

# ТЕПЛОЙ ВЗРЫВ В МЕХАНИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫХ СМЕСЯХ ТИТАНА С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Ш.Е. Габдрашова<sup>1\*</sup>, Г.Б. Буркашева<sup>1</sup>, С.Е. Токтагул<sup>1</sup>, М.А. Корчагин<sup>2</sup>, М.И. Тулепов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>КазНУ им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби 71, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, ул. Кутателадзе, 18, Новосибирск, Россия

Дата поступления:

2 ноября 2020

Принято на печать:

7 декабря 2020

Доступно онлайн:

28 декабря 2020

УДК: 666:622.2

## АННОТАЦИЯ

Настоящая работа посвящена взаимодействию многостенных углеродных нанотрубок с металлическим титаном при высокоэнергетическом шаровом измельчении и тепловом взрыве. Проведен анализ зависимости характеристик горения нанокомпозитов от продолжительности измельчения порошковых смесей. Методом рентгеновской дифракции проанализированы фазовые и структурные превращения смесей Ti-МУНТ.

*Ключевые слова:* углеродные нанотрубки, титан, тепловой взрыв, механоактивация.

## Введение

В настоящее время усилия ученых, в основном, направлены на разработку композиционных материалов, упрочненных углеродными нанотрубками. Исследованию структуры, свойств композиционных материалов, содержащих углеродные нанотрубки посвящено множество статей [1-4]. Большой интерес представляет введения углеродных нанотрубок (УНТ) в металлические матрицы, таких как Cu [5,6], Mg [7-9], Al [10-13], Ni [14-16].

Уникальные свойства углеродных нанотрубок дают возможность использовать их в различных отраслях науки и технологии. Они очень легкие, обладают высокой прочностью на растяжение, и отличной теплопроводностью [17-20]. Модифицирование материалов углеродными нанотрубками открывает новые области их применения. С введением углеродных нанотрубок существенно меняются свойства материалов и изделий из них.

Одним из перспективным материалом металлической матрицы является Ti и его сплавы. Высокая удельная прочность Ti и его сплавов позволяет использовать их в качестве технических материалов с малым удельным весом и вы-

сокой прочностью. С целью улучшить свойства Ti и получить новые перспективные композиционные материалы на его основе, углеродные нанотрубки добавляют в матрицу титана [21-23]. Большинство работ по получению композиционных материалов на основе металлических матриц, упрочненных углеродными нанотрубками, выполнено методами порошковой металлургии, искрового плазменного спекания (SPS), с предварительной механической активацией в планетарной шаровой мельнице.

В последние годы растет интерес к совмещению механическую активацию (МА) порошковых смесей с методами самораспространяющегося синтеза. Это связано с тем, что предварительная механическая активация порошковых смесей позволяет значительно расширить возможности самораспространяющегося синтеза неорганических материалов [24]. Например, увеличить концентрационные пределы горения, использовать для синтеза такие составы, которые в обычных условиях не горят из-за низкой калорийности, отказаться от необходимости прессования исходных образцов и реализовать твердофазный режим горения [25-27]. Во многих экзотермических системах, после предварительной МА и последующей самораспространяющейся реакции, удается получить

монофазные продукты с наноразмерным зерном. Проблема многофазности образующихся продуктов характерна для многих СВС составов, в частности практически для всех интерметаллидных систем [28-30].

К настоящему времени особенности динамики процесса тепловыделения в режиме теплового взрыва (ТВ) для получения композиционных материалов с металлическими матрицами, упрочненными наноразмерными частицами еще мало изучены. К тому же, синтез в режиме ТВ обладает рядом преимуществ, обусловленных возможностью внешнего воздействия на реакционную способность смеси путем изменения темпа внешнего нагрева, температуры окружающей среды, времени выдержки образца после прохождения реакции и т.д. Все это способствует более полному прохождению реакции, что особенно важно для низкокалорийных составов. Более того, термограммы ТВ позволяют получать информацию о таких важных параметрах синтеза как, критические условия инициирования ТВ и максимальных температурах реакции. И обработка этих термограмм позволяет получать данные о значениях эффективной энергии активации и кинетике химической реакции [31].

В данной работе приведены результаты исследований влияния МА на основные параметры теплового взрыва в низкокалорийных составах Ti + 4% УНТ, с использованием планетарной шаровой мельницы АГО-2 с водяным охлаждением [32], которая является самой энергонапряженной из всех аппаратов этого типа [33].

## Экспериментальная часть

Для приготовления исходных реакционных смесей состава Ti + 4 % УНТ использовались: титан (марки ПТОМ-2, 98,50% Ti) и углеродные нанотрубки марки МУНТ-3, полученные в институте катализа им. Г.К. Борескова СО РАН [34]. На рисунках 1 и 2, приведены микрофотографии исходных порошков титана и углеродных нанотрубок, а в таблице 1 приведены основные характеристики УНТ.

Методика приготовления исходных смесей УНТ с титаном заключалась в следующем: углеродные нанотрубки были обрабатывались в спирте в течение 10 мин в ультразвуковом низкочастотном диспергаторе УЗДН-1У4.2. К полученной спиртовой суспензии добавили заданное количество порошка титана и после этого образец сушили в сушильном шкафу при 40 °С в течение 1 ч. После этого для повышения гомогенности смеси образец растирали в фарфоровой ступке. Полученная смесь исходных реагентов подвергалась механической активации.

