. Погрешность измерений не превышала 1.2%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгенофазовый анализ смесей $5Ti + 3Si + xNi$ ($x = 0\text{--}30$ масс. %) после МА продолжительностью 5 мин не выявил образования новых фаз. На рентгенограммах активированных смесей наблюдались следы гидрида титана и рефлексы исходных компонентов (рис. 1а). Небольшое количество гидрида титана содержится в исходном титановом порошке марки ПТС.

При содержании Ni 40 мас. % в активируемой смеси $5Ti + 3Si$ в процессе МА происходит механохимический синтез с образованием продуктов Ti_5Si_3 , $TiNiSi$, Ni_3Ti_3O . Кроме того, на рентгенограмме активированной смеси $5Ti + 3Si + 40\%Ni$ присутствуют рефлексы непрореагировавшего никеля (рис. 1б).

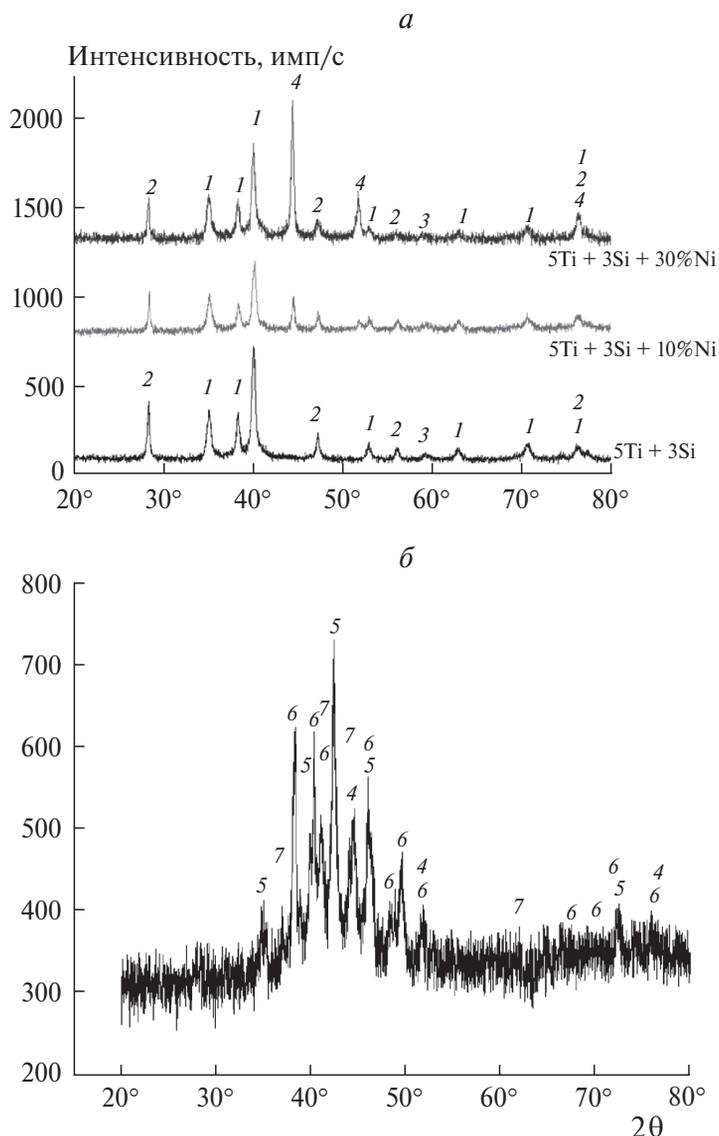


Рис. 1. Результаты рентгенофазового анализа: а – активированных смесей $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ ($x = 0, 10, 30$ мас. %); б – продуктов механосинтеза смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si} + 40\%\text{Ni}$. Цифрами обозначены рефлексы фаз: 1 – Ti, 2 – Si, 3 – $\text{TiH}_{1.5}$, 4 – Ni, 5 – $\text{Ni}_3\text{Ti}_3\text{O}$, 6 – TiNiSi , 7 – Ti_5Si_3 .

Сравнение рентгенограмм исходной и активированных смесей показало уширение всех рефлексов и уменьшение отношения интенсивности этих рефлексов к интенсивности фона после МА. Можно сделать вывод об увеличении дефектности кристаллической структуры компонентов смесей [11, 28, 29].

Частицы титана и кремния имеют характерный размер около 50 мкм, частицы никеля значительно меньше – около 10 мкм. Фотографии частиц исходной и активированной смесей $5\text{Ti} + 3\text{Si}$, МА-смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si} + 10\%\text{Ni}$ и продуктов механосин-

теза смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si} + 40\%\text{Ni}$ представлены на рис. 2.

Исходная порошковая смесь состоит из крупных частиц кремния осколочной формы и частиц титана, имеющих дендритную форму (рис. 2а). В процессе активации смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si}$ исходные частицы деформируются, разрушаются и агломерируются. В результате частицы титана приобретают форму, близкую к сферической. Разрушение исходных частиц приводит к образованию множества мелких частиц – обломков (рис. 2б).

После добавления в активируемую смесь более пластичного по сравнению с титаном и кремнием

