

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА РЕЖИМ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ СИНТЕЗА В СИСТЕМЕ $Ti + Al$

Н. А. Кочетов, Б. С. Сеплярский

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова РАН
142432 Черногловка, kolyan_kochetov@mail.ru

Процесс синтеза проводился в смеси $Ti + Al$, подготовленной двумя методами — предварительной механической активации (МА) или предварительного нагрева. Процесс синтеза реализован в двух режимах — послойного горения (СВС) и теплового взрыва. Исследованы зависимости скоростей горения активированных смесей $Ti + Al$ от времени МА. Определены зависимости скоростей и максимальных температур горения исходных смесей, а также удлинения образцов после горения от начальной температуры. Исследован фазовый состав исходных смесей после активации и продуктов синтеза. Экспериментально определено время МА (12 мин), при котором скорость горения смеси максимальна. Для этой смеси (МА 12 мин) исследованы зависимости скоростей и максимальных температур горения, а также удлинения образцов после горения от начальной температуры. Определен режим синтеза, при котором содержание основных фаз ($TiAl$, Ti_3Al) в продуктах максимально.

Ключевые слова: горение, тепловой взрыв, механическая активация, интерметаллиды, $Ti + Al$, алюминид титана, температура горения, фазовый состав продуктов.

DOI 10.15372/FGV20200307

ВВЕДЕНИЕ

Материалы на основе алюминидов титана находят широкое применение, например, в качестве конструкционных материалов для авиакосмических двигателей и промышленных газовых турбин. Они характеризуются высокой температурой плавления, низкой плотностью, высокими значениями модуля упругости, возрастанием предела текучести с повышением температуры, стойкостью к окислению и возгоранию, высоким отношением прочность/плотность [1, 2]. Технологическая значимость системы $Ti + Al$ описана в работах [3–6].

Традиционно сплавы на основе алюминия получают различными металлургическими методами [7–9]. Однако использование этих методов сопряжено с рядом трудностей, вызванных высокой химической активностью исходных компонентов при повышенных температурах, различием температур плавления, испарения и плотности исходных компонентов. Существующая технология их производства очень сложна и многостадийна. Поэтому разработка новых, недорогих технологий получения алюминидов титана является актуальной задачей.

Современной альтернативой получения алюминидов, и в частности алюминидов титана, является синтез с помощью горения, который может осуществляться как в режиме послойного горения (СВС) [10–12], так и в режиме теплового взрыва [13–17].

В нормальных условиях при комнатной температуре не удастся реализовать процесс послойного горения смеси порошков $Ti + Al$. Для его реализации используется предварительный нагрев смеси [12, 18–20]. Альтернативой нагреву является предварительная механоактивация (МА) порошковой смеси [10, 16, 17, 21–23].

В данной работе впервые проведено сравнение различных режимов синтеза горением алюминидов титана (СВС и тепловой взрыв). Процесс послойного горения (СВС) реализован в смесях, подготовленных как с помощью предварительного подогрева, так и с помощью МА исходной смеси.

В процессе МА в реакционной смеси образуются композитные частицы, состоящие из тонких слоев, размер которых значительно меньше размера исходных частиц [24–27]. Предыдущие исследования показали, что в МА-смесях [28, 29] из-за уменьшения характер-

ного размера исходных реагентов горение может проходить в режиме реакционной диффузии. Тогда возникает вопрос: в чем причина горения в случае неактивированной смеси, когда отсутствуют композитные частицы. Причиной может быть образование жидкой фазы в процессе горения за счет увеличения начальной температуры. Наличие жидкой фазы должно сказаться на внешнем виде образцов.

Кроме того, непонятным оставалось, изменится ли механизм реакции при горении активированной смеси при повышении начальной температуры, будут ли наблюдаться плавление и образование жидкой фазы в этом случае. Также в данной работе отслеживались изменения внешнего вида образцов продуктов и их фазового состава при переходе от режима горения к режиму теплового взрыва для МА-смесей.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В данной работе использовался порошок титана марки ПТМ с размером частиц менее 100 мкм и порошок алюминия АСД-4 со средним размером частиц около 10 мкм. Порошок алюминия АСД-4 содержит основного вещества 99.2 % (по массе), порошок титана ПТМ — не менее 99 % титана.

Исходные порошки в требуемых массовых пропорциях для получения стехиометрической смеси $Ti + Al$ (Ti — 64 %, Al — 36 %) перемешивались сухим смешением в фарфоровой ступке до визуального отсутствия неоднородностей.

Механоактивация осуществлялась с использованием стальных шаров диаметром 9 мм при ускорении 90g в механоактиваторе АГО-2 [24–27] с водяным охлаждением в воздушной среде. Перед МА в барабан помещалось 10 г смеси и 200 г шаров. Время активации составляло 1 ÷ 15 мин.

Из исходной, а также активированных смесей методом двухстороннего холодного прессования получали цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 16 ÷ 17 мм. Масса спрессованных образцов составляла 2.7 ÷ 2.9 г, а относительная плотность 0.57 ÷ 0.64. Давление прессования образцов 100 ÷ 140 кг/см².

