

Как видно из рис. 1, зависимость μ от T при $T > 40^\circ$ не подчиняется уравнению (3). В работе [8] аналогичные отклонения зависимости $\lg \mu - 1/T$ связываются с переходом в высокоэластичное состояние при $T > T_c$. Температура стеклования ПФВ $T_c = 242^\circ$ [6], что значительно превышает рассматриваемый температурный интервал. Наиболее вероятно наблюдаемые отклонения температурной зависимости μ связать с обратимыми изменениями надмолекулярной структуры ПФВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Opfermann J., Hörr H.-H.* // Z. phys. Chem. 1980. B. 261. № 6. S. 1161.
2. *Hörr H.-H., Helbig M., Raabe D., Opfermann J., Scherf U., Stockmann R., Weiss R.* // Z. Chem. 1987. № 4. S. 126.
3. *Krjukow A. J., Wannikow A. W., Opfermann J., Hörr H.-H.* // 2 Tagung über Polymere für Elektrotechnik/Elektronik (Mikroelektronik). T. 2. Berlin, 1989. S. 83.
4. *Крюков А. Ю., Ванников А. В., Пахратдинов А. А., Хёрхольд Х.-Х., Опферманн И.* // Высокомолек. соед. А. 1990. Т. 32. № 2. С. 348.
5. *Hörr H.-H., Helbig M.* // Makromolek. Chem. Makromolek. Symp. 1987. B. 12. S. 229.
6. *Hörr H.-H., Kowski S., Helbig M., Opfermann J., Raabe D., Reinmann W.* // 2 Tagung über Polymere für Elektrotechnik/Elektronik (Mikroelektronik). T. 1. Berlin, 1989. S. 241.
7. *Тюрин А. Г., Дубенсков П. И., Журавлева Т. С., Царевский А. В., Ванников А. В.* // Хим. физика. 1987. Т. 6. № 9. С. 1236.
8. *Pfister G.* // Phys. Rev. B. 1977. V. 16. № 8. P. 3676.
9. *Тюрин А. Г., Крюков А. Ю., Журавлева Т. С., Ванников А. В.* // Высокомолек. соед. Б. 1988. Т. 30. № 10. С. 783.
10. *Vannikov A. V., Kryukov A. Yu., Tyurin A. G., Zhuravleva T. S.* // Phys. Stat. Sol. A. 1989. Т. 115. № 1. С. K47.
11. *Sahgun M. R.* // Photographic Sci. and Engng. 1984. V. 28. P. 185.

Институт электрохимии
им. А. Н. Фрумкина АН СССР

Поступила в редакцию
10.05.89

УДК 541.64:539.3

© 1990 г. Ш. А. Насыбуллин, М. А. Зарипов,
И. Н. Файзуллин

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ НА ВЫГОРАНИЕ ТОНКОСЛОЙНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрено влияние ориентации образцов на развитие горения и скорость выгорания тонкослойных полимерных материалов с поверхностной массой от 45 до 440 г/м², различающихся структурой и природой полимера – тканей, бумаги, ПЭ-пленки, резинотканевого материала. Разработана модель горения, описывающая экспериментальные зависимости линейной скорости выгорания в диапазоне изменения угла ориентации от 0 до ±(70–90°).

Отличительной особенностью горения тонкослойных полимерных материалов (ТПМ), таких как бумага, полимерные пленки и облицовочные материалы, ткани, лакоткани, резинотканевые материалы и др. является зависимость параметров горючести от толщины материала. Эксплуатация ТПМ в изделиях (одежде, занавесях, тентах, палатках, надувных сооружениях и т. п.) предполагают их различную ориентацию в пространстве. При этом представляется практическим важным знание закономерностей развития очага горения и выгорания ТПМ.

В литературе [1] рассмотрены процессы распространения пламени по поверхности полимеров, в том числе полимерных пленок [2], в основном для двух ориентаций образцов: вертикальном (угол ориентации $\phi = -90^\circ$

при горении сверху вниз и 90° при горении снизу вверх) и горизонтальном ($\phi=0^\circ$). В работе [3] проводили исследования горения хлопколавсановых тканей при некоторых других промежуточных углах ориентации. В работе [4] изучали горение листовых композиционных материалов на основе эпоксидной смолы и вискозной ленты или стеклоткани с толщиной от 1 до 8 мм при изменении угла ориентации от -90 до 90° . Показано, что в диапазоне изменения угла ориентации ϕ от 0 до $\pm(50-70^\circ)$ скорость распространения пламени w_ϕ может быть выражена через $\sin \phi$

$$\frac{w_\phi}{w_{\phi=0}} - 1 = K \cdot \sin^m |\phi|, \quad (1)$$

где $w_{\phi=0}$ соответствует значению w_ϕ при $\phi=0^\circ$, а K и m – эмпирические константы.