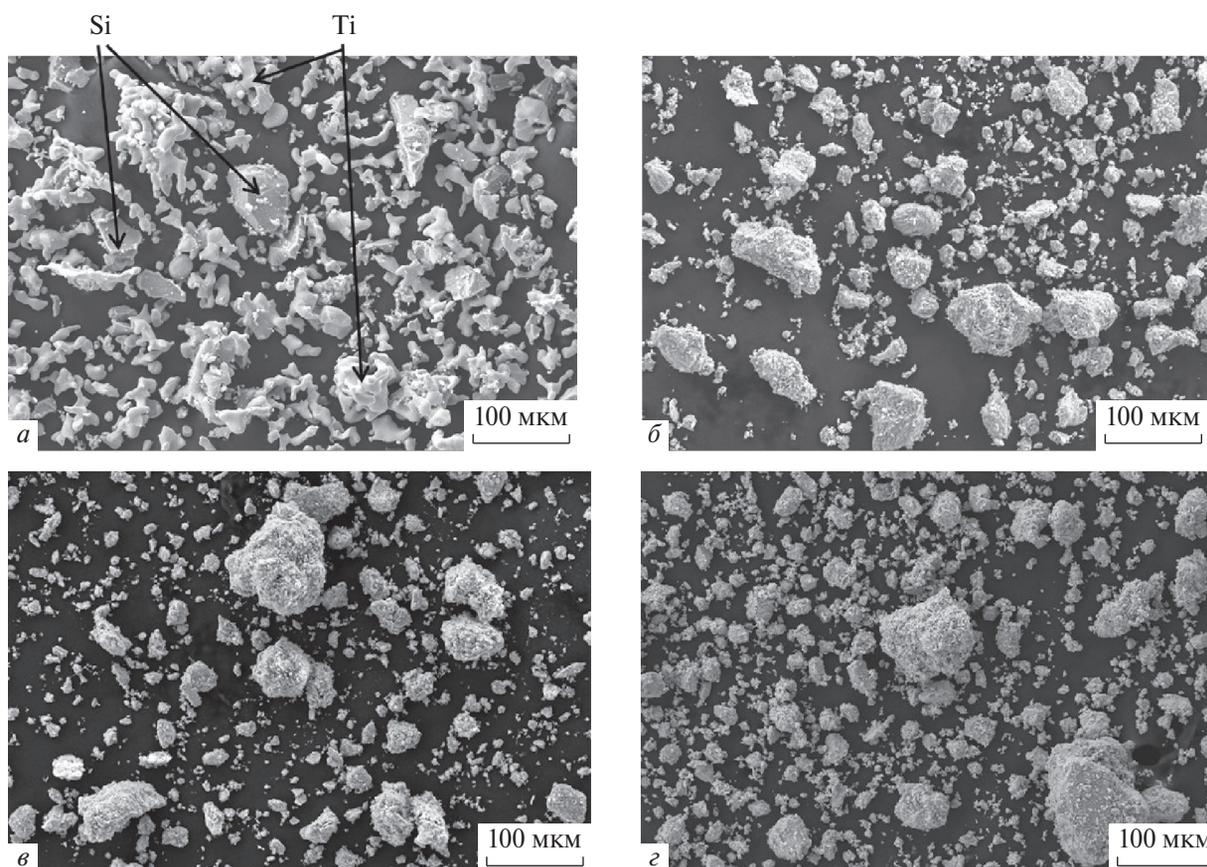


Рис. 2. Фотографии частиц исходной смеси 5Ti + 3Si (а); частиц активированной смеси 5Ti + 3Si (б); композитных частиц, образовавшихся в процессе МА-смеси 5Ti + 3Si + 10%Ni (в), частиц продуктов механосинтеза смеси 5Ti + 3Si + 40%Ni (г).

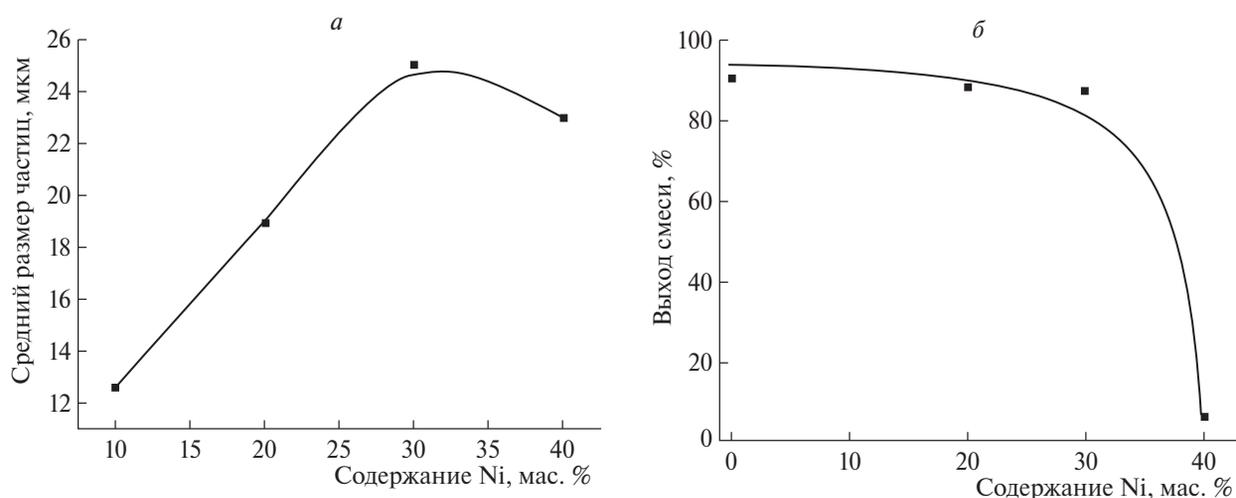


Рис. 3. Зависимость среднего размера частиц (а), выхода активированной смеси 5Ti + 3Si + xNi (б) от содержания никеля.

никеля многие мелкие частицы агломерируются с образованием композитных частиц (рис. 2в). Это приводит к возрастанию среднего размера композитных частиц активированной смеси 5Ti + 3Si + xNi ($x = 0-30$ мас. %) с увеличением содержания никеля (рис. 3а). Частицы продуктов

механосинтеза, произошедшего в процессе активации смеси 5Ti + 3Si + 40%Ni, по размеру несколько меньше композитных частиц активированной смеси 5Ti + 3Si + 30%Ni (рис. 3а) и близки к ним по форме (рис. 2г).