Горение и тепловой взрыв спрессованных образцов осуществлялись в среде аргона при давлении 760 Торр в камере постоянного давления. Видеозапись процессов проводилась видео-

камерой через смотровое стекло. Горение образцов инициировалось с верхнего торца через поджигающую таблетку состава $Ti + 2B$ нагретой вольфрамовой спиралью, что обеспечивало стабильные условия зажигания. Начальную и максимальную температуры горения и теплового взрыва измеряли вольфрам-рениевой термопарой ВР5/ВР20 с толщиной спая 0.2 мм. Термопара вводилась с нижнего торца образца по его оси на глубину 5 мм. Нагрев образца до требуемой начальной температуры осуществлялся нагреваемой электрическим током молибденовой проволокой, располагающейся вокруг образца (проволока не касалась образца). При достижении желаемого значения начальной температуры подача электрического тока на молибденовую проволоку прекращалась. Горение инициировалось после стабилизации начальной температуры. При покадровом просмотре видеозаписей определяли скорость горения образцов. Для уменьшения погрешности измерений и исключения влияния краевых эффектов при определении скорости горения учитывалась только скорость горения центральной части образца. Погрешности измерения скорости u и максимальной температуры T_{max} горения, а также относительного удлинения образцов $\Delta l/l_0$ находились в пределах 10 %. Каждой точке на графиках зависимостей этих параметров от начальной температуры T_0 соответствует среднее значение по результатам нескольких экспериментов.

Рентгенофазовый анализ продуктов горения и теплового взрыва осуществлялся на дифрактометре ДРОН-3М, на медном излучении, в диапазоне углов $2\theta = 20 \div 80^\circ$.

Микроструктура исходных частиц алюминия и титана, а также шлифы активированных частиц исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Ultra Plus фирмы «Carl Zeiss».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Горение исходных смесей

В образцах, спрессованных из исходной смеси, не удалось инициировать горение без предварительного подогрева. Минимальное значение начальной температуры, при которой было реализовано горение образцов исходной смеси, причем с полным их сгоранием, составило 267 °С. При меньших начальных температу-

рах ($127 \div 200$ °C) горение удавалось реализовать, но фронт горения останавливался, не дойдя до конца образца. Зависимости максимальной температуры горения, скорости горения и удлинения образцов от начальной температуры представлены на рис. 1. Видно, что максимальная температура и скорость горения возрастают с увеличением начальной температуры (рис. 1, *a, б*), что находится в соответствии с классической теорией горения [30, 31]. При этом значения максимальной температуры горения смесей во всем исследованном интервале начальных температур больше температуры плавления алюминия (660 °C), но меньше температур плавления титана (1680 °C) и алюминида титана (1245 °C). Таким образом, из общих соображений следует, что в волне горения возможно плавление лишь алюминия.

Отметим, что расчетная температура горения исходной смеси без подогрева (1520 K) (расчет по программе THERMO <http://www.ism.ac.ru/thermo/>) превышает температуру плавления алюминия. Возникает вопрос, почему такая смесь не горит. Если посмотреть на зависимость максимальной температуры от начальной (см. рис. 1, *a*), то видно, что горение становится возможным при максимальной температуре во фронте 750 °C, что ненамного превышает температуру плавления алюминия. Если экстраполировать зависимость максимальной температуры от начальной в область более низких начальных температур, то из рис. 1, *a* следует, что при комнатной температуре температура во фронте будет меньше температуры плавления алюминия. Этим фактом и объясняется невозможность горения при низкой начальной температуре. Причиной отклонения температуры горения от адиабатической является прежде всего низкая скорость горения (см. рис. 1, *б*), приводящая к большим потерям тепла в окружающую среду. В соответствии с тепловой теорией горения влияние теплопотерь на максимальную температуру горения зависит от скорости горения u следующим образом: a/u^2 , где a — коэффициент теплообмена образца с окружающей средой [30]. Другой причиной низкой температуры горения является состав продуктов горения, отличный от расчетного, т. е. неполное превращение исходной смеси в продукт.

