

В опытах при нормальном давлении получены пределы воспламенения частиц магния в смеси кислорода с водяным паром. При измерениях оставалось постоянным суммарное объемное содержание C кислорода («к») и водяного пара («вп»), но изменялось содержание каждого из окислителей (см. таблицу). Здесь критерий Рейнольдса Re рассчитывался по средней расходной скорости v , критерий Nu — по формуле Маршалла-Ранца

$C_{вп}$	$C_{к}$	$T_c, ^\circ C$	$v, \text{см/с}$	Re	Nu
0,285	0,000	634	114	10,4	3,94
0,230	0,055	603	138	11,1	4,0
0,190	0,095	600	114	11,4	4,05
0,142	0,143	616	272	25	5,0
0,000	0,285	627	70	6,2	3,5

$$Nu = 2 + 0,6Re^{1/2}Pr^{1/3}$$

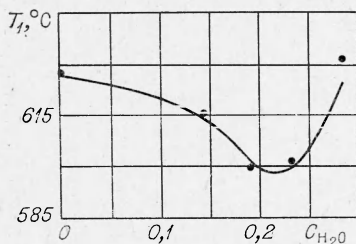
(Pr — критерий Прандтля). Опытные точки даны на рисунке.

При расчетном построении этой же зависимости по изложенной выше схеме использовались уравнения для скорости гетерогенного окисления частиц магния, найденные обработкой опытов по воспламенению частиц магния в водяном паре и кислороде [3]:

$$k_{с_{вп}} = 0,254 \cdot 10^8 \rho_0^{0,5} n_{вп_0}^{0,5} \exp\left(-\frac{40470}{RT}\right) \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}\right],$$

$$k_{с_{к}} = 0,200 \cdot 10^8 \rho_0^{0,5} n_{ок_0}^{0,5} \exp\left(-\frac{142600}{RT}\right) \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}\right].$$

В расчете использованы физические константы: $p = 10^5$ ата, $c_a = 0,345$ кал/(г·град), $\lambda = 178 \cdot 10^{-6}$ кал/(см·град·с); $\rho_0 = 0,305 \cdot 10^{-3}$ г/см³; $\epsilon = 0,35$; $q_{вп} = 4700$ кал/г; $q_k = 9180$ кал/г; $l = 31600$ кал/моль, $R = 2$ кал/моль, $\sigma^* = 0,0136$ кал/(см²·с·град). Расчетная кривая нанесена на рисунке (в объемных концентрациях). Отметим, что в среде, содержащей только кислород или только водяной пар, расчетная кривая располагалась ниже опытных точек вследствие использования условий



$$n_{к_0} = n_{к_c}; \quad n_{вп_0} = n_{вп_c}.$$

На основании приведенных результатов можно заключить, что при рассмотренном здесь механизме окисления зависимость предельной температуры от содержания одного из окислителей при постоянном суммарном содержании окислителя в среде должна иметь минимум, если

$$k_1^* q_1 \approx k_2^* q_2.$$

Поступила в редакцию
19/XI 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Р. Эванс. Коррозия и окисление металлов. М., Машгиз, 1962.
2. J. L. Blumental, M. J. Santy. 11-th symposium (Int.) on combustion., N. Y., 1967.
3. Г. К. Ежовский, А. С. Мочалова и др. III Всесоюзн. симпозиум по горению и взрыву. Автореф. докл. Черноголовка, 1971.
4. В. П. Грачухо, Е. С. Озеров, А. А. Юринов. ФГВ, 1972, 7, 2.

УДК 662.311.681.2.08

ИЗМЕРЕНИЕ МАССОВОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ВВ

В. Ф. Михеев, С. М. Борин
(Новосибирск)

В исследованиях процессов горения твердых ВВ одной из фундаментальных характеристик является скорость горения. Известные методы измерения линейных скоростей горения твердых ВВ [1] применимы для измерения только средних скоростей ста-

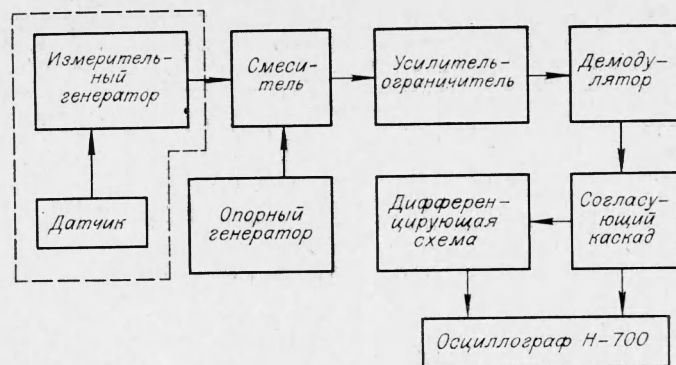


Рис. 1.

