

ЛИТЕРАТУРА

1. Шидловский А. А. Основы пиротехники.— М.: Машиностроение, 1973.
2. Шидловский А. А., Горбунов В. В. Изв. вузов. Сер. химия и хим. технология, 1972, 15, 5, 649.
3. Горбунов В. В., Хромов В. Г., Шидловский А. А. ЖПХ, 1971, 44, 4, 727.
4. Васильев А. В., Горбунов В. В., Хромов В. Г. и др. Изв. вузов. Сер. химия и хим. технология, 1971, 14, 2, 183.
5. Parker V. B., Wagman D. D., Evans W. H. NBS Technical Note 270—6.— Washington, 1971.
6. Некрасов Б. В. Основы общей химии.— М.: Химия, 1967.
7. Росговец С. Т. Теория металлургических процессов.— М.: Металлургиздат, 1956.

г. Москва

Поступила в редакцию 17/III 1989,
после доработки — 26/VI 1989

УДК 662.612.3

А. В. Суслов, Э. Л. Дрейзин, М. А. Трунов

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ МОНОДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ В ИМПУЛЬСНОЙ ДУГЕ

Получение металлических частиц с заранее заданными начальными параметрами (температура, размер и др.) позволяет повысить эффективность экспериментального изучения закономерностей их горения.

Высокую степень монодисперсности изучаемых частиц, локализацию в пространстве и времени их поджигания и регулируемую начальную температуру можно обеспечить, используя генератор монодисперсных сферических микрогранул [1, 2]. Работа генератора основана на оплавлении проволочного электрода импульсной электрической дугой. Сформированная капля расплава отрывается от электрода под действием сил, возникающих в дуговом столбе. Таким способом получены частицы меди, вольфрама, молибдена и никеля. Их диаметр регулируется от 100 до 300 мкм, причем разброс по размерам составляет для различных металлов 5—10 %.

Высокая скорость прогрева плавящегося электрода в дуговом импульсе позволяет при анализе процесса пренебречь тепловыми потерями [3]. Начальная температура частицы T_0 с радиусом r может быть связана с параметрами дугового импульса силой тока I , напряжением U и длительностью τ :

$$T_0 = T_{пл} + \frac{1}{C_{ж}} \left[\frac{3IU\tau}{4\pi r^3 \rho} - C_{тв} (T_{пл} - T_{ср}) - \lambda \right], \quad (1)$$

где $T_{ср}$, $T_{пл}$ — соответственно температура среды и температура плавления металла; ρ — плотность металла; $C_{тв}$ и $C_{ж}$ — удельные теплоемкости металла в твердом и жидком состояниях; λ — удельная теплота кристаллизации. Для получения металлических частиц соотношение (1) выполняется с точностью ~20 %.

При диспергировании в различных окислительных средах (включая воздух) частицы, свободно падая, воспламеняются и горят. Процесс горения движущихся медных, вольфрамовых и молибденовых частиц фиксировался на неподвижную фотопленку. Для всех перечисленных металлов наблюдалось, как минимум, двухстадийное горение. Характерные треки частиц приведены на рис. 1.

После первой стадии горения, завершающейся существенным уменьшением размера и яркости светящейся зоны вокруг частицы, наблюдается резкая вспышка и переход ко второй стадии. Для медных частиц

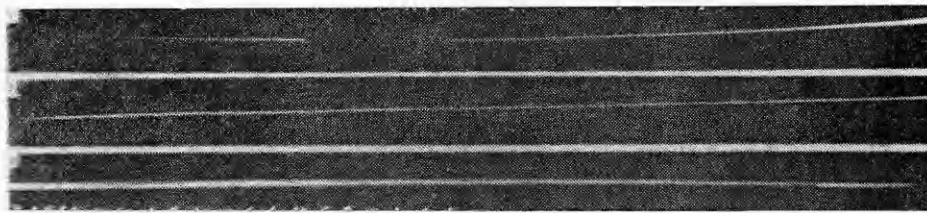


Рис. 1. Характерные треки горения частиц Cu (а), Мо (б) и W (в).



Рис. 2. Третья стадия горения и вторая вспышка для частицы меди.

установлено существование еще одной вспышки и третья фаза горения (рис. 2), которая протекает менее интенсивно.

Двухстадийный процесс горения металлических частиц, например алюминия, бора, известен [4], однако он не получил соответствующей теоретической интерпретации. Одна из возможных причин этого явления может заключаться в изменении химизма реакции [5] — смене гетерогенного механизма реагирования на газофазный с образованием промежуточных окислов и их доокислении до конечного продукта в газовой фазе. На возможность такого протекания процесса для исследуемых металлов указывает существенное уширение при вспышке трека частицы по сравнению с ее размерами (рис. 3). Значительная ширина трека на начальной стадии горения может быть связана со свечением удаленной от реагирующей поверхности зоны конденсации.