Относительное удлинение образцов, наоборот, уменьшается с увеличением началь-

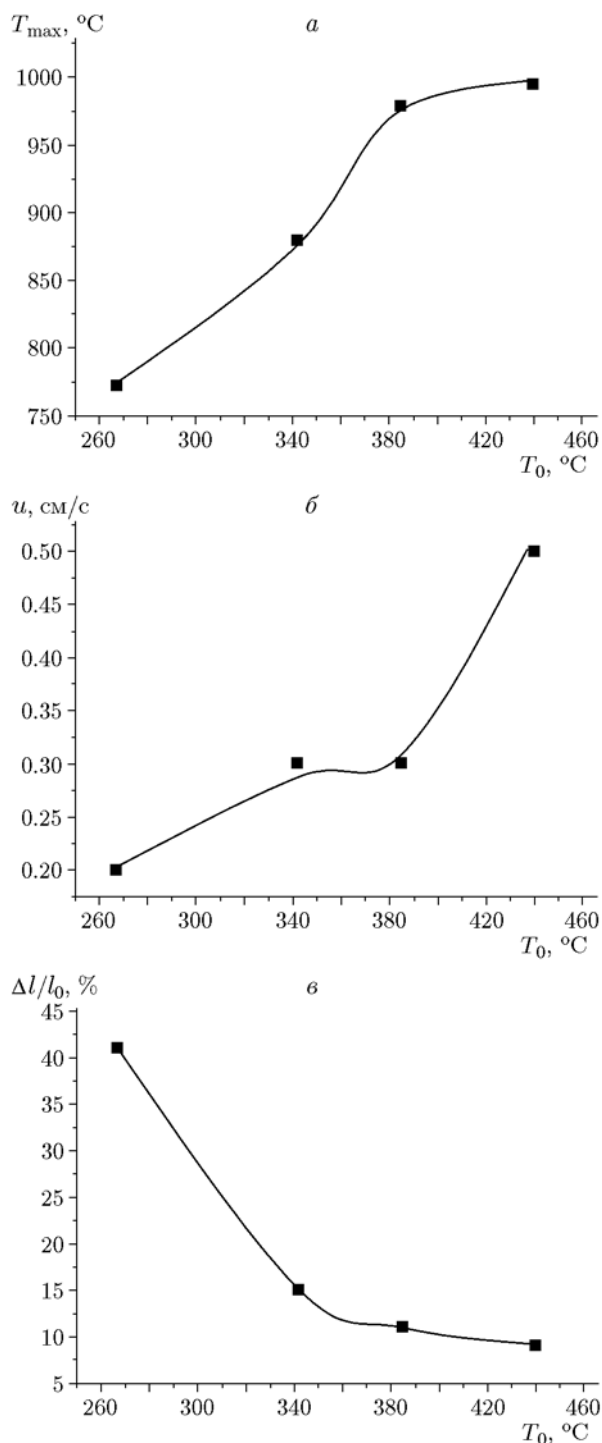


Рис. 1. Зависимости максимальной температуры горения (*a*), скорости горения (*б*), относительного удлинения образцов (*в*) от начальной температуры неактивированной смеси Ti + Al

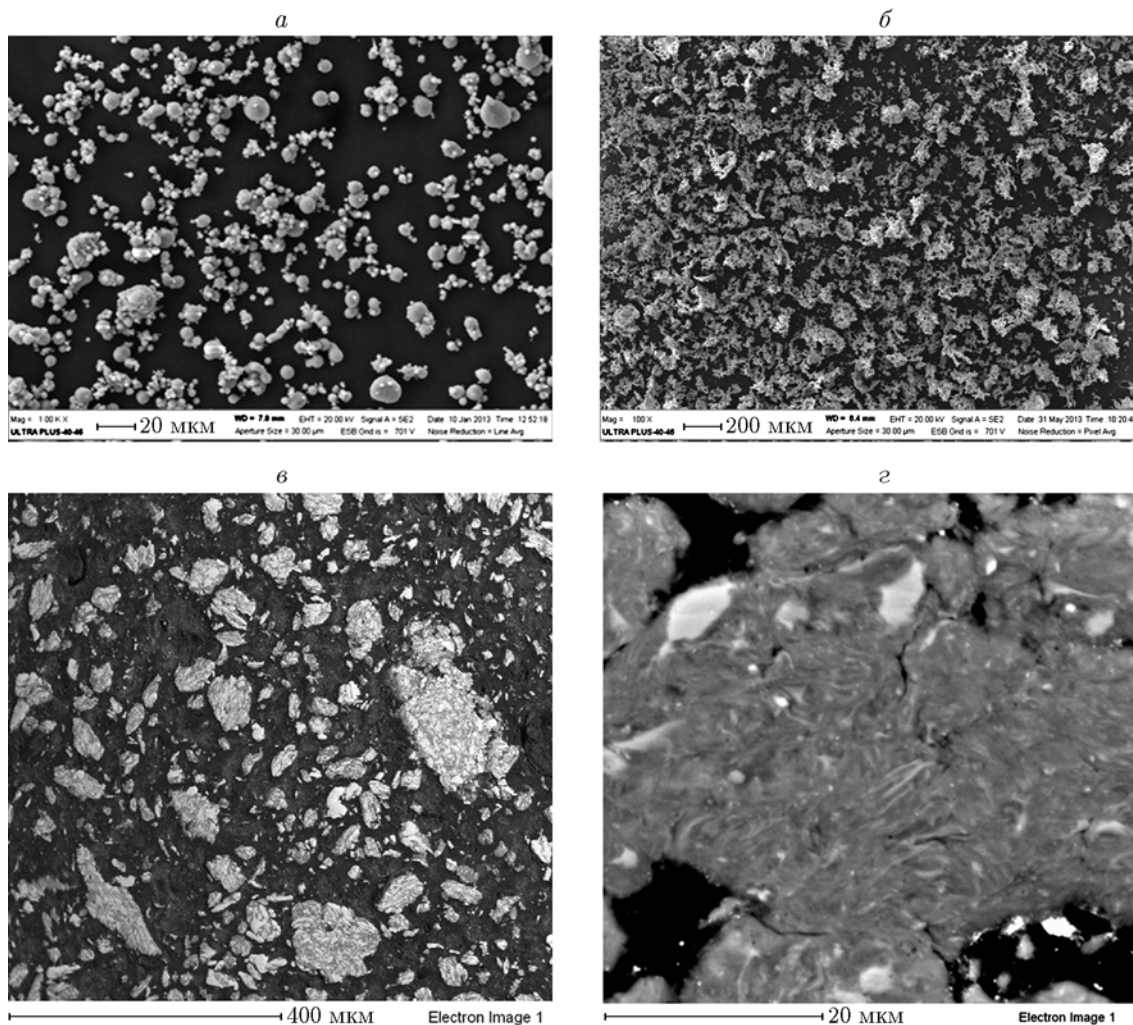


Рис. 2. Фотографии частиц алюминия (а), титана (б) и шлифов активированных частиц при различном увеличении (в, г)

ной температуры (рис. 1, в). Удлинение образца происходит из-за выделения примесных газов за фронтом горения [24–26]. Часть из них выделяется из образца в процессе его нагрева до заданной начальной температуры. С ростом начальной температуры увеличивается количество примесных газов, выделяемых из образца на стадии нагрева, и, соответственно, уменьшается количество примесных газов, выделяемых в процессе горения. Это приводит к наблюдаемой зависимости — уменьшению удлинения образцов при увеличении начальной температуры.