Механическую активацию реакционных смесей проводили в планетарной шаровой мельнице АГО – 2 с водяным охлаждением [32]. Объем каждого из двух стальных барабанов мельницы 160 см<sup>3</sup>. Диаметр шаров 8 мм, масса шаров в каждом барабане 200 грамм, масса образца 10 г. Центробежное ускорение шаров 400 м с<sup>-2</sup> (40 g). Для предотвращения окисления во время МА барабаны с образцами заполнялись аргоном. После МА образцы выгружались из барабанов в боксе с аргоновой

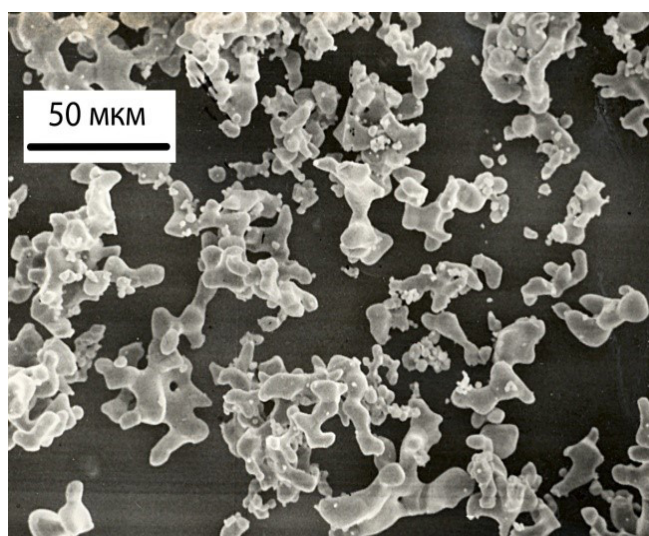


Рис. 1. Микрофотография порошка титана марки ПТОМ 2.

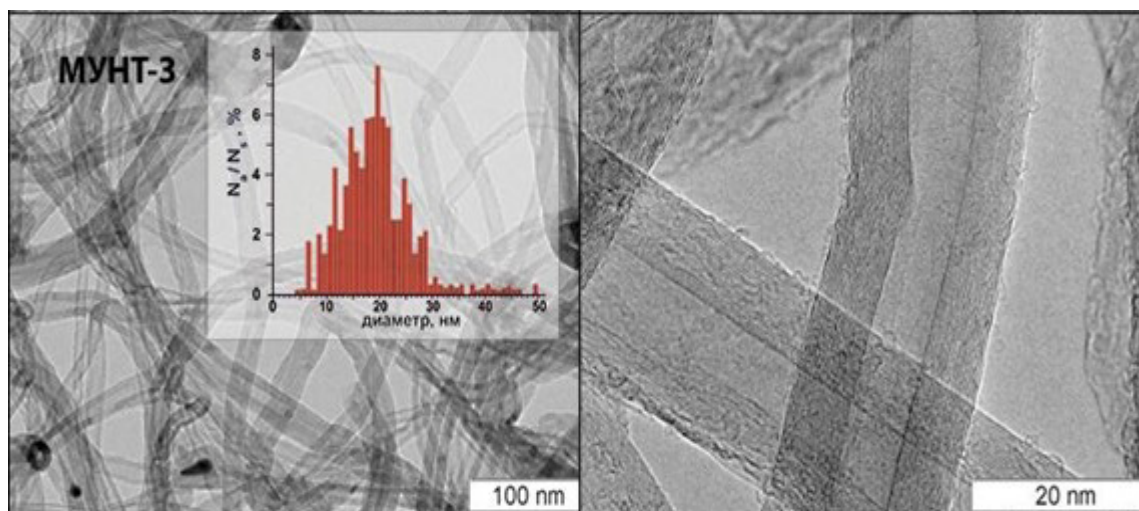


Рис. 2. Микрофотография и гистограмма углеродных нанотрубок марки МУНТ-3

**Таблица 1**

Характеристика углеродных нанотрубок марки МУНТ-3

Марка	МУНТ-3
Внешний диаметр, средний, нм	19
Количество стенок	12-14
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	115
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	0,1-0,3
Длина нанотрубок	5-25 мкм
Чистота	> 95 %

атмосферой. Время активации изменялось от 1 до 11 мин.

Полученные МА образцы использовались для проведения ТВ. Схема экспериментальной установки для проведения реакции в режиме динамического ТВ в атмосфере аргона приведена на рис. 3. Основным конструктивным элементом установки является специализированный реактор, созданный на базе индукционной тигельной электропечи ИЛТ-0,0005/1,0 – 22 – И1 (ЗАО НПП «ЭПОС», НГТУ). В этой печи медный трубчатый, водоохлаждаемый индуктор нагревает графитовый тигель. В тигель вставляется алундовый тигель с образцом. Масса образца 35 г. Образцы уплотнялись до относительной плотности 0,35–0,4. Мощность печи 1 кВт. Частота тока индуктора 22 кГц. Максимальная скорость нагрева образца в данной установке в атмосфере аргона – 60 град/мин. Максимальная температура нагрева 1100 °С. Скорость нагрева и температура печи контролировались с

использованием блока управления печи. Для записи термограмм использовались вольфрам-рениевые термопары (ВАР 5/ВР 20) диаметром 100 мкм. Сигнал с термопары поступал на аналого-цифровой преобразователь ЛА – 2USB – 14 и далее на компьютер.

Перед нагревом образцов и после ТВ реактор продувался аргоном. В предварительных экспериментах было установлено, что в этом случае окисление образцов не происходит. Скорость нагрева образцов была выбрана постоянной (40 град/мин).

