

УДК 544.45

ЭЛЕКТРОТЕПЛОЙ ВЗРЫВ СМЕСИ ТИТАН — САЖА В УСЛОВИЯХ КВАЗИИЗОСТАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ I. ТЕПЛОВЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

В. А. Щербаков, А. В. Щербаков, С. А. Бостанджиян

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова РАН
142432 Черноголовка, vladimir@ism.ac.ru

Представлены результаты исследования закономерностей электротеплового взрыва (ЭТВ) смеси титан — сажа в условиях квазиизостатического сжатия. Получены экспериментальные зависимости тепловых и электрических параметров ЭТВ от мощности электрического нагрева. Показано, что скорость нагрева реакционной смеси оказывает существенное влияние на температуру воспламенения и максимальную температуру ЭТВ. Установлено, что на стадии предвзрывного нагрева электрическое сопротивление смеси уменьшается на 90 ÷ 95 %, а скорость роста температуры на стадии теплового взрыва не зависит от скорости нагрева смеси. Предложена методика определения времени и температуры воспламенения, основанная на измерении тепловых и электрических параметров ЭТВ. Обсуждаются механизмы жидкофазного и твердофазного взаимодействия в смеси порошков титана и сажи.

Ключевые слова: электротеплового взрыв, кинетика высокотемпературного взаимодействия, карбид титана.

DOI 10.15372/FGV20190108

ВВЕДЕНИЕ

Исследование кинетики высокотемпературного взаимодействия представляет значительный интерес для понимания механизмов теплового взрыва и горения гетерогенных конденсированных систем, составляющих основу самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) тугоплавких неорганических материалов. Актуальность кинетических исследований связана с поиском эффективных способов управления процессом СВС методами математического моделирования. В настоящее время кинетика высокотемпературного взаимодействия в СВС-системах изучена недостаточно подробно, а количественные кинетические данные практически отсутствуют.

Основным подходом для определения кинетических параметров является обработка экспериментальных данных, полученных при нагреве исследуемой реакционной смеси. Однако использование классических кинетических методов [1, 2] затруднено быстротечностью физико-химических процессов, протекающих в условиях неизотермического и неоднородного нагрева.

Высокую эффективность кинетических исследований в изотермических условиях показал электротермографический метод, основанный на программируемом нагреве электрическим током металлических нитей [3, 4]. С его помощью изучена кинетика тепловыделения при взаимодействии металлической нити с газообразным окислителем или нанесенным на ее поверхность твердым реагентом. Однако модельные системы не отражают всё многообразие физико-химических процессов. Кинетические данные, полученные на модельных системах, не позволяют адекватно представить механизм высокотемпературного взаимодействия в гетерогенных конденсированных системах.

Для исследования кинетики быстротекающего высокотемпературного взаимодействия в гетерогенных конденсированных системах разработан метод электротеплового взрыва (ЭТВ), включающий в себя джоулев нагрев образца и регистрацию оптическим пирометром температуры на его поверхности [5]. Необходимым условием для осуществления ЭТВ являются высокая электрическая проводимость и механическая прочность образца, спрессованного из реакционной смеси порошков, чтобы обеспечить быстрый нагрев и предотвратить его разрушение примесными газами, выделя-

ющимися в ходе экзотермического взаимодействия.

Удобными объектами исследования кинетики высокотемпературного взаимодействия методом ЭТВ являются образцы, спрессованные из смеси металлических порошков с алюминием. Они обладают высокой электропроводностью, теплопроводностью и прочностью, что обеспечивает быстрый и однородный нагрев. Данным методом изучены кинетические особенности экзотермического взаимодействия в системе Ni—Al [6, 7].

Образцы, спрессованные из смеси порошков металлов и неметаллов, напротив, характеризуются низкой электрической проводимостью и механической прочностью. Под действием примесного газа, выделяющегося в ходе экзотермического взаимодействия, происходит разрушение исследуемых образцов, что препятствует осуществлению ЭТВ. Чтобы снизить влияние примесного газа, использовали реакционные смеси титана и графита [5]. Однако такая замена не является эквивалентной, так как графит обладает более низкой реакционной способностью по сравнению с сажей. Поэтому закономерности высокотемпературного взаимодействия в системах титан — графит и титан — сажа будут различаться.

Для увеличения проводимости и уменьшения содержания примесных газов образцы, спрессованные из смеси порошков титана и сажи, подвергали вакуумному отжигу [8, 9]. В результате отжига в образце накапливалось значительное количество ($\approx 30\%$) конечного продукта, что приводило к потере кинетической информации, относящейся к начальной стадии взаимодействия реагентов.

