

Б.Н. Кондриков

ПАДЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В СЛОЕ ПОРИСТОГО ВЕЩЕСТВА  
ПРИ ГОРЕНИИ

При горении слоя пористого вещества манометр, присоединенный к холодному торцу заряда, регистрирует в глубине слоя снижение давления, обнаруженное более 20 лет назад, но до сих пор по существу оставшееся необъясненным. Экспериментально показано, что этот эффект аналогичен изменению давления в порах при диффузии из них (или в них) легкого газа (гелий, водород) в изотермических условиях и усиливается при горении главным образом за счет спутного течения стефановского типа, а также, вероятно, в результате термической диффузии. Падению давления в порах способствует, видимо, и уменьшение давления в пламени, следующее из теории адиабаты Гюгонио.

В работе [1] упоминается об опытах, проводившихся, очевидно, для измерения предсказанного в [2] повышения давления в зоне горения — весьма существенного момента теории перехода горения пористых ВВ во взрыв. Результаты измерения показали, что вместо ожидавшегося относительно небольшого ( $-u_m^2/\rho_r$ , где  $u_m$  — массовая скорость горения,  $\rho_r$  — плотность горячего газа) повышения давления U-образный манометр, присоединенный к холодному торцу заряда, фиксировал значительное ( $-10^2 \cdot u_m^2/\rho_r$ ) его уменьшение.

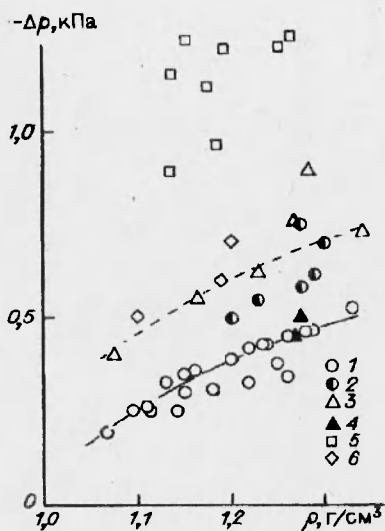
Объяснение авторов [1] заключается в том, что «втекающие в заряд горючие продукты горения заполняют поры и... охлаждаются, что закономерно должно сопровождаться падением давления в полужамкнутом поровом пространстве». Это заключение не кажется убедительным: горячие продукты могут втекать в поры под действием некоторого повышенного давления в пламени (которого в стационарном состоянии нет, так как пламя, как известно, всегда находится под разрежением). Когда они охлаждаются, поровое пространство заполняют новые порции горячего газа. Разрежения на холодном торце наблюдаться не должно.

На самом деле, как показано ниже, причина падения давления в порах горящего ВВ совершенно иная. Опыты проводили с пористыми зарядами из смеси перхлората аммония (ПХА) (средний размер частиц  $d \cong 3 \cdot 10^{-2}$  мм) с мелкодисперсным горючим — поливинилбутиралем ( $d \cong 5 \cdot 10^{-2}$  мм) и параформом ( $d \cong 1 \cdot 10^{-3}$  мм). Горючее с окислителем смешивали на листе бумаги резиновой пробкой. Смесь помещали в трубку из кварцевого стекла диаметром 12—20 мм и порционно уплотняли тefлоновым пуансоном. Толщина слоя смеси обычно составляла 3—4 см. Нижнюю часть трубки закрывали резиновой пробкой с отверстием, прикрытым хлопчатобумажной тканью. К отверстию присоединяли U-образный манометр, заполненный водой, или длинную стеклянную трубку, нижний конец которой погружали в воду.

При поджигании смеси со свободного верхнего торца в трубке возникало разрежение, величина которого нарастала со временем. В одних опытах на кривых  $\Delta p(t)$  наблюдался пологий максимум, в других разрежение непрерывно росло вплоть до толщины оставшегося слоя 1—2 мм, после чего резко падало. При увеличении исходной плотности горячей смеси предельное разрежение увеличивалось (см. рисунок), достигая при содержании горючего  $c_r \cong 10\%$  и  $\rho = 1,3$  г/см<sup>3</sup> величины  $\Delta p = 0,5$  кПа.