ционарного горения. В случае нестационарного горения, когда скорость меняется во времени, методы средних линейных скоростей вообще не позволяют исследовать закономерности процесса. В первую очередь это относится к процессам перехода от зажигания к горению (особенно при зажигании интенсивными тепловыми потоками) и перехода с одного режима горения на другой. Для изучения нестационарного горения необходимы методы, позволяющие непрерывно регистрировать скорость, причем известны [2, 3] две попытки создания таких методов.

Метод Германса [2] основан на использовании образца твердого топлива в качестве диэлектрического материала конденсатора, составляющего часть резонансного LC-контура, и применим только для веществ, являющихся хорошими диэлектриками.

Описанный в [3] метод непрерывного измерения массовой скорости горения твердых ВВ, основанный на непрерывном взвешивании горящего образца, также имеет ряд ограничений, главные из которых — недостаточная ширина полосы пропускания (десятки герц), сравнительно низкая чувствительность к изменению массы (сотни миллиграмм).

В настоящей работе предлагается более совершенный метод измерения массовой скорости, позволяющий исследовать как стационарные, так и нестационарные процессы горения твердых ВВ. Метод основан на непрерывном измерении убыли массы горящего образца ВВ с помощью емкостного датчика микроперемещений и электронной измерительной схемы.

Блок-схема измерительной установки показана на рис. 1. При поджигании исследуемого образца его первоначальная масса изменяется, что вызывает изменение емкости датчика, являющейся элементом LC-контура измерительного генератора, настроенного на среднюю частоту 25 мГц. Промодулированный датчиком сигнал с измерительного генератора подается на смеситель. На этот же смеситель поступает высокочастотный сигнал с опорного генератора, настраиваемого на частоту 22,5 мГц. В нагрузке смесителя выделяется разностная частота 2,5 мГц. После усиления и ограничения по амплитуде сигнал поступает в демодулятор, в нагрузке которого выделяется напряжение, пропорциональное изменению массы образца. Это напряжение через согласующий каскад подается одновременно на светолучевой осциллограф и дифференцирующую схему. После дифференцирования напряжение, пропорциональное массовой скорости горения, регистрируется осциллографом. Опорный генератор может перестраиваться в пределах ± 2 мГц, что позволяет подстраивать нулевой уровень прибора при работе с образцами массой от нескольких десятков миллиграммов до двух граммов. Схема полностью выполнена на полупроводниковых приборах. Конструкция емкостного датчика микроперемещений показана на рис. 2.

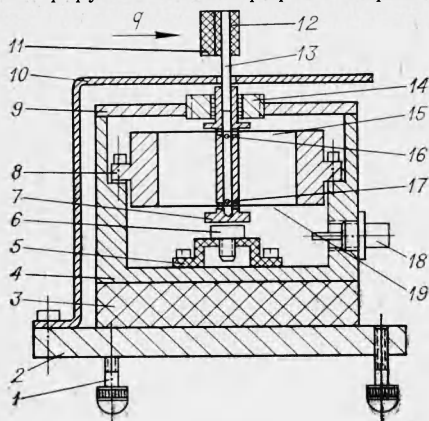


Рис. 2.

Исследуемый образец твердого ВВ 11, приклеенный ацетоном к пенопластовой подложке 12, закрепляется при помощи фарфоровой трубочки 13 в подвижном электроде 7, который подвешен в центре обоймы 8 при помощи растяжек 15—17, 19. Растяжки $\varnothing 0,5-0,7$ мм приклеены эпоксидной смолой к обойме и неподвижному электроду. Неподвижный электрод 6 крепится к корпусу 4 при помощи фарфорового кронштейна 5. Рабочие поверхности электродов отполированы. При расстоянии между электродами ~ 50 мк емкость датчика составляет ~ 5 пФ.

