

**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 высокозергетического 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 высокозергетического 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-

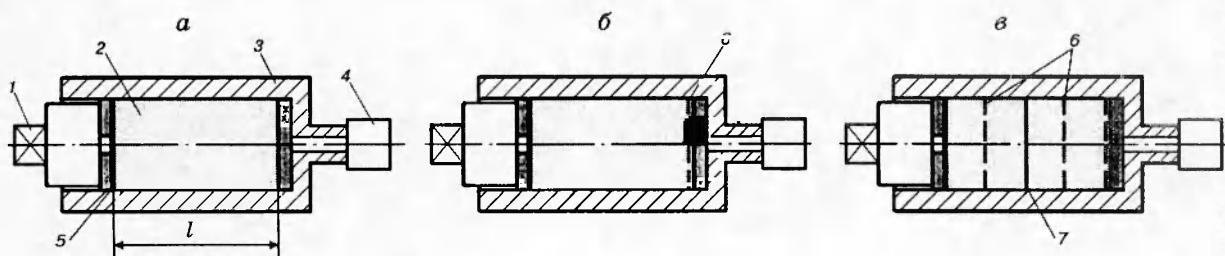


Рис. 1. Лабораторные сборки:

a — образец без посторонних включений, *b* — включения пороха в зоне глухого торца образца, *c* — 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 порох, 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,*b*). 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,*c*). Образцы зажигали таблетками толщиной 0,7 мм, спрессованными из смеси Zr + WO₃ [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,*b*): $2,5 \div 13 \text{ кН}$ и $5 \div 26 \text{ МПа}$ соответственно.

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

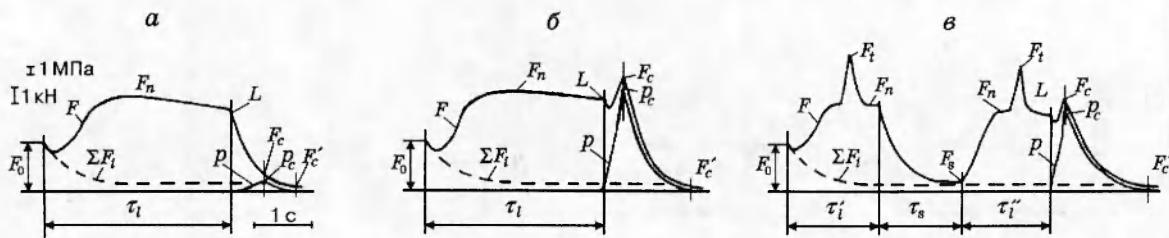


Рис. 2. Схемы осциллограмм давления p (в зоне глухого торца образца) и осевого усилия F , полученных при горении образцов из смеси Ti + C + 20 % TiC:
а — образец без посторонних включений; б — включения пороха в зоне глухого торца образца; в — включения пороха в зоне глухого торца и включения порох-сажа-порох на границах прессовок

показали во всех реализованных вариантах адекватную реакцию установки в виде резкого подъема или снижения осевого усилия относительно его номинальной величины до значений F_t или F_s (см. рис. 2, в) в соответствии с расположением этих включений. При этом значения F_t и F_s составили $8 \div 13$ кН и $0,3 \div 0,8$ кН соответственно. Слой сажи обеспечивал остановку фронта горения на время $\tau_s = 0,9 \div 2,1$ с. Время горения образцов $\tau_l = 0,83 \div 0,86$; $1,4 \div 1,5$ и $3,2 \div 3,3$ с при $l = 12, 22$ и 44 мм соответственно. Значения τ_l практически не менялись при размещении на границах прессовки включений из зерен пороха или слоя сажи (в последнем случае время горения рассчитывали по соотношению $\tau_l = \tau'_l + \tau''_l$, см. рис. 2, в).

Величина осевого усилия определяется соотношением [1]

$$F = pS + \sum F_i, \quad (1)$$

где p — давление газовой фазы в сечении образца с площадью S (в горящем образце — это давление p_f в зоне фронта горения); $\sum F_i$ — сумма сил, обусловленных напряжениями в твердой фазе (включая силу трения о стенки оболочки).

В исходном состоянии величина осевого усилия F_0 обусловлена напряжениями, создаваемыми в таблетке и образце при сборке установки. По мере сгорания таблетки, а затем и образца напряжение в твердой фазе резко снижается, что вызвано уменьшением объема сгоревших частиц образца в результате увеличения кристаллической плотности продуктов реакции по сравнению с кристаллической плотностью исходных веществ. Это приводит к резкому снижению значения составляющей $\sum F_i$ при еще незначительной величине $p_f S$. Поэтому в соответствии с соотношением (1) на осциллографмах осевого усилия сразу же после загорания поджигающей таблетки наблюдается резкое снижение величины F . Наступающий затем рост осевого усилия вызван увеличением значения составляющей $p_f S$ и снижением значения $\sum F_i$. Можно ожидать, что после прохождения фронтом горения некоторого расстояния по образцу величина $\sum F_i$ окажется существенно меньше величины $p_f S$ (предположительный характер изменения величины $\sum F_i$ показан на рис. 2 штриховыми линиями), что позволит для нахождения p_f пользоваться простым соотношением [1]

$$F \approx pS. \quad (2)$$

При этом критерием достоверности соотношения (2) может служить неравенство

$$F_n \gg \sum F_i. \quad (3)$$

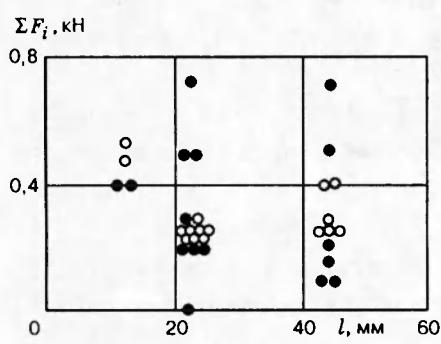


Рис. 3

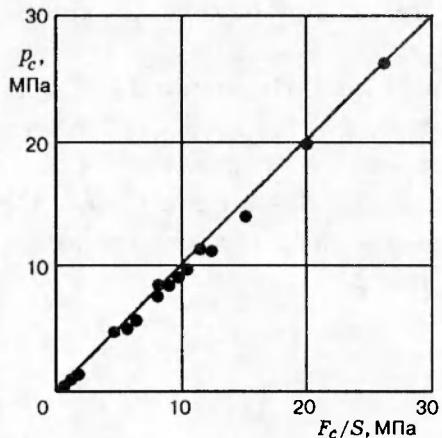


Рис. 4

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

- 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., Прокудин 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. Термоэлектрический 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.*
