

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

И. М. Абдурагимов, А. С. Андросов, Е. В. Крылов

(Москва)

Скорость распространения пламени по поверхности полимеров с увеличением толщины (диаметра) образца снижается [1, 2], при этом для некоторых материалов существует предельная толщина, выше которой горение при данных условиях протекания процесса становится невозможным [3]. В связи с этим исследования распространения горения по поверхности тонких полимерных материалов, кроме научного интереса, имеют и большое практическое значение, особенно в профилактике пожаров. В подавляющем большинстве случаев пожар начинается от небольшого источника загорания за счет распространения пламени по тонким образцам горючих материалов.

При распространении пламени по полимерному материалу происходит передача части тепла, выделяющегося в зоне пламени, ближним слоям поверхности. Под влиянием теплового потока происходит повышение температуры поверхности, прогрев образца по глубине, в результате чего возрастает скорость пиролиза материала. Выделяющиеся горючие газы смешиваются с окислителем, и при достижении определенной концентрации происходит зажигание и горение образовавшейся парогазовой смеси.

Согласно [4, 5], скорость распространения пламени определяется в основном процессами, происходящими на передней его кромке (носике). В этой области скорость горения полимера, точнее скорость горения перемешанной газовой смеси, определяется химической кинетикой и диффузией (диффузионно-кинетический режим горения) [5]. При этом между зоной химической реакции в газовой фазе и поверхностью полимера существует некоторая область, в которой происходит гашение пламени из-за наличия потока холодных компонентов [7], а также, по-видимому, из-за низкого содержания в этой зоне окислителя (богатая смесь).

Визуальные наблюдения за процессом распространения пламени по горизонтально расположенным тонким полимерным материалам (например, по бумаге) показывают (рис. 1), что оно состоит как бы из верхнего и нижнего пламени. При этом нижнее пламя практически по всей длине горящего образца более прозрачно и по внешним признакам напоминает скорее горение предварительно перемешанных компонентов, чем диффузионное горение.

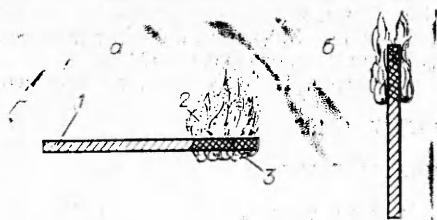


Рис. 1. Схема распространения пламени по тонким образцам.

1 — образец полимера; 2 — верхнее пламя; 3 — нижнее пламя. а) горизонтальный образец; б) вертикальный образец.

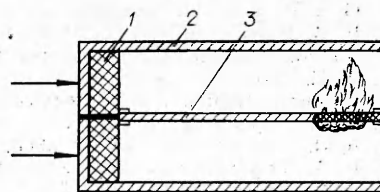
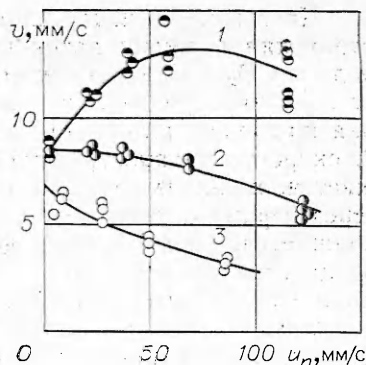


Рис. 2. Схема установки.

1 — выравнивающая засыпка; 2 — корпус установки; 3 — образец полимера.

Рис. 3. Влияние газовых потоков на скорости распространения пламени.

1 — воздух, верхняя грань образца; 2 — воздух, нижняя грань образца; 3 — углекислый газ, верхняя грань образца.



Очевидно, что условия воздействия пламени на поверхность полимера неодинаковы. Действительно, прогрев поверхности полимера от носика верхнего пламени будет осуществляться в основном за счет лучистого теплового потока. Нижнее пламя кроме лучистого теплового потока способно нагревать поверхность за счет конвекции от поднимающихся вверх продуктов горения.

Представлялось интересным приблизительно оценить роль соотношения величин тепловых потоков от верхнего и нижнего пламени на скорость его распространения. С этой целью образцы потребительской бумаги толщиной 0,05 мм сжигались в установке (рис. 2), через которую в противоположном направлении движению пламени с различными скоростями $u_{п}$ продувался воздух или двуокись углерода. Образцы с $u_{п} = 0$ сжигались на открытом воздухе.