Реакционные смеси после МА и продукты теплового взрыва исследовались с помощью рентгенофазового анализа (РФА) и сканирующей электронной микроскопии. Рентгенограммы снимались на дифрактометрах ДРОН-4,0 и D 8 ADVANCE (Bruker) с использованием  $\text{Cu K}\alpha$  излучения. Электронно-микроскопическое изучение проведено на сканирующих микроскопах ТМ-1000, S-3400 N (Hitachi), Carl Zeiss EVO50 XVP (X-Act).

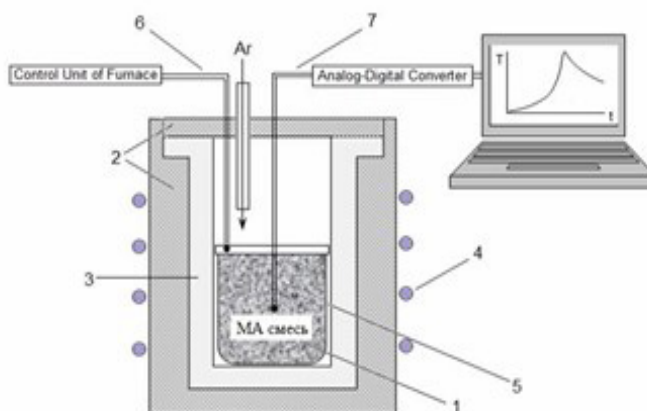


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – МА-смесь, 2 – керамический блок, 3 – графитовый тигель, 4 – индуктор, 5 – алундовый тигель, 6 – блок управления печи, 7 – термопара печи, 8 – вольфрам-рениевая термопара ВР5/ВР20, 9 – АЦП, 10 – компьютер.

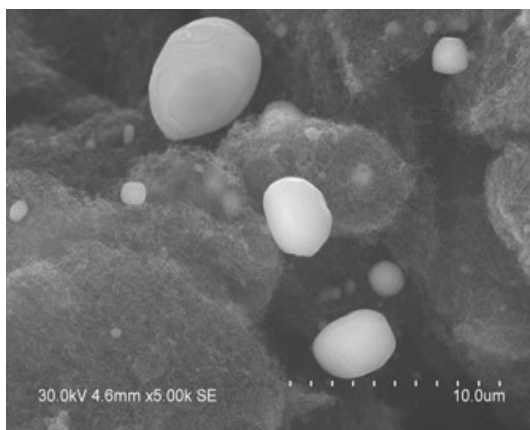


Рис. 4. Микрофотографии исходной смеси Ti + 4% УНТ.

## Результаты и обсуждения

Известно, что при механической обработке в планетарных мельницах существенно изменяется микроструктура и морфология исходных реагентов. В смесях хрупких веществ в основном происходит измельчение, а в смесях пластичных металлов, или смесях пластичных металлов с аморфными углеродом или бором, происходит образование механокомпозитов. Это, как правило, довольно крупные образования с размерами от десятков до сотен микрон, а в некоторых составах и крупнее, вплоть до миллиметровых размеров. Но размер зерна исходных компонентов в этих композитах уменьшается до нанометровых значений.

На рисунке 4 приведены микрофотографии смеси исходных компонентов, полученной по

выше описанной методике. В исходной смеси частицы имеют разные формы и размеры, а углеродные нанотрубки покрывают частиц порошка титана.

В результате исследования изменения морфологии МА образцов установлено, что уже после 2 мин механической активацией образуются механокомпозиты различных размеров неправильной формы, некоторые из которых имеют пластинчатую форму. Уже после 2 мин на поверхности частиц титана отсутствует углеродные нанотрубки, что свидетельствует об их встраивании в объем механокомпозитов (рисунок 5).

При увеличении продолжительности МА более крупные механокомпозиты приобретают округлую форму, а из более мелких начинается образование неплотных агломератов

(при 4-5 мин МА). В дальнейшем число таких агломератов увеличивается, повышается их плотность.

По результатам рентгенофазового анализа установлено, что после 1,5 мин МА кроме линий титана на рентгенограмме присутствуют и слабые линии TiC. Это свидетельствует о том, что начинается частичное образование первичных продуктов взаимодействия УНТ с титаном уже в барабанах мельницы. При увеличении времени МА увеличивается интенсивность и ширина этих линий TiC.

Рентгенограмма образца после 2 мин МА и рентгенограмма продуктов ТВ этого образца приведены на рисунке 6.

На рисунке 7 приведены рентгенограммы образца исследуемого состава без МА (а) и после 4 мин МА (б). Видно, что после 4 мин МА на рентгенограмме появляются более интенсивные линии TiC.

После 8 мин МА на рентгенограммах присутствуют anomalно широкие линии титана и TiC (рисунок 8).

Предварительная МА исходных порошковых смесей, которая приводит к существенному изменению микроструктуры образца и аккумуляции подводимой энергии существенно влияет на основные параметры последующего теплового взрыва. Для ТВ основными являются температура инициирования ТВ ( $T_{ign}$ ), максимальная температура процесса ( $T_{max}$ ) и фазовый состав конечных продуктов.

