

В. А. УШКОВ, канд. техн. наук, заведующий лабораторией "Современные композиционные строительные материалы", Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: va.ushkov@yandex.ru)

А. В. КОПЫТИН, аспирант кафедры "Технология вяжущих веществ и бетонов", Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: a.kopytin@ktbbeton.com)

Е. А. ШУВАЛОВА, аспирант кафедры "Технология вяжущих веществ и бетонов", Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: sh.elena@list.ru)

В. А. СМОРНОВ, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник научно-образовательного центра "Наноматериалы и нанотехнологии", Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: smirnov@nocnt.ru)

УДК 699.812

ГОРЮЧЕСТЬ И ДЫМООБРАЗУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ ОЛИГОМЕРОВ

Рассмотрено влияние содержания и химической природы исходных компонентов на термостойкость, воспламеняемость и дымообразующую способность композиционных материалов на основе эпоксидных олигомеров. Установлено, что фосфатные пластификаторы практически не влияют на горючесть эпоксидных полимеров, но снижают их дымообразующую способность. Показано, что при содержании минеральных наполнителей менее 45 % масс. их химическая природа мало влияет на воспламеняемость эпоксидных композитов, а коэффициент дымообразования линейно уменьшается с ростом степени наполнения. Для снижения горючести эпоксидных композитов предложено использовать аддитивные бромсодержащие антипирены в виде раствора в N,N-диметил-2,4,6-триброманилине. Показана высокая эффективность ацетилферроцена и α -оксиэтилферроцена, используемых в качестве дымоподавителей эпоксидных композитов. Выявлена корреляция кислородного индекса с предельной концентрацией кислорода и критической плотностью теплового потока воспламенения композитов.

Ключевые слова: антипирен; воспламеняемость; горючесть; дымообразующая способность; композиты; наполнители; пластификаторы; производные ферроцена; эпоксидные олигомеры.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.31-42

Введение

Крупнотоннажным потребителем диановых эпоксидных олигомеров является строительная индустрия. Это обусловлено широким диапазоном технологических, физико-механических и физико-химических свойств материалов на их основе и относительно доступной сырьевой базой для синтеза таких олигомеров [1–3]. Эпоксидные олигомеры используют в качестве связующего при производстве угле-, базальто- и стеклопластиков, композитной арматуры, химически стойких лакокрасочных покрытий, полимеррастворов и полимербетонов, пенопластов, клеев и монолитных покрытий пола [4–8]. Их применяют, как правило, в виде многокомпонентных композиций, содержащих, помимо эпоксидных олигомеров

и отвердителей, различные наполнители, модификаторы, антипирены, синергисты и другие функциональные добавки.

Широкое применение в строительной индустрии полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе эпоксидных олигомеров сдерживается их повышенной пожарной опасностью [9–13]. В связи с этим в России и за рубежом большое внимание уделяется разработке пожаробезопасных эпоксидных композитов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками. Целью работы является установление влияния содержания и химической природы исходных компонентов на термостойкость и основные показатели пожарной опасности эпоксидных ПКМ, что даст возможность целенаправ-

ленно регулировать воспламеняемость, горючесть и дымообразующую способность таких материалов.

Материалы и методы исследования

Объектом настоящего исследования являлись ПКМ на основе эпоксидной смолы марки ЭД-20 (ГОСТ 10587–84), содержащие в качестве отверждающего агента алифатические аминные отвердители: диэтилентриамин (ТУ 6-02-914–86), полиэтиленполиамин (ПЭПА, ТУ 2413-357-00203447–99), триэтилентетрамин (ТУ 6-09-11-2119–93), имидазолины марок УП-0640, УП-0641 и УП-0642 (ТУ 6-05-241-514–87) и моноэтилдиэтилентриамин УП-0633М (ТУ 2494-552-00203521–99). Упругоэластические характеристики композитов регулировали за счет применения низкомолекулярных бутадиен-нитрильных карбоксилатных каучуков марок СКН-18-1А и СКН-26-1А (ТУ 38.303-01-41–92), фосфатных пластификаторов — ди(2-этилгексил)фенилфосфата, дифенил(2-этилгексил)фосфата, трифенилфосфата, дифенилкрезилфосфата, дифенил(п-третбутил)фенилфосфата (ТУ 6-06-241–92), дифенилизопропилфенилфосфата (ТУ 6-05-211-1211–80), трихлорпропилфосфата (ТУ 2493-513-05763441–2007), трихлорэтилфосфата (ТУ 2493-319-05763441–2000), свойства которых приведены в работе [14], а также хлорпарафина марки Парахлор-380 (ТУ 2493-005-13164401–92), содержащего 54–57 % хлора. В качестве тонкодисперсных (3–25 мкм) минеральных наполнителей использовали оксиды и гидроксиды металлов, гетит, маршалит, андезит, кварцевую муку и гидратсодержащие минералы. Теплофизические свойства использованных оксидов металлов приведены в работе [15], а термические свойства гидратсодержащих минералов и разлагающихся минеральных наполнителей — в [16, 17].

Для снижения горючести эпоксидных ПКМ применяли промышленные марки броморганических антипиренов и синтезированные бромсодержащие соединения серии “Редант”, физико-химические и термические свойства которых приведены в работе [18], а в качестве дымоподавителей — производные ферроцена [19]. Синтезированные антипирены серии “Редант” содержат атомы брома и хлора в ароматическом и алифатическом фрагментах молекулы и представляют собой продукты бромирования 1,1-дихлор-2,2-ди(4-хлорфенил)этилена (Редант 1), конденсации п-хлорбензола с хлоралем (Редант 2), а также бромпроизводные дегидрохлорированных продуктов конденсации п-хлорбензола с хлоралем (Редант 1-2, Редант 2-1). В зависимости от степени бромирования исходного хлоралкилароматического соединения антипирены серии “Редант” содержат 15,5–26,5 % хлора и 44–46 % брома.

Термический анализ наполнителей, антипиренов, производных ферроцена и эпоксидных композиций на воздухе и в токе азота проводили с помощью автоматизированной модульной термоаналитической системы “DuPont-9900” при скорости нагрева 10 °С/мин. Кислородный индекс (КИ), температуры воспламенения T_v и самовоспламенения T_{sv} , коэффициент дымообразования D_m в режиме пиролиза и пламенного горения, теплоту сгорания, критическую плотность теплового потока воспламенения $q_{кр}$, предельную концентрацию кислорода $c_{пр}$ и скорости распространения пламени $V_{рп}$ по горизонтальной поверхности эпоксидных полимеров и ПКМ на их основе определяли по ГОСТ 12.1.044–89* и по методикам, приведенным в работах [14–16].