Температура движущихся металлических частиц оценивалась при обработке показаний яркостного импульсного пирометра. Установлена близость температур частиц непосредственно перед вспышкой к температурам кристаллизации соответствующих металлов. Это позволило выдвинуть предположение о том, что кристаллизация и процессы, ее сопровождающие, инициируют воспламенение. Объединяет целую группу механизмов, обуславливающих появление второй стадии горения, — изменение реагирующей поверхности или ее доступности. Один из элементов базируется на предположении о появлении при кристаллизации трещин на поверхности чистого металла (частицы вольфрама и молибдена) или в слое твердого окисла (медные частицы).

Заслуживает рассмотрения механизм, определяющий элемент которого — изменение температурного поля вблизи частицы, влияющее на режим горения. Существенное условие этого подхода состоит в нестационарности остывания движущейся частицы в холодной газовой среде. Проведенные оценки, использующие экспериментально определенные скорости движения частиц (порядка 2 м/с), показывают, что за время смещения частицы на характерное расстояние, равное ее диаметру, за счет теплопроводности успевает прогреться зона, сравнимая лишь с размерами пограничного слоя (10—20 мкм). Значительно большие размеры наблюдаемой светящейся зоны связаны с уносом тепла уходящими от ча-

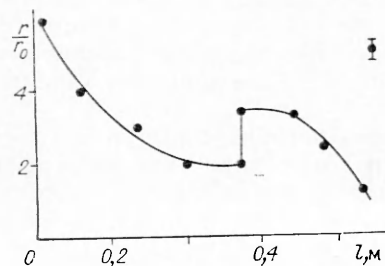


Рис. 3. Размеры светящейся зоны у частицы вольфрама в зависимости от пройденного ее расстояния.

стицы продуктами реакции. Дополнительное тепловыделение за счет кристаллизации улетающих окислов [6] не оказывает существенного влияния на горение частицы при температурах, значительно больших температуры их кристаллизации. Это связано со значительным расстоянием между частицей и зоной конденсации. По мере снижения T зона конденсации приближается к реагирующей поверхности, и когда расстояние уменьшается до размеров пограничного слоя, тепловой баланс частицы резко изменяется, что может привести к вторичному воспламенению.

Выдвинута гипотеза, согласно которой вспышка происходит в результате резкого изменения реакционной способности молекул кислорода, возбужденных при взаимодействии с электронами, вылетающими с поверхности частицы в момент кристаллизации (явление экзоэмиссии). Указанные причины не связаны с химизмом процесса и, следовательно, должны носить универсальный характер, по крайней мере для частиц металлов, для которых характерен гетерогенный механизм горения. Таким образом, для исследования многостадийного горения необходимо расширить номенклатуру изучаемых металлов.

Следует отметить, что использование генератора, позволяющего легко получать статистические ансамбли идентичных металлических частиц, позволяет резко интенсифицировать экспериментальную часть исследования процессов горения.

В заключение авторы выражают благодарность В. Г. Шевчуку за ценные замечания, высказанные при обсуждении настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суслев А. В., Дрейзин Э. Л. // Тез. докл. I Всесоюз. конф. «Физика и техника монодисперсных систем». — М.: Изд-во МЭИ, 1988.
2. Суслев А. В., Дрейзин Э. Л. // Материалы семинара «Электрокаплевая технология в реализации программы «Интенсификация-90». — Л., 1989.
3. Rudenberg R. Elektrische Schaltvorgänge. — Berlin; Heidenberg; N. Y.: Springer-Verlag, 1974.
4. Macek A., Semple J. // AIAA 5th Propulsion Joint Specialist Conf. — Colorado, 1969.
5. Похил П. Ф., Беляев А. В., Фролов Ю. В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. — М.: Наука, 1972.
6. Лукин А. Я., Степанов А. М. ФГВ, 1983, 19, 3.

г. Одесса

Поступила в редакцию 14/III 1989,
после доработки — 30/V 1989

УДК 536.46

Л. К. Гусаченко

ДЕЙСТВИЕ КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ НА СОБСТВЕННЫЕ ЛОКАЛЬНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

На двух простейших моделях показано, каким образом хаотические локальные пульсации скорости горения твердого топлива (ТТ) под действием колебаний давления могут стать когерентными.

Возможность подобной синхронизации пульсаций впервые упомянута в [1]. Сами пульсации скорости горения локальных участков поверхности ТТ могут быть вызваны при $p = \text{const}$ для смесового ТТ неомогенностью состава [2], для баллистита (и вообще квазигомогенного ТТ) накоплением и периодическим сбросом с горячей поверхности труднолетучих компонентов [3]. Хаотичность при $p = \text{const}$ обеспечивается для