Тепловой взрыв в активированных образцах состава Ti + 4 % УНТ удается реализовать, начиная с 1,5 мин МА. При 346 °C начинается плавное тепловыделение до 573 °C и потом

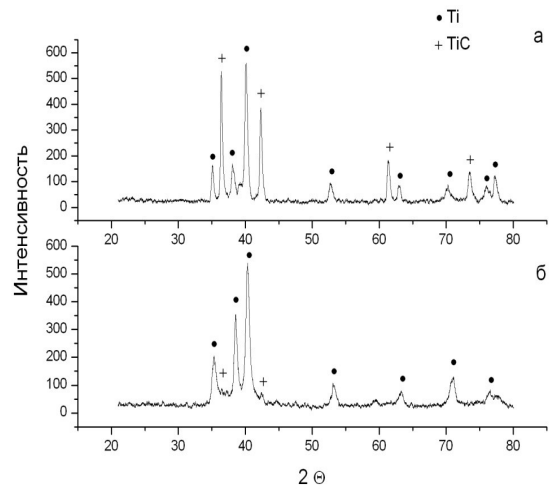


Рис. 6. (а) рентгенограмма продуктов ТВ состава Ti + 4 мас. % УНТ после 2 мин. МА, (б) рентгенограмма образца состава Ti + 4 мас. % УНТ после 2 мин МА.

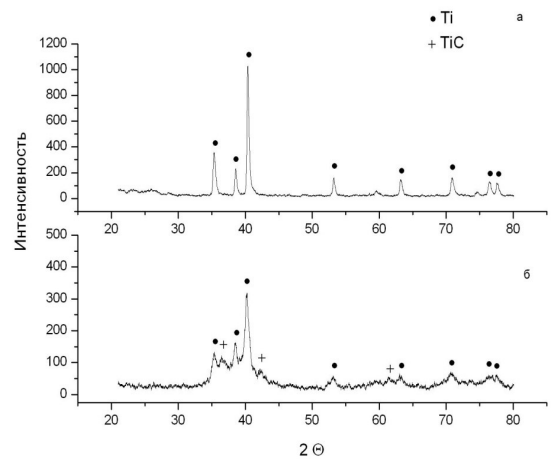


Рис. 7. (а) рентгенограмма исходных смеси без МА, (б) рентгенограмма после 4 мин МА.

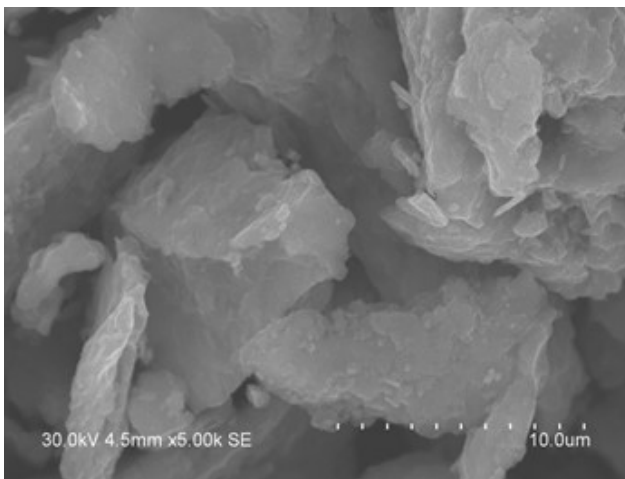


Рис. 5. Микрофотографии образца Ti + 4% УНТ после 2 мин МА.

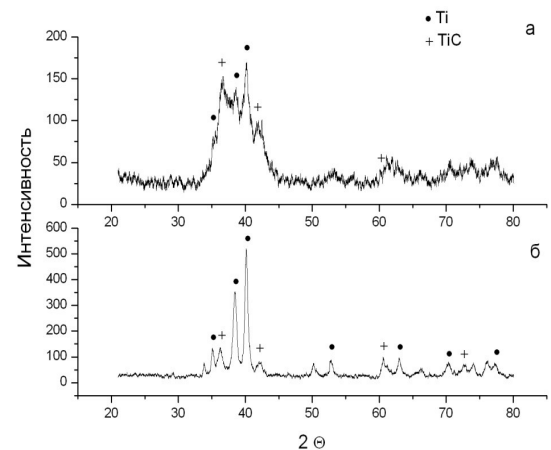


Рис. 8. Рентгенограмма образца состава Ti + 4 мас. % УНТ после 8 мин. МА

наблюдается резкий рост температуры до максимального значения ТВ, которое равно 1050 °С (рис. 10). При меньших временах МА, при 1 мин не реализуется ТВ, а наблюдается только слабое тепловыделение начиная при температуре 350 °С, и температура повышается до 770 °С (рис. 9).

Установлено, что характер ТВ меняется с увеличением времени предварительной механической активации. После 3 мин МА в образце при 346 °С начинается предварительное плавное тепловыделение до температуры 441 °С, и реализуется тепловой взрыв, максимальная температура равна 930 °С. С увеличением времени механической активации от 1,5 до 7 мин участок с плавным тепловыделением сокращается практически до нуля.

На рисунке 11 (а) приведена термограмма ТВ образца после 5 мин МА., в этом образце небольшое тепловыделение начинается при 336 °С до 385 °С и резкий ТВ с максимальной температурой 835 °С. А после 7 мин. нет участка с плавным тепловыделением, а сразу же при 345 °С наблюдается ТВ, максимальная температура ТВ равна 790 °С (рисунок 11 б).

Установлено, что после 8 мин МА не реализуется ТВ, как и после 1 мин, а наблюдается только медленное тепловыделение до максимальной температуры 613 °С (рис. 12).

Обработка соответствующих термограмм теплового взрыва дает возможность получать зависимости  $T_{ign}$  и  $T_{max}$  от времени предварительной активации исходной смеси (рис. 13).