При горении смеси с поливинилбутиралем, скорость горения которой несколько выше, чем с параформом, максимальное разрежение при приближенно одинаковой дисперсности ПХА также выше (см. рисунок и таблицу). Состав с более крупнодисперсным (~0,1 мм) окислителем дает такие же результаты как с параформом.

Увеличение массовой доли параформа от 0,1 до 0,2 привело к заметному повышению скорости горения и максимальной величины падения давления. Помимо влияния скорости, дело, вероятно, в том, что размер частиц параформа



Влияние плотности смеси ПХА с поливинилбутиратом (3) и параформом (1, 2, 4—6) на максимальное разрежение в слое пористого вещества толщиной 3—4 см в трубках диаметром 12—20 мм. Содержание горючего: 1—4 — 10 %, 5, 6 — 20 %; газ в порах: 1, 3, 6 — воздух, 2 — метан, 4 —  $\text{CO}_2$ , 5 — гелий.

гораздо меньше, чем перхлората, соответственно меньше и поры, а эффект в целом существенно зависит от размера пор.

Замена воздуха в порах азотом или углекислотой на величину  $\Delta p$  не влияет. Напротив, заполнение пор метаном продолжительным пропусканием через слой порошка бытового газа из сети, приводит к заметному увеличению  $\Delta p$ .

Еще сильнее влияет на  $\Delta p$  замена воздуха на гелий или водород. Сравнение результатов опытов с разными газами при различном содержании горючего в смеси

приведено в таблице, откуда следует, что при увеличении  $c_r$  растут и  $\Delta p$ , и  $u_m$ . Однозначной связи между ними нет: при  $c_r = 22\%$  скорость уже начинает снижаться, а  $\Delta p$  еще растет. Возможно также, что  $u_m$  несколько увеличивается при замене воздуха в порах гелием. Однако этот результат, вообще говоря, объяснимый, требует проверки.

В одном из опытов со слоем порошка толще обычного при заполнении пор гелием получено наибольшее снижение давления на холодном торце  $\Delta p = 3,0$  кПа. Из этих результатов следует, что основной причиной падения давления в порах является не втекание в них горячего газа, а истечение холодного, причем при уменьшении молекулярной массы газа, находящегося в порах, эффект существенно усиливается.

Очевидная причина снижения давления в свете этих данных — диффузия газа, находящегося в порах, в пламя. Легкий газ, характеризующийся большим коэффициентом диффузии, выходит из пор в зону пламени быстрее, чем воздух, азот или  $\text{CO}_2$ . Существенная (на порядок величины) разница в абсолютной температуре газа в порах и в пламени приводит к термической диффузии, хотя роль ее, как обычно при горении, по-видимому, невелика. Гораздо более существенно влияние стефановского потока: в пламени газ движется в том же направлении, в котором диффундирует газ, истекающий из пор. Это движение препятствует проникновению продуктов горения в поры, противодействуя возникновению характерного для диффузии обратного тока, стремящегося выравнять давление.

Роль диффузии может быть продемонстрирована весьма простыми и наглядными опытами, допускающими непосредственное сравнение с результатами опытов по горению. Если верхний торец трубки со слоем порошка, из которой воздух только что вытеснен водородом или гелием, открыть, в трубке сразу же возникает разрежение, которое нарастает обычно в течение 15—25 с, после чего падает. Полученные величины максимального разрежения  $\Delta p_1$  приведены в таблице. Величина  $\Delta p_1$  для одного и того же заряда с гелием или водородом всегда гораздо меньше  $\Delta p$  и слабее зависит от плотности и состава смеси, но сильно растет при увеличении толщины слоя порошка. Значения  $\Delta p$  для зарядов, поры которых заполнены воздухом, и  $\Delta p_1$  для зарядов, в порах которых находится водород, близки между собой.