Актуальной задачей является исследование кинетики высокотемпературного быстропротекающего взаимодействия в гетерогенных системах, сопровождающегося выделением примесных газов. Для решения этой задачи предложена методика ЭТВ под давлением, в которой отсутствует предварительная термообработка реакционной смеси порошков металлов и неметаллов. Особенность метода заключается в том, что исследуемый образец помещают в пресс-форму в окружении электропроводной [10] или диэлектрической [11] дисперсной среды и нагревают джоулевым теплом в условиях квазиизостатического сжатия. Последнее обеспечивает высокую электропроводность образца и препятствует разрушению его

примесными газами. Важным преимуществом метода ЭТВ под давлением является возможность квазигомогенного нагрева реакционной смеси, обусловленная использованием объемного источника тепла и увеличением теплопроводности образца в условиях квазиизостатического сжатия.

Этими методами были изучены режимы экзотермического взаимодействия в реакционной смеси порошков титана и сажи. В первом случае при нагреве в проводящей среде из-за неравномерного распределения плотности электрического тока, обусловленного различием электрических сопротивлений, исследуемый образец нагревался медленнее, чем окружающая его дисперсная среда. В результате воспламенялся поверхностный слой с последующим распространением зоны реакции к оси образца. Во втором случае при прямом пропускании электрического тока через образец происходило объемное воспламенение.

Математическая модель предложенной методики разработана в [12, 13]. Были изучены режимы экзотермического взаимодействия в системе Ti—C и определены критические условия электротеплового взрыва.

Целью настоящей работы является исследование влияния скорости электрического нагрева на тепловые и электрические параметры ЭТВ смеси титана и сажи в условиях квазиизостатического сжатия.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах использовали стехиометрическую смесь порошков титана марки ПТМ (ТУ 14-1-3086-80) с размером частиц менее 45 мкм и сажи марки П804Т (ТУ 38-1154-88) с размером частиц менее 0.2 мкм. Частицы титана имеют дендритную форму, а частицы сажи — близкую к сферической (рис. 1). Лабораторная установка, схема которой представлена на рис. 2, состоит из реакционной пресс-формы 2, электрического трансформатора тока 8 мощностью 100 кВт, тиристорного регулятора 9 электрической мощности и системы регистрации электрических и тепловых параметров ЭТВ, включающей в себя измерительную шину 10, аналого-цифровой преобразователь 11 и компьютер 12. Внутренняя поверхность корпуса пресс-формы (диаметром 35 мм, высотой 100 мм) покрыта слоем диэлектрика толщиной 2 мм.

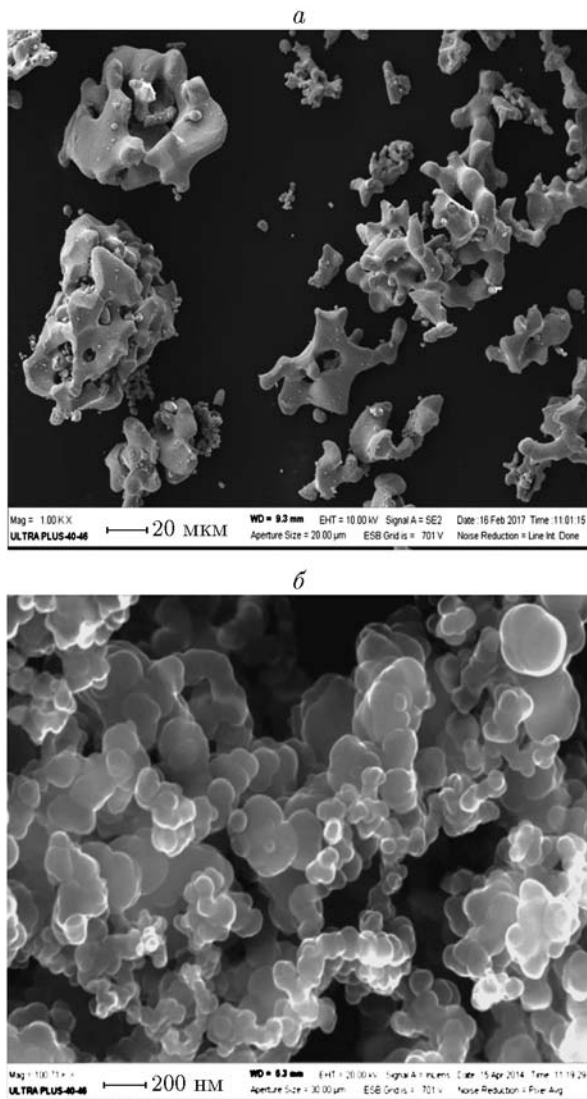


Рис. 1. Типичные формы частиц титана (а) и сажи (б)

