

УДК 536.46

## ГОРЕНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ ТИТАНОВЫХ АГЛОМЕРАТОВ В ВОЗДУХЕ. I. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДХОД

О. Г. Глотов

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090 Новосибирск  
glotov@kinetics.nsc.ru

Представлена методика исследования горения частиц титана диаметром  $300 \div 500$  мкм, полученных в результате слияния множества мелких частиц. Горящие монодисперсные частицы титана создавали посредством воспламенения помещенных в сгорающий образец миниатюрных кусочков пиротехнической композиции, содержащей 69 % порошкообразного титана. Полученные частицы-агломераты горели в условиях свободного падения в воздухе. Их движение и события эволюции, в том числе фрагментацию, регистрировали посредством видеосъемки. Также проводили гашение, отбор и изучение конденсированных продуктов горения.

Ключевые слова: титановый агломерат, горение, фрагментация, время горения, метод гашения и отбора, конденсированные продукты горения, распределение по размерам.

### ВВЕДЕНИЕ

Титан имеет сравнительно высокую теплоту сгорания (4.7 ккал/г) и используется как металлическое горючее в пиротехнике [1] и в технологическом горении (например, в СВС-процессах синтеза карбида и нитрида титана, для получения чистых газов [2]). В отличие от алюминия и магния, титан — тугоплавкий нелетучий металл с тугоплавким оксидом. Плотность оксида меньше, чем у металла, однако оксид обладает защитными свойствами, и из-за наличия естественной оксидной пленки титан коррозионно устойчив до температур  $500 \div 550$  °С. Благодаря своеобразному сочетанию свойств металла и оксида система титан — оксид характеризуется рядом особенностей [2, 3]. Так, оксид растворяется в жидком металле, в результате оксидная пленка теряет защитные свойства. Другая особенность титана — способность растворять газы, что существенно влияет на процессы окисления, воспламенения и горения. Третья особенность — фрагментация при горении. Вследствие перечисленных особенностей титан является интересным объектом исследования с точки зрения развития фундаментальных представлений о горении металлов.

Традиционное применение титана в фейерверочных пиротехнических композициях для создания эффектных искр, в пиротехнических

замедлительных, трассирующих или сигнальных композициях, равно как в СВС-системах и в свободнорастворимых системах, предназначенных для синтеза целевого продукта в процессе технологического горения, не требует детального понимания механизма горения частиц. Потребность в изучении механизма горения частиц титана возникла недавно в связи с задачей получения частиц диоксида титана с заданными свойствами в процессе горения частиц титана. В первую очередь речь идет о наноразмерных, каталитически активных частицах  $TiO_2$ . Предполагается [4], что облако таких частиц может быть использовано для дезактивации вредных или опасных веществ, оказавшихся в атмосферном воздухе в результате техногенной катастрофы или террористического акта. Один из возможных вариантов практической реализации этой идеи — разработка специальной пиротехнической системы, генерирующей горящие в воздухе частицы титана. Известно [5], что при горении пиротехнических композиций с порошкообразным титаном происходит его агломерация, т. е. объединение металлических частиц в волне горения. В результате с поверхности горения в газовую фазу выходят агломераты, образованные из сотен, а иногда и тысяч исходных частиц. Начальные частицы титана микронных размеров, заложенные в композицию, сливаются в сферические агломераты размером порядка сотен микрометров. Именно процесс горения агломератов титана в воздухе вдали от поверхно-

сти горения пиротехнической композиции определяет эффективность превращения металла в оксид и характеристики образующихся оксидных частиц.

Для оптимизации процесса преобразования горящих материнских частиц металла в оксидные частицы-продукты требуется информация о механизме горения, в частности о макрокинетике реагирования частиц титана и о влиянии условий горения на характеристики оксидных частиц. В [5–9] исследованы основные характеристики микронных частиц оксидного аэрозоля, образующегося при горении титана. Эти частицы представляют собой фрактальные агрегаты цепочно-разветвленной формы, состоящие из первичных частиц-сферул нанометрового размера. Были определены функции распределения по размерам агрегатов и сферул, фрактальная размерность агрегатов, их электрические заряды, подвижность и другие параметры. Установлено, что электростатическое (кулоновское) взаимодействие играет важную роль в процессе коагуляции. В итоге сейчас имеются данные о мелких оксидных частицах, но практически отсутствует информация о сравнительно крупных продуктах горения — о частицах-фрагментах и об остатках материнских частиц. Также дефицитна информация о процессе горения частиц размером  $100 \div 1000$  мкм, соответствующих размерам типичных частиц-агломератов, образующихся при горении пиротехнических композиций с титаном. Фактически, кроме наших работ [10–12], известна лишь одна работа [13], в которой исследовали горение частиц диаметром 240 и 280 мкм.