Результаты и их обсуждение

Наличие в диановых смолах эпоксидных (1–24 %) и гидроксильных (0,2–10 %) функциональных групп позволяет отверждать их органическими, неорганическими и элементоорганическими соединениями различных классов [1–3]. Установлено, что химическое строение исследованных отвердителей мало влияет на горючесть и дымообразующую способность эпоксидных композитов [20]. Значения $c_{пр}$ ПКМ превышают КИ более чем на 25 %, что связано с большими теплотериями при распространении пламени по горизонтальной поверхности материалов. При этом скорость распространения пламени $V_{рп}$ по поверхности исследованных композитов возрастает с 0,17–0,20 мм/с при концентрации кислорода в потоке окислителя $[O_2]$ 30 % до 0,32–0,69 мм/с при концентрации кислорода 45 % (рис. 1). С ростом содержания аминных отвердителей (ПЭПА) в связующем не только повышается степень отвержде-

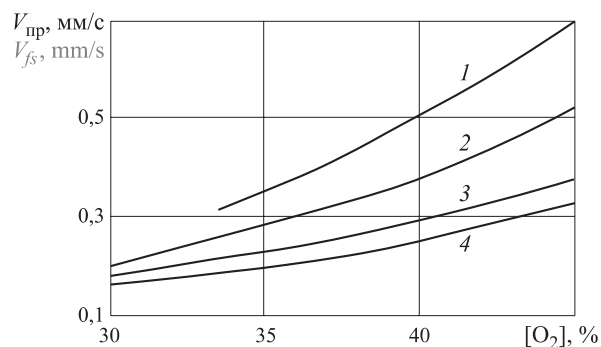


Рис. 1. Зависимость скорости распространения пламени по горизонтальной поверхности эпоксидных композиций от концентрации кислорода в потоке окислителя и природы аминного отвердителя: 1 — полиэтиленполиамин; 2 — УП-663М; 3 — триэтилентетрамин; 4 — диэтилентриамин

Fig. 1. Dependencies between fire spread speed V_{fs} (flat horizontal surface of epoxy matrix composite), oxygen concentration in stream and type of amine hardener: 1 — polyethylenepolyamine; 2 — hardener of type UP-663M; 3 — triethylenetetramine; 4 — diethylenetriamine

ния эпоксидной смолы марки ЭД-20, но и снижается горючесть и возрастает дымообразующая способность полимеров. Поэтому выбор аминных отвердителей следует проводить лишь с учетом требуемых технологических и эксплуатационных показателей эпоксидных композитов.

Эффективным методом повышения деформационно-прочностных показателей эпоксидных композитов является их модификация различными соединениями [21]. При этом низкомолекулярные органические соединения повышают горючесть и коэффициент дымообразования D_m эпоксидных ПКМ. Промышленные марки фосфатных пластификаторов повышают КИ и температуру самовоспламенения эпоксидных связующих с 22,1 % и 470 °С до 23,1–24,5 % и 500–510 °С соответственно, снижают величину $q_{кр}$ с 11,7 до 9,2–10,7 кВт/м² [20]. По эффективности пламегасящего действия трихлорэтил(пропил)фосфаты превосходят арил- и алкилфосфаты. Низкая эффективность фосфатных пластификаторов обусловлена их относительно высокой горючестью (КИ = 23,1÷29,9 %) по сравнению с полимером ЭД-20 (КИ = 21,6÷22,3 %) [14]. Существенное влияние на дымообразующую способность эпоксидных композитов оказывает химическая природа пластификаторов. Так, например, коэффициент ды-

мообразования D_m эпоксидного полимера, содержащего 8,3–15,4 % масс. дифенил(2-этилгексил)фосфата, незначительно снижается в режиме пиролиза с 980 до 910–640 м²/кг, пламенного горения — с 990 до 840–970 м²/кг. Трихлорэтил(пропил)фосфаты повышают коэффициент дымообразования в режиме пиролиза.

Кислородный индекс эпоксидного композита, наполненного андезитом (45 % масс.) и содержащего 4,4 % масс. хлорпарафина марки Парахлор-380 в сочетании с 2,2 % масс. Sb₂O₃, равен 29,1 %. Для получения аналогичного значения КИ для композитов, модифицированных синтетическим каучуком марки СКН-26-1А, необходимо содержание Парахлора-380 11,7 % масс. Установлено, что оптимальным является его содержание в композитах 10–15 % масс. относительно массы эпоксидного олигомера ЭД-20. В этом случае обеспечиваются не только высокие физико-механические свойства и химическая стойкость эпоксидных композитов, но и пониженная горючесть.

Существенное влияние на структуру эпоксидных полимеров оказывают минеральные наполнители [15, 16]. Влияние тонкодисперсных минеральных наполнителей на показатели пожарной опасности эпоксидных ПКМ показано в табл. 1. Установлено, что при степени наполнения менее 45 % масс. хими-

Таблица 1. Показатели пожарной опасности эпоксидных композитов

Table 1. Properties related to fire safety of epoxy matrix composites

Наполнитель Filler	Показатель Value					
	$T_{св}, ^\circ\text{C}$ $T_{si}, ^\circ\text{C}$	КИ, % LOI, %	$c_{пр}, \%$ $c_l, \%$	$q_{кр}, \text{кВт/м}^2$ $q_l, \text{kW/m}^2$	$D_m, \text{м}^2/\text{кг}$, в режиме $D_m, \text{m}^2/\text{kg}$, for	
					пиролиза pyrolysis	пламенного горения combustion
—	470	19,3	20,1	10,9	1350	890
CaO	480	21,2	27,0	11,7	520	350
CaCO ₃	495	20,5	25,1	11,4	790	390
Ca(OH) ₂	480	20,1	23,8	11,2	410	290
MgO	490	20,6	25,6	11,7	720	400
Al ₂ O ₃	490	20,1	23,3	10,8	800	460
CuO	480	19,8	21,8	10,6	590	480
Fe ₂ O ₃	500	21,9	29,7	—	760	500
Sb ₂ O ₃	510	20,6	25,4	11,2	630	470
Гетит Goethite	500	21,5	28,2	11,4	760	500
Кварцевая мука Grinded quartz sand	480	21,6	28,8	12,7	840	540
Mg(OH) ₂	500	22,1	30,9	14,8	680	330
Al(OH) ₃	515	22,3	31,6	16,2	780	360

Примечание. Содержание минеральных наполнителей равно 43,5 % масс., пластификатора (диоктилфталата) — 8,7 % масс.

Note. Amount of mineral fillers is 43.5 % by mass, amount of plasticizer (dioctylphthalate) is 8.7 % by mass.