Микроструктура смесей

Фотографии исходных частиц алюминия и титана приведены на рис. 2, а, б. Видно, что раз-

мер частиц титана на порядок больше (фотографии приведены в разных масштабах, отличающихся на порядок), чем частиц алюминия. Кроме того, частицы титана имеют разветвленную дендритную форму, а частицы алюминия — более простую, близкую к сферической. В процессе МА исходные частицы агломерируются и формируют композитные частицы [24–26, 28]. Фотографии шлифов этих композитных частиц активированной смеси представлены на рис. 2, в, г при различном увеличении. Светлые области соответствуют титану, темные — алюминию. Видны как крупные композитные частицы (превосходящие по размеру исходные частицы), так и мелкие (примерно равные размеру исходных частиц). Частицы состоят из длинных вытянутых слоев

исходных компонентов, которые формируются в результате МА (рис. 2,з). Присутствуют отдельные более крупные частицы Ti.

Рентгенофазовый анализ исходных и механоактивированных смесей

По результатам рентгенофазового анализа не выявлено образования продуктов реакции в ходе МА (рис. 3) [32]. На рентгенограммах как исходной, так и активированной в течение 15 мин смесей присутствуют пики алюминия, титана и гидрида титана. Сравнение этих рентгенограмм показывает уширение пиков интенсивности алюминия и титана и уменьшение отношения интенсивности этих пиков к интенсивности фона после МА. Этот факт в большей степени проявляется на пиках алюминия и свидетельствует об увеличении дефектности кристаллической структуры компонентов смесей [32].

Горение механоактивированных смесей

Без предварительного подогрева процесс горения удалось реализовать в смесях, подвер-

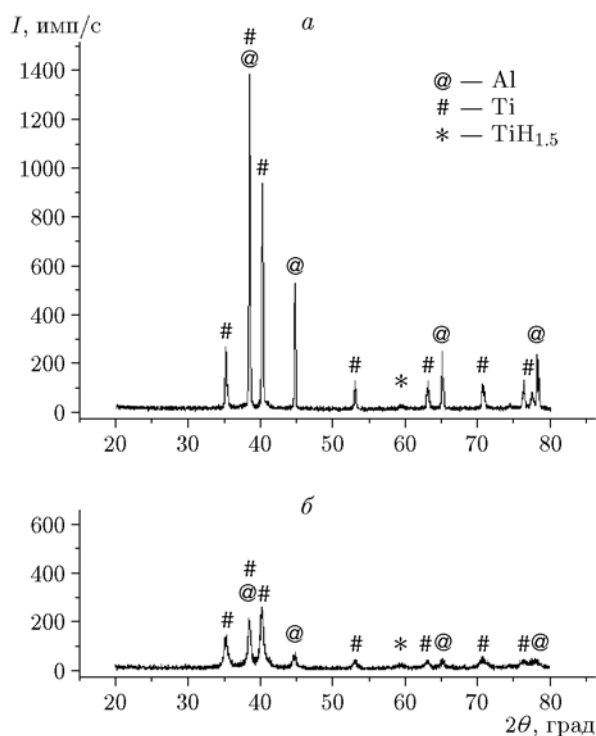


Рис. 3. Рентгенограммы исходной (а) и активированной в течение 15 мин (б) смесей Ti + Al

гавшихся МА 9 мин и больше. При этом максимальная скорость горения получена в смесях при продолжительности МА 12 мин (рис. 4,а). Наиболее вероятной причиной уменьшения скорости горения при длительности МА более 12 мин является частичное превращение вещества на стадии МА. Однако образовавшиеся в ходе МА продукты, скорее всего, находятся в аморфном состоянии, поэтому они не выявлены при рентгенофазовом анализе.

Относительное удлинение образца после горения уменьшается с увеличением продолжительности МА (рис. 4,б).

Для дальнейших исследований использовалась активированная смесь, имеющая максимальную скорость горения (длительность МА 12 мин).

Зависимости скорости горения, максимальной температуры горения и удлинения об-

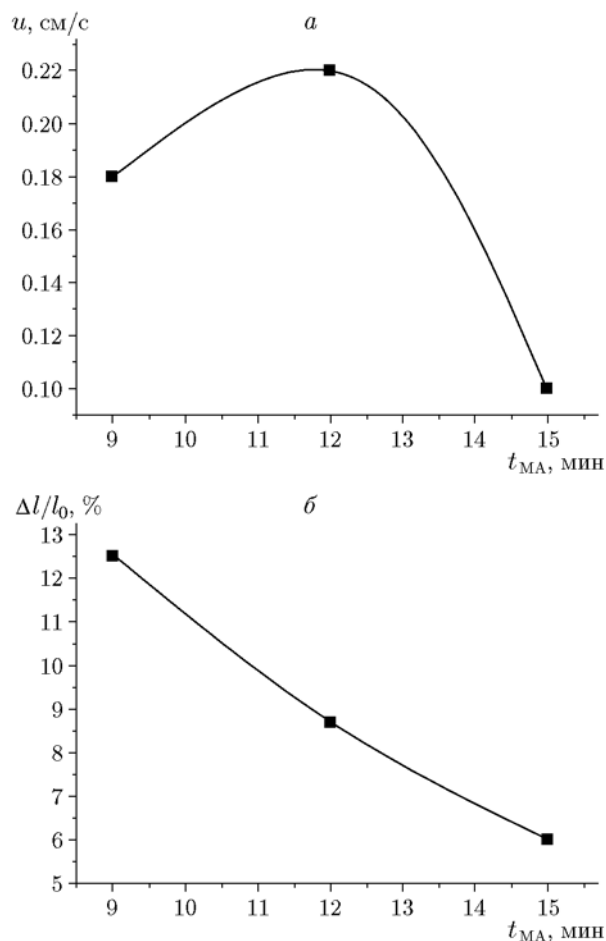


Рис. 4. Зависимости скорости горения (а) и относительного удлинения образца после горения (б) от продолжительности МА