На рисунке 13 приведены зависимости значений  $T_{ign}$  и  $T_{max}$  для состава Ti + 4% УНТ от времени предварительной активации исходной порошковой смеси. При скорости нагрева

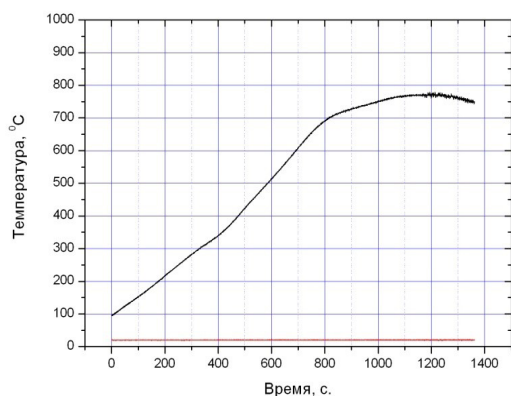


Рис. 9. Термограмма тепловыделения в образце после 1 мин предварительной МА.

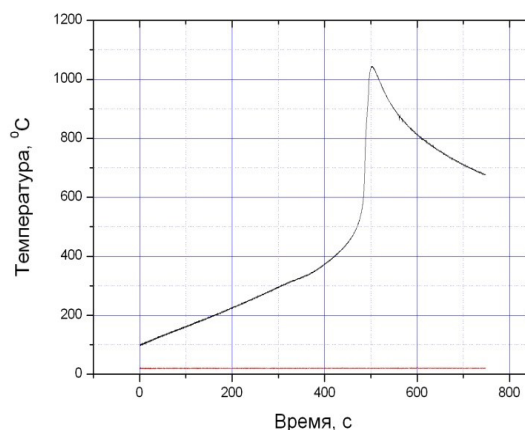
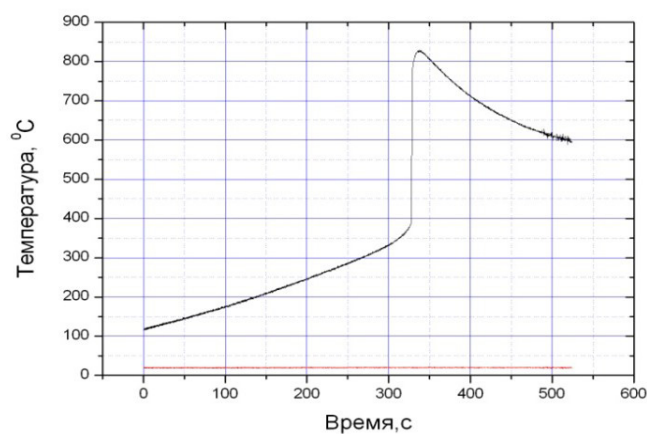
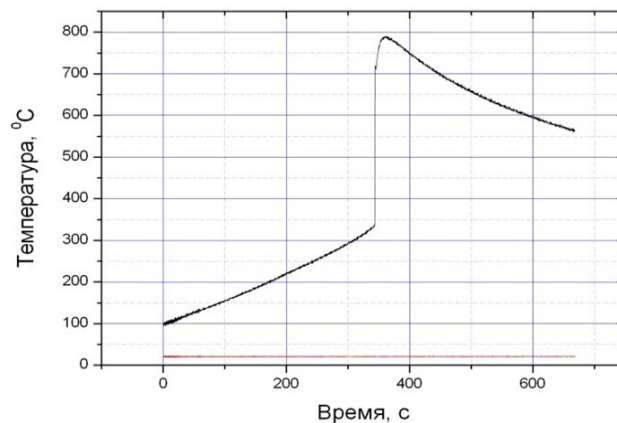


Рис. 10. Термограмма теплового взрыва образца после 1,5 мин предварительной МА.



(а)



(б)

Рис. 11. Термограммы теплового взрыва образца после 5 мин (а) и 7 мин (б) предварительной МА.

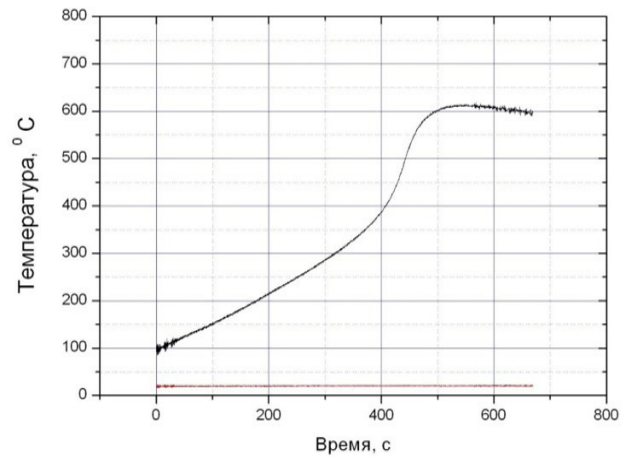


Рис. 12. Термограмма тепловыделения в образце после 8 мин предварительной МА.

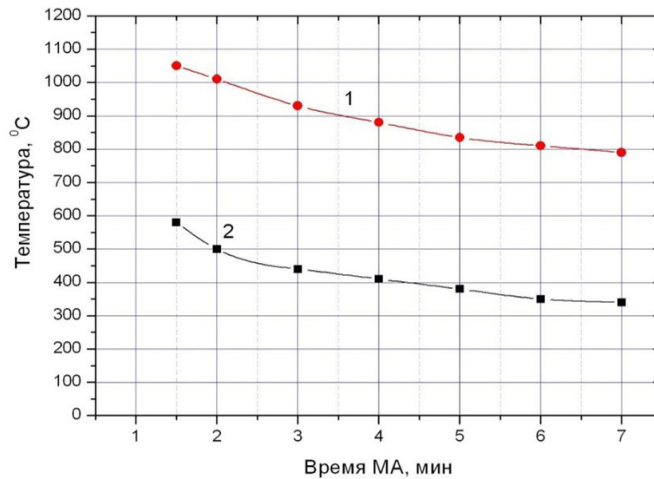


Рис. 13. Зависимость значений максимальных температур ( $T_{max}$ ) и температуры инициирования ( $T_{ign}$ ) теплового взрыва от времени МА для состава  $Ti + 4 \text{ мас.}\% \text{УНТ}$ , 1 -  $T_{max}$ , 2 -  $T_{ign}$ .