ческая природа минеральных наполнителей мало влияет на показатели пожарной опасности эпоксидных композитов: $KI = 19,8 \div 22,3 \%$; $T_b = 280 \div 310^\circ\text{C}$; $T_{св} = 480 \div 515^\circ\text{C}$; $q_{кр} = 10,6 \div 16,2 \text{ кВт/м}^2$; в режиме пиролиза $D_m = 520 \div 840 \text{ м}^2/\text{кг}$, пламенного горения — $D_m = 350 \div 540 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Значительное снижение пожарной опасности эпоксидных композитов происходит при степени наполнения более 50 % масс. С ростом содержания минеральных наполнителей до 61 % масс. KI полимеррастворов увеличивается до 30,8 % (рис. 2), T_b — до $290\text{--}320^\circ\text{C}$, $T_{св}$ — до $490\text{--}520^\circ\text{C}$, величина $q_{кр}$ линейно возрастает с 10,3 до $12,2\text{--}18,5 \text{ кВт/м}^2$, а D_m снижается в режиме пиролиза с 1470 до $460\text{--}550 \text{ м}^2/\text{кг}$, пламенного горения — с 800 до $190\text{--}250 \text{ м}^2/\text{кг}$. Коэффициент дымообразования в режиме пиролиза и пламенного горения при содержании наполнителей более 20 % масс. линейно снижается с ростом степени наполнения ПКМ и незначительно зависит от химической природы используемых наполнителей [20].

При этом маршалит незначительно повышает, а гетит и лимонит снижают термостойкость композитов, что обусловлено, по нашему мнению, различной устойчивостью наполнителей к действию повышенных температур и различной концентрацией гидроксильных групп на их поверхности [22]. Следует отметить, что для всех исследованных композитов наблюдается линейная зависимость величины $100/KI$ от относительного содержания минеральных наполнителей k . При этом тангенс угла наклона прямых к оси абсцисс $\text{tg}\alpha$ пропорционален удельному теплопоглощению наполнителя (рис. 3). Величина $\text{tg}\alpha$ может быть использована для оценки эффективности пламегасящего действия наполнителей [16]. Значения $\text{tg}\alpha$ для пластифицированного полимера ЭД-20 при разных наполнителях приведены ниже:

Al_2O_3	0,04
CaCO_3	0,13
CaO	0,24
Серпентин	1,07
$\text{Al}(\text{OH})_3$	1,2
$\text{Mg}(\text{OH})_2$	1,25
Лимонит	1,32

Эффективным методом снижения горючести эпоксидных композитов является применение аддитивных броморганических антипиренов (табл. 2). С ростом их содержания закономерно снижается горючесть эпоксидных композитов. Так, например, с повышением содержания тетрабромдiana до 9,8 % масс. температура воспламенения T_b ПКМ уменьшается с 300 до 280°C , а самовоспламенения $T_{св}$, напротив, возрастает с $460\text{--}470$ до $480\text{--}490^\circ\text{C}$, KI увеличивается с 21,6 до 29,2 %. Коэффициент дымообразования D_m в режиме пиролиза практи-

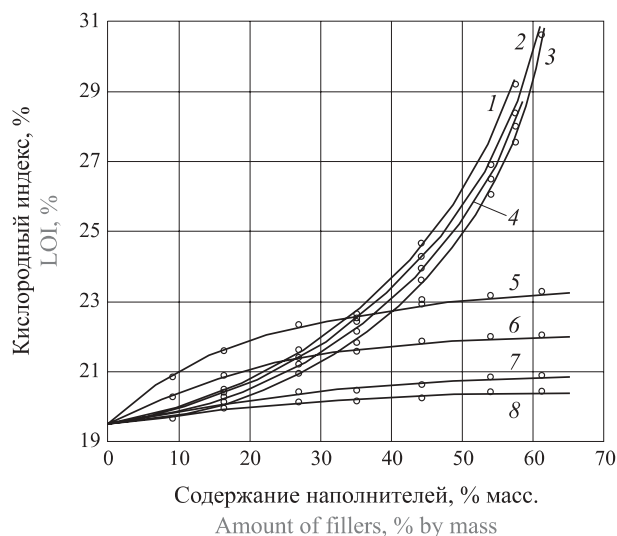


Рис. 2. Зависимость кислородного индекса эпоксидных композитов от химической природы и содержания минеральных наполнителей: 1 — лимонит; 2 — $\text{Mg}(\text{OH})_2$; 3 — $\text{Al}(\text{OH})_3$; 4 — серпентин; 5 — гетит; 6 — SiO_2 ; 7 — CaCO_3 ; 8 — Al_2O_3

Fig. 2. Dependencies between LOI of epoxy matrix composites and chemical type and amount of mineral fillers: 1 — limonite; 2 — $\text{Mg}(\text{OH})_2$; 3 — $\text{Al}(\text{OH})_3$; 4 — serpentine; 5 — goethite; 6 — SiO_2 ; 7 — CaCO_3 ; 8 — Al_2O_3

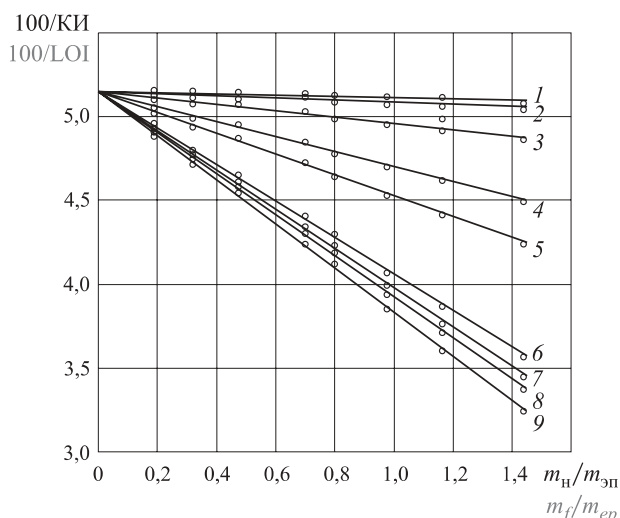


Рис. 3. Зависимость величины $100/KI$ от соотношения массы минерального наполнителя к массе эпоксидного полимера $m_n/m_{эп}$ для ПКМ, наполненных: 1 — Al_2O_3 ; 2 — CaCO_3 ; 3 — CaO ; 4 — SiO_2 ; 5 — гетит; 6 — серпентин; 7 — $\text{Al}(\text{OH})_3$; 8 — $\text{Mg}(\text{OH})_2$; 9 — лимонит

Fig. 3. Dependencies between $100/LOI$ and mineral filler/epoxy polymer fraction for PCM filled with: 1 — Al_2O_3 ; 2 — CaCO_3 ; 3 — CaO ; 4 — SiO_2 ; 5 — goethite; 6 — serpentine; 7 — $\text{Al}(\text{OH})_3$; 8 — $\text{Mg}(\text{OH})_2$; 9 — limonite

чески не зависит от содержания антипиренов и составляет $420\text{--}440 \text{ м}^2/\text{кг}$, а в режиме пламенного горения возрастает с 750 до $990 \text{ м}^2/\text{кг}$. Следует отметить, что антипирены аддитивного типа эффективнее реакционноспособных соединений. Так, для получения ПКМ с $KI = 27 \%$ концентрация брома при

