

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Т. Ерохин, Ю. И. Федоров. ФГВ, 1971, 7, 4.
2. Б. А. Райзберг, Б. Т. Ерохин, К. П. Самсонов. Основы теории рабочих процессов в ракетных системах на твердом топливе. М., «Машиностроение», 1972.
3. Н. А. Фукс. Испарение и рост капель в газообразной среде. М. Изд-во АН СССР, 1958.
4. Хортон и др. РТК, 1968, 6, 2.
5. Von Elbe G. Theory of Solid Propellant Ignition and Response to Pressure Transients. Interagency Solid Propulsion Meeting 3: 95, 1963.

УДК 662.612.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК К-ФАЗЫ ПРИ ГОРЕНИИ ПОРОХОВ БАЛЛИСТИЧНОГО ТИПА

Ю. С. Иващенко, А. С. Комаров, В. Л. Павленко

(Красноярск)

Исследование электрофизических характеристик к-фазы играет важную роль в изучении процесса горения твердых топлив.

В настоящей работе изложены результаты исследования электропроводности и ее флуктуаций (шумов) в реакционном слое к-фазы горящего баллистического пороха.

1. Зависимость удельной электропроводности σ_k полимеров от температуры описывается соотношением, справедливым для полупроводников

$$\sigma_k = \sigma_0 e^{-E/2kT},$$

где E — энергия активации; σ_0 — электропроводность системы при $T \rightarrow \infty$. Ситуация усложняется в случае полимерных систем, содержащих высокопроводящий наполнитель. Подобные дисперсные системы имеют место при горении металлизированных порохов. Однако даже при отсутствии высокопроводящего наполнителя возможно образование дисперсной системы в реакционном слое горящего пороха. Так, при горении баллистических порохов возможно появление прококсованных волокон нитроцеллюлозы с образованием углеродного каркаса, имеющего при малых скоростях горения надповерхностную структуру. Механизм электропроводности дисперсных систем является пока дискуссионным и определяется типом электропроводящего наполнителя, степенью его дисперсности, температурой и другими факторами.

Довольно значительный вклад в общую проводимость системы может вносить термоэлектронная эмиссия с частиц металла через промежутки между ними. В результате общая электропроводность σ_Σ дисперсного поверхностного слоя горящего пороха складывается из двух видов проводимости

$$\sigma_\Sigma = \sigma_g + \sigma_\tau,$$

где σ_g — электропроводность дисперсной системы в к-фазе; σ_τ — электропроводность, обусловленная термоэлектронной эмиссией.

Величина σ_g в общем виде определяется довольно сложно. Для статистической двухкомпонентной смеси, исходя из модели сферических

частиц в однородной среде, можно привести формулу Максвелла — Бетхера

$$\delta_k \frac{\sigma_k - \sigma_g}{\sigma_k + 2\sigma_g} + \delta_M \frac{\sigma_M - \sigma_g}{\sigma_M + 2\sigma_g} = 0,$$

где σ_k , δ_k , σ_M и δ_M — соответственно электропроводности и парциальные объемы полимера и высокопроводящего наполнителя ($\delta_k + \delta_M = 1$).

Полагая $\sigma_M \gg \sigma_g$, имеем

$$\sigma_g \approx \frac{\sigma_k}{\delta_k - 2\delta_M},$$

т. е. с увеличением парциального объема металла, когда $\delta_M \ll \delta_k$, электропроводность дисперсной системы возрастает.

Величина σ_T определяется соотношением

$$\sigma_T = Ae^{-\varphi/kT},$$

где A — постоянная для данных условий величина; φ — эффективная работа выхода электрона, которая может быть небольшой при близком расположении частиц металла из-за снижения потенциального барьера при перекрытии потенциалов сил изображения.

В проведенных опытах измерялась электропроводность поверхностного слоя баллиститного пороха типа Н и пороха Н, содержащего 10% алюминия. На большие боковые грани прямоугольных образцов сечением 5×15 мм и длиной 100 мм напылением в вакууме наносились электроды из олова толщиной 3—5 мкм.

Низкая температура плавления олова и малая толщина электродов исключали их выход в газовую фазу при горении образца, что устраняло шунтирующее действие проводимости газовой фазы. Образцы пороха с нанесенными электродами для обеспечения торцевого горения покрывались разогретым до жидкого состояния парафином толщиной 2—3 мм. Часть образца с электродами длиной 10 мм оставлялась свободной от покрытия для подключения к измерительной схеме. Готовые образцы крепились в пробке специальной конструкции, обеспечивающей подключение электродов к измерительной схеме.

Опыты проводились в приборе постоянного давления. Электропроводность измерялась на переменном токе частотой 1000 Гц. Величина тока, протекающего в измерительной цепи, составляла ~ 5 мкА. Учитывая неопределенность толщины реакционного слоя h , определялась величина удельной поверхностной проводимости $\sigma = \sigma_2 h$, где σ_2 — общая удельная объемная электропроводность.

Как видно из рис. 1, при горении пороха Н электропроводность слоя увеличивается с ростом давления. Это связано с повышением температуры поверхности и локализацией в поверхностном слое углеродного каркаса, образующегося при коковании волокон нитроцеллюлозы.