Эксперименты проводили следующим образом. Цилиндрический образец 5 (диаметром 12 мм, высотой 17 мм), спрессованный до относительной плотности 0.6, помещали между пуансоном 1 и основанием пресс-формы 6. На торцы образца помещали слои порошка карбида титана 3 для установления гальванической связи с пуансоном и основанием пресс-формы, а также для защиты их от воздействия высокой температуры. Пространство между цилиндрической поверхностью образца и корпусом пресс-формы заполняли порошком оксида кремния 4 с размером частиц $200 \div 300$ мкм. Диэлектрическая дисперсная среда обеспечивала квазиизостатическое сжатие образца и удаление примесного газа, выделяющегося в ходе

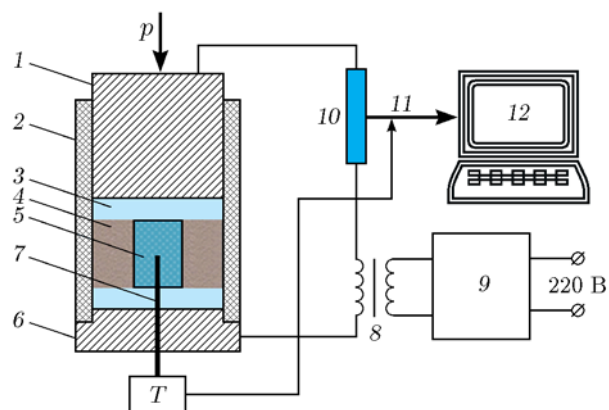


Рис. 2. Схема лабораторной установки:

1 — пуансон-электрод, 2 — диэлектрический корпус пресс-формы, 3 — слой порошка TiC, 4 — диэлектрическая дисперсная среда (SiO_2), 5 — исследуемый образец (Ti + C), 6 — основание пресс-формы, 7 — термопара, 8 — трансформатор тока, 9 — регулятор мощности, 10 — измерительная шина, 11 — аналого-цифровой преобразователь, 12 — компьютер

экзотермической реакции.

Пресс-форму с исследуемым образцом устанавливали на рабочем столе пневматического прессы и подключали к электрическому трансформатору тока. После приложения осевой нагрузки подавали электрическое напряжение и нагревали образец до воспламенения. В экспериментах давление сжатия варьировали от 1 до 100 МПа, а электрическое напряжение — от 3 до 11 В.

Температуру в центре образца измеряли вольфрам-рениевой термопарой 7 диаметром 100 мкм. Время тепловой релаксации $\tau = d^2/4a \approx 4 \cdot 10^{-5}$ с ($a \approx 0.65$ см²/с — температуропроводность вольфрама), погрешность измерения температуры $10 \div 50$ К [14]. Тепловые и электрические параметры регистрировали с помощью аналого-цифрового преобразователя (L-1250) с частотой 1 кГц и записывали в памяти компьютера. Мгновенные значения электрических параметров переводили в действующие значения электрического напряжения и силы электрического тока.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Термограммы ЭТВ

На рис. 3 представлены термограммы ЭТВ смеси титана и сажи, полученные

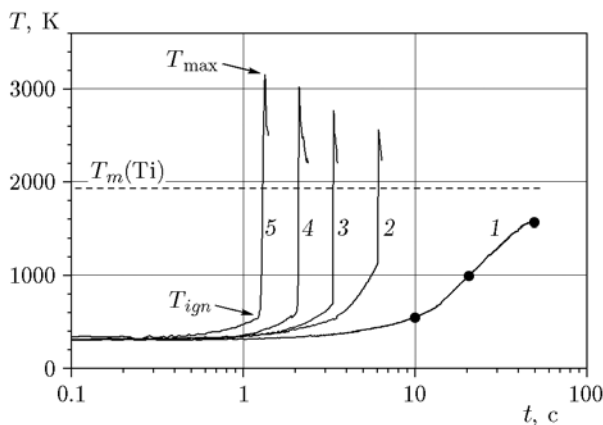


Рис. 3. Термограммы ЭТВ, полученные при $p = 48$ МПа и $U = 3$ (1), 4 (2), 6 (3), 9 (4), 11 В (5)

при давлении квазиизостатического сжатия 48 МПа. Видно, что параметры ЭТВ зависят от приложенного электрического напряжения U . В подкритических условиях ($U = 3$ В) температура образца плавно увеличивается до температуры 1600 К (рис. 3, кривая 1). Стабильное воспламенение смеси осуществлялось при $U > 4$ В.

В надкритических условиях ($U > 4$ В) на стадии теплового взрыва температура увеличивалась скачкообразно. На термограммах характерными точками являются температура T_{ign} и время t_{ign} воспламенения, а также максимальная температура ЭТВ T_{max} и время реакции t_{max} . При T_{max} взаимодействие реагентов завершается полным превращением в конечный продукт. Время воспламенения и время реакции соответствуют длительности роста температуры в интервалах $T_0 < T < T_{ign}$ и $T_{ign} < T < T_{max}$ соответственно.