Таблица 2. Показатели пожарной опасности эпоксидных ПКМ

Table 2. Fire safety properties of epoxy matrix composites

Марка антипирена Type of fire retardant	$T_{в}, ^\circ\text{C}$ $T_{с}, ^\circ\text{C}$	КИ, % LOI, %	$c_{пр}, \%$ $c_p, \%$	$V_{рп}$ при концент- рации кислорода менее 45 %, мм/с V_{fs} for oxygen concentration less than 45 %, mm/s	$D_m, \text{м}^2/\text{кг}$, в режиме $D_m, \text{m}^2/\text{kg}$, for	
					пиролиза pyrolysis	пламенного горения combustion
Без антипирена No fire retardant	300	21,6	29,4	0,41	410	570
Гексахлорбензол Hexachlorobenzene	290	27,2	37,4	0,35	470	580
Гексабромбензол Hexabromobenzene	280	28,8	36,1	0,38	440	1000
Декабромдифенилоксид Decabromodiphenyl oxide	270	28,6	36,8	0,32	460	900
Тетрабромпарахлорил Tetrabrom P-xylene	270	27,9	37,9	0,33	490	890
2,4,6-триброманилин 2,4,6-tribromaniline	300	28,4	38,9	0,32	480	820
N(2,4,6-трибромфенил)малеинимид N(2,4,6-tribromophenyl)maleimide	290	28,2	36,5	0,36	430	830
3,5,3',5'-тетрабром-4,4'-диамидифенилсульфон 3,5,3',5'-tetrabromo-4,4'-diamidiphenylsulfone	295	28,1	36,1	0,35	470	810
2,4,6-трибромфенол 2,4,6-tribromophenol	290	28,5	38,6	0,23	550	820
Тетрабромдифенилпропан Tetrabromodiphenylpropane	290	28,2	36,7	0,37	—	—
Тетрабромфталевый ангидрид Tetrabromphthalic anhydride	260	28,3	37,3	0,36	490	900

использовании пентабромфенола составляет 8,3 %, а при применении бромсодержащего олигомера марки УП-631 — 20 %. Влияние синтезированных броморганических антипиренов серии “Редант” на термостойкость и пожарную опасность эпоксидных ПКМ приведено в табл. 3. Эпоксидные композиты, модифицированные антипирином Редант 1-С, имеют более высокую теплопроводную способность по сравнению с материалами, модифицированными антипиренами Редант 1-20 и Редант 1-22 (удельная теплота сгорания композиции, содержащей 20 масс. ч. антипирена Редант 1-С, равна 31570 кДж/кг, Редант 1-20 — 29030 кДж/кг, Редант 1-22 — 29900 кДж/кг) и пониженную термостойкость. Массовая скорость выгорания композитов, модифицированных 20 масс. ч. антипиренов Редант 1-С и Редант 2-1, равна соответственно 32,17 и 30,59 г/(м²·с) при плотности теплового потока воспламенения 10,58 кВт/м².

Коэффициент дымообразования ПКМ повышается в режиме пиролиза с 410 до 440–490 м²/кг, пламенного горения — с 570 до 890–990 м²/кг. Основным критерием, определяющим эффективность таких антипиренов, является близость температуры

начала интенсивного разложения $T_{нр}$ для полимера ЭД-20 и бромсодержащего соединения. Механизм действия бромсодержащих антипиренов детально рассмотрен в работах [23–25]. Таким образом, применение аддитивных броморганических антипиренов позволяет получать умеренногорючие эпоксидные композиты при их содержании 8–10 % масс. Следует отметить, что для получения слабогорючих композитов кислородный индекс должен быть более 31 %.

Учитывая, что аддитивные броморганические антипирены являются порошкообразными кристаллическими или амфотными веществами, их целесообразно использовать в виде раствора в N,N-диметил-2,4,6-триброманилине. Установлено, что с ростом концентрации антипирена Редант 1 в N,N-диметил-2,4,6-триброманилине до 50 % КИ композитов повышается с 25,8 до 30,1 %, массовая скорость выгорания при плотности теплового потока 10,58 кВт/м² снижается с 29,1 до 23,4 г/(м²·с), а теплота сгорания линейно уменьшается с 34400 до 30150 кДж/кг (рис. 4). Максимальные значения D_m имеют композиты, содержащие 20–30 %-ный раствор антипирена

Таблица 3. Термостойкость, горючесть и дымообразующая способность эпоксидных композитов**Table 3.** Thermal stability, combustibility and fume evolution of epoxy matrix composites

Показатель Value	Марка антипирена Type of fire retardant			
	Редант 1-2 Redant 1-2	Редант 2-1 Redant 2-1	Редант 2 Redant 2	Редант 1 Redant 1
Кислородный индекс, % / LOI, %	32,3	33,2	30,5	33,7
Температура, °C / Temperature, °C:				
начала разложения / beginning of decomposition	284	252	253	264
максимальной скорости разложения на стадии / maximal rate of decomposition for stage:				
1	317	322	322	333
2	447	445	447	440
Скорость распространения пламени, мм/с, при концентрации кислорода в потоке окислителя, % / Flame spread rate, mm/s, for oxygen concentration, %:				
40	—	0,27	—	0,27
50	0,48	0,5	0,56	0,46
Теплота сгорания, кДж/кг / Heat of combustion, kJ/kg	29900	—	29030	31570
Коэффициент дымообразования, м ² /кг, в режиме / Fume evolution, m ² /kg, for:				
пиролиза / pyrolysis	770	870	760	850
пламенного горения / combustion	650	730	690	630
Примечание. Содержание антипиренов составляет 8,6 % масс., маршалита — 47,2 % масс. Note. Amount of fire retardants is 8.6 % by mass, amount of marshalite is 47.2 % by mass.				

на Редант 1 в N,N-диметил-2,4,6-триброманилине (рис. 5).

Применение антипиренов серии “Редант” в растворе N,N-диметил-2,4,6-триброманилина позволяет получать слабогорючие (Г1), не распространяющие пламя по поверхности строительных материалов (РП1) эпоксидные ПКМ, обладающие высокими физико-механическими показателями.

Эффективным дымоподавителем полимерных материалов является ферроцен (рис. 6). Установлено, что цикlopентадиенильные сэндвичеобразные

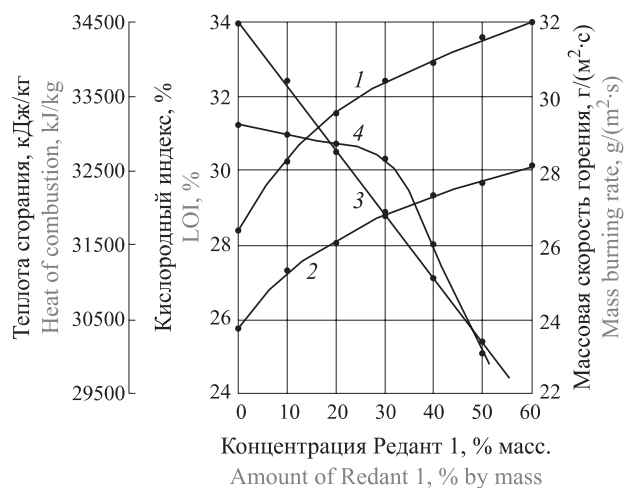


Рис. 4. Зависимость КИ (1, 2), теплоты сгорания (3) и массовой скорости горения (4) эпоксидных ПКМ от концентрации антипирена Редант 1 в N,N-диметил-2,4,6-триброманилине при его содержании в ПКМ: 1 — 8,6 % масс.; 2, 3, 4 — 4,5 % масс.