разцов от начальной температуры для смеси $Ti + Al$, активированной 12 мин, представлены на рис. 5. Скорость горения возрастает с увеличением начальной температуры (рис. 5,а). Режим послойного горения удалось реализовать при температурах нагрева, меньших $226\text{ }^{\circ}C$, при $226\text{ }^{\circ}C$ происходил тепловой взрыв образца.

Относительное удлинение образцов из прошедших активацию смесей (рис. 5,б), так же как и из неактивированных смесей, уменьшается с увеличением начальной температуры. При этом удлинение невелико — от 8.7 до 2 %. При всех значениях начальной температуры как исходной, так и МА-смесей, как в режиме горения, так и в режиме теплового взрыва образцы сохраняют первоначальную форму после синтеза. Визуальных следов наличия жидкой фазы в продуктах не обнаружено. Максимальная температура реакции (рис. 5,б) возрастает с увеличением начальной температуры.

Рентгенофазовый анализ продуктов синтеза

Рентгенограммы продуктов горения исходной смеси, полученные при разных начальных температурах, представлены на рис. 6. Основной фазой в продуктах горения исходных смесей является $TiAl$, также присутствуют Ti_3Al и $TiAl_3$. Видно, что рентгенограммы продуктов горения исходных смесей с различными начальными температурами идентичны.

В продуктах смеси, активированной 12 мин, все вышеупомянутые фазы $TiAl$, Ti_3Al и $TiAl_3$ наблюдаются в случае режима горения (рис. 7,а–в). На этой рентгенограмме присутствует также фаза Ti . В продуктах горения МА-смеси, синтезированной в режиме теплового взрыва (рис. 7,з), фаза Ti отсутствует. С увеличением начальной температуры уменьшается содержание фазы $TiAl_3$ в продуктах горения активированной смеси. При синтезе в режиме теплового взрыва (начальная температура $226\text{ }^{\circ}C$) в продуктах МА-смеси обнаружены лишь две основные фазы — $TiAl$, Ti_3Al (рис. 7,з).

Форма образцов продуктов синтеза

Во всем исследованном диапазоне начальных температур ($20 \div 226\text{ }^{\circ}C$) при всех наблюдаемых в данной работе режимах синтеза

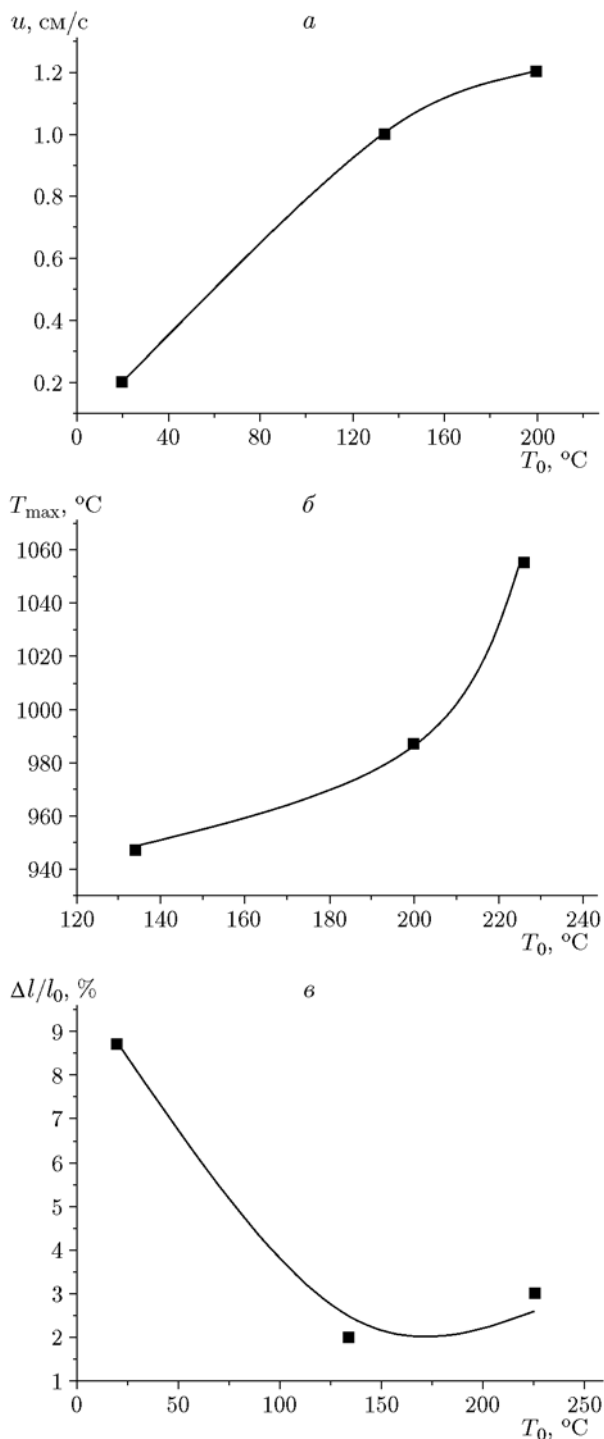


Рис. 5. Зависимости скорости горения (а), максимальной температуры горения (б), относительного удлинения образцов (в) от начальной температуры смеси $Ti + Al$, активированной в течение 12 мин