Для поджигания образцов использовалась спираль, и по времени прохождения пламенем контрольного участка определялась скорость горения. Ширина образцов составляла 25 мм, что выше того значения, до которого она влияет на скорость распространения пламени по бумаге [6, 8].

На рис. 3 приведены графики влияния газовых потоков на линейную скорость горения. Видно, что с увеличением скорости воздушного противотока, воздействующего на верхнюю поверхность образца, скорость распространения пламени вначале возрастает, а при $u_{п} \sim 70$ мм/с начинает медленно снижаться. Аналогичное влияние потока воздуха на скорость распространения пламени наблюдалось в [1] при изучении горения полиметилметакрилата. Можно полагать, что воздушный поток, направленный против движения пламени, оказывает двойное влияние на скорость процесса. С одной стороны, он должен снижать скорость пламени за счет аэродинамического торможения и охлаждения прогретых участков поверхности полимера перед фронтом пламени. Однако, с другой стороны, при этом интенсифицируется смешение летучих продуктов пиролиза с окислителем, что, по-видимому, приближает пламя к поверхности полимера и, следовательно, увеличивает интенсивность теплового потока от его носика к поверхности горючего материала.

При увеличении $u_{п}$ на верхней поверхности вначале доминирует второй фактор, однако затем роль аэродинамического торможения и охлаждения образца начинает превалировать и скорость распространения пламени снижается¹. При подаче воздуха на нижнюю поверхность образца скорость пламени, напротив, снижается с увеличением скорости газового потока, так как роль интенсификации смешения летучих с окислителем здесь менее заметна. В этом случае, по-видимому, проявляется эффект аэродинамического торможения и особенно — снижение конвективной составляющей теплового потока.

¹ Согласно последним экспериментальным данным по изучению процесса распространения пламени по образцам ПММА с 85% ПХА с помощью шпирец-киносъемки, полученным в Чувашском государственном университете, воздействие газовых противотоков приводит к образованию ламинарных вихрей продуктов сгорания, которые способствуют появлению конвективного прогрева поверхности полимера перед фронтом пламени.

Чрезвычайно интересное влияние оказывает на скорость распространения пламени поток инертного газа — двуокиси углерода. При подаче CO_2 фактически имеет место изоляция той или иной поверхности от горения. При изоляции верхней поверхности полимера процесс горения протекает только за счет нижнего пламени. Как следует из рис. 3, 3, скорость распространения пламени с увеличением потока газа снижается, по-видимому, в основном за счет интенсификации съема тепла через верхнюю грань образца. Процесс горения замедляется, но не прекращается. При изоляции двуокисью углерода нижней поверхности образца горение при любом потоке газа прекращалось. Исходя из этого, можно заключить, что теплового потока, поступающего к поверхности полимера только от носика верхнего пламени, недостаточно для поддержания самопроизвольного распространения горения по образцу бумаги даже толщиной 0,05 мм.

Определяющую роль на процесс распространения пламени оказывают лучистый и конвективный потоки от нижнего пламени. Сделанный вывод подтверждают данные по горению вертикальных образцов бумаги (толщина 0,05 мм) сверху вниз (см. рис. 1, б). В этом случае, очевидно, отсутствует конвективное влияние пламени на подготавливаемые к горению участки поверхности полимера. Скорость свободного горения на воздухе в этом случае составляет $\sim 0,53$ мм/с. Однако при изоляции инертным газом одной из поверхностей горение также прекращалось.

На основании полученных экспериментальных результатов оценим соотношение тепловых потоков, поступающих к поверхности полимера от нижнего и верхнего пламен при горении в неподвижной атмосфере. Согласно [4, 9], скорость распространения пламени пропорциональна интенсивности суммарного теплового потока (q_0), поступающего от пламени к поверхности полимера.

Сделаем несколько упрощающих допущений:

1) горение вертикального образца сверху вниз в неподвижной атмосфере осуществляется за счет лучистого теплового потока от правой и левой частей пламени (q_x) [10];

2) при горении горизонтального образца в неподвижной атмосфере от носика верхнего пламени на поверхность полимера воздействует только лучистый поток, от нижнего пламени — лучистый и конвективный (q_k) потоки;

3) интенсивности лучистых тепловых потоков от правого и левого пламен при горении горизонтального образца и от верхнего и нижнего пламен при горении горизонтального образца равны между собой;

4) влияние кондуктивной теплопередачи на скорость распространения пламени пренебрежимо мало. Согласно [4, 9], при горении отдельных хвоек и их совокупности ее доля не превышает 1—2% в общем тепловом балансе.