Предлагаемая работа, состоящая из двух частей, посвящена изучению эмпирических закономерностей горения крупных сферических частиц титана агломерационного происхождения диаметром  $D \approx 300 \div 500$  мкм, свободно падающих в воздухе. В первой части описаны экспериментальные методики, во второй представлены данные о временных параметрах горения частиц титана и о конденсированных продуктах горения. Некоторые предварительные материалы и данные опубликованы в [10–12].

### СОЗДАНИЕ ГОРЯЩИХ ЧАСТИЦ МОНОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ТИТАНА

Как отмечено во введении, при горении

пиротехнических композиций с их поверхности горения в газовую фазу выходят агломераты, существенно отличающиеся от начальных частиц титана по форме, размерам и структуре. После плавления металла агломераты приобретают сферическую форму диаметром порядка сотен микрометров. Практический интерес представляет процесс горения агломератов, поскольку именно он определяет эффективность преобразования металла в оксид и характеристики оксида при горении пиротехнических систем с порошкообразным титаном. Поэтому желательно, чтобы объект исследования по структуре и размеру соответствовал агломерату, т. е. крупной сферической частице, образованной в результате слияния множества мелких частиц. Кроме того, для удобства обработки и интерпретации экспериментальных данных желательно иметь монодисперсные частицы. В [14] аналогичные требования были сформулированы для алюминиевых агломератов, горящих в факеле модельного твердого топлива, и предложена методика создания соответствующих модельных агломератов. В данной работе используется та же идея — формирование агломератов из миниатюрных кусочков высокометаллизированной композиции в процессе горения специального образца. Забегая вперед, укажем, что описанная ниже технология позволила изготовить и исследовать горящие модельные агломераты (титановые сферы) диаметром 300, 390 и 480 мкм. Такие частицы прежде никто не изучал, поскольку, в отличие от алюминия и магния, титановые порошки с частицами сферической формы до недавнего времени отсутствовали. Сейчас имеется коммерчески доступный титановый порошок с частицами сферической формы диаметром 150 мкм [15], однако горение таких частиц пока не исследовано. Традиционными промышленными методами получают слитки титана губчатой формы, которые затем измельчают на частицы преимущественно чешуйчатой формы размером менее 100 мкм. Большинство исследователей экспериментировали либо с узкими ситовыми фракциями частиц неправильной формы (например, в [16] использовали фракции от  $20 \div 25$  до  $106 \div 125$  мкм), либо с миниатюрными образцами (например, в [17] это были цилиндры диаметром 3.125 мм, высотой 3.125 мм из металлического титана). Наиболее близкие к нашим по размеру частицы (240 и 280 мкм) исследованы в [13]. Эти

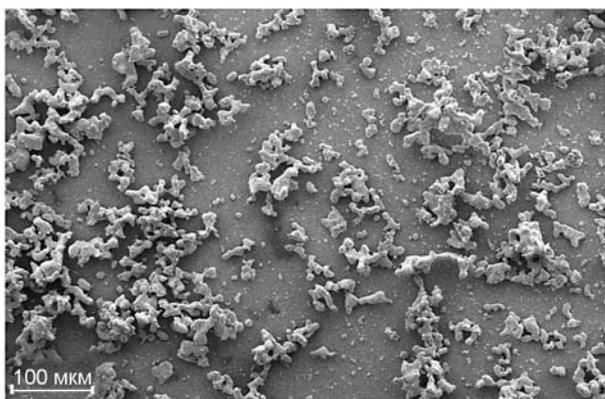


Рис. 1. Вид титанового порошка марки ПТМ под сканирующим электронным микроскопом

частицы получены по оригинальной методике в импульсном электродуговом разряде между массивным холодным катодом и расходуемым анодом из титановой проволоки.

Авторская методика создания горящих монодисперсных частиц титана состоит в следующем. (1) Приготавливается металлизированная композиция, состоящая из 69 % Ti и 31 % активного связующего на основе метилполивинилтетразола. Используется порошок титана марки ПТМ (ТУ 14-22-57-92) с частицами неправильной формы (рис. 1). Рассев на ситах показал, что 85 % массы составляют частицы мельче 50 мкм. (2) Приготавливается безметаллная композиция-матрица, состоящая из 23 % перхлората аммония, 50 % октогена (все частицы мельче 10 мкм) и 27 % вышеупомянутого связующего. Соотношение между компонентами композиций выбрано на основе термодинамических расчетов из условия достижения максимальной температуры. Обе композиции имеют консистенцию пластилина, легко формуются и держат форму. (3) Композиция-матрица наносится на кварцевую трубку диаметром 1 см в форме полоски размеров  $W \times L \times H$  примерно  $2 \times 15 \times 1$  мм. Трубка играет роль держателя образца и используется многократно. (4) В полоску матрицы внедряют включения — миниатюрные одинаковые кусочки металлизированной композиции, в количестве  $10 \div 20$  шт. Включения сформованы в виде шариков. Их помещают на поверхность полоски в предварительно приготовленные лунки и слегка вдавливают. Рис. 2 иллюстрирует описанную технологию. После поджигания