В настоящей работе рассмотрены закономерности развития горения и измерены линейные скорости выгорания ТПМ различной структуры и химической природы при изменении угла ориентации образцов от 90 до -90° через каждые $10-20^\circ$.

Исследовали воздухопроницаемые материалы – хлопковую ткань (артикул 409) с величиной заполнения поверхности нитями $E=85,3\%$, хлопкоакриловую ткань (артикул 66018) с содержанием 50% капроновых нитей и $E=70,5\%$, хлопколавсановую ткань (артикул 3303) с содержанием 20% лавсановых нитей и $E=91,6\%$, а также материалы изолирующего типа – бумагу различной толщины, ПЭ-пленку, резинотканевый материал на основе ткани (артикул 66018) и с покрытием из бутилкаучука с каолином. Данные материалы имеют величину кислородного индекса в пределах 17–19 % и, согласно принятой классификации [5], относятся к группе горючих материалов.

Для измерения линейной скорости выгорания ТПМ использовали лабораторный прибор, состоящий из основания с вертикальной стойкой. Через верхнюю часть стойки параллельно основанию проходит ось, связанная с прямоугольной рамкой с испытуемым образцом размером 40×180 мм. Поворотом рамки вокруг оси производится ее ориентация с шагом 5° . В опытах оценивали время прохождения задним фронтом пламени меток, нанесенных на рамке через каждые 10 мм. Движение заднего фронта пламени соответствовало полному выгоранию образца ТПМ.

Как показал эксперимент (рис. 1, кривая 4), при распространении пламени сверху вниз ($\phi=-90^\circ$) после его «разгона» в течение 15–20 с на участке образца длиной 10–15 мм перемещение передней кромки фронта пламени по образцу происходит равномерно и опережает границу выгорания для всех исследованных образцов на 1–3 мм. Ширина зоны выгорания увеличивается от 1–3 до 5–15 мм при увеличении угла ориентации от -90 до 0° . При этом равномерное движение пламени по образцу сохраняется.

Горение снизу вверх ($\phi>0^\circ$) предварительно изучали на образцах бумаги размером 40×750 мм с различным весом p единицы площади. В первые моменты времени на участке размером $l=150-200$ мм перемещение фронта пламени происходит с некоторым ускорением, а зона выгорания с течением времени увеличивается в размерах, после чего на участке $l=200-750$ мм достигается стационарное горение (рис. 2) с постоянной шириной зоны выгорания 150–200 мм. В дальнейшем при $\phi>0^\circ$ горение ТПМ изучали на образцах размером $l=180$ мм, т. е. рассматривали участок развития горения. Для образцов указанного размера практически при всех углах ориентации граница выгорания ТПМ перемещается по образцу равномерно (рис. 1), и ее движение может быть характеризовано одним значением линейной скорости выгорания (табл. 1).

Зависимости линейной скорости выгорания w_ϕ от угла ориентации ϕ имеют сходный характер для ТПМ различной структуры и химической природы и симметричны относительно горизонтальной ориентации $\phi=-0^\circ$ (табл. 1). Причем при изменении ϕ в пределах от 0 до $\pm 50^\circ$ изменение w_ϕ значительно, а при ориентациях от ± 50 до $\pm 90^\circ$ становится малозаметным. Зависимости относительной скорости выгорания ($w_\phi/w_{\phi=0}-1$) в пределах всего диапазона изменения ϕ могут быть удовлетворительно опи-