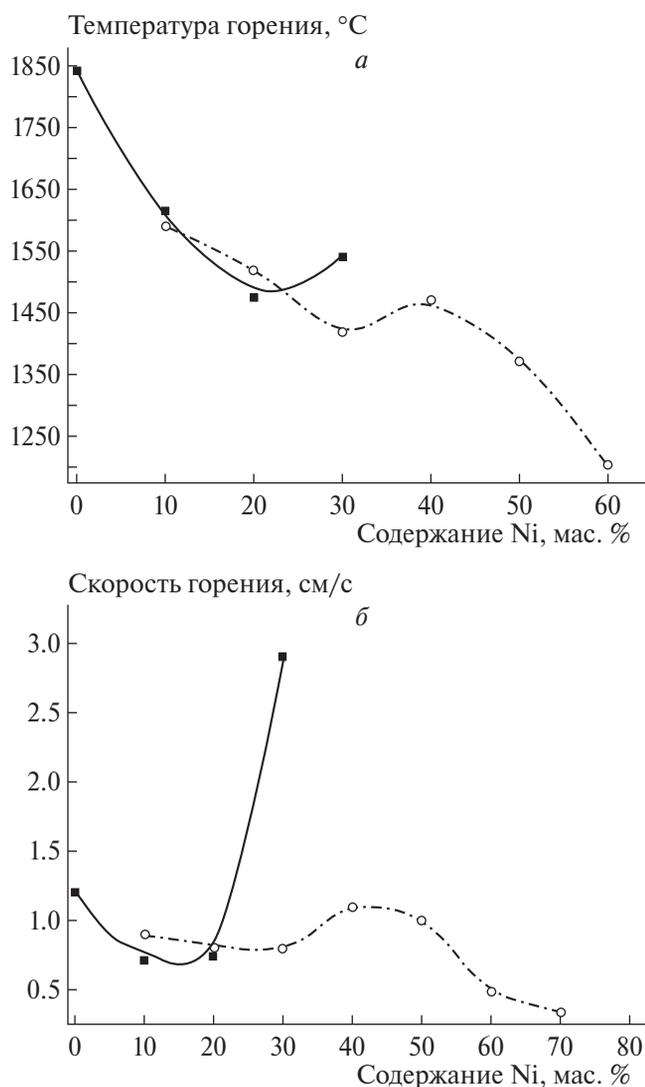


Рис. 4. Экспериментально измеренные зависимости максимальной температуры (а), скорости горения (б) от процентного содержания никеля в исходной (○, штрих-пунктирная линия) и активированной (■, сплошная линия) смесях $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$.

Кроме того, возрастание содержания более пластичного никеля в активируемой смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ приводит к увеличению налипания смеси на стенки барабана и поверхность шаров в процессе МА. В результате наблюдается тенденция к уменьшению выхода активированной смеси после МА с увеличением содержания никеля в системе $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ (рис. 3б). Значительное уменьшение выхода смеси (продуктов реакции) наблюдается после протекания механосинтеза в процессе МА.

Экспериментально измеренные зависимости максимальной температуры и скорости горения от процентного содержания никеля в исходной и

активированной смесях $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ представлены на рис. 4. Образец из исходной смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si}$ не догорел до конца. При добавлении в смесь $5\text{Ti} + 3\text{Si}$ никеля образцы сгорали до конца до достижения содержания никеля, равного 60 мас. %. Образец из смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si} + 70\%\text{Ni}$ так же как из смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si}$, не догорел до конца. Механоактивация смеси позволила реализовать горение смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ с полным сгоранием образца при содержании Ni до 30 мас. %. В процессе МА смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si} + 40\%\text{Ni}$ происходил механохимический синтез с образованием продуктов реакции.

Из рис. 4а видно, что измеренные максимальные температуры горения близки для исходной и активированной смеси. То есть МА практически не повлияла на максимальную температуру горения смесей $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$. Кроме того, заметна тенденция уменьшения максимальной температуры горения смесей $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ с увеличением содержания никеля. Это происходит вследствие того, что с увеличением содержания Ni, кроме основной экзотермической реакции $5\text{Ti} + 3\text{Si}$ с образованием продукта Ti_5Si_3 , в смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si} + \text{Ni}$ происходят и другие, менее экзотермические реакции с участием Ni. В результате этих реакций образуются тройные фазы – интерметаллидные сплавы TiNiSi , $\text{Ti}_2\text{Ni}_3\text{Si}$ (рис. 5а). На рентгенограмме продуктов горения смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si} + 50\%\text{Ni}$ рефлексы фазы Ti_5Si_3 не зафиксированы, присутствуют лишь рефлексы тройных фаз. При высоком содержании никеля (60 мас. %) на рентгенограммах продуктов реакции наблюдаются рефлексы исходных компонентов Ni, Si, Ti и тройной фазы $\text{Ni}_{16}\text{Ti}_6\text{Si}_7$.

Рентгенограммы продуктов синтеза МА-смесей содержат рефлексы фазы Ti_5Si_3 и тройной фазы TiNiSi (рис. 5б). При содержании Ni 20 и 30 мас. % на рентгенограммах продуктов горения МА-смесей $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ наблюдаются также рефлексы двойного оксида $\text{Ni}_3\text{Ti}_3\text{O}$. Небольшое количество кислорода могло попасть в смесь в процессе МА в воздушной атмосфере.

Как и значения максимальных температур, измеренные значения скоростей горения образцов близки для исходной и МА-смеси при небольшом содержании никеля в смесях – до 20 мас. %) (рис. 4б). Для обеих смесей зависимость скорости горения от содержания Ni немонотонна – скорость горения сначала убывает, потом возрастает.