образца 40 град/мин тепловой взрыв в образцах данного состава реализуется, начиная с 1,5 мин. предварительной МА. Видно, что при увеличении времени МА температура инициирования ТВ снижается от температуры 590 °C до температуры 350 °C. Эти данные получены при скорости нагрева образцов 40 град/мин.

Каждая экспериментальная точка на этих графиках зависимостей  $T_{ign}$  и  $T_{max}$  ТВ определена как среднеарифметическое трех- четырех измерений. Ошибка измерений температуры ( $\pm 15$  °C) отражена размерами экспериментальных точек на данных графиках.

Значения максимальных температур реакции также снижаются от 1050 до 798 °C при увеличении продолжительности МА (рис. 13).

Эти значений максимальных температур ( $T_{max}$ ) и температуры инициирования ( $T_{ign}$ ) теплового взрыва можно сравнивать с значениями искусственно созданного низкокалорийного состава  $Ti + 4 \text{ мас.}\% \text{C}$  [35]. Установлено, что при скорости нагрева образца 40 град/мин тепловой взрыв в образцах состава реализуется, начиная с 3 мин. предварительной МА. Как показано на рис. 8, где приведены зависимости значений  $T_{ign}$  и  $T_{max}$  ТВ от продолжительности МА, эти температуры также имеют очень низкие значения. При увеличении времени МА от 3 до 7 мин температура инициирования ТВ снижается от 500 °C до 360 °C. Это значение практически не изменяется и при увеличении МА до 10 мин. Максимальная температура ТВ в МА образцах снижается от 960 до 810 °C (рис. 14).

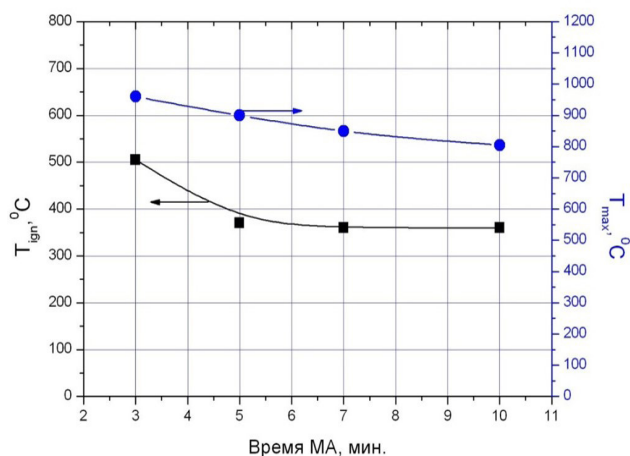


Рис. 14. Зависимости температуры иницирования ( $T_{ign}$ ) и максимальной температуры ( $T_{max}$ ) теплового взрыва от времени предварительной МА для состава  $Ti + 4 \text{ мас.}\%C$ .

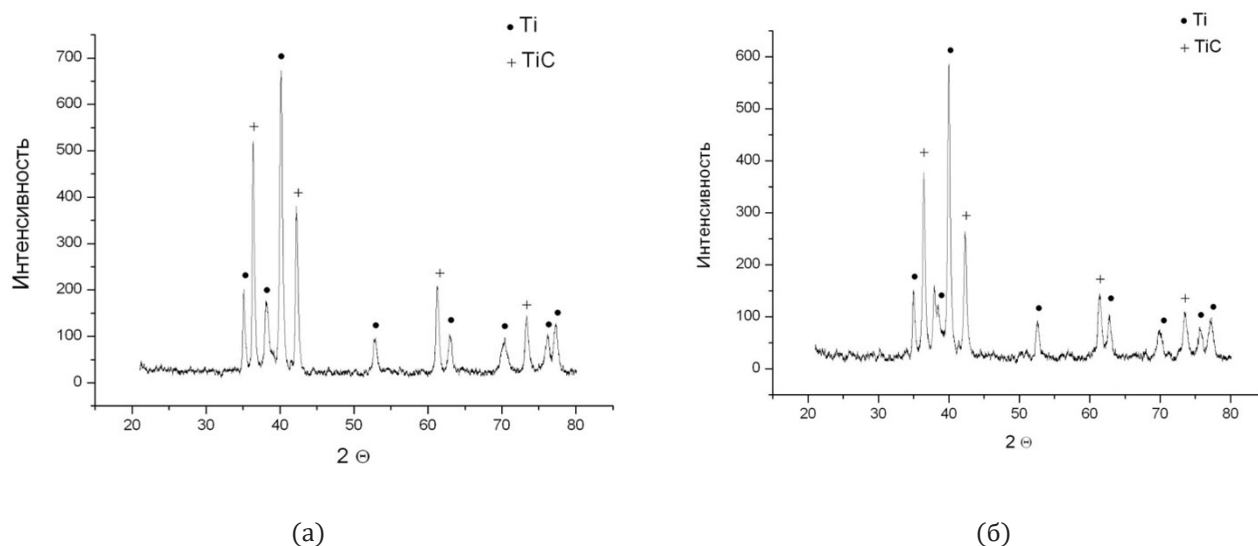


Рис. 15. (а) рентгенограмма продуктов ТВ после 1,5 мин МА, (б) рентгенограмма продуктов ТВ после 4 мин МА

Установлено, что фазовый состав продуктов теплового взрыва исследуемой системы практически не зависит от продолжительности предварительной МА. При увеличении времени МА от 1,5 до 7 минут продуктами теплового взрыва являются титан и карбид титана. В качестве примера, на рисунке 15 приведены рентгенограммы продуктов ТВ после 1,5 мин (а) и после 4 мин (б) МА.