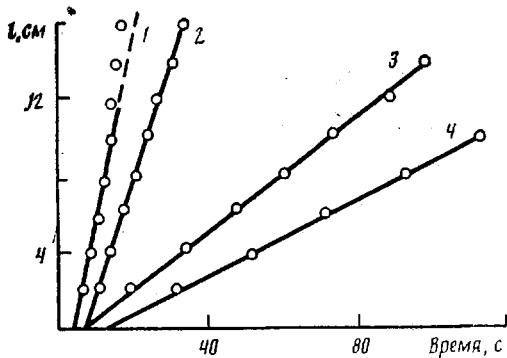


Рис. 1

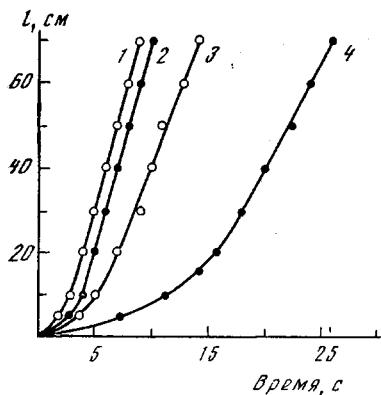


Рис. 2

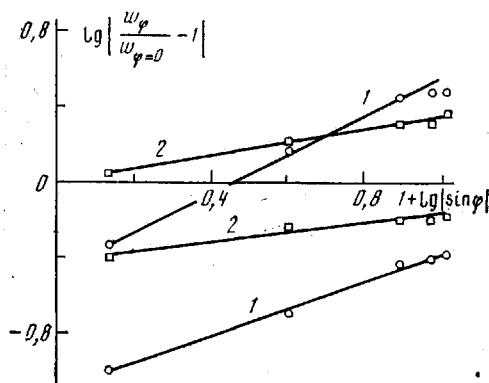


Рис. 3

саны эмпирическим уравнением (1). В табл. 2 приведены параметры K и t уравнения (1), найденные методом линеаризации уравнения в логарифмических координатах (рис. 3). Здесь следует отметить, что зависимость (1) не описывает участок практически одинаковых скоростей выгорания тканей артикула 66018 и 3303 для углов $50^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ (табл. 1), а также не объясняет постоянство скорости выгорания бумаги при $\varphi = 90^\circ$ (рис. 2, кривые 1, 2).

Представляет интерес рассмотреть влияние структуры и природы ТПМ на скорость выгорания и ее зависимость от ориентации образца. Из данных, представленных в табл. 2, следует, что зависимость скорости выгорания от угла ориентации для воздухопроницаемых тканей (артикулы 66018 и 409) выражена слабо (t возрастает, K уменьшается), чем для изолирующих материалов — бумаги и резинотканевого материала. Специфика структуры тканей артикула 66018 и 409 выражается также в увеличении скорости выгорания для всех ориентаций образцов (табл. 1). Указанная особенность может быть связана с процессами более быстрого воспламенения в передней кромке пламени из-за лучшего доступа кислорода воздуха к структурным элементам (нитям) ткани. В подтверждение этому пропитка ткани артикула 66018 kleem из бутилкаучука, резко снижая воздухопроницаемость ткани, уменьшает также скорость выгорания (табл. 1). В литературе [6–8] также отмечалось, что воспламеняемость и способность к тлению тканей из хлопчатобумажных и синтетических нитей возрастает, а величина кислородного индекса снижается с увеличением пористости и воздухопроницаемости ткани.

Для термоэластичного материала — ПЭ-пленки наблюдаются аномально большие значения линейной скорости выгорания при движении пла- мени сверху вниз ($\varphi = 0^\circ \dots -90^\circ$). Увеличению скорости движения гра-

Рис. 1. Скорость выгорания бумаги с $p = 190 \text{ г/м}^2$ на участке развития горения при изменении ориентации образцов $\varphi = 90^\circ$ (1), 10° (2), -10° (3) и -90° (4)

Рис. 2. Скорость выгорания бумаги с $p = 45$ (1–3) и 190 г/м^2 (4) при изменении ориентации образцов $\varphi = 90^\circ$ (1), 70° (2), 30° (3) и 90° (4)

Рис. 3. Зависимость относительной линейной скорости выгорания ТПМ от $\sin \varphi$ для ткани артикула 66018 (1) и бумаги с $p = 190 \text{ г/м}^2$ (2)

Таблица 1

Линейные скорости выгорания ТПМ при изменении угла ориентации

Материал	p , г/м ²	Толщина, мм	w_ϕ (мм/с) при ϕ					
			90°	70°	50°	30°	10°	0°
Ткань, артикул 66018 409 3303	95	0,21	10,5	10,5	10,2	6,7	4,0	2,8
	195	0,30	12,0	10,8	10,0	7,0	2,9	1,7
	280	0,61	8,8	8,7	8,6	6,3	3,2	1,5
ПЭ-пленка	100	0,12	—	4,7	5,0	4,7	4,0	3,6
Бумага	190	0,24	9,3	8,5	8,4	7,4	6,0	2,8
Резинотканевый материал	440	0,46	—	7,4	6,7	5,4	2,0	1,6
Ткань (артикул 66018), пропитанная бутилкау- чуком	145	—	—	7,5	6,2	2,7	—	—

Материал	p , г/м ²	Толщина, мм	w_ϕ (мм/с) при ϕ				
			-10°	-30°	-50°	-70°	-90°
Ткань, артикул 66018 409 3303	95	0,21	2,5	2,2	2,0	1,95	1,9
	195	0,30	1,5	1,2	1,0	—	0,98
	280	0,61	0,9	0,6	0,56	0,55	0,53
ПЭ-пленка	100	0,12	3,1	3,3	3,3	3,3	3,3
Бумага	190	0,24	1,6	1,3	1,15	1,1	1,05
Резинотканевый материал	440	0,46	0,9	0,5	0,4	0,37	0,36
Ткань (артикул 66018), пропитанная бутилкау- чуком	145	—	2,1	1,1	1,1	1,07	1,07