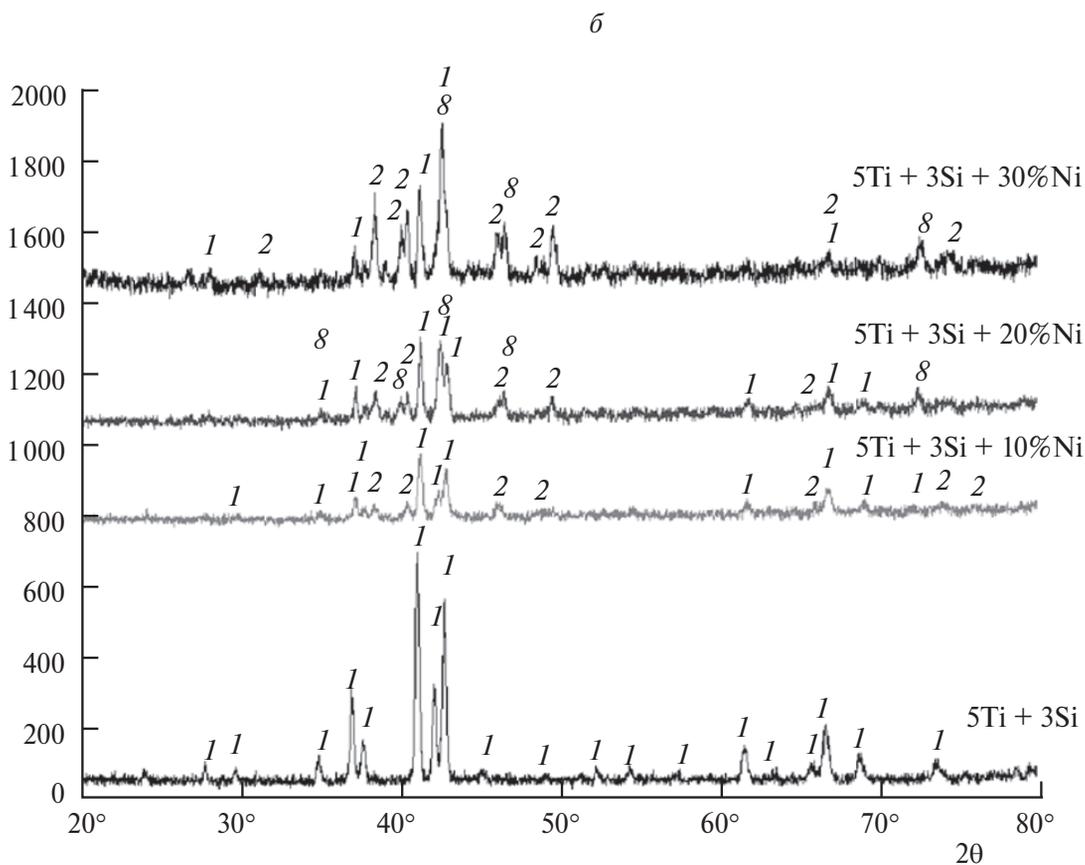
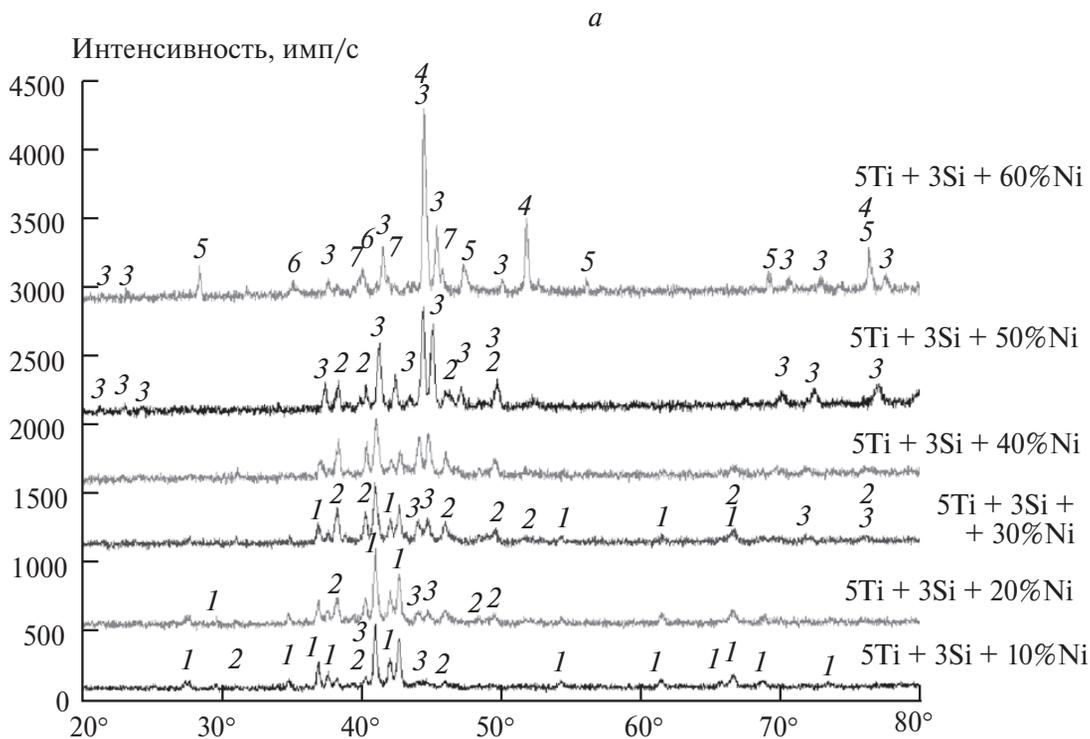


Рис. 5. Результаты рентгенофазового анализа продуктов синтеза исходной (а) и активированной (б) смесей 5Ti + 3Si + xNi с различным содержанием никеля. Цифрами обозначены рефлексы фаз: 1 – Ti₅Si₃, 2 – TiNiSi, 3 – Ti₂Ni₃Si, 4 – Ni, 5 – Si, 6 – Ti, 7 – Ni₁₆Ti₆Si₇, 8 – Ni₃Ti₃O.