Второй вариант проведения опытов по диффузии состоял в том, что верхнюю часть трубки, снабженной U-образным манометром, закрывали колпаком из полиэтилена, который предварительно был заполнен гелием. Давление в слое порошка тут же начинало расти, но более медленно, чем падение его в предыдущих опытах. Время достижения максимума давления составляло обычно ~2 мин. Достигнув максимума  $\Delta p$ , давление снижается,

Результаты опытов со смесью ПХА с параформом в трубках диаметром 16 мм, толщина слоя смеси 3 см ( $\Delta p$  в кПа)

Число опытов	$C_r$ %	Газ в порах	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\Delta p$	$\Delta p_1$	$\frac{u_m}{\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})}$	$\Delta p_2$	$\Delta p_3$
5	10—11	Воздух*	1,16—1,34	0,55—0,9	—	1,14	—	—
10		Воздух	1,25	0,3—0,45	—	0,57	—	—
2		CO <sub>2</sub>	1,27	0,45—0,5	—	0,56	—	—
6		CH <sub>4</sub>	1,2—1,3	0,5—0,75	~ 0,08	0,68	—	—
1		He	1,18	1,0	—	—	—	—
1	17	Воздух	1,19	0,6	—	0,93	—	—
1		He	1,14	1,15	0,35	1,05	—	—
3	20	Воздух	1,1—1,2	0,5—0,7	—	1,06	—	—
5		He	1,13—1,26	0,9—1,25	0,4—0,5	1,14	—	—
1	22	Воздух	1,17	—	—	0,94	—	—
		He	1,23	1,8	0,5	1,10	—	—
		He**	1,17	2,9	1,5	1,10	—	—
4	22***	He	1,12	—	—	—	0,4—0,6	0,08—0,12
3			1,17	—	—	—	0,5—0,6	0,10—0,12
3			1,22	—	—	—	0,4—0,8	0,09—0,11
5			1,23	—	—	—	0,7—0,8	0,12—0,20

\* Горючее — поливинилбутираль.

\*\* Слой смеси 7 см.

\*\*\* Без поджигания (изотермическая диффузия).

проходит через начальное значение  $p_0$ , после чего в трубке возникает разрежение. Наибольшая величина его  $\Delta p_3$  достигается через несколько минут, затем давление внутри и вне трубки постепенно выравнивается. Измеренные для одной из смесей значения  $\Delta p_2$  и  $\Delta p_3$  приведены в таблице. Соотношения между измеренными величинами по модулю для смесей, содержащих гелий, следующие:  $\Delta p > \Delta p_2 > \Delta p_1 > \Delta p_3$ . Последнее неравенство очевидно: величина  $\Delta p_3$  отвечает смеси гелия с воздухом в порах, тогда как  $\Delta p_1$  получается при истечении из пор чистого гелия.

Неравенство  $|\Delta p_2| > |\Delta p_1|$  несколько менее наглядно. По-видимому, при проникании в поры гелия максимум давления  $\Delta p_2$  в слое смещен в среднюю часть трубки — гелий «гонит» воздух сверху вниз, истечение воздуха затруднено. При определении  $\Delta p_1$  и  $\Delta p_3$  гелий вытекает в воздух, а последний поступает в трубку извне. Максимум  $|\Delta p|$  находится вблизи верхнего торца и соответственно меньше, чем в предыдущем случае. На это указывает и различие времен достижения максимума  $|\Delta p|$ : ~ 2 мин в случае изменения  $\Delta p_2$  и менее полминуты для  $\Delta p_1$ .

Наиболее интересна величина  $\Delta p$ . Расчет ее существенно затруднен: уравнение диффузии, в данном случае неизотермической, следует решать совместно с уравнением фильтрации и в присутствии стефановского потока в части рассматриваемого объема. Причем, поскольку размеры пор всегда малы, диффузию и фильтрацию желательнее рассматривать в кнудсеновской области (хорошо известно, например, что диффузионное разделение изотопов наиболее эффективно, когда размер пор близок к длине свободного пробега молекул). Это специальная задача, далеко выходящая за рамки данной работы.