По изломам на термограммах ЭТВ определяли стадии предвзрывного нагрева $T_0 < T < T_{ign}$, теплового взрыва $T_{ign} < T < T_{max}$ и постпроцесса, протекающего при остывании конечного продукта (см. рис. 3, кривые 2–5). Видно, что с ростом электрического напряжения значения t_{ign} и T_{ign} уменьшаются, а T_{max} — увеличиваются.

Изменение параметров связано с взаимодействием реагентов на стадии предвзрывного нагрева, которое приводит к накоплению продукта реакции — теплового балласта, уменьшающего тепловой эффект реакции. Чем выше концентрация теплового балласта, тем больше тепла потребуется на воспламенение реакцион-

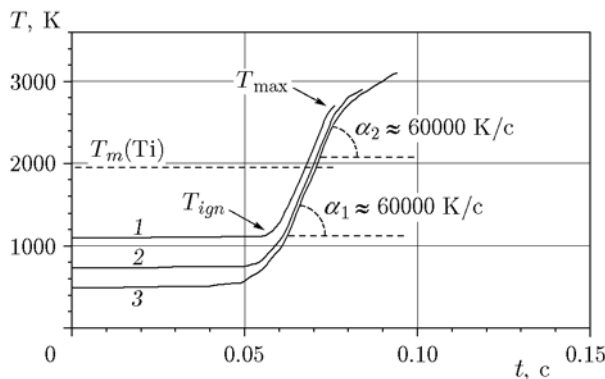


Рис. 4. Участки термограмм ЭТВ, соответствующие стадиям теплового взрыва, полученные при $p = 48$ МПа и $U = 4$ (1), 6 (2), 11 В (3)

ной смеси. Уменьшение T_{max} обусловлено потерей части химической энергии исходного образца, связанной с взаимодействием реагентов на стадии предвзрывного нагрева и отводом выделившегося тепла в окружающую среду.

Рассмотрим влияние напряжения U на время реакции t_r и скорость роста температуры $\frac{dT}{dt}$, которые изменяются на стадии теплового взрыва при увеличении температуры от T_{ign} до T_{max} . Для наглядности расположим рядом участки экспериментальных термограмм, соответствующие стадиям теплового взрыва (рис. 4). Видно, что выбранные участки термограмм расположены параллельно. Это означает, что скорость роста температуры на стадии теплового взрыва постоянна и не зависит от U .

Температура плавления титана T_m находится на участке линейного роста температуры. Важно отметить, что при $T < T_m$ и $T > T_m$ $\frac{dT}{dt} \approx 60\,000$ К/с, т. е. плавление титана не влияет на мощность химического тепловыделения. Аналогичный результат получен при ЭТВ смеси титана и бора [15].

2.2. Электрические параметры ЭТВ

На рис. 5 и 6 представлены зависимости электрического тока I и относительного электросопротивления R_*/R_0 от времени. Вид экспериментальных кривых зависит от величины приложенного напряжения U . В подкритических условиях ($U = 3$ В) в течение 50 с нагрева сила тока I плавно увеличивалась (рис. 5, кривая 1), а сопротивление R_*/R_0 уменьшалось

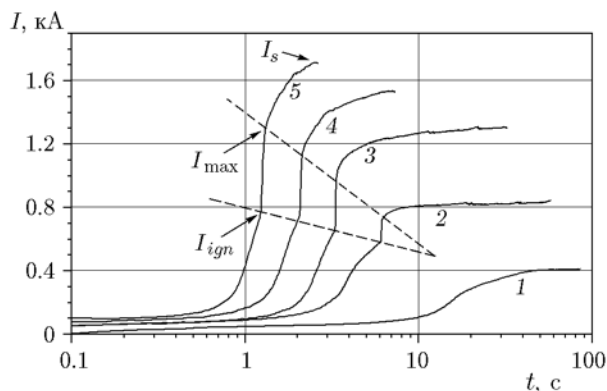


Рис. 5. Зависимости электрического тока от времени, полученные при $p = 48$ МПа и $U = 3$ (1), 4 (2), 6 (3), 9 (4), 11 В (5)