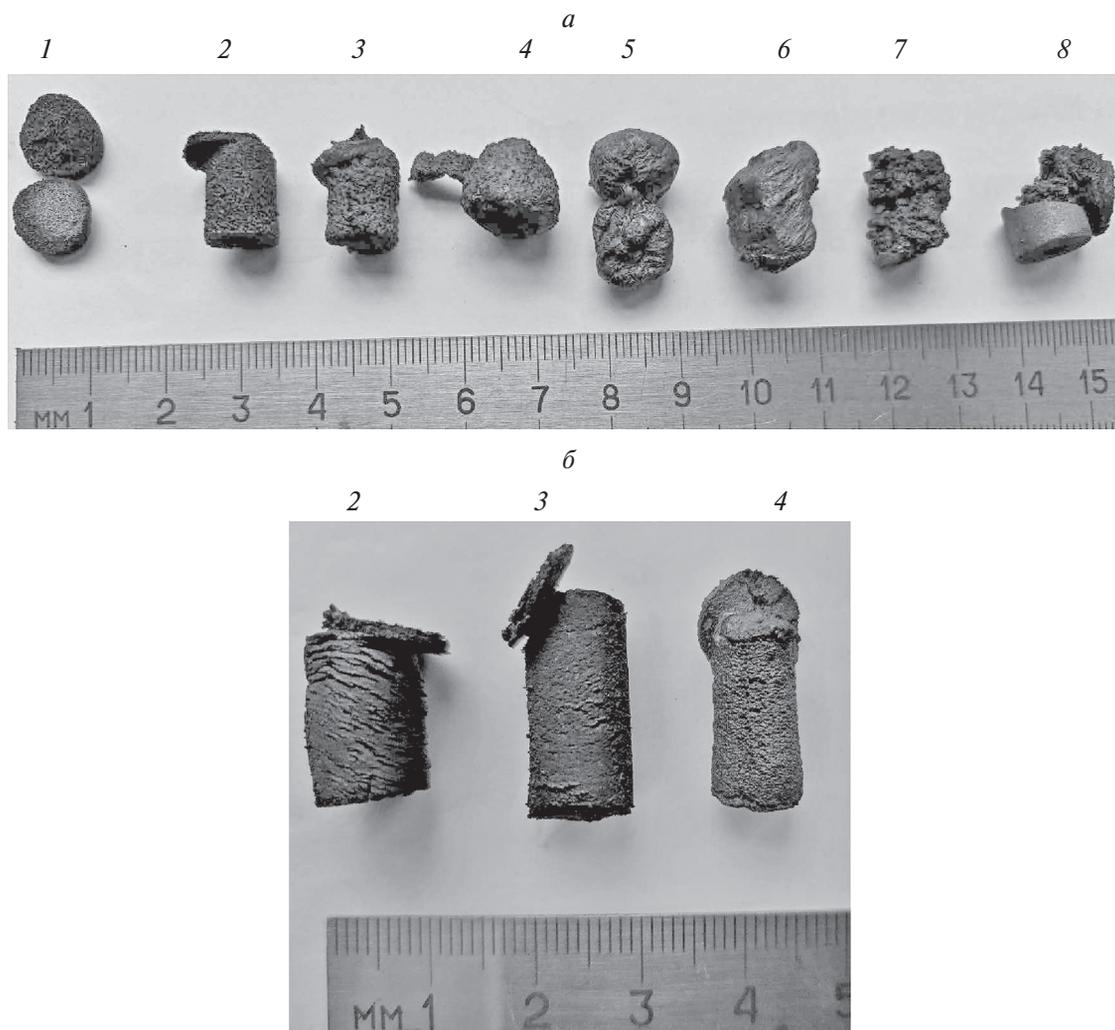


Рис. 6. Фотография образцов продуктов горения исходной (а) и активированной (б) смесей $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ с различным содержанием никеля: 1 – 0, 2 – 10, 3 – 20, 4 – 30, 5 – 40, 6 – 50, 7 – 60, 8 – 70 мас. %.

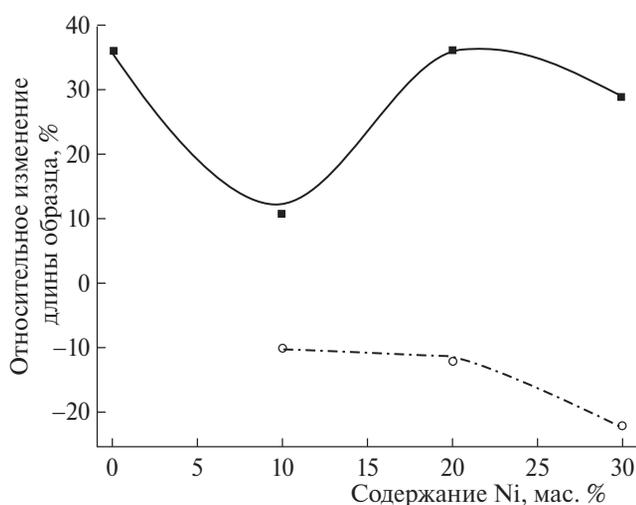


Рис. 7. Зависимость относительного удлинения образцов продуктов синтеза исходной смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ (○, штрих-пунктирная линия), МА-смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ (■, сплошная линия) от содержания никеля.

Для исходной смеси при высоких содержаниях никеля скорость горения уменьшается с увеличением его содержания.

На скорость горения образцов влияют противоположно действующие факторы. С одной стороны, с увеличением содержания никеля в смесях $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ уменьшается максимальная температура горения, что также должно уменьшать и скорость горения. С другой – с увеличением содержания никеля в продуктах реакции появляются значительно более легкоплавкие, по сравнению с Ti_5Si_3 (температура плавления – 2120°C), тройные фазы TiNiSi , $\text{Ti}_2\text{Ni}_3\text{Si}$ (температура плавления – 1100°C – 1200°C [30]), и их содержание увеличивается. То есть увеличивается содержание жидкой фазы в продуктах реакции в процессе синтеза. Об этом также свидетельствует фотография образцов продуктов синтеза исходных

смесей $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ (рис. 6а). Визуальные следы плавления появляются уже в образцах продуктов горения смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si} + 20\%\text{Ni}$. При дальнейшем увеличении содержания никеля в смесях образцы продуктов теряют первоначальную форму, т.е. жидкой фазы становится больше, несмотря на уменьшение максимальной температуры синтеза.