Fig. 4. Dependencies between combustibility of epoxy matrix composites and amount of Redant 1 in N,N-dimethyl-2,4,6-tribromoaniline: 1, 2 — LOI; 3 — heat of combustion; 4 — mass burning rate; 1 — amount of fire retardant in the composition is 8.6 % by mass; 2, 3, 4 — 4.5 % by mass

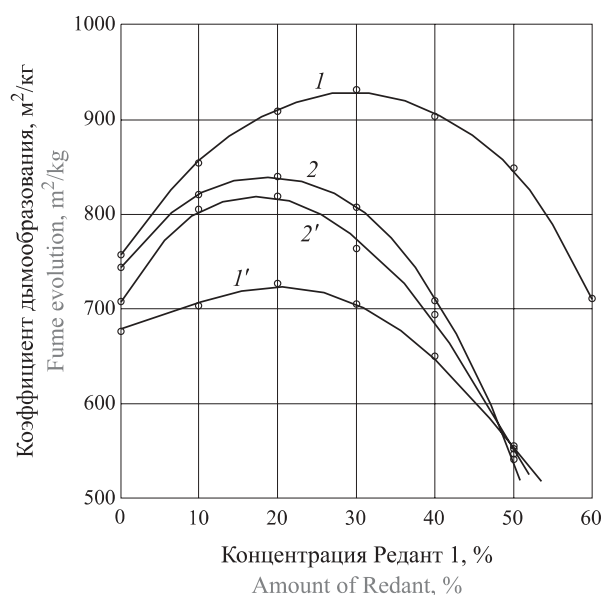


Рис. 5. Зависимость коэффициента дымообразования ПКМ от концентрации антипирена Редант 1 в N,N-диметил-2,4,6-триброманилине в режиме пиролиза (1, 2) и пламенного горения (1', 2') при содержании антипирена 4,1 % масс. (1, 1') и 7,9 % масс. (2, 2')

Fig. 5. Dependencies between fume evolution of epoxy matrix composites and amount of Redant 1 in N,N-dimethyl-2,4,6-tribromoaniline: 1, 2 — pyrolysis mode; 1', 2' — flaming combustion; 1, 1' — amount of fire retardant is 4.1 % by mass; 2, 2' — 7.9 % by mass

производные железа не влияют на температуру воспламенения (220–230 °C) и разложение эпоксидных композиций в низкотемпературной области

(табл. 4), но существенно влияют на их пиролиз при температуре выше 300 °С. При этом чем выше эффективность производных ферроцена, тем с большей скоростью разлагаются эпоксидные композиты на второй стадии и тем ниже их температура самовоспламенения.

Так, например, на второй стадии для исходной композиции температура максимальной скорости разложения T_{\max} и скорость разложения $V_{\text{разл}}$ равны соответственно 485 °С и 18,8 %/мин, а для композитов, содержащих 0,29 % масс. α -оксиэтилферроцена, — 468 °С и 24,5 %/мин. При 10 %-ной конверсии значения эффективной энергии активации $E_{\text{эфф}}$ разложения исходной композиции и составов с добавкой ацетилферроцена и ферроцена равны соответственно 170,5; 161,3 и 185,5 кДж/моль, при 30 %-ной конверсии — 193,2; 189,3 и 207,5 кДж/моль. Это обусловлено, по нашему мнению, тем, что образовавшиеся при разложении производных ферроцена оксиды железа повышают скорость разложения k -фазы.

Воспламеняемость эпоксидных композиций снижается с ростом концентрации производных ферро-

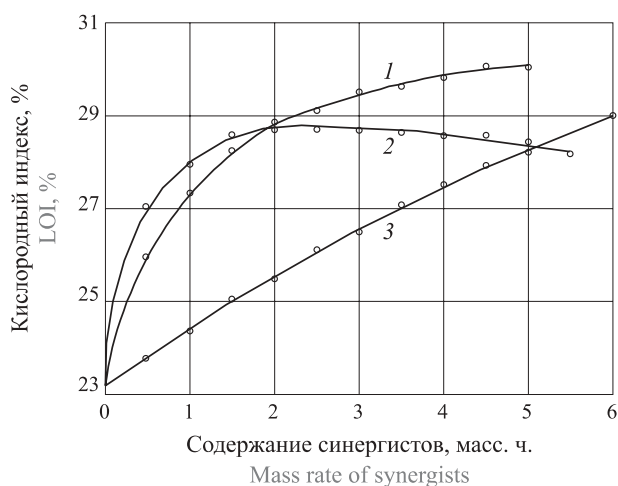


Рис. 6. Зависимость кислородного индекса эпоксидных композитов от содержания синергистов: 1 — ферроцен; 2 — бор; 3 — Sb₂O₃

Fig. 6. Dependencies between LOI of epoxy matrix composites and amount of synergists: 1 — ferrocene; 2 — boron; 3 — Sb₂O₃

цена, при этом КИ эпоксидных композитов возрастает с 23,3 до 25,6–28,3 %. Значительное повышение КИ полимеров происходит при увеличении кон-

Таблица 4. Термостойкость и горючесть наполненных (35 % масс.) эпоксидных композиций, содержащих 0,29 % масс. производных ферроцена

Table 4. Thermal stability and combustibility of filled epoxy matrix composites (amount of filler is 35 % by mass) with 0.29 % by mass of ferrocene derivatives

Показатель Value	Без добавки No admixtures	Ферроцен Ferrocene	α -оксиэтил- ферроцен α -oxyethyl ferrocene	Ацетил- ферроцен Acetyl- ferrocene	Ферроцен- дикарбоно- вая кислота Ferrocene dicarboxylic acid	Поли-ди(α -окси- изопропиленил)- ферроцен Poly-di(α -oxy- isopropylene- yl) ferrocene	Sb ₂ O ₃
Температура, °С / Temperature, °С:							
воспламенения / ignition	220	240	230	220	220	220	—
начала интенсивного разложения / start of decomposition	284	276	285	273	284	282	284
при максимальной скорости раз- ложения на стадии / maximal rate of decomposition on stage:							
1	304	301	305	300	305	306	306
2	485	500	468	459	483	481	496
самовоспламенения / self-ignition	515	490	470	480	480	480	—
Максимальная скорость разложе- ния, %/мин, на стадии / Maximal rate of decomposition, %/min, on stage:							
1	19,9	19,9	20,0	21,2	18,4	21,4	22,2
2	18,9	24,2	24,5	20,8	18,8	16,0	22,9
Тепловой эффект разложения, кДж/кг / Specific heat of decompo- sition, kJ/kg	4070	4300	3960	4300	4300	3300	4360
Кислородный индекс, % / LOI, %	23,3	27,6	28,3	25,6	26,1	25,8	27,9