полоски с выступающего за срез трубки кончика волна горения начинает двигаться вдоль полоски. Доходя до очередного включения, волна поджигает и выбрасывает его. В процессе горения включение превращается в сферическую частицу, размер которой предопределен массой включения. Предложенный способ генерации горящих монодисперсных частиц Ti физически моделирует образование агломератов при горении пиротехнических композиций.

Начальный диаметр частиц определяли расчетным путем как диаметр сферы из титана, содержащегося в одном включении:  $D = \sqrt[3]{6m_{Ti}/\pi\rho_{Ti}}$ , где  $m_{Ti}$  — масса титана во включении,  $\rho_{Ti}$  — плотность титана (принимали  $4.5 \text{ г/см}^3$ ). Корректность этого подхода была проверена экспериментально в [10]: рассчитанный по формуле диаметр в пределах погрешности совпал со средним диаметром частиц, погашенных и отобранных сразу после приобретения ими сферической формы. Это позволяет надеяться, что входящее в состав композиции включение связующее практически полностью газифицируется в процессе трансформации включения в металлическую сферу\*. Конечно, нельзя совсем исключить возможность присутствия в частице углерода (не более 8 мас. % в соответствии с содержанием углерода в связующем и долей связующего в композиции), например в виде карбида титана. Это, однако, не противоречит заявленной концепции имитации образования агломератов при горении конденсированных систем с титаном.

Массу титана во включении  $m_{Ti}$  вычисляли с использованием массовой доли титана в композиции (0.69). Массу одного включения определяли как среднюю по множеству одинаковых включений. Например, для серии экспериментов было изготовлено 219 одинаковых включений общей массой 0.02038 г, так что масса одного включения  $9.3 \cdot 10^{-5}$  г, и включения порождали частицы диаметром  $D = 300$  мкм. Прямое взвешивание каждого включения невозможно, так как его масса меньше погрешности обычных аналитических весов. Так, погрешность применяемых нами полумикровесов МВ 210-А производства ЗАО «Сартогосм», Россия, составляет  $\pm 0.0001$  г.

\* Аналогичная ситуация имела место в случае алюминиевых агломератов [14] с иным составом включений.