Имеется, однако, еще одна особенность процесса, о которой в качественном плане следовало бы упомянуть. Адиабата Гюгонио для горения дает состояние в пламени, характеризующееся более низким давлением  $p_{пл}$ , чем на поверхности раздела фаз  $p_0$ :  $\Delta p = p_0 - p_{пл} = u_m^2 / \rho_r$  и есть та величина, которая рассчитана в [2] (с той только разницей, что непосредственно над поверхностью конденсированной фазы наблюдается не повышение давления, а его понижение). Более того, если в результате диффузии давление в порах

вблизи поверхности ВВ уменьшается, это означает снижение  $p_0$  и соответственно сразу же  $p_{пл}$ . Понижение давления в пламени в свою очередь способствует истечению газа из пор и дальнейшему уменьшению давления вблизи горячей поверхности.

Разумеется, полученные результаты следует учитывать при формулировке теории конвективного горения, например, условий самопроизвольного проникновения горения в глубь пористого вещества. Очевидно, в определенном интервале изменения пористости, газопроницаемости и скорости горения такому проникновению может предшествовать диффузионное истечение газа из пор с соответствующим понижением давления внутри заряда, облегчающим, а может быть и определяющим возможность прорыва горения в поры.

Опыты подготовлены и проведены совместно со студенткой С. Николенко.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев А.Ф., Боболев В.К., Коротков А.И., Сулимов А.А., Чуйко С.В. Переход горения конденсированных систем во взрыв. — М.: Наука, 1973.
2. Беляев А.Ф. К вопросу об условиях стационарного режима горения ВВ // Докл. АН СССР. — 1940. — 28. — С. 715—718.

125190, г. Москва  
МХТИ им. Д.И. Менделеева

Поступила в редакцию  
16/VI 1994

УДК 541.124

В.Д. Зазуля, В.В. Цветков

### О ПРИЧИНАХ МИГРАЦИЙ ЖИДКОЙ ФАЗЫ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ИХ СВС-КОНСОЛИДАЦИИ

Изучены явления миграции жидкой фазы при горении порошковых металлических прессовок. Установлено, что одной из причин миграции является возникновение температурного градиента, наводимого волной горения. Возникающая при этом разность капиллярных потенциалов в порах направлена в холодную сторону прессовки. Высказаны представления, что часть расплава (слои, примыкающие к стенкам пор-капилляров) могут перемещаться в горячую сторону. Предложены способы, устраняющие отрицательные последствия ликвации жидкости под воздействием температурного градиента при СВС-спекании изделий.

Одно из препятствий освоения метода СВС-спекания — частичная потеря формы и размеров деталей вследствие ликвации жидкой фазы, образующейся при экзотермических реакциях металлов. Причины ликвации и ее последствия при изготовлении деталей методами литья и спекания металлических порошковых материалов изучены достаточно полно [1]. Главные из них — неодинаковая температура кристаллизации расплавленных компонентов, различный объемный вес, капиллярное перераспределение, воздействие газовыделений и др.

Примерно те же явления имеют место также при СВС-консолидации порошковых прессовок [2]: капиллярное растекание образующегося легкоплавкого компонента горения между реагирующими с ним тугоплавкими частицами [3] с возникающей зачастую их коалесценцией [4], перетеканием эвтектики из крупных в более мелкие поры.

При СВС-спекании порошковых металлических материалов на основе алюминия с нагревом до воспламенения в камере электропечи на воздухе была также замечена ликвация жидкой фазы. Она проявлялась в виде капель, выделяющихся на более холодных поверхностях цилиндрических прессовок сразу после их воспламенения. Объем этих капель впоследствии

© В.Д. Зазуля, В.В. Цветков, 1995.