Иная зависимость наблюдается при горении металлизированного пороха. При увеличении давления до ~ 50 атм электропроводность падает, а потом начинает возрастать. Изменения электропроводности в области 20—50 атм можно объяснить, исходя из явления агломерации металла на поверхности пороха. С увеличением давления до 50 атм среднеобъемный размер агломератов уменьшается, что приво-

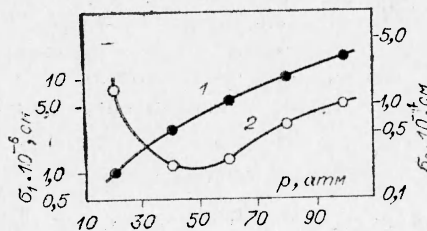


Рис. 1. Зависимости поверхностной электропроводности от давления при горении порохов типа Н (1) и Н+10% Al (2).

дит к уменьшению объемной доли металла на поверхности пороха и к снижению эффективной электропроводности поверхностного слоя. При дальнейшем увеличении давления начинает превалировать другой фактор — проводимость за счет термоэлектронной эмиссии с частиц металла на поверхности топлива. С ростом давления этот эффект увеличивается из-за растрескивания защитной окисной пленки в условиях высокоскоростного нагрева, а также все большего числа частиц металла, воспламеняемых на поверхности пороха.

Таким образом, электропроводность поверхностного слоя неметаллизированного баллистического пороха определяется состоянием углеродного каркаса, образующегося в результате коксования нитей нитроцеллюлозы. Величина электропроводности при этом должна быть чувствительна к воздействию таких физических факторов, как обдув поверхности горения газовым потоком, пульсации давления и др. Введение в состав пороха металла увеличивает электропроводность реакционного слоя. В этом случае электропроводность определяется исключительно объемной долей и температурой частиц металла на поверхности пороха.

2. При горении баллистического пороха имеют место термический распад и диспергирование основы пороха — нитроклетчатки, пластифицированной труднолетучим растворителем, а также диспергирование частиц металла. Указанные процессы приводят к флуктуациям (шумам) поверхности пороха и, как результат, к флуктуациям электропроводности реакционного слоя. Пропускание через поверхностный слой слабого электрического тока позволяет выделить шумоподобный сигнал, несущий информацию о процессах в к-фазе. Частотный спектр флуктуаций тока при этом отражает частотные свойства процесса горения пороха в к-фазе.

Большинство физических флуктуационных процессов, протекающих на групповом молекулярном уровне, характеризуется спектральной плотностью вида

$$S(f) \sim f^{-m},$$

где f — частота; m — постоянный для данного процесса коэффициент. Рассматривая шумовой сигнал в виде последовательности шумовых импульсов определенной формы и анализируя выражения для спектральной плотности этих импульсов, можно получить обобщенное соотношение, связывающее среднюю длительность импульса $\langle \tau \rangle$ со значениями спектральной плотности сигнала $S(0)$ на частоте, близкой к нулевой, и спектральной плотностью $S(f)$ на достаточно высокой (10—30 кГц) частоте:

$$\langle \tau \rangle = \lim_{f \rightarrow \infty} \left[\frac{S(0)}{S(f) f^m} \right]^{\frac{1}{m}}.$$

Таким образом, с помощью частотного спектра шумового сигнала можно определить среднестатистическое время $\langle \tau \rangle$ процессов в к-фазе. Используя значение $\langle \tau \rangle$, можно найти среднюю частоту $\langle f \rangle$ процессов и среднюю толщину выгорающего слоя пороха $\langle d \rangle = u \langle \tau \rangle$, где u — скорость горения пороха.

Измерения спектральной плотности электрических шумов реакционного слоя пороха проводились при пропускании через поверхность горения слабого (≤ 5 мА) электрического тока от источника постоянного напряжения. Ток пропускался через электроды, нанесенные напылением в вакууме на поверхность боковых граней плоского образца пороха. Последовательно с источником напряжения и электродами было включено сопротивление нагрузки величиной 3—5 кОм.

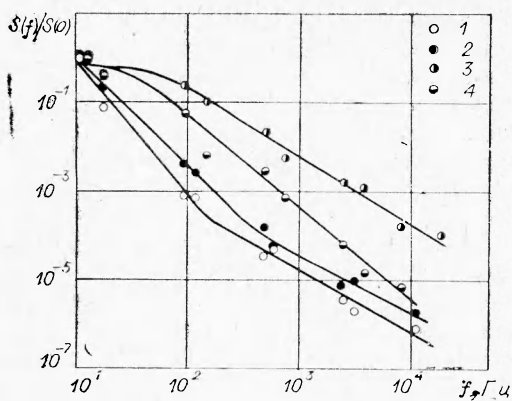


Рис. 2. Нормированные частотные спектры шумов электропроводности реакционного слоя. Порох Н: 1—40 атм, 2—80 атм, порох Н+10% Al: 3—40 атм, 4—80 атм.