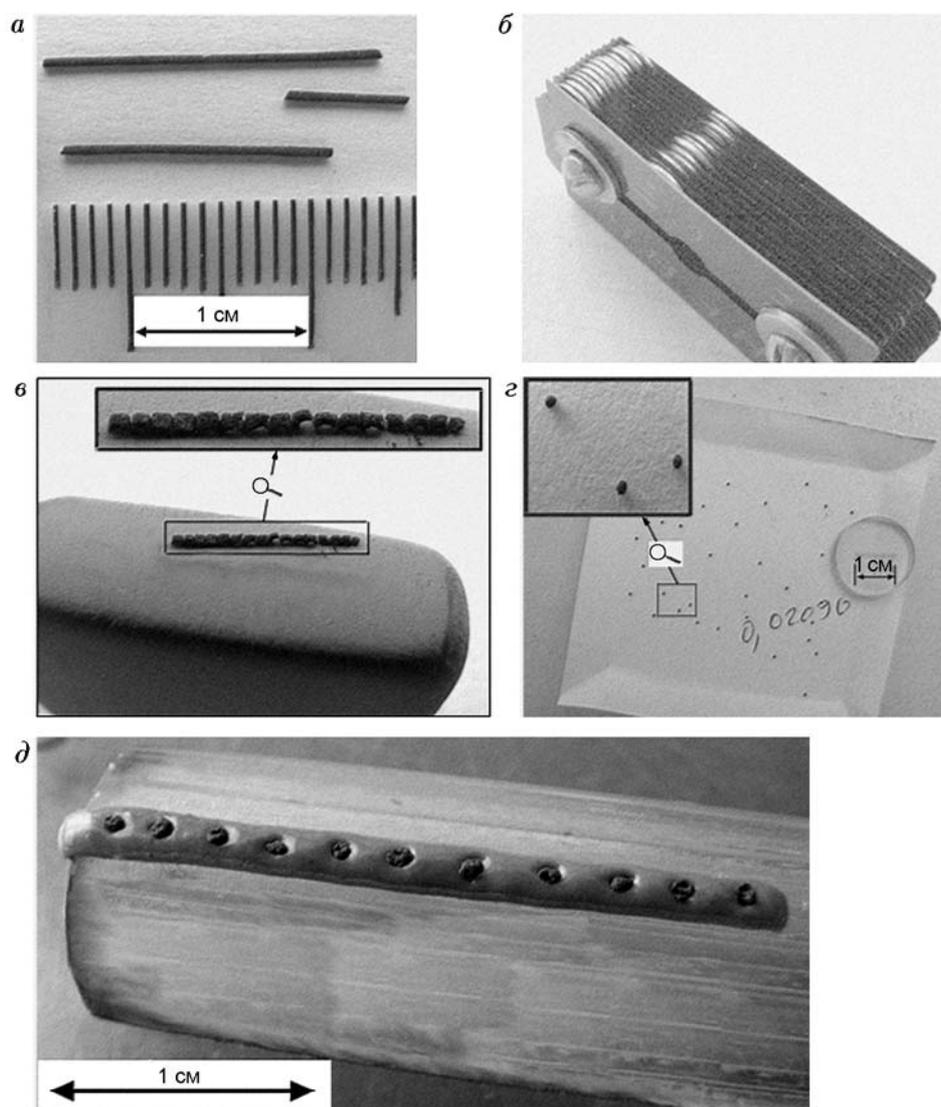


Рис. 2. Приготовление образца:

*a* — из композиции-матрицы путем раскатывания формируем цилиндры диаметром  $\approx 500$  мкм, *b* — с помощью приспособления из бритвенных лезвий, разделенных шайбами, разрезаем цилиндры на одинаковые кусочки, *c* — вид разрезанного цилиндра на резиновой подложке, *z* — из кусочков скатываем шарики и вдавливаем их в полосу композиции-матрицы, нанесенную на кварцевую трубку-держатель, *d* — готовый образец

### ПРОВЕДЕНИЕ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ВИДЕОСЪЕМКОЙ

В большинстве экспериментов трубку-держатель (рис. 3, поз. *A*) располагали горизонтально, образцом вниз, на заданном расстоянии  $L$  от ловушки (поз. *C*). Падение и горение частиц регистрировали цифровым фотоаппаратом (поз. *B*) в режиме видеозаписи со скоростью 30 кадр/с. Ловушка для принудительного гашения и отбора частиц представляет со-

бой цилиндрический сосуд, открытый сверху и продуваемый слабым током аргона, подаваемого снизу. Аргон тяжелее воздуха, и падающая частица практически лишается внешнего окислителя после пересечения плоскости верхнего открытого торца сосуда. Для сбора частиц внутри сосуда закреплены воронка и чашка Петри с подложкой.

В описанной постановке частицы горят в свободном падении в воздухе. В экспериментах определяли параметры событий эволюции

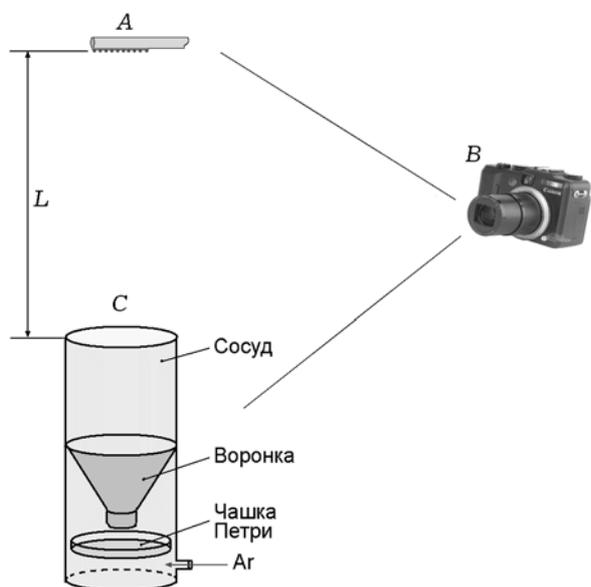


Рис. 3. Схема эксперимента:

*A* — образец на трубке-держателе, *B* — фотоаппарат, *C* — ловушка для гашения и отбора частиц

частиц и регистрировали их движение. Кроме того, отбирали и анализировали конденсированные продукты горения. Для горящих частиц титана выделяли следующие события: начало фрагментации — *b*, окончание фрагментации — *e*, окончание горения — *z*. Отметим особо, что фрагментация частиц исследуемых размеров происходит посредством отстрела мелких частиц-фрагментов от горячей материнской частицы, которая по окончании фрагментации не исчезает. Окончание горения регистрируется как постепенное снижение яркости свечения частицы, после чего частица перестает быть видимой. При короткой дистанции *L* вместо естественного окончания горения (события *z*) реализуется принудительное гашение — событие *s*. Совокупность событий называли сценарием. Например, сценарий *bez* означает, что в жизни частицы имели место начало фрагментации, ее окончание, естественное окончание горения. Сценарий *bs* означает, что частица начала фрагментироваться, но была принудительно погашена до окончания фрагментации.

