

КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ГОРЕНИЯ ПЛОСКИХ СЛОЕВ ПММА НА ПОДЛОЖКАХ РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

*Н. Н. Базман, Б. Н. Кондриков, С. О. Раубель, Л. А. Шутова
(Москва)*

В [1, 2] изучены критические условия горения пленок ПММА на медных проволоках и стеклянных нитях. В настоящей работе проведено аналогичное исследование для плоских слоев ПММА на подложках с различной толщиной и теплопроводностью.

Из листов ПММА толщиной $\Delta = 1,0; 2,0; 3,0; 4,4; 6,0$ и $8,8$ мм вырезались прямоугольные образцы размером 26×200 мм¹, которые приклеивались эпоксидной смолой к подложке из меди, дюралаля или текстолита. Опыты проведены также со слоями порошкообразного ПММА (с размером частиц 3–5 мкм), которые прессовались до различной плотности в кювете, состоявшей из дюралеевой плиты (длиной 280, шириной 40 и толщиной 15 мм) со сквозным отверстием, в котором мог помещаться поддон из дюралаля или текстолита. В готовом образце поверхность слоя ПММА находилась на уровне верхней поверхности плиты.

Все опыты проведены с горизонтальными образцами в воздухе при атмосферном давлении и комнатной температуре. Образец поджигался электроспиралью одновременно по всей его ширине. Скорость пламени вдоль поверхности образца w измерялась с помощью перегорающих проволочек и шлейфового осциллографа, а также секундомера.

Величина $\Delta_{кр}$ определялась как $\Delta_{кр} = (\Delta_+ + \Delta_-)/2$, где Δ_+ — минимальная толщина образца, обеспечивающая стационарное горение, Δ_- — максимальная толщина образца, при которой горение затухает. Величина $w_{кр}$ определялась как $w|_{\Delta_+}$, нормальная скорость горения по формуле $u = w \sin \psi$, где ψ — угол при вершине клиновидной выемки, возникающей в образце в ходе горения.

Полнота горения слоя. При горении пленок ПММА на проволоках и нитях [1, 2] на подложке оставались лишь отдельные островки сажи и смолы. При горении же плоских слоев ПММА на не слишком тонких металлических подложках остается слой несгоревшего ПММА.

В случае порошкообразного ПММА остаток представляет собой прозрачную пленку застывшего расплава. Поверхность пленки чистая, со сравнительно небольшим количеством застывших пузырьков газообразных продуктов пиролиза и островков сажи; у боковых краев слоя остается часть порошкообразного ПММА. На дюралеевой подложке вес остатка ПММА составлял около 20% веса исходного слоя. Примечательно, что этот процент почти не менялся при изменении Δ (хотя априори можно было бы ожидать, что полнота сгорания будет расти при увеличении Δ , так как при этом увеличиваются время горения и тепловыделение на 1 см² подложки).

В случае листового ПММА обращалось внимание на прочность склеивания образца с подложкой, так как в тех местах, где образец отклеивается от подложки, он прогорает насквозь. Толщина остатка $\Delta_{ост}$ измерялась микрометром. Величина $\Delta_{ост}$ существенно зависела от теплопроводности и толщины подложки. На подложке из дюралаля толщиной 15 мм $\Delta_{ост} \approx 2$ мм.

Критическая толщина слоя. Из табл. 1–3 следует, что для плоских слоев порошкообразного ПММА $\Delta_{кр} = 1 \div 3$ мм, а для листового ПММА $\Delta_{кр} = 1,5 \div 8$ мм. Это на один-два порядка больше, чем для пленок ПММА

¹ При ширине образца $b \geq 20$ мм скорость пламени практически не зависела от b .

Таблица 1

Критические параметры горения горизонтальных плоских слоев порошкообразного ПММА на дюралевой пластине (толщиной 15 мм) при различной пористости слоя

ρ , г/см ³	Π	$\Delta_{кр}$, мм	$w_{кр} \cdot 10^2$, см/с	$u_{кр} \cdot 10^3$, см/с	$u_{кр} \Delta_{кр} \cdot 10^3$, см ² /с	$\rho u_{кр} \Delta_{кр} \cdot 10^4$, г/(см·с)
0,30	0,75	1,95	2,30	2,24	4,37	1,31
0,45	0,62	2,25	1,60	1,38	3,10	1,40
0,70	0,41	2,69	1,45	0,85	2,29	1,60

на медных проволоках и стеклянных нитях [1, 2]. Столь сильное различие в величине $\Delta_{кр}$ может быть связано с двумя причинами:

1) для цилиндрических образцов скорость пламени w по мере увеличения наружного диаметра образца d убывает сначала сильно, а затем все слабее, стремясь к значению w для плоского слоя ($d \rightarrow \infty$). Для плоского образца листового ПММА $w_{кр} = 0,03 \div 0,08$ мм/с (см. табл. 3), в то время как для пленок ПММА на медных проволоках диаметром 150 мм