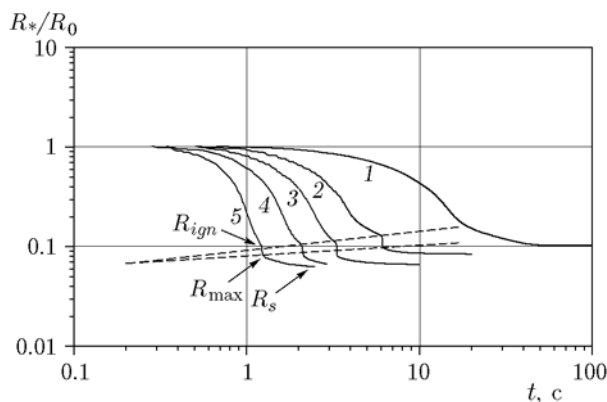


Рис. 6. Зависимости R/R_0 от времени, полученные при $p = 48$ МПа и $U = 3$ (1), 4 (2), 6 (3), 9 (4), 11 В (5)

(см. рис. 6, кривая 1). В надкритических условиях ($U > 4$ В) на стадии теплового взрыва электрические параметры, подобно тепловым, изменялись скачкообразно (см. рис. 5 и 6, кривые 2–5). Параметры I_{ign} , R_{ign} и I_{max} , R_{max} соответствуют значениям силы электрического тока и электрического сопротивления, которые устанавливаются при достижении температуры воспламенения и максимальной температуры ЭТВ соответственно.

Проходящие через значения I_{ign} , R_{ign} и I_{max} , R_{max} (точки излома на кривых) линии (штриховые на рис. 5, 6) разделяют стадии предвзрывного нагрева $I < I_{ign}$, $R_* > R_{ign}$, теплового взрыва $I_{ign} < I < I_{max}$, $R_{ign} > R_* > R_{max}$ и постпроцесса при остывании $I_{max} < I < I_s$, $R_{max} < R_* < R_s$ (о величинах I_s , R_s будет сказано ниже). Штриховые линии — зависимости $I_{ign}(U)$, $I_{max}(U)$ — пересекаются в

точке, в которой воспламенение отсутствует. С уменьшением U до критического значения амплитуда скачка силы электрического тока ΔI стремится к нулю. При изменении U от 4 до 11 В электросопротивление на стадии предвзрывного нагрева уменьшилось на $85 \div 90$ %, на стадии теплового взрыва — на $10 \div 12$ %, а на стадии постпроцессов — на $2 \div 3$ %.

Для объяснения уменьшения электросопротивления воспользуемся экспериментальными данными о влиянии термического нагрева на удельное электрическое сопротивление образца, спрессованного из смеси порошков титана и графита. В [16] показано, что при нагреве в вакууме от 600 до 1000 К удельное электрическое сопротивление образца уменьшается более чем на два порядка. Реакционную смесь можно представить в виде последовательной электрической цепочки, состоящей из титана, оксида титана и углерода. Поскольку оксид титана является диэлектриком и обладает высоким электрическим сопротивлением, растворение оксидной пленки в титане обеспечивает значительное уменьшение электрического сопротивления исследуемого образца.

Представленные в [16] температурные интервалы уменьшения электросопротивления количественно совпадают с полученными в настоящей работе при $T < T_{ign}$. Это указывает на то, что на стадии предвзрывного нагрева уменьшение электрического сопротивления связано с разрушением оксидного слоя на поверхности частиц титана. Важно отметить, что при нагреве образца электрического тока разрушение оксидного слоя происходит намного интенсивнее, чем при термическом нагреве. Наиболее вероятной причиной интенсивного разрушения является тепловой пробой диэлектрического оксидного слоя.

При $T_{ign} < T < T_{max}$ скачкообразное снижение R_*/R_0 обусловлено резким уменьшением электрической прочности и толщины оксидного слоя титана. Одновременно с разрушением оксидного слоя формируется поверхность контакта между частицами. Из теории спекания [17] известно, что резкое увеличение температуры приводит к росту скорости усадки пористого образца. При достижении T_{ign} площадь контакта между частицами практически сформировалась и в дальнейшем изменялась незначительно.

При $T_s < T < T_{max}$ на стадии постпроцесса завершается формирование микрострук-

туры и плотности продуктов ЭТВ. С уменьшением температуры в ходе остывания скорость спекания замедляется, и при температуре T_s оно прекращается. Достигнутые в конце спекания значения R_s и I_s являются конечными и в дальнейшем не изменяются.

Важным параметром ЭТВ является температура воспламенения T_{ign} , при которой происходит срыв теплового равновесия. Из-за отсутствия особых точек на термограмме ЭТВ определение этого параметра сопряжено с некоторыми трудностями. Для определения температурной границы, разделяющей стадии предвзрывного нагрева и теплового взрыва, воспользуемся данными об изменении во времени электрических параметров ЭТВ.

На рис. 7 представлена зависимость скорости изменения электрического тока $\frac{dI}{dt}$ от времени, отражающая интенсивность формирования электрических контактов между частицами смеси. Видно, что полученная в подкритическом режиме ($U = 3$ В) зависимость имеет один, а в надкритическом режиме ($U > 4$ В) — два максимума. Первый максимум отражает процессы, протекающие на стадии предвзрывного нагрева, второй — на стадии теплового взрыва.