На рис. 4 показана кинограмма — последовательность фрагментов кадров видеозаписи, демонстрирующая вылет частицы из образца и ее свободное падение вплоть до попадания в ловушку. Для построения кинограмм ис-

пользуется компьютерная программа собственной разработки. Программа в автоматическом режиме вырезает из каждого кадра видеозаписи заданный прямоугольный фрагмент, подписывает номер кадра и помещает фрагменты последовательно в единый графический файл (часть такого файла показана на рис. 4). Дальнейшие измерения координаты частицы *x* в момент времени *t* проводили «вручную» с использованием программы обработки изображений ScopePhoto [18].

По кинограммам определяли:

(1) Числовые параметры событий эволюции частиц — время (момент)  $t_{ev}$  наступления события, расстояние  $x_{ev}$ , пройденное частицей к моменту наступления события, и скорость  $v_{ev}$  частицы в момент наступления события. Здесь индекс *ev* (event) — одно из событий *b*, *e*, *z*, *s*. Заметим, что время определяется с погрешностью, равной длительности кадра (1/30 с).

(2) Закон движения и коэффициент аэродинамического сопротивления частицы. Вначале для каждой частицы в серии экспериментов с фиксированным диаметром строили зависимость координаты от времени  $x(t)$ . После этого зависимости осредняли, получая обобщенный закон движения частиц данного размера. Посредством дифференцирования из него извлекали зависимость  $v(t)$ . К этой эмпирической зависимости затем подгоняли расчетную зависимость, которую находили путем численного решения задачи о движении сферической частицы в воздухе под действием сил тяжести и Стокса. Подгонку производили посредством вариации параметров  $A$  и  $v_0$ , где  $A$  — константа в выражении для коэффициента аэродинамического сопротивления частиц в форме  $C_d = A/Re$  ( $Re$  — число Рейнольдса),  $v_0$  — начальная скорость частиц. В расчетах использовали значения плотности частиц  $4.5 \text{ г/см}^3$  и динамической вязкости воздуха  $8.213 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$  (вычислена по формуле  $\mu = 1.717 \cdot 10^{-5} (T/273)^{0.683}$  из [19] при температуре  $T = 2700 \text{ К}$ , равной температуре горения частиц титана [13]). Забегая вперед, отметим, что коэффициент сопротивления горящих частиц выше, чем в классическом стоксовском выражении  $C_d = 24/Re$ .

(3) Параметры разлета фрагментов — максимальная дистанция (видимое удаление от материнской частицы) и скорость. Дистанцию находили путем «ручных» пиксельных измерений на графическом файле, скорость — путем деления дистанции на длительность кадра.

