

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВО ФРОНТЕ ГОРЕНИЯ БЕЗГАЗОВЫХ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С НИЗКОЙ ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

УДК 536.46

В. Ф. Проскудин, В. А. Голубев, П. Г. Бережко

ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Показано, что метод непрерывного измерения давления в зоне фронта горения с помощью датчика осевого усилия применим к безгазовым пиротехническим системам, которые дают твердые продукты реакции и характеризуются низкой газопроницаемостью образцов в исходном состоянии. Для контроля достоверности получаемых результатов предусматривается размещение в образцах небольших включений высокоэнергетического материала, дающего газообразные продукты горения. Эти включения располагаются вблизи входа в магистраль, ведущую к датчику давления. Приведены результаты экспериментов с образцами $Ti + C + 20\% TiC$, содержащими включения пироксилинового пороха.

Описание процессов в зоне фронта горения пиротехнических систем требует знания ряда параметров, и в частности давления газовой фазы. Это особенно актуально для систем с твердыми продуктами реакции, в которых наблюдается перемещение вещества, в основном обусловленное, по-видимому, воздействием давления в зоне фронта горения. Оценку давления для таких систем удобно проводить путем измерения осевого усилия [1]. При этом часто возникает необходимость расширить область применения этого метода. Например, метод [1] неприменим для случая горения образцов с незажатыми торцами, а также для образцов с низкой газопроницаемостью в исходном состоянии. Первое обстоятельство связано с тем, что, не нагрузив торцы образца, невозможно измерить осевое усилие; второе — с трудностью контроля достоверности получаемых результатов. (Контроль по методу [1] проводится путем сравнения значений давления газовой фазы, измеренного одновременно датчиком осевого усилия и датчиком давления в момент, когда фронт горения приближается к входу в магистраль датчика давления). Дело в том, что для систем с низкой газопроницаемостью уровень давления газовой фазы, попадающей через поры еще не сгоревшей части образца в магистраль датчика давления, оказывается чрезвычайно низким. Первое ограничение может быть снято при зажигании образцов с помощью таблеток с «податливыми» шлаками, которые позволяют образцам при горении частично удлиняться [2]. Затем проводится экстраполяция результатов измерения давления на величину полного удлинения образца, соответствующего горению с незажатыми торцами. Второе ограничение требует модернизации самого метода с целью обеспечения контроля достоверности получаемых результатов. Эта проблема решается путем использования в контрольных опытах образцов, содержащих в зоне глухого торца небольшое количество высокоэнергетического вещества (например, пороха), дающего при сгорании такое количество газа, которое обеспечивает в момент контроля подъем давления до необходимого уровня.

Опыты проводили с использованием лабораторных сборок, снабженных либо датчи-

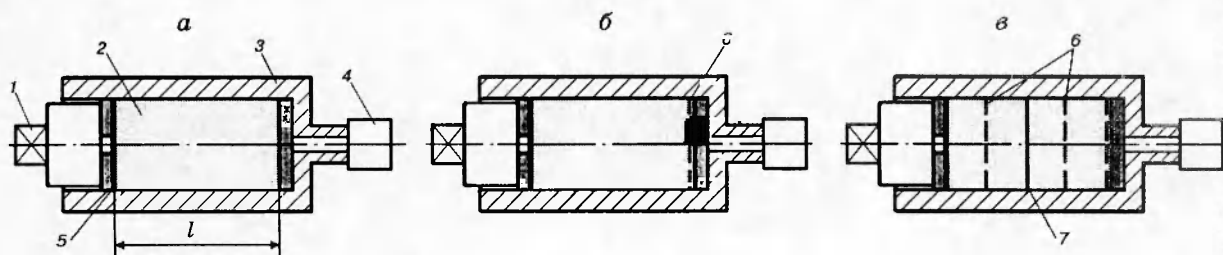


Рис. 1. Лабораторные сборки:

a — образец без посторонних включений, *б* — включения пороха в зоне глухого торца образца, *в* — включения пороха в зоне глухого торца и включения пороха и сажи на границах прессовок; 1 — датчик осевого усилия, 2 — образец, 3 — стальная оболочка, 4 — датчик давления, 5 — таблетка, 6 — пироксилиновый порошок, 7 — сажа

ками осевого усилия и давления (рис. 1, *a*) [1], либо датчиком осевого усилия и фотодиодом [2]. Образцы изготавливали из смеси $Ti + C + 20\% TiC$ [2], прессуя ее в стальные оболочки до относительной плотности 0,7. В большинстве опытов на сетчатое дно оболочек перед прессовкой смеси помещали 10–30 зерен пироксилинового пороха общей массой 0,1–0,3 г (рис. 1, *б*). Образцы имели диаметр 25,2 мм и длину $l = 12, 22$ или 44 мм. Образцы длиной 22 и 44 мм прессовали порциями длиной 11 мм каждая. В некоторых сборках между прессовками размещали включения в виде 10–20 зерен пироксилинового пороха общей массой 0,1–0,2 г или в виде сплошного слоя сажи массой 0,2 г (один из вариантов размещения включений показано на рис. 1, *в*). Образцы зажигали таблетками толщиной 0,7 мм, спрессованными из смеси $Zr + WO_3$ [3] до относительной плотности 0,6.

Для того чтобы снизить силу трения шлаков таблетки и образца о стенки стальной оболочки, на внутреннюю поверхность последней перед прессовкой смесей наносили графитовым стержнем тонкий слой графита.

Начальное осевое усилие F_0 , создаваемое на установках [1, 2], составляло 3 кН.

