

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ГОРЕНИЯ КРУПНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ЧАСТИЦ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Г. И. Смелков, А. А. Александров, В. А. Пехотиков, Е. В. Гришин

(Балашиха)

В работах [1—5] приводятся многочисленные данные по режиму горения алюминиевых частиц, входящих, как правило, в качестве присадок в ракетные топлива. Это обстоятельство определяло характер выполняемых исследований, реакцию среду, а также дисперсный состав исследуемых частиц, который составлял от единиц до нескольких сотен микрон. В работе [5] при анализе ряда работ по оценке температуры горения частиц алюминия в факеле пламени смесевых составов отмечается, что температура алюминия в пламени металлизированных составов, измеренная тремя методами, лежит в пределах 3100÷3750 К; высказано предположение, что температура поверхности должна быть ограничена температурой кипения алюминия, поскольку последний находится в жидком состоянии.

В данной работе экспериментально исследовались температуры горения алюминиевых частиц диаметром 500÷3000 мкм в воздушном потоке. Подобные частицы образуются при коротких замыканиях электрических проводов с алюминиевыми жилами сечением 2,5÷6 мм<sup>2</sup> в сетях 220/380 В. Разлетаясь в различных направлениях со скоростью до 10 м/с, они представляют большую пожарную опасность для окружающих горючих материалов.

В предварительных экспериментах исследован полный спектр алюминиевых частиц, образующихся при коротком замыкании. Отмечено, что дисперсный состав этих частиц составляет широкий диапазон от 20 до 3000 мкм; размер частиц слабо зависит от плотности и рода тока, протекающего по проводникам. Нижняя часть спектра 20—80 мкм образована, по-видимому, «шариками», вырвавшимися из зоны горения алюминиевых частиц в результате процесса, описанного в [5]. Исследования температуры горения проводились на крупных частицах как наиболее пожароопасных.

### Методика экспериментов

Для измерения температуры горения алюминиевых частиц в воздушном потоке использовалось два метода. В первом измерение проводилось при помощи фоторегистрации процесса короткого замыкания [7, 8]. Особенность применения этого метода здесь заключается в том, что частицы разлетаются в различных направлениях и имеют неодинаковый диаметр. Предполагается как обязательное условие равенство диаметров эталонного и исследуемого образцов, а направление движения частицы должно происходить в плоскости, параллельной плоскости объектива фоторегистрирующей установки.

Короткое замыкание проводников производилось в камере 1 (рис. 1). Диаметр отверстия в диафрагме 2 подобран так, что из всего множества через него проходят одна-две частицы, летящие в нужном направлении. Съемка велась фоторегистратором 3 через стеклянную трубку 4. Исследуемая частица 5 падает в поддон 6, после чего измеряется ее диаметр.

После съемки частицы на ту же киноплёнку экспонировались треки свечения тела накала эталонной лампы, отградуированной по яркостной температуре в диапазоне 2000÷2700°С. В качестве эталонных

использовались температурные лампы 2-го разряда Си-8-200 и Си-10-300. Питание ламп осуществлялось от стабилизированных источников тока СИП-30 М, имеющих точность регулирования тока 0,001 А. Эталонная лампа закрывалась непрозрачным кожухом с отверстием, соответствующим размеру исследуемой частицы. На рис. 2 представлена типичная фотография треков частицы и эталонной лампы. Параллельные линии — эталонные треки с интервалом температур в 200°С, причем нижний трек соответствует 2000°С. Пересекающая эти треки линия — след падающей в воздухе горячей алюминиевой частицы. По измерениям плотности (степени почернения) эталонных треков строилась характеристическая кривая плотность трека — температура, представляющая собой логарифмическую зависимость  $D=f(T)$ . По этой зависимости определены температуры горения частицы на разных стадиях ее полета.

Денситометрические измерения проводились на микрофотометре МФ-4. Правильность выбора исследуемой частицы (исключая отраженные) контролировалась по углу наклона кривой трека частицы (по скорости движения частиц  $u$ )

$$u = k \cdot v \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $v$  — скорость движения пленки;  $k$  — коэффициент увеличения (или уменьшения) на пленке. Поскольку процесс образования и прохождения через диафрагму частиц в описанном методе носит случайный характер, в проведенных опытах удалось зафиксировать температуры частиц диаметром 600 ÷ 1200 мкм. Количество частиц этого диапазона достигает максимального значения в их общем спектре распределения по размерам при коротком замыкании.

Во втором способе температура горения измерялась прецизионным оптическим цветовым пирометром «Веселка-1-3». Частица 3 (рис. 3) «взвешивалась» в электромагнитном поле высокой частоты в индукторе 2 и воспламенялась при помощи аргонодугового плазмотрона 1. При воспламенении частицы происходит автоматическое отклонение плазмотрона и подача воздуха через трубку 5, скорость которого изменяется в соответствии с законом свободного падения данной сферы в воздушной среде. Таким образом, достигается моделирование процесса падения горячей частицы в воздухе. Регистрирующее устройство оптического пирометра 4 (самописец КСМ-4) фиксирует температуру горения в течение всего процесса. Эксперименты по этой методике проводились с алюминиевыми частицам диаметром 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 мм.