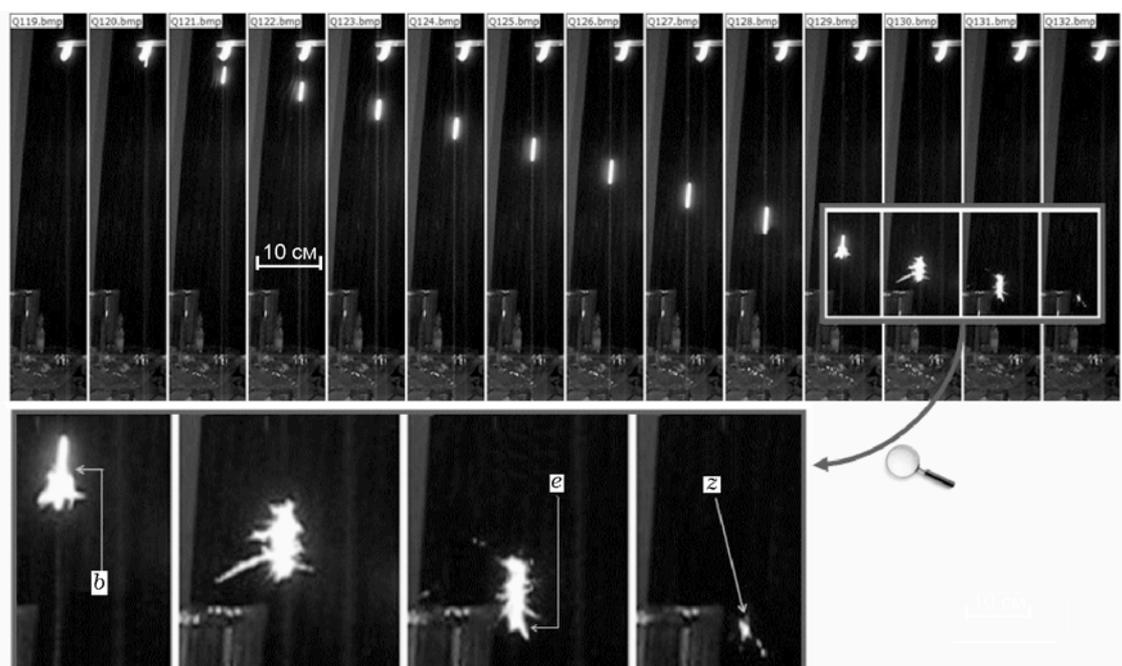


Рис. 4. Характерные события эволюции частицы (полет одной частицы от образца до ловушки): сверху каждого фрагмента — конец кварцевой трубки с горящим образцом, виден его факел, внизу — ловушка для гашения/отбора частиц; за время экспозиции кадра  $1/30$  с частица смещается на  $\approx 5$  см (см. светящийся отрезок); частица следует сценарию *bez*, события показаны в увеличенном масштабе; при наступлении события *b* (начало фрагментации) трек частицы становится «лохматым» из-за отстреливаний многочисленных мелких фрагментов; по окончании фрагментации (событие *e*) трек гладкий, кадр с событием *z* — последний, на котором частица еще видна

## ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ ГОРЯЩЕЙ ЧАСТИЦЫ

В ходе экспериментов было замечено, что почти сразу после выхода из образца частицы начинают очень ярко светиться. Это свечение (сияние) длится непродолжительное время, затем яркость свечения уменьшается и изменяется слабо почти до окончания горения. В самом конце горения яркость постепенно снижается вплоть до полного исчезновения свечения. В некоторых случаях по окончании фрагментации наблюдались пульсации яркости (мерцание). Очевидно, что динамика свечения и соответствующие характерные времена могут дать дополнительную информацию о механизме горения. Однако количественная регистрация свечения в нашем случае осложнена большим пространственным масштабом экспериментов. Например, у частиц размером  $480$  мкм общая длина трека более  $2$  м. Поэтому мы ограничились оценочной полуколичественной регистрацией сияния, проводя видеосъемку началь-

ного участка траектории частицы при сравнительно большом увеличении. Кадры видеозаписи со светящимися отрезками-участками трека, подобные показанным на рис. 4, обрабатывали на компьютере с использованием программ ScopePhoto [18] и ImageJ [20]. Вследствие возрастания интенсивности свечения на изображении увеличивается видимая ширина трека. При обычном режиме видеозаписи центральная часть трека «пересвечена» — уровни цветовых компонентов R, G, B близки к предельному значению 255, поэтому вначале проводили бинаризацию изображения. Уровень бинаризации (194) был подобран таким образом, чтобы размер бинарного черного изображения визуально соответствовал «пересвеченной» области трека. Обработка изображений включала определение площади и длины каждого отрезка трека. Условной мерой интенсивности свечения служила «ширина», равная частному от деления площади на длину (в пикселах).

## ОТБОР И ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ

Конденсированные продукты горения титановых частиц состоят из частиц трех основных типов:

- 1) крупные частицы-остатки горения материнских частиц,
- 2) частицы-фрагменты и их продукты горения,
- 3) первичные наноразмерные оксидные частицы — сферулы и состоящие из них агрегаты.

Сферулы и их агрегаты исследованы в [5–9]. Данные о частицах типов 1 и 2 в литературе практически отсутствуют, поэтому именно им было уделено внимание в настоящей работе.

Применяли три варианта организации отбора частиц-фрагментов и материнских частиц (рис. 5), каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки.