В первом случае под действием электрического напряжения между частицами смеси происходят электрический пробой и локальный нагрев поверхности частиц титана, приводящие к разрушению оксидных пленок и формированию электрического контакта [18].

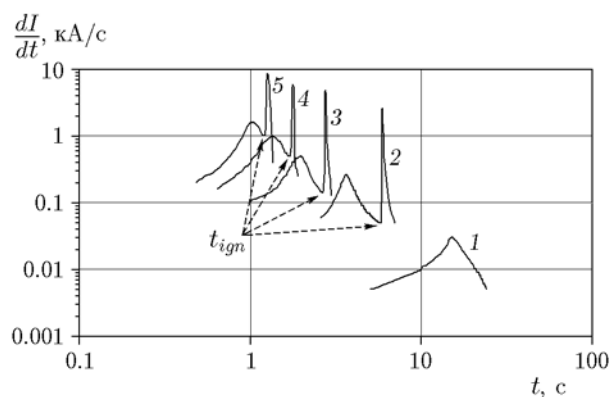


Рис. 7. Зависимости скорости изменения электрического тока от времени, полученные при $p = 48$ МПа и $U = 3$ (1), 4 (2), 6 (3), 9 (4), 11 В (5)

Максимальное значение $\frac{dI}{dt}$ указывает на достижение максимальной скорости формирования площади контакта между частицами. Последующее уменьшение $\frac{dI}{dt}$ связано со снижением интенсивности формирования электрических контактов между частицами. Второй максимум связан с увеличением поверхности контактов из-за интенсивного образования продуктов реакции на стадии теплового взрыва.

Важно отметить, что точка минимума на зависимости $\frac{dI}{dt}(t)$ разделяет стадии предвзрывного нагрева и теплового взрыва. Это позволяет определить t_{ign} и T_{ign} на термограмме ЭТВ смеси титана и сажи. С использованием данного подхода было установлено, что с ростом электрического напряжения время задержки воспламенения t_{ign} уменьшается от 6 до 1.5 с, а температура T_{ign} снижается от 1200 до 600 К. Увеличение U приводит к сокращению интервала времени между максимумами $\frac{dI}{dt}$. Совмещение максимумов будет указывать на одновременность протекания процессов формирования электрического контакта и экзотермического взаимодействия между частицами. Необходимое время воспламенения для реализации этого режима можно определить в точке пересечения штриховых линий на рис. 6.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При джоулевым нагреве экзотермическое взаимодействие в гетерогенной смеси может протекать в режиме теплового взрыва или теплового пробоа. В первом случае реакция инициируется во всем объеме реакционной смеси, а во втором — локально внутри смеси, из которой затем распространяется к поверхности образца. Для корректного исследования кинетики и механизма высокотемпературного взаимодействия в гетерогенной смеси необходимо использовать режим теплового взрыва. Однако с помощью визуального наблюдения невозможно отличить один режим от другого. В связи с этим важной задачей является диагностика режимов ЭТВ.

В настоящей работе использовали метод, включающий в себя измерение тепловых и электрических параметров ЭТВ. Это позволило получить более детальную информацию о

процессах, протекающих при ЭТВ гетерогенной смеси. Указанные параметры имеют характерные особенности, заключающиеся в следующем. Термограмма является локальной, а электрограмма — интегральной характеристикой ЭТВ. Первая отражает процессы вблизи спая термопары, а вторая — изменения в объеме реакционной смеси. Кроме того, электрические параметры являются структурно чувствительными, реагирующими на небольшие изменения площади контакта между частицами смеси.

Результаты экспериментов показали четкую корреляцию между изменением тепловых и электрических параметров. Равенство времен изменения локального температурного и интегрального электрического параметров свидетельствует о протекании режима теплового взрыва.

Современные электрические приборы позволяют измерять электрические параметры с очень высокой скоростью. Важно отметить, что измеряемое в экспериментах синхронное изменение температурного и электрического параметров указывает на корректное измерение температуры вольфрам-рениевой термопарой.

Полученные результаты показали, что интенсивное взаимодействие в системе Ti—C протекает при значительно более низких температурах, чем это представлено в теории СВС при взаимодействии по жидкофазному механизму [19]. Согласно этой модели, основное взаимодействие реагентов происходит при температуре выше температуры плавления титана, а взаимодействие в твердой фазе настолько незначительно, что им можно пренебречь.