Таблица 5. Влияние производных ферроцена на дымообразующую способность пластифицированных эпоксидных композиций

Table 5. Effect of ferrocene derivatives on the smoke-forming ability of plasticized epoxy compositions

Производные ферроцена Ferrocene derivatives	D_m , м ² /кг, в режиме D_m , m ² /kg, for	
	пиролиза pyrolysis	пламенного горения flame combustion
Без добавки No admixtures	1030	890
Ферроцен Ferrocene	720	480
Ацетилферроцен Acetylferrocene	660	340
Диацетилферроцен Diacetylferrocene	560	430
α -оксиэтилферроцен α -oxyethylferrocene	580	380

центрации производных ферроцена до 0,6 % масс. (рис. 7). При этом их концентрация не влияет на температуру воспламенения T_v и снижает температуру самовоспламенения T_{cv} эпоксидных композиций. Так, с ростом концентрации диацетилферроцена с 0,17 до 1,7 % масс. величина T_{cv} снижается с 505 до 490 °С. Это подтверждает вывод о том, что действие производных ферроцена проявляется в высокотемпературной области разложения эпоксидных ПКМ. Влияние исследованных циклопентадиенильных производных железа на дымообразующую способность пластифицированных эпоксидных композиций приведено ниже в табл. 5.

Более высокая эффективность ацетилферроцена и α -оксиэтилферроцена по сравнению с ферроценом обусловлена легкостью образования при их пиролизе ультрадисперсных каталитически активных оксидов железа (Fe_2O_3 , Fe_3O_4), которые влияют на механизм пиролиза коксующихся полимеров, повышают вероятность образования на поверхности полимерного материала карбонизованного слоя, ингибируют образование бензола и дыма. При этом

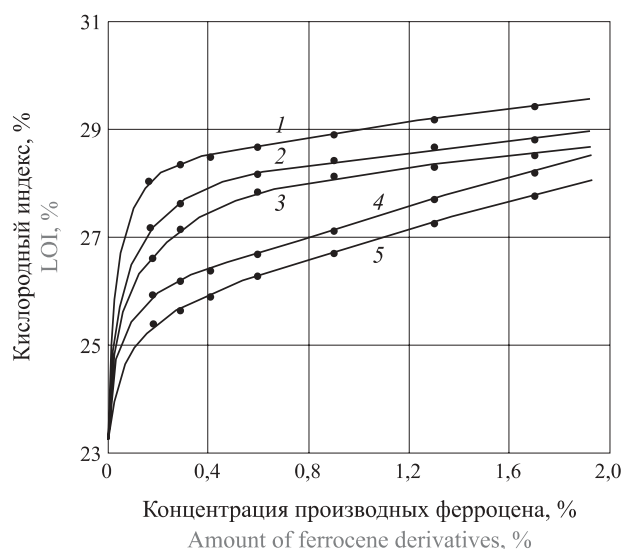


Рис. 7. Зависимость кислородного индекса эпоксидных полимеррастворов от концентрации производных ферроцена в исходной композиции: 1 — α -оксиэтилферроцен; 2 — ферроцен; 3 — диацетилферроцен; 4 — ферроцендикарбоновая кислота; 5 — ацетилферроцен

Fig. 7. Dependence between LOI of epoxy matrix mortars and amount of ferrocene derivatives: 1 — α -oxyethylferrocene; 2 — ferrocene; 3 — diacetylferrocene; 4 — ferrocenedicarboxylic acid; 5 — acetylferrocene

оптимальной концентрацией производных ферроцена в эпоксидных ПКМ является 0,3–0,5 % масс.

Заключение

Выполненный авторами комплекс экспериментальных исследований позволил выявить количественные закономерности влияния рецептурных факторов — химической природы и содержания дисперсных фаз и модификаторов — на термостойкость, воспламеняемость и дымообразующую способность композитов на основе эпоксидных олигомеров.

Определены составы эпоксидных композитов, характеризующихся повышенными показателями эксплуатационных свойств и отличающихся умеренной и малой горючестью. Разработанные композиты могут быть успешно использованы в строительной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев Ю. С., Кочергин Ю. С., Пактер М. К., Кучер Р. В. Эпоксидные олигомеры и клеевые композиции. — Киев : Наукова думка, 1990. — 200 с.
2. Кочнова З. А., Жаворонок Е. С., Чалых А. Е. Эпоксидные смолы и отвердители: промышленные продукты. — М. : ООО “Пейнт-Медиа”, 2006. — 200 с.
3. Чернин И. З., Смехов Ф. М., Жердев Ю. В. Эпоксидные полимеры и композиции. — М. : Химия, 1982. — 232 с.
4. Баженов С. Л., Берлин А. А., Кульков А. А., Ошмян В. Г. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология. — Долгопрудный : Изд. дом “Интеллект”, 2010. — 347 с.