Таблица 2

Критические параметры горения горизонтальных плоских слоев порошкообразного ПММА ($\rho = 0,47$ г/см³, $\Pi = 0,60$) на подложках из различных материалов

Подложка	$\Delta_{кр}$, мм	$w_{кр} \cdot 10^2$, см/с	$\text{tg } \psi$	$u_{кр} \cdot 10^4$, см/с	$\rho u_{кр} \Delta_{кр} \cdot 10^4$, г/(см·с)
Дюраль, 15 мм	2,25	1,80	0,058	10,4	1,10
Текстолит (12 мм) + медь (мм)					
1,5	2,25	1,75	0,060	10,5	1,11
1,0	2,15	1,95	0,040	7,8	0,79
0,3	1,75	1,86	0,061	11,4	0,94
0,05	1,25	3,22	0,043	14,0	0,83
Текстолит, 12 мм	1,20	3,72	0,040	14,9	0,84

$w_{кр} = 13$ мм/с. Уменьшение скорости пламени при переходе к плоскому слою увеличивает теплотери из зоны горения, а следовательно, и величину $\Delta_{кр}$;

2) для пленок ПММА на проволоках и нитях факел пламени нагревает обнажившуюся после газификации ПММА подложку. При горении плоского слоя ПММА на массивной подложке этот эффект выражен сравнительно слабее, так как образуется слой несгоревшего ПММА, который экранирует подложку.

Таблица 3

Критические параметры горения горизонтальных листов ПММА ($\rho = 1,18$ г/см³, $\Pi = 0$) на подложках из различных материалов

Подложка	$\Delta_{кр}$, мм	$w_{кр} \cdot 10^2$, см/с	$\text{tg } \psi$	$u_{кр} \cdot 10^4$, см/с	$\rho u_{кр} \Delta_{кр} \cdot 10^4$, г/(см·с)
Дюраль, 15 мм	7,4	0,31	0,048	1,50	1,31
Медь, мм					
1,0	5,2	0,39	0,052	2,04	1,25
0,3	2,5	0,68	0,055	3,76	1,11
0,05	1,5	0,80	0,060	4,73	0,84
Текстолит, 12 мм	2,5	0,52	0,060	3,14	0,93

Из табл. 1 следует, что при уменьшении пористости Π слоя порошкообразного ПММА от 0,75 до 0,41 величина $\Delta_{кр}$ возрастает от 2,0 до 2,7 мм (т. е. на 35%). При переходе к листовому ПММА ($\Pi = 0$) $\Delta_{кр}$ возрастает до 7,4 (см. табл. 1 и 3).

При переходе от текстолитовой подложки (толщиной $\Delta_{п} = 12$ мм) к дюралевой ($\Delta_{п} = 15$ мм), т. е. при увеличении теплопроводности подложки $\lambda_{п}$ в ~ 500 раз, величина $\Delta_{кр}$ возрастает в случае листового ПММА в ~ 3 раза, а в случае порошкообразного ПММА ($\Pi = 0,60$) — только в $\sim 1,9$ раза (ср. табл. 3 и 2).

Если в условиях, соответствующих табл. 1 при $\Pi = 0,41$, между слоем порошкообразного ПММА и дюралевой подложкой поместить бумажные прокладки, то величина $\Delta_{кр}$ заметно уменьшается.

	Без проклад- ки	1 лист бумаги толщиной 70 мкм	5 склеенных лис- тов бумаги об- щей толщиной 630 мкм
$\Delta_{кр}$, мм	2,7	1,9	1,4

Толщина подложки Δ влияет на величину $\Delta_{кр}$, причем для листового ПММА это влияние выражено сильнее, чем для порошкообразного. Так, при увеличении толщины медной пластины от 0,05 до 1 мм величина $\Delta_{кр}$ для порошкообразного ПММА (при $\Pi = 0,6$) увеличивалась в 1,8 раза (табл. 2), а для листового ПММА — в 3,5 раза (см. табл. 3).

Для понимания физического смысла зависимости $\Delta_{кр}$ от теплопроводности слоя ПММА и подложки, а также от толщины подложки следует учесть, что предел горения в значительной мере определяется процессами на передней кромке («носике») пламени. Носик отделен от подложки слоем полимера толщиной Δ (а конец зоны горения — слоем полимера и конденсированных продуктов его пиролиза толщиной $\Delta_{ост}$). Теплотери от носика пламени определяются как теплопроводностью слоя полимера λ , так и теплопроводностью $\lambda_{п}$ и толщиной $\Delta_{п}$ подложки.

Для слоя порошкообразного ПММА расчет по формулам Оделевско-го [3] и Максвелла — Эйкена [4] дает практически совпадающие значения для отношения $\lambda_{п}/\lambda_{п=0}$ (где $\lambda_{п}$ относится к слою ПММА с пористостью Π , а $\lambda_{п=0}$ — к листовому ПММА):

ρ , г/см ³	0,30	0,45	0,47	0,70
Π	0,75	0,62	0,60	0,41
$\lambda_{п}/\lambda_{п=0}$	0,30	0,40	0,41	0,57

(при расчете принято $\lambda_{п=0} = \lambda_{пмма} = 0,19$ Вт/(м · град) [5], $\lambda_{возд} = 0,0256$ Вт/(м · град) [6]).