Полученное несоответствие можно объяснить проявлением различных механизмов взаимодействия, которые реализуются в реакционной смеси, находящейся в свободном состоянии или в условиях квазиизостатического сжатия. В первом случае частицы реагентов имеют минимальную площадь контактов, так как фактически отделены друг от друга. Поэтому при нагреве реакционной смеси реагенты вступают во взаимодействие до температуры плавления титана. И только после плавления и растекания титана по поверхности частиц сажи происходит реакционное растворение твердых частиц сажи в титановом расплаве, обеспечивающее резкое увеличение мощности химического тепловыделения.

Во втором случае при квазиизостатиче-

ском сжатии площадь контакта между частицами реакционной смеси значительно возрастает, что позволяет осуществить взаимодействие реагентов при $T < T_m$ по механизму реакционной диффузии. Отсутствие влияния жидкой фазы подтверждается результатами двух независимых измерений: при $T > T_m$ не наблюдается резкого увеличения мощности химического тепловыделения и уменьшения электрического сопротивления.

Влияние развитой площади контакта между частицами на температуру воспламенения подтверждается экспериментальными результатами. В [20] показано, что продолжительное механическое активирование (9 мин) приводит к увеличению поверхности контакта реагентов и уменьшению температуры воспламенения системы Ni—Al на $300 \div 600$ К.

Для обоснования механизма взаимодействия при ЭТВ смеси титана и сажи оценим степень превращения реагентов при T_{ign} . Поскольку на стадии теплового взрыва нагрев осуществляется за счет тепла экзотермической реакции, протекающей в адиабатических условиях, степень превращения реагентов при T_{ign} составляет

$$\eta_{ign} = 1 - (T_{max} - T_{ign}) / (T_{max} - T_0).$$

Подставляя в это выражение экспериментальные значения $T_{max} = 2700$ К, $T_{ign} = 1200$ К и $T_{max} = 3200$ К, $T_{ign} = 600$ К, полученные при $U = 4$ и 11 В (см. рис. 3, кривые 2 и 5), находим глубину превращения — 0.44 и 0.21 соответственно. Эти результаты указывают, что на стадии предвзрывного нагрева взаимодействие реагентов протекает на значительную глубину.

Сопоставим адиабатические температуры горения титана и углерода, рассчитанные с помощью программы THERMO [21] в предположении, что экзотермическое взаимодействие начинается при температуре, близкой к начальной ($T = 300$ К), или при температуре плавления титана ($T = 2000$ К). Расчеты показали, что в первом случае адиабатическая температура горения составляет 3300 К (продукт реакции — твердый TiC), а во втором — 3750 К (продукт реакции — расплавленный TiC). Важно отметить, что измеренная в экспериментах максимальная температура ЭТВ ниже адиабатической температуры горения, а конечный продукт не содержит расплавленного TiC. Различие расчетных и экспериментальных результатов обусловлено тем, что интен-

сивное взаимодействие титана и сажи, приводящее к срыву теплового равновесия, протекает при температуре значительно ниже температуры плавления титана.

Таким образом, можно заключить, что площадь контакта между частицами реагентов оказывает значительное влияние на механизм высокотемпературного взаимодействия в смеси титана и сажи. Увеличение площади контакта приводит к реализации взаимодействия реагентов по твердофазному механизму.

ВЫВОДЫ

1. Разработана эффективная методика исследования закономерностей ЭТВ гетерогенной смеси в условиях квазиизостатического сжатия в интервале давления $1 \div 100$ МПа, включающая в себя измерение тепловых и электрических параметров и позволяющая исследовать механизмы взаимодействия в режимах подкритического и надкритического нагрева. Показано, что интенсивное взаимодействие реагентов происходит при температуре значительно ниже температуры плавления титана. Максимальная скорость роста температуры на стадии теплового взрыва составляет $\approx 60\,000$ К/с.

2. Изучено влияние скорости электрического нагрева на параметры ЭТВ смеси титан — сажа. Показано, что на стадии предвзрывного нагрева электрическое сопротивление реакционной смеси уменьшается на $85 \div 90$ %, что связано с формированием электрических контактов между частицами и взаимодействием исходных реагентов. Установлено, что в зависимости от скорости нагрева глубина превращения реагентов при T_{ign} достигает $21 \div 44$ %. Взаимодействие реагентов приводит к увеличению T_{ign} и уменьшению T_{max} .