Этот факт подтверждается также зависимостью изменения длины образцов продуктов исходных смесей $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ от содержания никеля (рис. 7). Данная зависимость построена при тех значениях содержания никеля, когда при изменении формы образцов продуктов горения можно было измерить изменение длины. Видно, что с увеличением содержания никеля в исходных смесях $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ возрастает усадка образцов продуктов синтеза.

Согласно конвективно-кондуктивной модели горения примесные газы, выделяющиеся за фронтом горения, оказывают давление на расплав [31, 32]. Это должно увеличивать скорость перемещения расплава, т.е. скорость распространения волны горения. С увеличением количества жидкой фазы этот эффект может проявляться сильнее. Таким образом, увеличение содержания жидкой фазы во фронте реакции может приводить к увеличению скорости горения образцов.

Можно сделать вывод о том, что при содержании в смесях $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ никеля до 20 мас. % преобладает воздействие фактора, уменьшающего скорость горения образцов с увеличением содержания Ni. При возрастании содержания никеля от 20 до 40 мас. % преобладает воздействие фактора, увеличивающего скорость горения, т.е. увеличения содержания жидкой фазы в продуктах реакции. При дальнейшем увеличении содержания никеля в смеси (более 40 мас. %) опять преобладает воздействие фактора уменьшения теплового эффекта реакции, приводящее к уменьшению скорости горения (рис. 4б).

Более значительное увеличение скорости горения при возрастании содержания никеля >20 мас. % наблюдалось при горении образцов из активированных смесей. В предыдущих работах отмечалось, что в процессе МА в активируемые смеси вносятся дополнительные примесные газы [33, 34]. Выделение этих газов за фронтом горения приводит к увеличению длины образцов продуктов в случае МА-смесей вместо усадки про-

дуктов в случае исходных смесей [35, 36] (рис. 7). Кроме того, выделение дополнительных примесных газов за фронтом горения МА-смесей приводит к более существенному возрастанию скорости горения образцов (рис. 4б).

По вышеуказанной причине образцы продуктов МА-смесей сохраняют свою форму в отличие от образцов продуктов исходных смесей во всем исследованном диапазоне значений содержания никеля в смесях $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ (рис. 6б). Результаты данной работы могут быть использованы при получении интерметаллидных сплавов на основе системы Ti–Si–Ni.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено влияние механической активации и содержания никеля в системе $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ на скорость и максимальную температуру горения, удлинение образцов в процессе синтеза, размер композитных частиц и выход смеси после МА, фазовый состав и морфологию продуктов реакции.

Механическая активация смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si}$ позволила реализовать горение, и при этом образцы сгорали полностью. В процессе МА-смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si} + 40\%\text{Ni}$ происходил механохимический синтез продуктов, содержащих тройную фазу – интерметаллидный сплав TiNiSi.

Увеличение содержания более пластичного по сравнению с титаном и кремнием никеля приводит к возрастанию усадки образцов продуктов, увеличению содержания тройных фаз и расплава в продуктах синтеза исходных смесей, а также увеличению размера композитных частиц и уменьшению выхода смеси после МА. Синтезированы интерметаллидные сплавы - тройные фаза TiNiSi, $\text{Ti}_2\text{Ni}_3\text{Si}$, $\text{Ni}_{16}\text{Ti}_6\text{Si}_7$.

Максимальная температура горения монотонно убывает с увеличением содержания никеля в смесях $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ как для исходных, так и для МА-смесей. Это происходит из-за того, что с увеличением содержания Ni, кроме основной экзотермической реакции $5\text{Ti} + 3\text{Si}$ с образованием продукта Ti_5Si_3 , в смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si} + \text{Ni}$ происходят и другие, менее экзотермичные реакции с участием Ni.

Зависимость скорости горения образцов от содержания никеля немонотонна из-за противоположно действующих на скорость горения факторов. С одной стороны, увеличение содержания никеля

уменьшает температуру горения, что снижает скорость горения. С другой – с увеличением содержания никеля увеличивается содержание легкоплавких фаз в продуктах синтеза, что увеличивает скорость горения. Зафиксировано резкое возрастание скорости горения при увеличении содержания никеля от 20 до 30 мас. % в смесях $5\text{Ti} + 3\text{Si} + x\text{Ni}$ после МА. После МА усадка образцов продуктов горения сменяется их удлинением из-за выделения примесных газов в процессе синтеза.