### Заключение

Проведенные исследования позволяют установить следующее:

В механический активированных образцах

состава  $Ti + 4\% \text{УНТ}$  удается реализовать тепловой взрыв при временах МА начиная от 1,5 мин до 7 мин. При увеличении времени предварительной МА от 1,5 до 7 мин, значения температуры иницирования ТВ снижаются от 580 до 340  $^\circ\text{C}$ , а значения максимальных температур реакции снижаются от 1050 до 790  $^\circ\text{C}$ . Не зависимо от времени предварительной МА продуктами теплового взрыва являются порошки композитов, состоящих из титана и  $TiC$ . Сравнение полученных данных с ранее полученными результатами на образцах аналогичного состава с сажой, показали более высокую реакционную способность УНТ.



## Список литературы

- [1]. W.A. Curtin, B.W. Sheldon, CNT-reinforced ceramics and metals, *Mater. Today* 7 (11) (2004) 44-49.
- [2]. S. Suarez, E. Ramos-Moore, B. Lechthaler, F. Mücklich, Grain growth analysis of multiwalled carbon nanotube-reinforced bulk Ni composites, *Carbon* 70 (2014) 173-178.
- [3]. R. Sivakumar, S.Q. Guo, T. Nishimura, Y. Kagawa, Thermal conductivity in multi-wall carbon nanotube/silica-based nanocomposites, *Scr. Mater.* 56 (2007) 265-268.
- [4]. B. Chen, S.F. Li, H. Imai, L. Jia, J. Uneda, M. Takahashi, et al., Load transfer strengthening in carbon nanotubes reinforced metal matrix composites via in-situ tensile tests, *Compos. Sci. Technol.* 113 (2015) 1-8.
- [5]. P.C. Tsai, Y.R. Jeng, Experimental and numerical investigation into the effect of carbon nanotube buckling on the reinforcement of CNT/Cu composites, *Compos. Sci. Technol.* 79 (2013) 28-34.
- [6]. S.J. Yoo, S.H. Han, W.J. Kim, A combination of ball milling and high-ratio differential speed rolling for synthesizing carbon nanotube/copper composites, *Carbon* 61 (2013) 487-500.
- [7]. S.J. Yoo, S.H. Han, W.J. Kim, Magnesium matrix composites fabricated by using accumulative roll bonding of magnesium sheets coated with carbon-nanotube-containing aluminum powders, *Scr. Mater.* 67 (2012) 129-132.
- [8]. C.D. Li, X.J. Wang, W.Q. Liu, K. Wu, H.L. Shi, C. Ding, et al., Microstructure and strengthening mechanism of carbon nanotubes reinforced magnesium matrix composite, *Mater. Sci. Eng. A* 597 (2014) 264-269.
- [9]. H. Fukuda, K. Kondoh, J. Umeda, B. Fugetsu, Interfacial analysis between Mg matrix and carbon nanotubes in Mg6 wt.% Al alloy matrix composites reinforced with carbon nanotubes, *Compos. Sci. Technol.* 71 (2011) 705-709.
- [10]. J. Stein, B. Leczowski, N. Frety, E. Anglaret, Mechanical reinforcement of a high-performance aluminium mechanical reinforcement of a high-performance aluminium carbon nanotubes, *Carbon* 50 (2012) 2264-2272.
- [11]. W.J. Kim, S.H. Lee, High-temperature deformation behavior of carbon nanotube (CNT)-reinforced aluminum composites and prediction of their high-temperature strength, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 67 (2014) 308-315.
- [12]. S.J. Yoo, S.H. Han, W.J. Kim, Strength and strain hardening of aluminum matrix composites with randomly dispersed nanometer-length fragmented carbon nanotubes, *Scr. Mater.* 68 (2013) 711-714.
- [13]. B. Chen, S.F. Li, H. Imai, L. Jia, J. Uneda, M. Takahashi, et al., Inter-wall bridging induced peeling of multi-walled carbon nanotubes during tensile failure in aluminum matrix composites, *Micron* 69 (2015) 1-5.
- [14]. J.Y. Hwang, B.K. Lim, J. Tiley, R. Banerjee, S.H. Hong, Interface analysis of ultra-high strength carbon nanotube/nickel composites processed by molecular level mixing, *Carbon* 57 (2013) 282-287.
- [15]. S. Suarez, E. Ramos-Moore, B. Lechthaler, F. Mücklich, A high temperature X-ray diffraction study of the influence of MWCNTs on the thermal expansion of MWCNT/Ni composites, *Carbon* 51 (2013) 404-409.
- [16]. S. Suarez, F. Lasserre, F. Mücklich, Mechanical properties of MWCNT/Ni bulk composites: influence of the microstructural refinement on the hardness, *Mater. Sci. Eng. A* 587 (2013) 381-386.
- [17]. M.M.J. Treacy, T.W. Ebbesen, J.M. Gibson, *Nature* 381 (1996) 678.
- [18]. Q.Z. Zhao, M.B. Nardelli, J. Bernholc, *Phys. Rev. B* 65 (2002) 144105
- [19]. E.W. Wong, P.E. Sheehan, C.M. Lieber, *Science* 271 (1997) 1971.
- [20]. P.M. Ajayan, *Chem. Rev.* 99 (1999) 1787.
- [21]. S.F. Li, B. Sun, H. Imai, T. Mimoto, K. Kondoh, Powder metallurgy titanium metal matrix composites reinforced with carbon nanotubes and graphite, *Compos. Part A-Appl. Sci. Manuf.* 48 (2013) 57-66.
- [22]. K. Kondoh, T. Threrujirapong, H. Imai, J. Umeda, B. Fugetsu, Characteristics of powder metallurgy pure titanium matrix composite reinforced with multiwall carbon nanotubes, *Compos. Sci. Technol.* 69 (2009) 1077-1081.
- [23]. K. Kondoh, T. Threrujirapong, J. Umeda, B. Fugetsu, High-temperature properties of extruded titanium composites fabricated from carbon nanotubes coated titanium powder by spark plasma sintering and hot extrusion, *Compos. Sci. Technol.* 72 (8) (2012) 1291-1297.
- [24]. Рогачев А.С., Мукасян А.С. Горение для синтеза материалов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 400 с.
- [25]. Корчагин М.А., Григорьева Т.Ф., Бохонов Б.Б., Шарафутдинов М.Р., Баринава 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.
- [26]. Корчагин М.А., Григорьева Т.Ф., Бохонов Б.Б., Шарафутдинов М.Р., Баринава А.П., Ляхов Н.З. Твердофазный режим горения в механически активированных СВС-системах. II. Влияние режимов механической активации