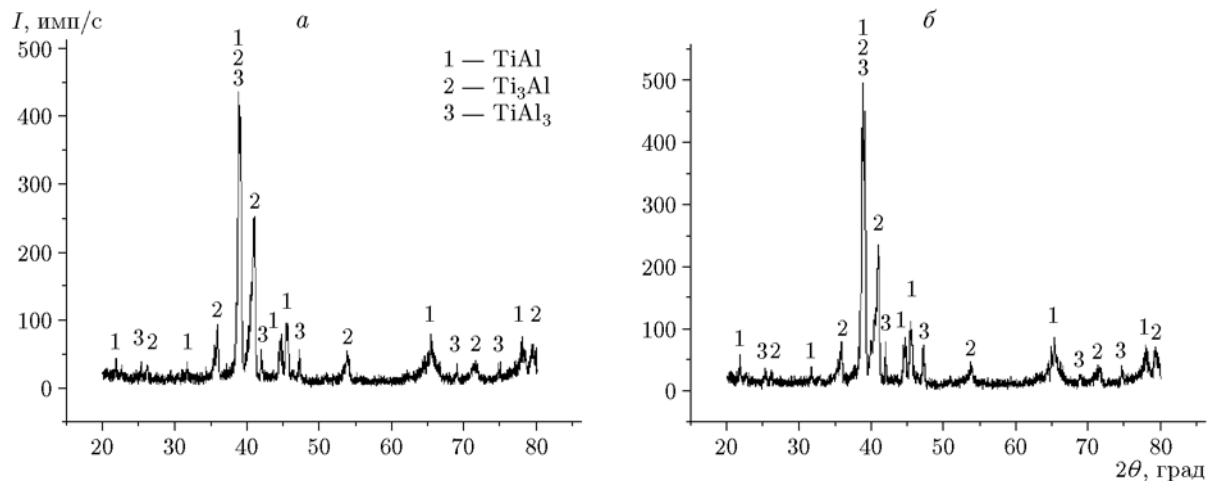


Рис. 6. Рентгенограммы продуктов горения исходной (неактивированной) смеси Ti + Al при начальной температуре 267 (а), 440 °C (б)