С целью уменьшения температурной погрешности корпус сделан достаточно массивным, обойма и электроды выполнены из инвара, а растяжки из плавленного кварца. Стальной экран 10 защищает датчик от теплового воздействия поджигающего потока q и тепла, выделяющегося при горении образца. С целью уменьшения влияния вибраций на результат измерения датчик устанавливается на слой пористой резины толщиной 50—70 мм; этой же цели служит прокладка 3 из пенопласта. Стойки 1 в основании 2 служат для регулировки положения датчика. При помощи разьема 18 датчик соединяется с измерительной схемой. Успокоение собственных колебаний осуществляется жидкостным демпфером. Демпфирующая жидкость (полифениловый эфир 5Ф43 ТУ 6П-5 № 67) расположена в зазоре между подвижным электродом и гайкой 14, которая также служит ограничителем хода подвижного электрода, исключая поломку хрупких кварцевых растяжек при снятии образца. При установке образца ограничителем служит неподвижный электрод.

Экспериментально были определены основные параметры измерительной установки. Собственная частота ненагруженного датчика равна 400 Гц. При использовании гальванометров с рабочей полосой 0—400 Гц максимальная чувствительность всей измерительной установки равна ~ 800 мм/г. Если считать, что на осциллограмме можно разрешить с приемлемой точностью высоту кривой ~ 10 мм, то при указанной максимальной чувствительности такой сигнал будет соответствовать выгоранию слоя ~ 40 мкм для образца нитроглицеринового пороха диаметром 16 мм. Такая ширина выгоревшего слоя соизмерима с величиной зоны реакции в k -фазе при горении в условиях умеренных давлений. Ни один из указанных выше методов измерения скорости горения не позволяет реализовать такую высокую чувствительность. Амплитудно-частотная характеристика, снятая при нагружении датчика образцом в 0,8 г, линейна в диапазоне частот 0—220 Гц. Градуировка измерительной установки показала, что ее линейность не хуже 2%. Погрешность измерения массовой скорости не превышает 5—7%. Специально проведенные эксперименты по влиянию реактивной силы на результат измерения массовой скорости показали, что если при установке образца на датчике выдержана параллельность фронта горения образца и плоскости, в которой перемещается подвижный электрод, то реактивная сила практически полностью гасится реакцией растяжек и не вносит погрешности в измерение.

В качестве иллюстрации возможностей данного метода на рис. 3 приведена копия осциллограммы записи переходного процесса от зажигания к горению образца нитроглицеринового пороха Н+сажа. Порох зажигался световым потоком $q_0 = 3$ кал/см²·с на воздухе ($p = 1$ атм). Время зажигания $\tau_z = 1,32$ с. Излучение после зажигания не убиралось. Кривая 1 — уменьшение веса во времени, масштаб по ординате — 2 мг/мм. На кривой 2 записан сигнал производной, пропорциональной массовой скорости горения. Четко видна динамика выгорания прогретого слоя; скорость проходит через максимальное значение, превышающее более чем в 2 раза стационарную величину. Время выгорания $\sim 0,22$ с. К моменту выхода скорости на постоянное значение (стационарная скорость горения при наличии внешнего облучения) выгорело ~ 100 мг пороха. При диаметре образца 16 мм (плотность пороха $\rho \approx 1,56$ г/см³) это соответствует слою $\sim 0,32$ мм.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность П. Ф. Лосеву за конструктивную проработку отдельных узлов датчика, В. П. Дьячкову и Т. Ф. Воеводченко за помощь в проведении опытов.

Поступила в редакцию
9/XI 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, В. М. Зайцев. Методы исследования процессов горения и детонации. М., «Наука», 1969.
2. К. Е. Германс. Ракетная техн. и косм., 1967, 5, 10, 57.
3. А. В. Худяков, Г. В. Горварди и др. ФГВ, 1967, 3, 3, 462.

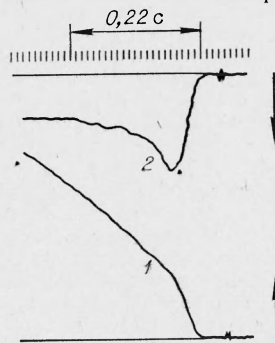


Рис. 3.