5. Баженов Ю. М., Батаев Д. К.-С., Муртазаев С.-А. Ю. Энерго- и ресурсосберегающие материалы и технологии для ремонта и восстановления зданий и сооружений. — М. : Комтех-Принт, 2006. — 235 с.
6. Степанова В. Ф., Степанов А. Ю., Жирков Е. П. Арматура композитная полимерная. — М. : Бумажник, 2013. — 200 с.
7. Шилин А. А., Пиеничный В. А., Картузов Д. В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. — М. : Стройиздат, 2007. — 184 с.
8. Селяев В. П., Иващенко Ю. Г., Низина Т. А. Полимербетоны. — Саранск : Изд-во Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва, 2016. — 284 с.
9. Полимерные материалы с пониженной горючестью / Под ред. А. Н. Праведникова. — М. : Химия, 1986. — 221 с.
10. Михайлин Ю. А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. — СПб. : Научные основы и технологии, 2011. — 416 с.
11. Karbhari V. M., Chin J. W., Hunston D., Benmokrane B., Juska T., Morgan R., Lesko J. J., Sorathia U., Reynaud D. Durability gap analysis for fiber-reinforced polymer composites in civil infrastructure // Journal of Composites for Construction. — 2003. — Vol. 7, No. 3. — P. 238–247. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2003)7:3(238).
12. Bakis C. E., Bank L. C., Brown V. L., Cosenza E., Davalos J. F., Lesko J. J., Machida A., Rizkalla S. H., Triantafyllou T. C. Fiber-reinforced polymer composites for construction — state-of-the-art review // Journal of Composites for Construction. — 2002. — Vol. 6, No. 2. — P. 73–87. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2002)6:2(73).
13. Mouritz A. P., Gibson A. G. Fire properties of polymer composite materials. — Dordrecht : Springer, 2006. — 401 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-5356-6.
14. Ушков В. А., Лалаян В. М., Невзоров Д. И., Ломакин С. М. О влиянии фталатных и фосфатных пластификаторов на воспламеняемость и дымообразующую способность полимерных композиционных материалов // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 10. — С. 25–33.
15. Ушков В. А., Лалаян В. М., Ломакин С. М., Невзоров Д. И. О влиянии неразлагающихся наполнителей на воспламеняемость и дымообразующую способность полимерных композиционных материалов // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 6. — С. 32–39.
16. Ушков В. А., Лалаян В. М., Ломакин С. М., Невзоров Д. И. Горючесть и дымообразующая способность полимерных композиционных материалов с разлагающимися минеральными наполнителями // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 8. — С. 15–24.
17. Ушков В. А., Абрамов В. В., Григорьева Л. С., Кирьянова Л. В. Термостойкость и пожарная опасность эпоксидных полимеррастворов // Строительные материалы. — 2011. — № 12. — С. 68–71.
18. Ушков В. А., Григорьева Л. С., Абрамов В. В. Горючесть эпоксидных полимеров // Вестник МГСУ. — 2011. — № 1-2. — С. 352–356.
19. Ушков В. А., Невзоров Д. Н., Копытин А. В., Лалаян В. М. Воспламеняемость и дымообразующая способность полимерных материалов, содержащих производные ферроцена // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 7. — С. 27–35.
20. Ушков В. А., Абрамов В. В., Лалаян В. М., Кирьянова Л. В. Слабогорючие эпоксидные полимеррастворы, используемые для восстановления и ремонта строительных конструкций // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 10. — С. 36–40.
21. Панина Н. Н., Чурсова Л. В., Бабин А. Н., Гребенева Т. А., Гуревич Я. М. Основные способы модификации эпоксидных полимерных материалов в России // Все материалы. Энциклопедический справочник. — 2014. — № 9. — С. 10–17.
22. Брык М. Т. Деструкция наполненных полимеров : монография. — М. : Химия, 1989. — 192 с.
23. Халтуринский Н. А. О механизме действия галогенсодержащих ингибиторов // Все материалы. Энциклопедический справочник. — 2009. — № 11. — С. 22–30.
24. Халтуринский Н. А. О механизме действия галогенсодержащих ингибиторов // Все материалы. Энциклопедический справочник. — 2009. — № 12. — С. 30–37.
25. Халтуринский Н. А., Рудакова Т. А. Физические аспекты горения полимеров и механизм действия ингибиторов // Химическая физика. — 2008. — Т. 27, № 6. — С. 73–84.

Материал поступил в редакцию 10 июня 2017 г.

Для цитирования: Ушков В. А., Копытин А. В., Шувалова Е. А., Смирнов В. А. Горючесть и дымообразующая способность композиционных материалов на основе эпоксидных олигомеров // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 6. — С. 31–42. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.31-42.

COMBUSTIBILITY AND FUME EVOLUTION OF EPOXY MATRIX COMPOSITES

USHKOV V. A., Candidate of Technical Sciences, Head of Modern Composites for Construction Laboratory, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: va.uskov@yandex.ru)

KOPYTIN A. V., Postgraduate Student of Technology of Binders and Concretes Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: a.kopytin@ktbbeton.com)

SHUVALOVA E. A., Postgraduate Student of Technology of Binders and Concretes Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: sh.elena@list.ru)

SMIRNOV V. A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Lead Researcher of Nanomaterials and Nanotechnology Research and Educational Centre, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: smirnov@nocnt.ru)

ABSTRACT

Introduction. Epoxy oligomers are widely used as binders in construction industry. At the same time, wide use of polymers in modern construction industry requires careful examination and optimization of operational properties related to fire safety. It is known that such properties can be controlled by chlorinated paraffins, synthesized fire retardants of type “Redant” and many other compounds. However, the effect of such compounds to the properties of epoxy matrix composites has not been thoroughly investigated to date. The choice of an admixture that reduces the fume evolution of epoxy composites is an important task also.

Purpose of the work. The purpose of this work is to study the thermal stability, flammability, fume evolution of epoxy matrix composites with different types and amounts of hardeners, fillers, plasticizers, fire retardants and ferrocene derivatives.

Materials and methods. Dependencies between thermal stability, flammability, fume evolution of polymer matrix composites based on ED-20 epoxy resin and amount and chemical type of components are examined in the present work. To control operational properties of interest the chemical type and content of hardeners, fillers, plasticizers, fire retardants and ferrocene derivatives are varied. DuPont-9900 device is used for thermal analysis. Properties related to fire safety are determined in accordance with RU GOST 12.1.044–89 and several methods that were previously developed by authors of this work.

Results. It is shown that while phosphate-based plasticizers are of almost no effect on combustibility of epoxy-based polymer matrix composites, they can successfully be used for the reduction of fume evolution. It is revealed that chemical nature of mineral fillers has little effect on the flammability when amount of such fillers are less than 45 % by weight; at the same time, fume evolution linearly decreases with the increase of degree of filling. To reduce the flammability of epoxy composites, we propose additive bromine-containing flame retardants in the form of a solution in N,N-dimethyl-2,4,6-tribromoaniline. High efficiency of acetylferrocene and α -hydroxyethylferrocene as reducers of fume evolution is shown. The correlation between critical density of the heat flux of ignition and limiting oxygen index and also limiting concentration of oxygen is revealed.

Conclusion. In the present work we have summarized results of several laboratory tests. The tests were allowed to select the type and amount of components of epoxy matrix composites with improved operational properties, intermediate and small combustibility. Such composites can successfully be used in different areas of construction industry.

Keywords: fire retardant; flammability; combustibility; fume evolution; composites; fillers; plasticizers; ferrocene derivatives; epoxies.