- на характеристики процесса и состав продуктов горения // Физика горения и взрыва. 2003. Т.39, №1. с.60-68.
- [27]. Корчагин М.А., Ляхов Н.З. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез в механически активированных составах // Химическая физика. 2008, т. 27, № 1, с. 73-78.
- [28]. Filimonov Valeriy Yu., Korchagin Michail A., Ditenberg Ivan A., Tyumentsev Alexander N., Lyakhov Nicolay Z. High temperature synthesis of single-phase Ti3Al intermetallic compound in mechanically activated powder mixture // Powder Technology, 335 (2013), p. 606-613.
- [29]. Filimonov V.Yu., Korchagin M.A., Lyakhov N.Z. "Kinetics of mechanically activated high temperature synthesis of Ni3Al in the thermal explosion mode" // Intermetallics, 2011, Vol. 19, p. 833-840.
- [30]. Корчагин М.А., Филимонов В.Ю., Смирнов Е.В, Ляхов Н.З. Тепловой взрыв в механически активированной смеси 3Ni + Al // Физика горения и взрыва, 2010, т. 46, № 1, с. 48-53.
- [31]. М.А. Корчагин, Н.В. Булина. Сверхадиабатический режим теплового взрыва в механически активированной смеси вольфрама с сажей. // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52, № 2. – с. 112-121.
- [32]. А.с. № 975068 (СССР). Планетарная мельница / Аввакумов Е.Г., Поткин А.Р., Самарин О.И. – Бюл. Изобрет. – 1982. – № 43.
- [33]. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. Новосибирск. Изд-во Наука, 1986. – 305 с.
- [34]. [http://catalysis.ru/block/index.php?ID=3&SECTION\\_ID=1513](http://catalysis.ru/block/index.php?ID=3&SECTION_ID=1513)
- [35]. Корчагин М.А. Тепловой взрыв в механически активированных низкокалорийных составах. // Физика горения и взрыва, 2015, т. 51, № 5, с. 77-86.

### Thermal explosion in mechanically activated mixtures of titanium and carbon nanotubes

Sh.E. Gabdrashova<sup>1</sup>, G.B. Burkasheva<sup>1</sup>, S.E. Toktagul<sup>1</sup>, M.A. Korchagin<sup>2</sup>, M.I. Tulepov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi ave. 71, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, SB RAS, Kutateladze str. 18, Novosibirsk, Russia

### ABSTRACT

The present work is focused on the interaction between multi-walled carbon nanotubes and metallic titanium during high-energy ball milling and thermal explosion. An analysis of the dependence of the combustion characteristics of the nanocomposites on the milling duration of powder mixtures is provided. The phase and structural transformations of the Ti-MWCNT mixtures have been analyzed using X-ray diffraction.

*Keywords:* carbon nanotubes, titanium, thermal explosion, mechanoactivation.

### Көміртекті нанотүтікшелері бар титанның механикалық белсендірілген қоспаларындағы жылулық жарылыс

Ш.Е. Габдрашова<sup>1</sup>, Г.Б. Буркашева<sup>1</sup>, С.Е. Токтагул<sup>1</sup>, М.А. Корчагин<sup>2</sup>, М.И. Тулепов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>эл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, эл-Фараби даңғ. 71, А15ЕЗВ4. Алматы қ., Қазақстан

<sup>2</sup>Қатты дене химиясы және механохимия институты РҒА СБ, Кутателадзе к., 18, Новосибирск, Ресей

### АННОТАЦИЯ

Бұл жұмыс көпқабатты көміртекті нанотүтікшелердің жоғары энергиялы шарлы ұсақтау және жылулық жарылыс кезінде титан металымен өзара әрекеттесуіне арналған. Нанокөмір қоспаларының жану сипаттамаларының ұнтақ қоспаларын ұнтақтау ұзақтығына тәуелділігі талданды. Рентгендік дифракция әдісімен Ti-KHT қоспаларының фазалық және құрылымдық өзгерістері талданды.

*Кілт сөздер:* көміртекті нанотүтікшелер, титан, жылулық жарылыс, механоактивация.