Авторы работы признательны О.Д. Боярченко и М.Л. Бусуриной за помощь в экспериментах, Б.С. Сеплярскому за проявленный интерес и обсуждение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов А.С., Герасимов А.П., Прохорова И.И. Применение эффекта памяти формы в современном машиностроении. М.: Машиностроение, 1981.
2. Гюнтер В.Э., Котенко В.В., Миргазизов М.З. и др. Сплавы с памятью формы в медицине. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1986.
3. Гюнтер В.Э., Итин В.И., Монасевич Л.А. и др. Эффекты памяти форм и их применение в медицине. Новосибирск: Наука, 1992.
4. Сычев А.Е., Вадченко С.Г., Шукин А.С. и др. // Хим. физика. 2022. Т.41. № 1. С. 69; <https://doi.org/10.31857/S0207401X22010150>
5. Вадченко С.Г., Альмов М.И. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 3. С. 22; <https://doi.org/10.31857/S0207401X2203013X>
6. Итин В.И., Монасевич Т.В., Братчиков А.Д. // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33. № 5. С. 48.
7. Итин В.И., Найорденко Ю.С. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. Томск: Из-во Томского ун-та, 1989.
8. Кочетов Н.А., Сеплярский Б.С. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 9. С. 39; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20090058>
9. Корчагин М.А., Григорьева Т.Ф., Бохонов Б.Б. и др. // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39. № 1. С. 51.
10. Корчагин М.А., Григорьева Т.Ф., Бохонов Б.Б. и др. // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39. № 1. С. 60.
11. Кочетов Н.А., Сеплярский Б.С., Шукин А.С. // Физика горения и взрыва. 2019. Т. 55. № 3. С.63; <https://doi.org/10.15372/FGV20190308>
12. Kasraee K., Yousefpoura M., Tayebifard S.A. // Mater. Chem. Phys. 2019. V. 222. P. 286; <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.10.024>
13. Кочетов Н.А., Сеплярский Б.С. // ЖФХ. 2018. Т. 92. № 1. С. 56; <https://doi.org/10.7868/S0044453718010119>
14. Кочетов Н.А., Студеникин И.А. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 1. С. 43; <https://doi.org/10.7868/S0207401X18010089>
15. Jiao Y., Huang L., Wang S. et al. // J. Alloy. Comp. 2017. V. 704. P. 269; <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.044>
16. Wang H.Y., Zha M., Lü S.J. et al. // Solid State Sci. 2010. V. 12 P. 1347; <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2010.05.006>
17. Yeh C., Hwang P., Chen Y. // J. Alloy. Comp. 2017. V. 714. P. 567; <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.283>
18. Wang H.Y., Lü S.J., Xiao W. et al. // J. Am. Ceram. Soc. 2013. V. 96. P. 950. <https://doi.org/10.1111/jace.12079>
19. Kasraee K., Tayebifard A., Salahi E. // Adv. Powder Technol. 2014. V. 25. P. 885; <https://doi.org/10.1016/j.apt.2014.01.008>
20. Zha M., Wang H.Y., Li S.T., et al. // Mater. Chem. Phys. 2009. V. 114. P. 709. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.10.024>
21. Beattie H.J., Ver Snyder F.L., Jr. // Nature. 1956. V. 178. P. 20.
22. Beattie H.J., Hagel W.C., Jr. // Trans. Met. Soc. AIME. 1957. V. 209. P. 911.
23. Gladyshevskii E.I. // Sov. Powder Metall. Met. Ceram. 1962. V. 1. P. 262.
24. Bardos D.I., Gupta K.P., Beck P.A. // Trans. Met. Soc. AIME. 1961. V. 221. P. 1087.
25. Steinmets J., Albrecht J.-M., Malaman B. // C.R. Hebd. Séances Acad. Sci., Ser. C, Sci. Chem. 1974. V. 279C. P. 1119.
26. Jeitschko W., Jordan A.G., Beck P.A. // Trans. Met. Soc. AIME. 1969. V. 245. P. 335.
27. Shoemaker C.B., Shoemaker D.P. // Acta Crystallogr. 1965. V. 18. P. 900.
28. Кочетов Н.А. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 7. С. 39; <https://doi.org/10.31857/S0207401X2207007X>
29. Kochetov N.A., Sytshev A.E. // Mater. Chem. Phys. 2021. V. 257. P. 123727; <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123727>
30. Weitzer F., Naka M., Krendelsberger N. et al. // Z. Anorg. Allg. Chem. 2010. V. 636. № 6. P. 982; <https://doi.org/10.1002/zaac.201000017>
31. Сеплярский Б.С. // Докл. РАН. 2004. Т. 396. № 5. С. 640.
32. Seplyarskii B.S., Kochetkov R.A., Lisina T.G. et al. // Combustion and Flame. 2022. V. 236. 111811; <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111811>
33. Vadchenko S.G. // Intern. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. 2016. V. 25. № 4. P. 210; <https://doi.org/10.3103/S1061386216040105>
34. Vadchenko. S.G. // Ibid. 2015. V. 24. № 2. P. 90; <https://doi.org/10.3103/S1061386215020107>
35. Kamynina O.K., Rogachev A.S., Sytshev A.E. et al. // Ibid. 2004. V. 13. № 3. P.193.
36. Камынина О.К., Рогачев А.С., Умаров Л.М. // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39. № 5. С. 69.

THE EFFECT OF NICKEL CONTENT AND MECHANICAL ACTIVATION ON COMBUSTION IN THE 5Ti + 3Si + xNi SYSTEM

N. A. Kochetov^{1*}, I. D. Kovalev¹

¹*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, Rus. Ac. Sci., Chernogolovka, Russia*

E-mail: kolyan_kochetov@mail.ru

Intermetallic alloys were synthesized in the 5Ti + 3Si + xNi system by the method of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) and mechanosynthesis. The influence of nickel content on the morphology, size and yield of composite particles after mechanical activation (MA) of mixtures was studied. The dependences of the maximum temperatures and combustion rates, phase composition, morphology and elongation of synthesis products on the nickel content for the initial and MA mixtures are studied. Under the conditions of the experiments conducted in this work, combustion process was able to realize and at the same time the samples burned completely at a nickel content of 10 to 60 wt.% in the 5Ti + 3Si + xNi system. After MA, the samples from the 5Ti + 3Si mixture burned to the end, and during the activation of the 5Ti + 3Si + 40% Ni mixture, mechanochemical synthesis occurred. With increasing nickel content combustion temperature decreases, and combustion velocity behaves nonmonotonically, increases the size of composite particles and decreases the yield of the mixture after MA. MA practically did not affect the maximum combustion temperatures of mixtures of 5Ti + 3Si + xNi. A multiple (from 0.7 to 2.9 cm/s) increase in the burning rate of samples from MA mixtures with an increase in the Ni content from 20 to 30 wt. % was recorded. An increase in the nickel content leads to an increase in the content of triple phases and the amount of melt in the synthesis products of mixtures of 5Ti + 3Si + xNi. Shrinkage of product samples increases with increasing nickel content in the initial mixtures. After MA, the shrinkage of the product samples is replaced by their growth. Explanations of the observed dependencies are proposed.

Keywords: combustion, mechanical activation, intermetallic alloy, Ti + Si + Ni, phase composition of products, mechanochemical synthesis, impurity gas release.