Шумовой сигнал, снимаемый в виде напряжения с нагрузочного сопротивления цепи, усиливался в узкой полосе на разных частотах в диапазоне 10—30 000 Гц селективным микровольтметром В6-4, детектировался квадратичным детектором и регистрировался шлейфовым осциллографом в виде напряжения, пропорционального мощности шума. Измерение мощности шума на разных частотах позволяло получить распределение спектральной плотности $S(f)$ шума по частоте f .

На рис. 2 приведены нормированные частотные спектры шума, а в таблице — значения $\langle \tau \rangle$, $\langle f \rangle$ и $\langle d \rangle$, определенные с помощью частотных спектров. Горение пороха Н характеризуется присутствием двух групп процессов, имеющих разное среднее время существования, что проявляется в наличии в частотных спектрах участков с разными наклонами (разными коэффициентами m).

Исходя из очагово-пульсирующего горения [1—2], наблюдаемые события можно классифицировать по размерам очагов выгорания. Наряду с крупномасштабными (600 и 750 мкм) очагами, выгорающими с частотой, слабо зависящей от давления (~ 10 Гц), существуют более

Порох	p , атм	$\langle \tau \rangle$, мс	$\langle f \rangle$, Гц	$\langle d \rangle$, мкм
Н	40	100/20	10/50	600/120
	80	90/10	11/100	750/85
Н+10% Al	40	20	50	170
	80	40	25	550

мелкие, частота выгорания которых увеличивается с давлением и составляет ~ 50 и 100 Гц при давлении 40 и 80 атм соответственно. Толщина выгорающего слоя мелких очагов при этом равна 120 и 85 мкм, т. е. уменьшается с ростом давления. Приведенные данные согласуются по частотам и близки по размерам к величинам, приведенным в работе [1].

Форма частотных спектров, полученных при горении пороха Н+10% Al, свидетельствует о существовании лишь одной группы процессов (в пределах наблюдаемых частотных спектров), частота которых при увеличении давления уменьшается с 50 до 25 Гц. Средняя толщина выгорающего слоя увеличивается соответственно с 170 до 550 мкм. Подобные результаты трудно объяснить с известных позиций, поскольку с ростом скорости горения можно ожидать увеличения частоты выгорания очагов на поверхности пороха. Вместе с тем можно предположительно рассмотреть причины наблюдаемого явления.

Поскольку в суммарной проводимости при высоких давлениях участвуют электронные облака, окружающие эмиттирующие частицы металла, время участия очага горения в проводимости реакционного слоя возрастает, поэтому возрастает эффективный (кажущийся) размер очага. Возможно и другое объяснение. Причиной увеличения средней

толщины выгорающего слоя может быть образование при высоких давлениях «кратеров» на поверхности топлива из-за воспламенения частиц металла непосредственно у поверхности.

Наряду с исследованием квазистационарного горения порохов представляет интерес изучение шумовых процессов в к-фазе при гашении пороха. На рис. 3 дана зависимость нормированной к начальному моменту спектральной плотности шума во времени сбросом давления. Гашение осуществлялось при начальном давлении 40 атм. На рис. 4 дана зависимость средней частоты выгорания очагов на поверхности во времени при гашении пороха. Момент времени $\tau=0$ на рис. 3 и 4 соответствует началу сброса давления.

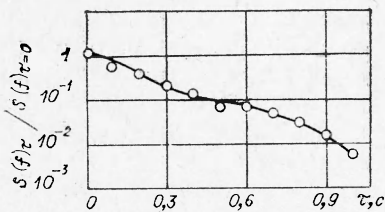


Рис. 3. Зависимость относительной спектральной плотности шума во времени на частоте 4000 Гц при гашении пороха Н+10% АІ сбросом давления со скоростью 2000 атм/с.

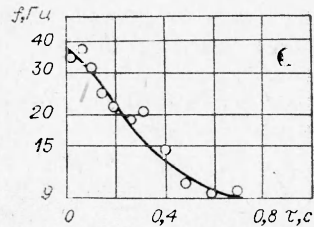


Рис. 4. Зависимость средней частоты процесса горения во времени при гашении пороха Н+10% АІ.

Из рис. 3 и 4 следует, что время «жизни» реакционного слоя пороха при гашении порядка одной секунды, т. е. химические процессы в к-фазе не завершаются за период спада давления, а продолжают еще довольно длительное время. При этом частота выгорания отдельных очагов на поверхности уменьшается, стремясь к нулю.

Таким образом, основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод, что исследование электрофизических характеристик к-фазы позволяет расширить представления о процессах горения в ней. Особенно перспективна электрошумовая диагностика. Распространение спектрального анализа на область частот $>30-50$ кГц позволит получить информацию о таких характеристиках горения, как время пребывания и размеры частиц металла на поверхности пороха и др. Важным является также возможность исследования процессов в к-фазе при высоких давлениях, когда применение других инструментальных средств ограничено.

Поступила в редакцию
12/VIII 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Синаев. Первый симпозиум по горению и взрыву. Тез. докл. М., «Наука», 1968.
2. Г. Г. Шелухин, В. Ф. Булдаков, В. П. Белов. ФГВ, 1969, 5, 1.