Чем выше теплопроводность подложки, тем сильнее теплотери от носика пламени (следовательно, и величина $\Delta_{кр}$) зависят от теплопроводности слоя ПММА. Так, при уменьшении пористости слоя ПММА от 0,60 до нуля, когда расчетное значение λ возрастает в $\sim 2,5$ раза, величина $\Delta_{кр}$ на текстолитовой подложке возрастает в 2,1 раза, а на дюралевой — в 3,3 раза. В свою очередь, чем выше теплопроводность слоя полимера, тем сильнее $\Delta_{кр}$ зависит от теплопроводности подложки.

Критерий предела горения. По аналогии с критерием Я. Б. Зельдовича для предела горения гомогенных газовых смесей [7] $Re = Re_{кр} = \text{const}$; в [1, 2] показано, что для пленок ПММА выполняется условие

$$\rho u_{кр} \Delta_{кр} = \text{const} = A. \quad (1)$$

Отметим, что априори такая аналогия отнюдь не очевидна. Помимо различий в режиме горения (кинетический для гомогенных газовых смесей и диффузионный для полимерных пленок) имеются сильные различия в геометрии задачи. При горении газовых смесей в трубах тепло отводится в стенки трубы главным образом за счет кондукции. При горении полимерных пленок на проволоке (нити) факел пламени и струя продуктов сгорания окружены холодным воздухом и отдают ему тепло,

преимущественно за счет конвекции. Что касается подложки, то в зависимости от условий она может служить либо стоком тепла, либо теплопроводящим элементом, по которому тепло от факела пламени подводится к свежей пленке полимера.

Результаты опытов настоящей работы показывают, что критерий (1) применим также к горению плоских слоев ПММА на подложках. Если суммировать данные табл. 1—3, то при изменении плотности слоя ПММА, а также теплопроводности и толщины подложки величина $\Delta_{кр}$ меняется в 6,2 раза, $w_{кр}$ — в 12 раз, $u_{кр}$ — в 14,7 раза, а величина A — только в 2 раза. Абсолютная величина A для плоских слоев ПММА лежит в пределах $(0,8 \div 1,6) \cdot 10^{-4}$ г/(см·с), что хорошо согласуется со значением $A = (0,7 \div 1,1) \cdot 10^{-4}$ г/(см·с) для пленок ПММА на медных проволоках и стеклянных нитях [1, 2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. И. Алдабаев, Н. Н. Бахман, Б. Н. Кондриков и др. Докл. АН СССР, 1978, 241, 5, 1109.
2. N. N. Bakhman, L. I. Aldabaev, B. N. Kondrikov, V. A. Filippov. Combust. Flame, 1981, 41, 4, 35.
3. В. И. Оделевский. ЖТФ, 1951, 21, 6.
4. А. В. Лыков. Тепломассообмен. Изд. 2. М.: Энергия, 1978.
5. P. Andersen, B. Sundqvist. J. Polym. Sci., Polym. Physics Ed., 1975, 13, 2, 243.
6. С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский. Справочник по теплопередаче. Л.—М.: Госэнергоиздат, 1959.
7. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1941, 11, 159.

УДК 536.46

НЕОДНОМЕРНОЕ ГОРЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

*В. А. Вольперт, А. В. Дворянкин, А. Г. Струнина
(Черноголовка)*

При изучении горения конденсированных систем обнаружены [1] спиновые режимы распространения волны: локализованная в очаге химическая реакция распространялась вдоль боковой поверхности цилиндрического образца по спирали. Эта работа положила начало подробным теоретическим [2—6] и экспериментальным [7—9] исследованиям неодномерных режимов горения конденсированных систем, в частности изучению влияния геометрии образца на вид режимов горения.

Первая часть настоящей работы посвящена теоретическому анализу неодномерных режимов горения образцов прямоугольного сечения, проводимому методами теории бифуркаций. Во второй части приведены результаты экспериментального исследования нестационарных режимов горения прессованных образцов прямоугольного сечения из реакционноспособных составов на модели железозиркониевых термитов различной калорийности и плотности запрессовки (ср. [9]). Проведено сопоставление теоретических и экспериментальных результатов.

Для математического описания неодномерных режимов распространения волны горения рассмотрим записанную в безразмерном виде задачу

$$\frac{\partial u_k}{\partial t} = a_k \Delta u_k + f_k(u_1, \dots, u_m; \mu) \quad (k = 1, \dots, m), \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_k}{\partial \xi} (t, z, \xi, \eta) \Big|_{\xi=0}^{\xi=L} = \frac{\partial u_k}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0}^{\eta=l} = 0. \quad (2)$$