REFERENCES

1. *Tikhonov A.S., Gerasimov A.P., Prokhorova I.I.* // Application of shape memory effect in modern mechanical engineering. Moscow: Mashinostroenie, 1981. P. 80.
2. *Gunter V.E., Kotenko V.V., Mirgazitov M.Z. et al.* // Shape memory Alloys in medicine. Tomsk: Publishing house Tomsk. Univ. 1986, P. 208.
3. *Gyunter V.E., Itin V.I., Monasevich L.A. et al.* // Effects of shape memory and their application in medicine. Novosibirsk: Nauka, 1992.
4. *Sytshev A.E., Vadchenko S.G., Shchukin A.S. et al.* // Russ. J. Phys. Chem. B. 2022. V. 16(1). P. 167; <https://doi.org/10.1134/S1990793122010158>
5. *Vadchenko S.G., Alymov M.I.* // Russ. J. Phys. Chem. B. 2022. V. 16.(2). P. 236; <https://doi.org/10.1134/S1990793122020130>
6. *Itin V.I., Monasevich T.V., Bratchikov A.D.* // Combust. Explos. Shock Waves. 1997. V. 33(5). P. 553; <https://doi.org/10.1007/BF02672741>
7. *Itin V.I., Naiborodenko Y.S.* // High-temperature synthesis of intermetallic compounds. Tomsk: Publishing house Tomsk. Univ., 1989, P. 214.
8. *Kochetov N.A., Seplyarskii B.S.* // Combust. Explos. Shock Waves. 2020. V. 56(3). P. 308; <https://doi.org/10.1134/S0010508220030077>
9. *Korchagin M.A., Grigor'eva T.F., Bokhonov B.B. et al.* // Combust. Explos. Shock Waves. 2003. V. 39(1). P. 43; <https://doi.org/10.1023/A:10221972187492>
10. *Korchagin M.A., Grigor'eva T.F., Bokhonov B.B. et al.* // Combust. Explos. Shock Waves. 2003. V. 39(1). P. 51; <https://doi.org/10.1023/A:1022197218749>
11. *Kochetov N.A., Seplyarskii B.S., Shchukin A.S.* // Combust. Explos. Shock Waves. 2019. V. 55(3). P. 300; <https://doi.org/10.1134/S0010508219030080>
12. *Kasraee K., Yousefpoura M., Tayebifard S.A.* // Mater. Chem. Phys. 2019. V. 222. P. 286; <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.10.024>
13. *Kochetov N.A., Seplyarskii B.S.* // Russ. J. Phys. Chem. A. 2018. V. 92(1). P. 47; <https://doi.org/10.1134/S1990793118050172>
14. *Kochetov N.A., Studenikin I.A.* // Russ. J. Phys. Chem. B. 2018. V. 12(1). P. 77; <https://doi.org/10.1134/S1990793118010086>
15. *Jiao Y., Huang L., Wang S. et al.* // J. Alloy. Comp. 2017. V. 704. P. 269; <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.044>
16. *Wang H.Y., Zha M., Lu S.J. et al.* // Solid State Sci. 2010. V. 12 P. 1347; <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2010.05.006>
17. *Yeh C., Hwang P., Chen Y.* // J. Alloy. Comp. 2017. V. 714. P. 567; <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.283>
18. *Wang H.Y., Lu S.J., Xiao W. et al.* // J. Am. Ceram. Soc. 2013. V. 96. P. 950. <https://doi.org/10.1111/jace.12079>
19. *Kasraee K., Tayebifard A., Salahi E.* // Adv. Powder Technol. 2014. V. 25. P. 885; <https://doi.org/10.1016/j.appt.2014.01.008>

20. *Zha M., Wang H.Y., Li S.T., et al.* // Mater. Chem. Phys. 2009. V. 114. P. 709.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.10.024>
21. *Beattie H.J., Ver Snyder F.L., Jr.* // Nature. 1956. V. 178. P. 20.
22. *Beattie H.J., Hagel W.C., Jr.* // Trans. Met. Soc. AIME. 1957. V. 209. P. 911.
23. *Gladyshevskii E.I.* // Sov. Powder Metall. Met. Ceram. 1962. V. 1. P. 262.
24. *Bardos D.I., Gupta K.P., Beck P.A.* // Trans. Met. Soc. AIME. 1961. V. 221. P. 1087.
25. *Steinmetz J., Albrecht J.-M., Malaman B.* // C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., Ser. C, Sci. Chem. 1974. V. 279C. P. 1119.
26. *Jeitschko W., Jordan A.G., Beck P.A.* // Trans. Met. Soc. AIME. 1969. V. 245. P. 335.
27. *Shoemaker C.B., Shoemaker D.P.* // Acta Crystallogr. 1965. V. 18. P. 900.
28. *Kochetov N.A.* // Russ. J. Phys. Chem. B. 2022. V. 16(4). P. 621;
<https://doi.org/10.1134/S1990793122040078>
29. *Kochetov N.A., Sytshev A.E.* // Mater. Chem. Phys. 2021. V. 257. P. 123727;
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123727>
30. *Weitzer F., Naka M., Krendelsberger N. et al.* // Z. Anorg. Allg. Chem. 2010. V. 636. № 6. P. 982;
<https://doi.org/10.1002/zaac.201000017>
31. *Seplyarskii B.S.* // Dokl. Phys. Chem. 2004. V. 396(4–6). P. 130.
32. *Seplyarskii B.S., Kochetkov R.A., Lisina T.G. et al.* // Combustion and Flame. 2022. V. 236. 111811;
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111811>
33. *Vadchenko S.G.* // Intern. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. 2016. V. 25. № 4. P. 210;
<https://doi.org/10.3103/S1061386216040105>
34. *Vadchenko S.G.* // Ibid. 2015. V. 24. № 2. P. 90;
<https://doi.org/10.3103/S1061386215020107>
35. *Kamynina O.K., Rogachev A.S., Sytshev A.E. et al.* // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. 2004. V. 13(3). P. 193.
36. *Kamynina O.K., Rogachev A.S., Umarov L.M. et al.* // Combust. Explos. Shock Waves. 2003. V. 39(5). P. 548;
<https://doi.org/10.1023/A:1026161818701>