Вариант А — с использованием аргоновой ловушки, расположенной на траектории частицы вблизи точки окончания фрагментации (точка *e* на рис. 4). Достоинства варианта А: некоторая часть фрагментов подвергается принудительному гашению и имеется возможность исследовать морфологию частиц-фрагментов,

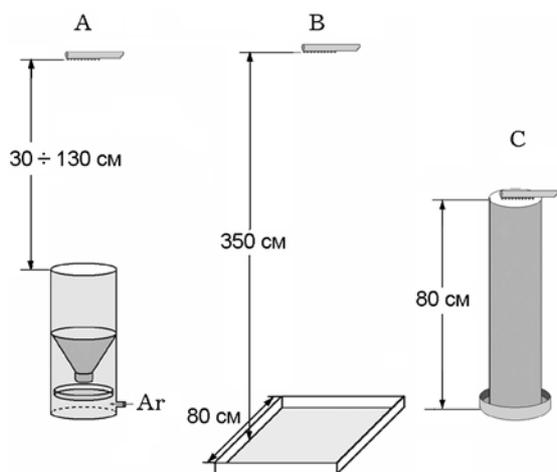


Рис. 5. Три варианта экспериментов с отбором частиц-фрагментов и материнских частиц:

сверху — образец, как на рис. 2 и 3, внизу — аргоновая ловушка (вариант А), большая кювета (вариант В), чашка Петри (вариант С)

только что отделившихся от материнской частицы. В частности, в этом варианте можно разделить металлические и оксидные частицы. Недостаток варианта А — пониженная представительность отбора, так как часть частиц не попадает в ловушку.

Вариант В — с использованием большой (80 × 80 см) плоской кюветы. Этот вариант применяли в случае падения частиц с высоты более 2 м. Он отличается от варианта А более высокой представительностью отбора финальных частиц и частиц-фрагментов размером в десятки микрометров, однако все они попадают в кювету уже полностью сгоревшими.

Вариант С — с использованием сосуда — стальной трубы внутреннего диаметра 5 см, высотой 80 см. Труба установлена вертикально на чашку Петри, в которую собираются частицы, образец сжигается в верхнем открытом торце трубы. Этот вариант применяли для частиц размером 300 мкм, которые полностью сгорают на дистанции меньше 80 см. Гашения частиц не происходит, однако имеется возможность почти полностью отобрать частицы размером от 1 мкм и выше (за исключением тех, что осядут на стенки трубы).

Отобранные частицы подвергали гранулометрическому анализу, подразделяя их на остатки материнских частиц и частицы-продукты фрагментации. Такое разделение естественно, поскольку размер остатков сопоставим с начальным (сотни микрометров), в то время как фрагменты существенно мельче (единицы-десятки микрометров). В большинстве случаев анализ проводили методом оптической микроскопии с построением гистограмм числа частиц с шириной интервала 20 мкм (для частиц размером 300 мкм интервал 10 мкм). Минимальный размер измеряемых под микроскопом частиц был 10 ÷ 15 мкм. Выборку частиц не делали, анализу подвергали все отобранные частицы. Если частицы-продукты по внешнему виду можно отнести к металлическим или оксидным, то для каждого вида строили свою гистограмму. В случае отборов способом С микроскопический анализ был скомбинирован с анализом на автоматическом гранулометре «Малверн-3600Е», минимальный размер анализируемых частиц составлял 0,5 мкм.

Остатки материнских частиц дополнительно исследовали под электронным микроскопом LEO 420, снабженным EDS-приставкой INCA Oxford Instruments для локального эле-

ментного анализа (EDS — energy dispersive spectroscopy — спектроскопия энергетического рассеяния).