3. Установлено, что в подкритических условиях зависимость $\frac{dI}{dt}$ от времени имеет один, а в надкритических условиях — два максимума, которые соответствуют стадиям предвзрывного нагрева и теплового взрыва. Предложена методика определения температуры воспламенения T_{ign} , основанная на определении времени достижения минимального значения $\frac{dI}{dt}$ между стадиями предвзрывного нагрева и теплового взрыва.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г. Твердопламенное горение. — Черноголовка: ИСМАН, 2000.
2. Барзыкин В. В. Тепловые режимы экзотермических реакций (избранные труды). — Черноголовка: ИСМАН, 2000.
3. Вадченко С. Г., Григорьев Ю. М., Мержанов А. Г. Исследование механизма воспламенения и горения систем Ti + C и Zr + C электротермографическим способом // Физика горения и взрыва. — 1976. — Т. 12, № 5. — С. 676–682.
4. Pelekh A., Mukasyan A. S., Varma A. Electro thermography apparatus for kinetics of rapid high-temperature reactions // Rev. Scient. Instrum. — 2000. — V. 71, N 1. — P. 220–223. — DOI 10.1063/1.1150186.
5. Князик В. А., Мержанов А. Г., Соломонов В. Б., Штейнберг А. С. Макрокинетика высокотемпературного взаимодействия титана с углеродом в условиях электротеплового взрыва // Физика горения и взрыва. — 1985. — Т. 21, № 3. — С. 69–73.
6. White J. D. E., Reeves R. V., Son S. F., Mukasyan A. S. Thermal explosion in Al—Ni system: influence of mechanical activation // J. Phys. Chem. A. — 2009. — V. 1, N 48. — P. 13541–13547.
7. Shteinberg A. S., Lin Y.-C., Son S. F., Mukasyan A. S. Kinetics of high temperature reaction in Ni—Al system: influence of mechanical activation // J. Phys. Chem. A. — 2010. — V. 114, N 20. — P. 6111–6116.
8. Knyazik V. A., Shteinberg A. S., Gorovenko V. I. Thermal analysis of high-speed high-temperature reactions of refractory carbide synthesis // J. Therm. Anal. — 1993. — V. 40, N 1. — P. 363–371.
9. Князик В. А., Мержанов А. Г., Штейнберг А. С. О механизме горения системы титан — углерод // Докл. АН. — 1988. — Т. 301, № 4. — С. 899–902.
10. Щербаков В. А., Грядунов А. Н., Телпа В. Т., Щербаков А. В. Влияние квазигидростатического давления на закономерности электротеплового взрыва в системе Ti—C // Высокие технологии, образование, промышленность: сб. ст. — СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. политехн. ун-та. — 2011. — Т. 2. — С. 186–193.
11. Щербаков А. В., Щербаков В. А. Особенности взаимодействия титана и сажи в условиях электротеплового взрыва под давлением // Успехи химической физики: сб. тез. докл. на III Всерос. молодежн. конф., 3–7 июля 2016 г. — М.: Граница, 2016. — С. 45.
12. Бостанджиян С. А., Гордополова И. С., Щербаков В. А. Моделирование электротеплового взрыва в безгазовых системах, помещенных в электропроводную среду // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 6. — С. 53–61.

13. **Bostandzhiyan S. A., Shcherbakov A. V., Shcherbakov V. A.** Mathematical modeling of electrothermal explosion in gasless systems placed in a hollow dielectric cylinder // *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* — 2016. — V. 25, N 2. — P. 75–79.
14. **Рогачев А. С., Мукасьян А. С.** Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику. — М.: Физматлит, 2012.
15. **Попов К. В., Князик В. А., Штейнберг А. С.** Исследование высокотемпературного взаимодействия титана с бором методом электро-теплого взрыва // *Физика горения и взрыва.* — 1993. — Т. 29, № 1. — С. 82–87.
16. **Блощенко В. Н., Бокий В. А., Боровинская И. П.** О растворении окисной пленки металла в процессе синтеза карбида титана // *Физика горения и взрыва.* — 1984. — Т. 20, № 6. — С. 87–90.
17. **Гегузин Я. Е.** Физика спекания. — М.: Наука, 1967.
18. **Григорьев Е. Г., Калинин Б. А.** Электроимпульсная технология формирования материалов из порошков: учеб. пособие. — М.: МИФИ, 2008.
19. **Мержанов А. Г., Рогачев А. С., Мукасьян А. С., Хусид Б. М.** Макрокинетика структурных превращений при безгазовом горении смесей порошков титана и углерода // *Физика горения и взрыва.* — 1990. — Т. 26, № 1. — С. 104–114.
20. **Vadchenko S. G., Boyarchenko O. D., Shkodich N. F., Rogachev A. S.** Thermal explosion in various Ni–Al systems: Effect of mechanical activation // *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* — 2013. — V. 22, N 1. — P. 60–64. — DOI 10.3103/S1061386213010123.
21. **Shiryaev A. A.** Thermodynamics of SHS: An advanced approach // *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* — 1995. — V. 4, N 4. — P. 351–362.

*Поступила в редакцию 8/XI 2017 г.,
в окончательном варианте — 30/I 2018 г.*