REFERENCES

1. Zaytsev Yu. S., Kochergin Yu. S., Pakter M. K., Kucher R. V. *Epoksidnyye oligomery i kleyevyye kompozitsii* [Epoxy oligomers and glue compositions]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990. 200 p. (in Russian).
2. Kochnova Z. A., Zhavoronok E. S., Chalykh A. E. *Epoksidnyye smoly i otverditeli: promyshlennyye produkty* [Epoxy resins and hardeners: industrial products]. Moscow, Peynt-Media Publ., 2006. 200 p. (in Russian).
3. Chernin I. Z., Smekhov F. M., Zherdev Yu. V. *Epoksidnyye polimery i kompozitsii* [Epoxy polymers and compositions]. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 232 p. (in Russian).
4. Bazhenov S. L., Berlin A. A., Kulkov A. A., Oshmyan V. G. *Polimernyye kompozitsionnyye materialy. Prochnost i tekhnologiya* [Polymer matrix composites. Strength and technology]. Dolgoprudnyy, Intel-ekt Publ., 2010. 347 p. (in Russian).
5. Bazhenov Yu. M., Bataev D. K.-S., Murtazaev S.-A. Yu. *Energo- i resursoberegayushchiye materialy i tekhnologii dlya remonta i vosstanovleniya zdaniy i sooruzheniy* [Sustainable materials and technologies for repair and reconstruction of buildings and constructions]. Moscow, Komtekhn-Print Publ., 2006. 235 p. (in Russian).
6. Stepanova V. F., Stepanov A. Yu., Zhirkov E. P. *Armatura kompozitnaya polimernaya* [Polymer matrix composite reinforcement]. Moscow, Bumazhnik Publ., 2013. 200 p. (in Russian).
7. Shilin A. A., Pshenichnyy V. A., Kartuzov D. V. *Vneshneye armirovaniye zhelezobetonnykh konstruktsey kompozitsionnymi materialami* [External reinforcement of ferroconcrete by composite materials]. Moscow, Stroyizdat Publ., 2007. 184 p. (in Russian).
8. Selyaev V. P., Ivashchenko Yu. G., Nizina T. A. *Polimerbetony* [Polymer matrix concretes]. Saransk, Ogarev Mordovia State University Publ., 2016. 284 p. (in Russian).
9. Pravednikov A. N. (ed.). *Polimernyye materialy s ponizhennoy goryuchestyu* [Polymers of low flammability]. Moscow, Khimiya Publ., 1986. 221 p. (in Russian).
10. Mikhaylin Yu. A. *Teplo-, termo- i ognestoykost polimernykh materialov* [Thermal stability and fire resistance of polymers]. Saint Petersburg, Nauchnyye osnovy i tekhnologii [Scientific foundations and technologies] Publ., 2011. 416 p. (in Russian).
11. Karbhari V. M., Chin J. W., Hunston D., Benmokrane B., Juska T., Morgan R., Lesko J. J., Sorathia U., Reynaud D. Durability gap analysis for fiber-reinforced polymer composites in civil infrastructure. *Journal of Composites for Construction*, 2003, vol. 7, no. 3, pp. 238–247. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2003)7:3(238).
12. Bakis C. E., Bank L. C., Brown V. L., Cosenza E., Davalos J. F., Lesko J. J., Machida A., Rizkalla S. H., Triantafyllou T. C. Fiber-reinforced polymer composites for construction — state-of-the-art review. *Journal of Composites for Construction*, 2002, vol. 6, no. 2, pp. 73–87. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2002)6:2(73).
13. Mouritz A. P., Gibson A. G. *Fire properties of polymer composite materials*. Dordrecht, Springer, 2006. 401 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-5356-6.
14. Ushkov V. A., Lalayan V. M., Nevzorov D. I., Lomakin S. M. The effect of phthalate and phosphorus plasticizer for flammability and smoke-forming ability of polymer composite materials. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 10, pp. 25–33 (in Russian).
15. Ushkov V. A., Lalayan V. M., Lomakin S. M., Nevzorov D. I. About influence of non-degradable fillers for flammability and smoke-forming ability of polymer composite materials. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 6, pp. 32–39 (in Russian).
16. Ushkov V. A., Lalayan V. M., Lomakin S. M., Nevzorov D. I. Flammability and smoke generation ability of polymer composite materials with degradable mineral fillers. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 8, pp. 15–24 (in Russian).
17. Ushkov V. A., Abramov V. V., Grigorieva L. S., Kirianova L. V. Heat-resistance and fire hazards of epoxy polymer mortars. *Stroitel'nye materialy / Construction Materials*, 2011, no. 12, pp. 68–71 (in Russian).
18. Ushkov V. A., Grigoryeva L. S., Abramov V. V. Burning of epoxy polymer solution. *Vestnik MGSU / Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2011, no. 1-2, pp. 352–356 (in Russian).
19. Ushkov V. A., Nevzorov D. N., Kopytin A. V., Lalayan V. M. Flammability and smoke-forming ability of polymeric materials containing ferrocene derivatives. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 7, pp. 27–35 (in Russian).
20. Ushkov V. A., Abramov V. V., Lalayan V. M., Kiryanova L. V. Hard combustible epoxy polymer solutions in restoration and repair of building constructions. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 10, pp. 36–40 (in Russian).

21. Panina N. N., Chursova L. V., Babin A. N., Grebeneva T. A., Gurevich Ya. M. The most used ways of modifications of epoxy polymers that are common in Russia. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik / All Materials. Encyclopedic Reference Book*, 2014, no. 9, pp. 10–17 (in Russian).
22. Bryk M. T. *Destruktsiya napolnennykh polimerov: monografiya* [Destruction of the filled polymers. Monograph]. Moscow, Khimiya Publ., 1989. 192 p. (in Russian).
23. Khalturinskiy N. A. Processes that causes the destruction of halide retardants. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik / All Materials. Encyclopedic Reference Book*, 2009, no. 11, pp. 22–30 (in Russian).
24. Khalturinskiy N. A. Processes that causes the destruction of halide retardants. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik / All Materials. Encyclopedic Reference Book*, 2009, no. 12, pp. 30–37 (in Russian).
25. Khalturinskii N. A., Rudakova T. A. Physical aspects of polymer combustion and the inhibition mechanism. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2008, vol. 2, issue 3, pp. 480–490. DOI: 10.1134/s1990793108030238.

For citation: Ushkov V. A., Kopytin A. V., Shuvalova E. A., Smirnov V. A. Combustibility and fume evolution of epoxy matrix composites. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 6, pp. 31–42 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.31-42.



Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу

Д. Г. Пронин, Д. А. Корольченко

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ПОЖАРНЫХ ОТСЕКОВ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ : монография.

— М. : Издательство "ПОЖНАУКА", 2014. — 104 с. : ил.



Изложены современные подходы к нормированию площадей пожарных отсеков и раскрыты требования к ним. Предложен метод научно-технического обоснования размеров пожарных отсеков с учетом вероятностного подхода на основе расчета пожарного риска. Рассмотрены возможности расчета вероятностных показателей, используемых в разработанном методе. Представлены основные достижения в данном направлении отечественной и зарубежной науки; приведены сведения о положительных и отрицательных сторонах действующей системы технического регулирования.

Монография ориентирована на научных и инженерных работников, занимающихся вопросами проектирования противопожарной защиты зданий и сооружений, а также на научных и практических работников пожарной охраны, преподавателей и слушателей учебных заведений строительного и пожарно-технического профиля, специалистов страховых компаний, занимающихся вопросами оценки пожарного риска.

Монография рекомендуется к использованию при выполнении научно-исследовательских и нормативно-технических работ по оптимизации объемно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений, в том числе тех, на которые отсутствуют нормы проектирования, а также при проведении оценки страхования пожарных рисков.

Разработанный метод расчета может быть положен в основу технических регламентов и сводов правил в области строительства и пожарной безопасности.

121352, г. Москва, а/я 43; тел./факс: (495) 228-09-03; e-mail: info@fire-smi.ru