Автор выражает благодарность студентам Новосибирского государственного технического университета И. С. Стремяковой и Е. А. Елисейевой за участие в обработке методики и в проведении пробных экспериментов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Шидловский А. А.** Основы пиротехники. — М.: Машиностроение, 1973.
2. **Энергетические** конденсированные системы: краткий энциклопедический словарь / ред. Б. П. Жуков. — М.: Янус-К, 2000.
3. **Пульцин Н. М.** Взаимодействие титана с газами. — М.: Металлургия, 1969.
4. **Weiser V., Neutz J., Eisenreich N., Roth E., Schneider H., Kelzenberg S.** Development and characterization of pyrotechnic compositions as counter measures against toxic clouds // *Energetic Materials. — Performance and Safety: 36th Intern. Annu. Conf. of ICT & 32nd Intern. Pyrotechn. Seminar*, June 28 — July 1, 2005, Karlsruhe, Germany. — P. 102-1–102-12.
5. **Захаров Р. С., Глотов О. Г.** Характеристики горения пиротехнических композиций с порошкообразным титаном // *Вестн. НГУ. Сер. Физика.* — 2007. — Т. 2, вып. 3. — С. 32–40. — [http://www.phys.nsu.ru/vestnik/catalogue/2007/03/Vestnik\\_NSU\\_07T2V3\\_p1-103.pdf](http://www.phys.nsu.ru/vestnik/catalogue/2007/03/Vestnik_NSU_07T2V3_p1-103.pdf).
6. **Khromova S. A., Karasev V. V., Onischuk A. A., Glotov O. G., Zarko V. E.** Formation of nanoparticles of  $TiO_2$  and  $Al_2O_3$  at combustion of metal droplets // *Nonequilibrium processes, V. 2: Plasma, Aerosols, and Atmospheric Phenomena* / G. Roy, S. Frolov, A. Starik (Eds). — Moscow: Torus press, 2005. — P. 225–234.
7. **Karasev V. V., Onischuk A. A., Khromova S. A., Glotov O. G., Zarko V. E., Pilyugina E. A., Tsai C.-J., Hopke P. K.** Peculiarities of oxide nanoparticle formation during metal droplet combustion // *Energetic Materials — Insensitivity, Ageing, Monitoring: 37th Intern. Annu. Conf. of ICT*, 2006, Karlsruhe, Germany. — P. 124-1–124-12.
8. **Карасев В. В., Онищук А. А., Хромова С. А., Глотов О. Г., Зарко В. Е., Пилюгина Е. А., Тсай Ч.-Цз.** Образование наночастиц оксида металла при горении частиц титана и алюминия // *Физика горения и взрыва.* — 2006. — Т. 42, № 6. — С. 33–47.
9. **Glotov O. G., Zarko V. E., Simonenko V. N., Onischuk A. A., Baklanov A. M., Gus'kov S. A., Dushkin A. V.** In search of effective ways for generation of  $TiO_2$  nanoparticles by means of firing Ti-containing pyrotechnic composition // *Eucass 2009, 3rd Europ. Conf. for Aero-space Sci.*, France, Paris, July 6–9, 2009. — CD Copyright 2009 by the von Karman Institute for Fluid Dynamics / M. L. Riethmuller (Editor-in-Chief).
10. **Glotov O. G., Simonenko V. N., Zarko V. E., Surodin G. S.** Combustion of monodisperse titanium particles in air // *Energetic Materials for High Performance, Insensitive Munitions and Zero Pollution: 41st Intern. Annu. Conf. of ICT*, Karlsruhe, Germany, June 29 — July 2, 2010. — P. 30-1–30-14.
11. **Glotov O. G., Zarko V. E., Simonenko V. N.** Combustion of monodisperse titanium particles free falling in air // *Energetic Materials: Modeling, Simulation and Characterisation of Pyrotechnics, Propellants and Explosives: 42nd Intern. Annu. Conf. of the Fraunhofer ICT*, June 28 — July 1, 2011, Karlsruhe, Germany. — P. 45-1–45-12.
12. **Глотов О. Г.** Горение частиц титана в воздухе // *Тр. междунар. конф. «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика», посвященной 90-летию со дня рождения акад. Н. Н. Яненко (Новосибирск, Россия, 30 мая — 4 июня 2011 г.)*. — Гос. регистр. № 0321101160, ФГУП НТЦ «Информрегистр». — Новосибирск, 2011. — [http://conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/37173/46861/Glotov\\_Ti\\_6pages.pdf](http://conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/37173/46861/Glotov_Ti_6pages.pdf).
13. **Molodetsky I. E., Dreizin E. L., Vicenzi E. P., Law C. K.** Phases of titanium combustion in air // *Combust. Flame.* — 1998. — V. 112. — P. 522–532.
14. **Глотов О. Г., Жуков В. А.** Эволюция 100-микронных алюминиевых агломератов и изначально сплошных алюминиевых частиц в пламени модельного твердого топлива. I. Экспериментальный подход // *Физика горения и взрыва.* — 2008. — Т. 44, № 6. — С. 52–60.
15. **Каталог** Сигма Олдрич. Порошок титановый сферический, кат. № 578347. — <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/578347?lang=en&region=RU>.
16. **Shafirovich E., Soon Kay Teoh, Varma A.** Combustion of levitated titanium particles in air // *Combust. Flame.* — 2008. — V. 152. — P. 262–271.
17. **Andrzejak T. A., Shafirovich E., Varma A.** On the mechanisms of titanium particle reactions in  $O_2/N_2$  and  $O_2/Ar$  atmospheres // *Propellants, Explos. Pyrotechn.* — 2009. — V. 34. — P. 53–58.
18. **Компания** Scope Tek ®. — <http://www.scopepetek.com/download/download.html>.
19. **Физические** свойства воздуха. — <http://www.highexpert.ru/index.php?go=Content&id=17>.
20. **ImageJ.** — <http://rsb.info.nih.gov/ij/download.html>.

Поступила в редакцию 4/IV 2012 г.