Типичные осциллограммы, получаемые на установке [1], показаны на рис. 2. Характерная точка L осциллограмм осевого усилия F , как показали опыты, проведенные на установке [2], отвечает приходу фронта горения в зону глухого торца образца.

Низкая газопроницаемость образцов приводит к тому, что газы, выделяющиеся в зоне фронта горения, выходят в основном в атмосферу через твердые продукты реакции — шлаки. В измерительную магистраль датчика давления газ начинает поступать только после окончания горения образца. Положение усугубляется еще и низким газовыделением смеси $Ti + C + 20\% TiC$ ($< 15 \text{ см}^3/\text{г}$). В результате к тому времени, когда давление газовой фазы в магистрали датчика давления, сравниваясь с постоянно снижающимся давлением газовой фазы в зоне шлаков глухого торца образца, достигает максимального значения и можно проводить сравнение показаний датчика давления p_c и датчика осевого усилия F_c , эти показания оказываются слишком малы (см. рис. 2, *a*). В опытах с образцами, не содержащими включений пороха в зоне глухого торца, $F_c = 0,3 \div 0,8 \text{ кН}$ и $p_c = 0,2 \div 1,0 \text{ МПа}$, в то время как номинальные величины осевого усилия F_n , полученные в этих и последующих опытах, лежат в пределах $4,8 \div 6,6 \text{ кН}$.

Наличие зерен пороха в зоне глухого торца образца обеспечило подъем значений F_c и p_c до приемлемого уровня (см. рис. 2, *б*): $2,5 \div 13 \text{ кН}$ и $5 \div 26 \text{ МПа}$ соответственно.

Включения из зерен пороха и слоя сажи, размещенные на границах прессовок образца,

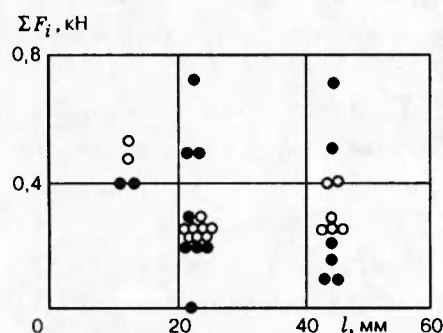


Рис. 3

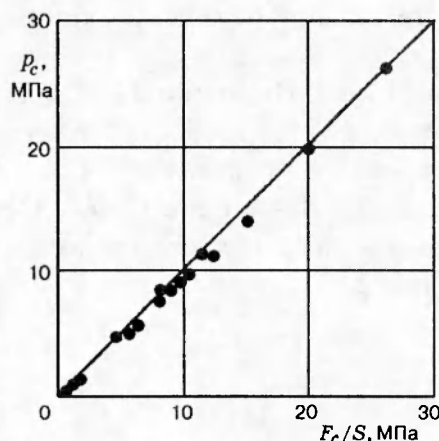


Рис. 4

Рис. 3. Значения величины $\sum F_i$ в опытах с образцами из смеси $Ti + C + 20\% TiC$ (в том числе и с образцами, содержащими включения пороха и сажи на границах прессовок):

темные точки — оценки по формуле $\sum F_i = F_c - p_c S$, светлые — по формуле $\sum F_i = F'_c$

Рис. 4. Зависимость $p_c = f(F_c/S)$ (точки — эксперимент, линия — соотношение (2))

Результаты измерения давления газовой фазы в зоне глухого торца сгоревшего образца одновременно датчиком осевого усилия и датчиком давления позволяют оценить величину $\sum F_i$, требуемую критерием (3), по соотношениям $\sum F_i = F_c - p_c S$ и $\sum F_i = F'_c$ соответственно для двух крайних случаев: когда давление газовой фазы, измеряемое датчиком давления, максимально и когда оно равно нулю. Оценки показали, что при $l = 12 \div 44$ мм среднее значение величины $\sum F_i$ составляет $\approx 0,3$ кН (рис. 3). Это на порядок меньше среднего значения ($\approx 5,7$ кН) величины F_n .

Таким образом, можно считать, что на длине образцов от 12 до 44 мм выполняется критерий (3) и для оценки номинальных значений давления газовой фазы в зоне фронта горения (которые обычно лежат в пределах $9 \div 13$ МПа) приемлемо соотношение (2). Для значений давления газовой фазы, отличающихся от номинальных, вопрос о применимости соотношения (2) может быть решен сравнением соответствия параметров p_c и F_c/S соотношению (2). Результаты экспериментов для образцов длиной от 12 до 44 мм (рис. 4) показывают, что приемлемый уровень точности измерения давления газовой фазы датчиком осевого усилия лежит в диапазоне давлений $3 \div 30$ МПа.

Авторы выражают благодарность участникам проведения экспериментальной части работы Л. А. Журавлевой, А. Г. Лещинской, И. В. Шевцовой, И. Е. Бойцову и В. В. Островскому.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голубев В. А., Бережко П. Г., Проскудин В. Ф., Малышев А. С. О возможности непрерывного измерения давления во фронте горения пиротехнических составов,

- дающих твердые продукты реакции // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 1. С. 67–70.
2. **Голубев В. А., Бережко П. Г., Проскудин В. Ф. и др.** О перемещении вещества воспламенителя и образца при горении безгазовых систем в жесткой оболочке // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 2. С. 93–97.
 3. **Леваков Е. В., Пелесков С. А., Сорокин В. П.** Термoeлектрический метод регистрации автоколебательного режима горения // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 3. С. 18–22.

*Поступила в редакцию 6/II 1996 г.,
в окончательном варианте — 5/VII 1996 г.*