Таблица 2

Параметры уравнения (1)

Материал	K	m	Интервал изменения ϕ°
Ткань, артикул 66018 409 3303	3,09/-0,33	1,00/0,59	70...-90
	5,88/-0,42	0,95/0,42	90...-90
	5,24/-0,65	0,69/0,25	70...-70
Бумага	2,14/-0,65	0,36/0,22	90...-90
Резинотканевый материал	2,69/-0,76	0,2/0,24	70...-90

Примечание. В числителе приведены значения параметров при направлении волны горения вверх, в знаменателе — вниз.

цы выгорания пленки способствует движение расплава ПЭ под действием силы тяжести по направлению, совпадающему с движением фронта пламени. При переходе к горизонтальной ориентации образца пленки и к случаю горения вверх ($\phi \geq 0^\circ$) расплав полимера отрывается от пленки в виде капель, что уносит тепло горения и ограничивает нарастание w_ϕ (табл. 1).

Оценено влияние нарастания веса единицы поверхности ТПМ путем наложения нескольких (до 6–7) слоев материала друг на друга в пакет на изменение линейной скорости выгорания для трех характерных ориентаций образцов $\phi = -45, 0, 55^\circ$. С увеличением величины p многослойного материала в пределах 100–1000 г/м² величина w_ϕ уменьшается в соответствии с зависимостью $w_\phi = Ap^{-n}$, где p — вес 1 м² материала; A и n — константы. Вычисленные по результатам эксперимента значения констант $\lg A$ и n приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры зависимости линейной скорости выгорания от веса единицы площади ТПМ

Материал	Значения констант $\lg A/n$ для углов ориентации		
	55°	0°	-45°
Ткань, артикул 66018	1,92/0,57	2,42/1,0	0,40/1,09
409	2,40/0,73	1,75/0,64	1,84/0,79
3303	2,56/0,78	3,90/1,41	1,80/0,86
ПЭ-пленка	1,46/0,38	1,84/0,62	1,94/0,70
Бумага ($p=190 \text{ г/м}^2$)	3,04/0,93	2,50/0,90	2,40/1,05
Резинотканевый материал	2,86/0,89	2,05/0,69	3,46/1,42

Как видно, в изменении параметра n нет определенной закономерности для горения ТПМ при горизонтальной ориентации ($\phi=0^\circ$), которая входит в участок сильной зависимости скорости w_ϕ от угла ориентации (табл. 1). По сравнению с ориентацией -45° зависимость w_ϕ от p при горении под углом 55° выражена слабее. Этот факт означает, что интенсивность горения при распространении пламени снизу вверх достаточна, чтобы сохранить высокую скорость выгорания материала при увеличении веса p и толщины образца.

Судя по величине константы n , наиболее резко уменьшается скорость выгорания при увеличении количества слоев бумаги и резинотканевого материала, в то время как увеличение слоев текстильных материалов, полностью не изолируя внутренние слои пакета от доступа воздуха, не снижают w_ϕ в такой степени. Малая величина n для термопластичной ПЭ-пленки подтверждает значительный вклад в движение границы выгорания течения расплава полимера, скорость которого зависит от температуры плавления и вязкости расплава полимера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асеева Р. М., Заиков Г. Е. Горение полимерных материалов. М., 1981. С. 63.
2. Воробьев В. Н., Бычихина Л. В., Базенкова Е. Н., Перов Б. В. // Высокомолек. соед. А. 1984. Т. 26. № 10. С. 2181.
3. Hammons M. A., Reeves W. A. // Textile Chem. and Color. 1982. V. 14. № 10. P. 26.
4. Бахман Н. Н., Ларионов К. И., Лобанов И. Н. // Тез. докл. VI Всесоюз. конф. по горению полимеров и созданию ограниченно горючих материалов. Сузdal', 1988. С. 28.
5. Кодолов В. И. Горючесть и огнестойкость полимерных материалов. М., 1976. С. 7.
6. Horrocks A. R., Ugras M. // Fire and Mater. 1983. V. 7. № 3. P. 111.
7. Travers E. B., Olson N. E. // Tex. Res. J. 1982. V. 52. № 9. P. 598.
8. Jeler S., Kresevic B., Colob V. // Textilveredlung. 1985. V. 20. № 5. S. 158.

Поступила в редакцию
12.05.89