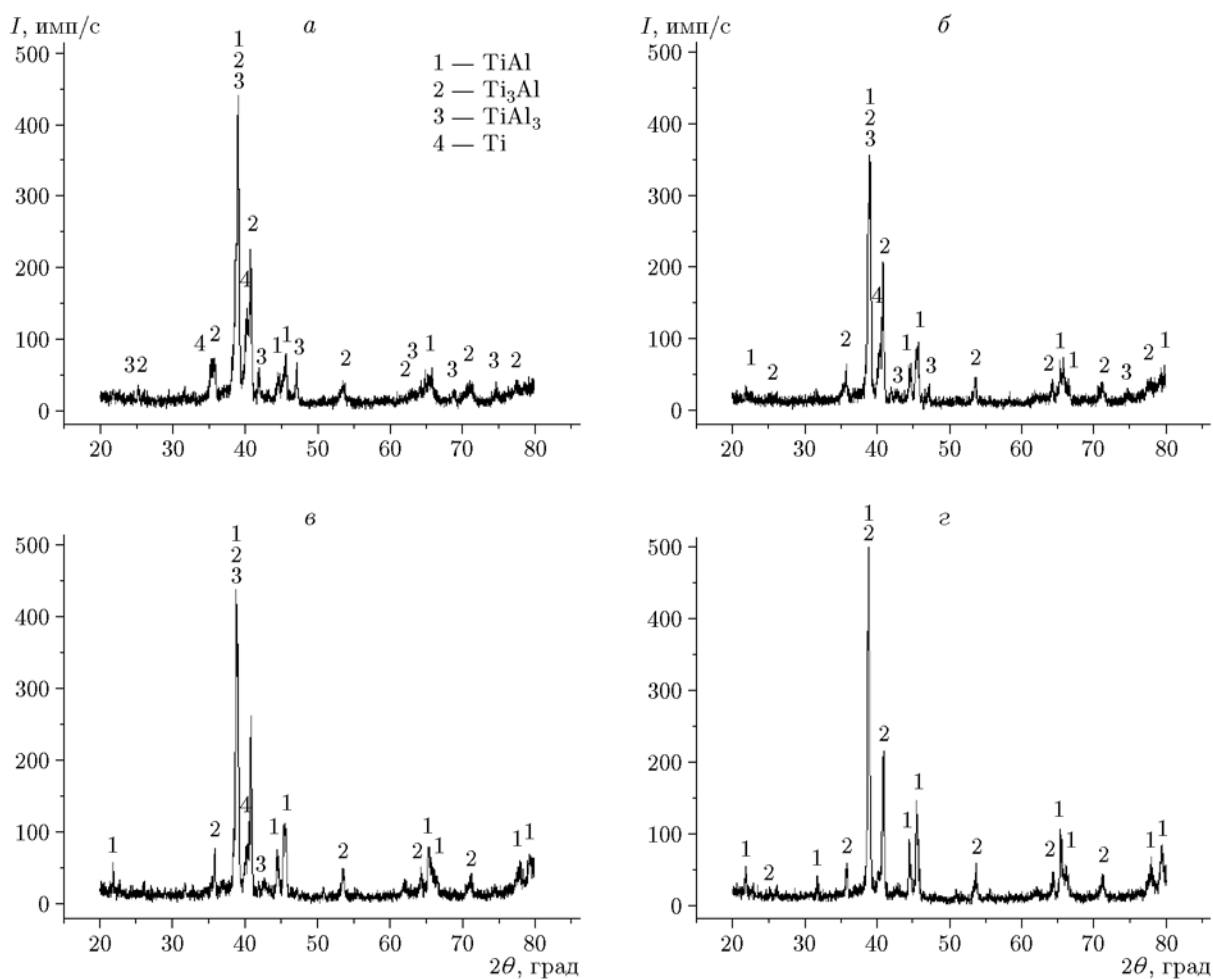


Рис. 7. Рентгенограммы продуктов синтеза активированной в течение 12 мин смеси Ti + Al при начальной температуре 20 (а), 134 (б), 200 (в), 226 °C (г, тепловой взрыв)

(послойное горение и тепловой взрыв) образцы продуктов сохраняют свою первоначальную форму. Визуальные следы присутствия жидкой фазы в продуктах не наблюдаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В системе Ti + Al, не горящей в обычных условиях, реализован процесс послойного горения при комнатной температуре с помощью применения к смеси метода предварительной высокоинтенсивной МА небольшой продолжительности (9 ÷ 15 мин).

Изучено влияние начальной температуры образцов на скорость и максимальную температуру синтеза, удлинение образцов, а также на фазовый состав продуктов синтеза для исходной и МА-смесей Ti + Al.

Зависимость скорости горения от времени МА немонотонна, имеет максимум при времени МА 12 мин.

Определен оптимальный режим синтеза интерметаллов TiAl, Ti₃Al — продолжительность МА 12 мин, начальная температура 226 °C.

Определена область реализации послойного режима горения в МА-смеси Ti + Al.

Показано, что при повышении начальной температуры до 226 °C в МА-смеси происходит тепловой взрыв.

Визуальных следов присутствия жидкой фазы в продуктах синтеза не обнаружено при всех исследованных режимах синтеза как для исходных, так и для МА-смесей.

Результаты данного исследования могут найти применение для оптимизации процесса получения сплавов на основе алюминида титана.

Авторы работы признательны И. Д. Ковалеву за рентгенофазовое исследование смесей и их продуктов синтеза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Doorbar P., Dixon M., Chatterjee A. Aero-engine titanium: from alloys to composites // *Mater. Sci. Forum.* — 2009. — V. 618-619. — P. 127–134. — <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.618-619.127>.
2. Banhart J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foam // *Prog. Mater. Sci.* — 2001. — V. 46, N 6. — P. 559–632.
3. Novoselova T., Celotto S., Morgan R., Fox P., O'Neill W. Formation of TiAl intermetallics by heat treatment of cold-sprayed precursor deposits // *J. Alloys Compd.* — 2007. — V. 436, N 1-2. — P. 69–77. — DOI: 10.1016/j.jallcom.2006.06.101.
4. Palm M., Zhang L. C., Stein F., Sauthoff G. Phases and phase equilibria in the Al-rich part of the Al–Ti system above 900 °C // *Intermetallics.* — 2002. — V. 10, N 6. — P. 523–540. — DOI: 10.1016/S0966-9795(02)00022-5.
5. Przeliorz R., Goral M., Moskal G., Swadzba L. The relationship between specific heat capacity and oxidation resistance of TiAl alloys // *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.* — 2007. — V. 21, N 1. — P. 47–50.
6. Rohatgi A., Harach D. J., Vecchio K. S., Harvey K. P. Resistance-curve and fracture behavior of Ti–Al₃Ti metallic-intermetallic laminate (MIL) composites // *Acta Mater.* — 2003. — V. 51, N 10. — P. 2933–2957. — DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00108-3.
7. McKimpson M. G., Scott T. E. Processing and properties of metal matrix composites containing discontinuous reinforcement // *Mater. Sci. Eng. A.* — 1989. — V. 107, N 1-2. — P. 93–106.
8. Divecha A. P., Fishman S. G., Karmarkar S. D. Silicon carbide reinforced aluminum — a formable composite // *J. Metals.* — 1981. — V. 33, N 9. — P. 12–17.
9. Levi C. G., Abbaschian C. J., Mehrabian R. Interface interactions during fabrication of aluminum alloy — alumina fiber composites // *Metall. Mater. Trans. A.* — 1978. — V. 9, N 5. — P. 697–711.
10. Medda E., Delogu F., Cao G. Combination of mechanochemical activation and self-propagating behaviour for the synthesis of Ti aluminides // *Mater. Sci. Eng. A.* — 2003. — V. 361, N 1-2. — P. 23–28. — [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00566-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00566-5).
11. Orrú R., Cao G., Munir Z. A. Field-activated combustion synthesis of titanium aluminides // *Metall. Mater. Trans. A.* — 1999. — V. 30, N 4. — P. 1101–1108.
12. Adeli M., Seyedein S. H., Aboutalebi M. R., Kobashi M., Kanetake N. A study on the combustion synthesis of titanium aluminide in the self-propagating mode // *J. Alloys Compd.* — 2010. — V. 497, N 1-2. — P. 100–104. — <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.03.050>.
13. Lee S. H., Lee J. H., Lee Y. H., Shin D. H., Kim Y. S. Effect of heating rate on the combustion synthesis of intermetallics // *Mater. Sci. Eng. A.* — 2000. — V. 281, N 1-2. — P. 275–285.
14. Bertolino N., Monagheddu M., Tacca A., Giuliani P., Zanotti C., Anselmi Tamburini U. Ignition mechanism in combustion synthesis of Ti–Al and Ti–Ni systems // *Intermetallics.* — 2003. — V. 11, N 1. — P. 41–49.
15. Boyarchenko O. D., Kamynina O. K., Sytshev A. E., Vadchenko S. G., Gotman I., Umarov L. M. Synthesis of Ti–Al-based materials by thermal explosion //

- Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. — 2010. — V. 19, N 4. — P. 285–291. — DOI: 10.3103/S1061386210040084.
16. **Корчагин М. А.** Тепловой взрыв в механически активированных низкокалорийных составах // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 5. — С. 77–86. — DOI: 10.15372/FGV20150509.
17. **Filimonov V. Yu., Korchagin M. A., Di-etenberg I. A., Tyumentsev A. N., Lyakhov N. Z.** High temperature synthesis of single-phase Ti_3Al intermetallic compound in mechanically activated powder mixture // Powder Technol. — 2013. — V. 235. — P. 606–613. — DOI: 10.1016/j.powtec.2012.11.022.
18. **Кванин В. Л., Балихина Н. Т., Вадченко С. Г., Боровинская И. П., Сычев А. Е.** Получение интерметаллида $\gamma\text{-TiAl}$ методом СВС прессования // Неорг. материалы. — 2008. — Т. 44, № 11. — С. 1327–1331. — DOI: 10.1134/S0020168508110095.
19. **Yi H., Petric A., Moore J. J.** Effect of heating rate on the combustion synthesis of Ti—Al intermetallic compounds // J. Mater. Sci. — 1992. — V. 27, N 24. — P. 6797–6806. — DOI: 10.1007/BF01165971.
20. **Che H. Q., Fan Q. C.** Microstructural evolution during the ignition/quenching of preheated Ti/3Al powders // J. Alloys Compd. — 2009. — V. 475, N 1–2. — P. 184–190. — DOI: 10.1016/j.jallcom.2008.07.035.
21. **Matsubara T., Uenishi K., Kobayashi K. F.** Fabrication of thick intermetallic compound Al_3Ti layer on metal substrate by combustion synthesis of ball-milled powder // Mater. Trans., JIM. — 2000. — V. 41, N 5. — P. 631–634. — DOI: 10.2320/matertrans1989.41.631.
22. **Medda E., Delogu F., Cao G.** Combination of mechanochemical activation and self-propagating behaviour for the synthesis of Ti aluminides // Mater. Sci. Eng. A. — 2003. — V. 361, N 1–2. — P. 23–28. — DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00566-5.
23. **Filimonov V. Yu., Sitnikov A. A., Afanas'ev A. V., Loginova M. V., Yakovlev V. I., Negodyaev A. Z., Schreifer D. V., Solov'ev V. A.** Microwave assisted combustion synthesis in mechanically activated 3Ti + Al powder mixtures: structure Formation // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. — 2014. — V. 23, N 1. — P. 18–25. — DOI: 10.3103/S1061386214010038.
24. **Кочетов Н. А., Сеплярский Б. С.** Влияние длительности механической активации гранулированных смесей 5Ti + 3Si на скорость распространения волны горения и удлинение образцов в процессе взаимодействия // Журн. физ. химии. — 2018. — Т. 92, № 1. — С. 56–61. — DOI: 10.7868/S0044453718010119.
25. **Кочетов Н. А., Сеплярский Б. С.** Влияние механической активации гранулированных и порошковых смесей Ni + Al на скорость распространения пламени и удлинение образцов в процессе горения // Хим. физика. — 2018. — Т. 37, № 10. — С. 44–50. — DOI: 10.1134/S0207401X18100059.
26. **Кочетов Н. А.** Горение и характеристики механически активированной смеси Ni+Al. Влияние массы и размера измельчающих тел (шаров) // Хим. физика. — 2016. — Т. 35, № 7. — С. 49–54. — DOI: 10.7868/S0207401X16070049.
27. **Кочетов Н. А., Вадченко С. Г.** Влияние времени механической активации смеси Ti + 2B на горение цилиндрических и ленточных образцов // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 4. — С. 77–81.
28. **Kovalev D. Yu., Kochetov N. A., Ponomarev V. I., Mukasyan A. S.** Effect of mechanical activation on thermal explosion in Ni—Al mixtures // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. — 2010. — V. 19, N 2. — P. 120–125. — DOI: 10.3103/S106138621002007X.
29. **Корчагин М. А., Григорьева Т. Ф., Боханов Б. Б., Шарафутдинов М. Р., Баринова А. П., Ляхов Н. З.** Твердофазный режим горения в механически активированных СВС-системах. I. Влияние продолжительности механической активации на характеристики процесса и состав продуктов горения // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 1. — С. 51–59.
30. **Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М.** Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980.
31. **Рогачев А. С., Мукасян А. С.** Горение для синтеза материалов. — М.: Физматлит, 2012.
32. **Kovalev D. Yu., Kochetov N. A.** Behavior of the Ti—Al system during mechanical activation // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. — 2013. — V. 22, N 1. — P. 56–59. — DOI: 10.3103/S1061386213010056.

Поступила в редакцию 20.06.2019.

После доработки 13.08.2019.

Принята к публикации 28.08.2019.