### Обработка и результаты экспериментов

Для перехода к истинным температурам от значений, измеренных оптическими методами, использовались известные соотношения [9]. В случае измерения фотометрическим методом связь между действительной температурой  $T$  и измеренной яркостной температурой  $T_{\text{я}}$  черного тела в зависимости от величины монохроматического коэффициента излучения  $\epsilon$  и эффективной длины волны  $\lambda_{\text{эфф}}$  можно записать в виде

$$T^{-1} = T_{\text{я}}^{-1} + \frac{\lambda_{\text{эфф}}}{c_2} \cdot \ln \epsilon(\lambda, T).$$

В экспериментах использовался красный светофильтр. При  $\lambda_{\text{эфф}} = 0,65$  мкм в пределах измеренных температур монохроматический коэффициент излучения для алюминия принят равным 0,4 [10].

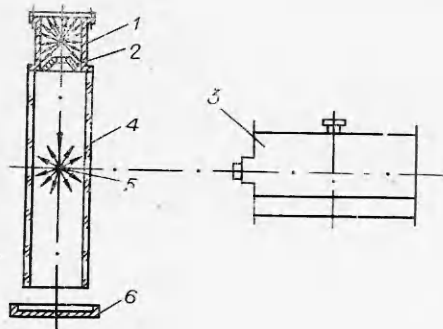


Рис. 1. Стенд для получения и съемки горящих частиц.

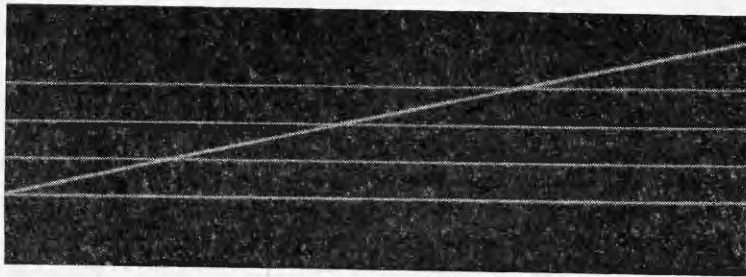


Рис. 2. Фотография трека частицы.

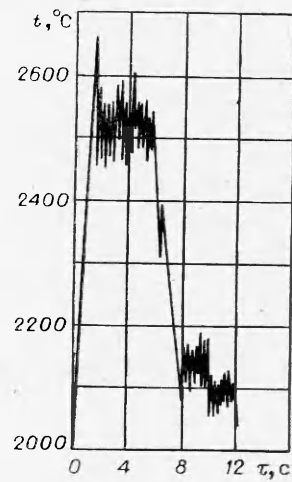
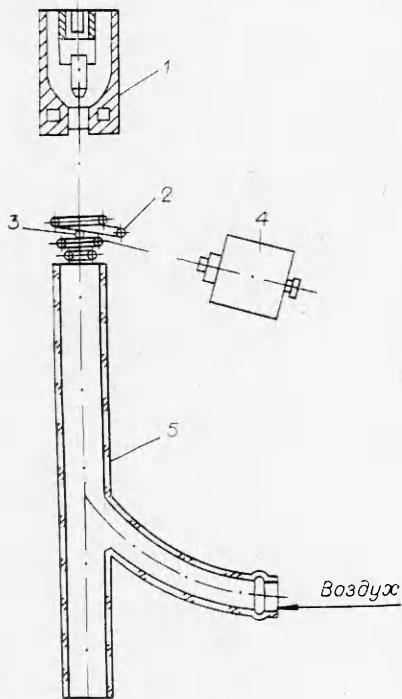


Рис. 4. Температурная диаграмма для горячей алюминиевой частицы;  $d=3$  мм,  $v=8$  м/с.

Рис. 3. Аэродинамическая трубка (разрез).

Этим методом получены значения истинных температур горения алюминиевых частиц от 2050 до 2700°C, причем наибольшее число измерений приходится на температурный диапазон 2250÷2300°C. Этот разброс температур можно объяснить, по-видимому, несколькими причинами, главная из которых — неравенство размеров образовавшихся частиц. Имеются также погрешности, характерные для этого метода, — неравенство характеристических размеров образца и отверстия эталонного насадка, погрешности при измерении скорости вращения электродвигателя фоторегистратора и при обработке фотоматериалов, погрешности денситометрических измерений и другие. В целом точность этого метода в экспериментах оценивается в 15%.

Для перевода измеренной пирометром цветовой температуры  $T_{ц}$  в истинную  $T$  использовалось соотношение

$$T^{-1} = T_{ц}^{-1} + \frac{\Lambda}{c_2} \cdot \ln \frac{\varepsilon |\lambda_1, T|}{\varepsilon |\lambda_2, T|}$$

Здесь  $\Lambda = (\lambda_1 \cdot \lambda_2) / (\lambda_1 - \lambda_2) = 1,27$  — эквивалентная длина волны пирометра.