Отношение скоростей распространения пламени по горизонтальному (v_r) и вертикальному (v_v) образцам пропорционально интенсивности тепловых потоков, поступающих к поверхности полимера, т. е. с учетом принятых допущений,

$$v_r/v_v = (2q_x + q_k)/2q_x \quad (1)$$

Подставив значение v_r ($\sim 0,82$ мм/с) и v_v ($\sim 0,53$ мм/с) при горении на открытом воздухе ($u_x = 0$), получим, что $q_k = 1,2 q_x$, откуда следует, что в случае горения горизонтального образца менее 25% от суммарной интенсивности воздействующего на поверхность полимера теплового потока поступает от верхнего пламени и $\sim 75\%$ — от нижнего, при этом более 50% — только за счет конвекции.

Полученные результаты показывают, что основное влияние на

распространение горения по целлюлозным горизонтальным образцам в неподвижной атмосфере оказывают физико-химические процессы, протекающие на их нижней поверхности. В случае изоляции последней от горения распространение пламени на воздухе при нормальной температуре окружающей среды становится невозможным вплоть до очень тонких (0,05 мм) образцов.

Поступила в редакцию
18/VII 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. R. S. Magee, F. McAleer. *J. Fire and Flammabil*, 1971, 2, 10, 271.
2. Н. Н. Бахман, Л. И. Алдаваев.— В сб.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем. М., ИХФ АН СССР, 1977.
3. И. М. Абдурагимов, А. С. Андросов, Е. В. Крылов. *Тр. ВИПТШ МВД СССР*. Вып. 3. М., 1978.
4. А. И. Сухинин, Э. В. Конев.— В сб.: Вопросы лесной пирологии. Красноярск, ИЛНД СО АН СССР, 1972.
5. W. A. Sirignano. *Combustion Science and Technology*, 1972, 6, 2, 95.
6. А. Д. Марголин, В. Д. Крупкин. *ФГВ*, 1978, 14, 2, 56.
7. Я. Б. Зельдович. *ЖТФ*, 1949, XIX, 10, 1199.
8. M. Sibulkin, W. Kettelhut, S. Feldman. *Combustion Science and Technology*, 1974, 9, 2, 75.
9. Э. В. Конев.— В сб.: Вопросы лесной пирологии. Красноярск, ИЛНД СО АН СССР, 1970.
10. A. C. Fernandez-Pello. *Combustion Science and Technology*, 1977, 17, 1—2.

О ПРЕДЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ГОРЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ

*И. А. Болодьян, Э. И. Долгов, А. Ф. Жевлаков,
А. С. Мелихов, В. И. Потякин*

(Балашиха)

Исследование предельных условий горения полимеров представляет научный и практический интерес. В связи со сложностью процессов, протекающих при горении, строгой модели для расчета этих условий в настоящее время не существует. При приближенном решении задачи можно рассмотреть процесс горения в диффузионном режиме, когда переход к кинетическому режиму есть предельное условие существования пламени у поверхности полимера.

Для этого воспользуемся представлениями о «приведенной пленке» [1] как некоем аналоге пограничного слоя, когда существует только нормальная к поверхности полимера составляющая скорости потока. Тепло, выделяющееся при горении, отводится в окружающую среду через внешнюю часть приведенной пленки. Полагая, что стефановский поток в пленке определяется массовой скоростью выгорания полимера, и проводя отсчет температуры от температуры окружающей среды, уравнение теплового баланса для внешней части приведенной пленки и уравнение сохранения окислителя можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} (\rho v)_k [Q_{эфф} - c_p (T - T_e)] &= -\lambda \cdot dT/dy, \\ (\rho v)_k (\varphi + C_0) &= \rho D \cdot dC_0/dy, \end{aligned} \quad (1)$$

где $(\rho v)_k$ — массовая скорость выгорания; C_0 — концентрация окислителя; φ — стехиометрический коэффициент; $Q_{эфф}$ — теплота сгорания полимера; c_p — теплоемкость газовой фазы; T_e — температура в набегающем потоке; λ — коэффициент теплопроводности газовой фазы; ρ , D — плотность и коэффициент диффузии.