На рис. 4 приведена типичная диаграмма температуры горения алюминиевой частицы в набегающем воздушном потоке. Характерно наличие двух температурных стадий: высокотемпературного и низкотемпературного горения. На первой стадии температура горения достигает значений 2500÷2700°C. Длительность периода высокотемпературного горения для 3-миллиметровых частиц составляет 0,4÷0,5 полного времени горения ( $\tau_r$ ). С уменьшением диаметра частиц этот период сокращается до 0,2÷0,3  $\tau_r$ , а температура горения незначительно уменьшается (на 150÷200°C). Температура во второй стадии горения для всех исследованных диаметров лежит вблизи  $T_{цк}$   $Al_2O_3$  и составляет 2050÷2100°C.

Наблюдения показали, что процесс горения крупных частиц алюминия нельзя объяснить, опираясь только на известную пузырьковую или парофазную модель горения. В процессе проведения исследований авторами предложена следующая модель горения крупных частиц алюминия с  $d > 1000$  мкм.

Начальная стадия горения частицы происходит в паровой фазе по всей поверхности, чему соответствует пик на кривой температура — время (см. рис. 4). Постепенно на поверхности частицы неравномерно образуются «островки» окисла, наблюдаемые через оптическую систему цветového пирометра. Конец высокотемпературной стадии горения характеризуется образованием сплошной пленки окисла алюминия, чему соответствует резкое снижение температуры. Диффузия кислорода в зону горения алюминия через пленку окисла приводит к повышению давления внутри оболочки окисла. Последнее обстоятельство вызывает прорыв окисла в наиболее слабом месте (сторона сферы, противоположная фронту набегающего воздушного потока). В этом районе образуется кратер, через который вырываются продукты горения и поступает окислитель.

Парофазная модель горения больших частиц алюминия предполагает иную схему процесса: на поверхности сферы накапливается окисел, имеющий пористую структуру. Испаряющийся алюминий диффундирует в зону реакции, и выделяющееся тепло нагревает каплю металла, расположенную за постепенно утолщающимся слоем окисла. Температура капли может достичь точки кипения алюминия и вследствие перегрева разорвать оболочку окисла. В результате крупная частица распадается на несколько мелких.

С позиций этой модели трудно объяснить снижение температуры поверхности частицы и появление участка низкотемпературного горения. Согласно существующей модели, диффузия испаряющегося алюминия

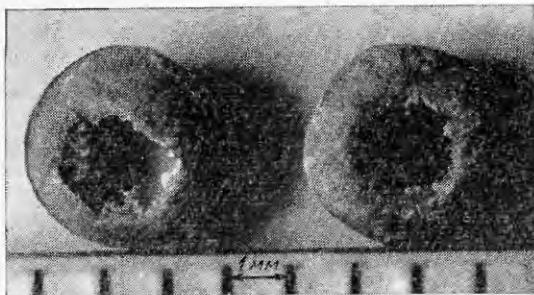


Рис. 5. Фотография «сгоревших» частиц.

но ступенчатое изменение температуры, причем появление ступени низкотемпературного горения объясняется возникновением сплошной пленки окисла (см. рис. 4). Дробление частиц в процессе их горения не наблюдалось.

В подтверждение выдвинутой гипотезы говорят и такие данные, как прямая зависимость размера кратера от времени горения частиц. Например, искусственное прекращение горения в его начальной стадии показало, что до возникновения кратера частица алюминия покрыта сплошной пленкой окисла. Увеличение времени горения (до момента искусственного прекращения горения) ведет к увеличению глубины кратера (рис. 5). Исследования показали, что с момента образования кратера происходит выгорание алюминия через зону кратера. Пленка окисла увеличивается к центру сферы («внутреннее» горение алюминия). Восстановлению сплошной пленки окисла мешает избыточное давление паров алюминия. Вероятно, кислород воздуха поступает в зону реакции в основном через кратер и частично диффундирует через расплавленную пленку окисла алюминия.

Поступила в редакцию  
26/IV 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов. РТК, 1975, 13, 2.
2. Б. М. Злобинский, В. Г. Иоффе, В. Б. Злобинский. Воспламеняемость и токсичность металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1972.
3. Р. Фридман, А. Мачек.— В сб.: Гетерогенное горение. М., «Мир», 1967.
4. Ю. А. Гальченко, Ю. М. Григорьев, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1973, 9, 1.
5. П. Ф. Похил и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М., «Наука», 1968.
6. А. А. Раздобреев, А. И. Скорик, Ю. В. Фролов. ФГВ, 1976, 12, 2.
7. В. А. Попов. Изв. АН СССР, ОТН, 1956, 1.
8. Б. А. Хрусталева, А. М. Раков. Теплообмен, гидродинамика и теплофизические свойства вещества. М., «Наука», 1968.
9. Д. Я. Свет. Объективные методы высокотемпературной пирометрии на непрерывном спектре излучения. М., «Наука», 1968.
10. R. Bourgiannes. C. R. Acad. Sc. Paris, T. 275, 1972.