Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-3-374-382 Оригинальная статья/Research article
УДК 678.8:662.64:614.841.4 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Исследование влияния каменноугольного пека на огнезащитные свойства эпоксидных композиционных материалов

Светлана А. Астафьева [1] astafeva.s@itcras.ru 0000-0003-2018-2908
Игорь В. Вальцифер [1] valtsifer.i@itcras.ru 0000-0002-9135-2487
Татьяна С. Истомина [1] istominas@ya.ru 0000-0001-6668-9574
Елена А. Лебедева [1] itch.elena@mail.ru 0000-0001-5847-0396
Вячеслав В. Морозов [1] nikopol88@mail.ru 0000-0003-2318-5338

1 Институт технической химии Уральского отделения РАН, ул. Академика Королева, 3, г. Пермь, 614068, Россия

Аннотация. Проведено исследование вспенивающихся полимерных композиций, содержащих каменноугольный пек и неорганические наполнители, с целью оценки свойств разработанных материалов и влияния введения пека на их огнезащитную эффективность. Исследованы физико-химические и технологические свойства разработанных материалов и проведено сравнение их характеристик с атмосферостойкой органоразбавляемой эпоксидной композицией промышленного изготовления. Установлено, что введение 10 мас.% каменноугольного пека не снижает термоокислительную стабильность эпоксидных композиций и практически не влияет на количество образующегося коксового остатка, при этом указанные показатели сопоставимы с образцом без пека. В то же время модифицированный пеком состав демонстрирует выраженный эффект вспучивания: средний коэффициент вспучивания составляет не менее 22.7 раз. Под воздействием открытого пламени формируется пенококс с развитой пористой структурой, который затем частично разрушается (растрескивается), прогорает, а площадь прогара постепенно увеличивается. Механизм деструкции пенококса обусловлен его микроструктурой, представленной крупными и мелкими, преимущественно открытыми, ячейками. Такая структура снижает теплоизолирующую способность материала, поскольку облегчает доступ кислорода к реакционным зонам и ускоряет прогрев. Несмотря на это, состав с каменноугольным пеком обеспечивает огнезащитную эффективность на уровне не менее 60 минут в условиях лабораторного испытания. Полученные результаты позволяют рассматривать каменноугольный пек как перспективную модифицирующую добавку для вспенивающихся эпоксидных композиций, поскольку его введение заметно улучшает огнезащитные свойства эпоксидных композиций и обеспечивает выраженное вспучивание без существенного усложнения технологического процесса. Практический интерес к использованию каменноугольного пека связан с тем, что он представляет собой углеродсодержащий побочный продукт производства с ограниченными направлениями применения.

Ключевые слова: огнезащитные материалы, каменноугольный пек, эпоксидные композиции, металлоконструкции, интумесцентные материалы.

Investigation of the effect of coal tar pitch introduction on the fire‑retardant properties of epoxy composite materials

Svetlana A. Astaf'eva [1] astafeva.s@itcras.ru 0000-0003-2018-2908
Igor V. Valtsifer [1] valtsifer.i@itcras.ru 0000-0002-9135-2487
Tatyana S. Istomina [1] istominas@ya.ru 0000-0001-6668-9574
Elena A. Lebedeva [1] itch.elena@mail.ru 0000-0001-5847-0396
Vyacheslav V. Morozov [1] nikopol88@mail.ru 0000-0003-2318-5338

1 Institute of Technical Chemistry of UB RAS, Akademika Koroleva str., 3, Perm 614068, Russia

Abstract. An investigation of foaming polymer compositions containing coal tar pitch and inorganic fillers was performed to evaluate their properties and the effect of pitch introduction on fire protection efficiency. The physicochemical and technological properties of the developed materials were studied and compared with a commercially available weather-resistant, solvent-borne epoxy composition. It was found that the addition of 10% w/w coal tar pitch does not reduce the thermo-oxidative stability of the epoxy compositions and has virtually no effect on the amount of coke residue; these parameters remained comparable to those of a pitch-free sample. At the same time, the pitch-modified composition exhibits a pronounced swelling effect, with an average swelling ratio of at least 22.7. Exposure of the material to an open flame results in the formation of an intumescent char with a well-developed porous structure. This char layer subsequently undergoes partial degradation (cracking) and oxidation, leading to a progressive increase in the burnt-out area. The degradation mechanism is governed by the char's microstructure, which consists of a mixture of large and small, predominantly open, cells. This morphology reduces the material's thermal insulation capacity by facilitating oxygen diffusion to the reaction zones and accelerating heat transfer. Nevertheless, the coal tar pitch-based composition maintains a fire resistance rating of at least 60 minutes under laboratory conditions. These results identify coal tar pitch as a promising modifier for intumescent epoxy systems; it significantly enhances fire retardancy by ensuring pronounced expansion without complicating the manufacturing process. The practical viability of using coal tar pitch is further underscored by its status as a carbon-rich industrial byproduct with currently limited high-value applications.

Keywords: fire‑protective materials, coal‑tar pitch, epoxy compositions, steel structures, intumescent materials.

Для цитирования

Астафьева С.А., Вальцифер И.В., Истомина Т.С., Лебедева Е.А., Морозов В.В. Исследование влияния каменноугольного пека на огнезащитные свойства эпоксидных композиционных материалов // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 3. С. 374–382. doi:10.20914/2310-1202-2026-3-374-382

For citation

Astaf'eva S.A., Valtsifer I.V., Istomina T.S., Lebedeva E.A., Morozov V.V. Investigation of the effect of coal tar pitch introduction on the fire‑retardant properties of epoxy composite materials. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 3. pp. 374–382. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-3-374-382

© 2026, Астафьева С.А. и др. / Astaf'eva S.A. et al.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Вспенивающиеся огнезащитные композиции на основе эпоксидных смол – наиболее распространенные материалы для огнезащиты несущих металлоконструкций [1–10].

Из-за сравнительно низкой термостойкости конструкционной стали, используемой для изготовления металлоконструкций, в условиях пожара происходит снижение их несущей способности, зачастую приводящее к обрушению зданий. Согласно ГОСТ Р 53295-2009 критическая температура, при которой стальные конструкции теряют несущую способность, составляет 500 °С. Незащищенные металлоконструкции достигают этого температурного порога уже спустя 10–15 минут с момента начала пожара. Применение огнезащитных материалов позволяет замедлить нагрев металла и сохранить его прочностные характеристики. Благодаря этому появляется дополнительный временной ресурс для ликвидации возгорания и эвакуации людей.

Материалы на основе эпоксидной матрицы обладают рядом ценных эксплуатационных свойств: высокой адгезией к металлу, малой усадкой, высокой влаго- и атмосферостойкостью. Введение дополнительных компонентов в эпоксидные смолы позволяет получить вспенивающиеся огнезащитные композиции, которые многократно увеличиваются в объеме, образуя пенококс, представляющий собой теплоизолирующий физический барьер между защищаемой металлической поверхностью и пламенем.

Согласно классической рецептуре [11–16] в составе вспенивающейся огнезащитной композиции, помимо полимерной матрицы, должны присутствовать три обязательных компонента: меламин, пентаэритрит, полифосфат аммония. Дополнительно могут быть введены пламегасящие и коксообразующие добавки, способствующие затуханию горения и образованию прочного кокса. В качестве коксообразующего компонента часто используется графит. Однако перспективным представляется применение углеродсодержащих соединений, которые зачастую являются побочными продуктами производства и не находят широкого применения, таких как битум, каменноугольная смола и ее производное – каменноугольный пек. Пек может быть использован в качестве коксо- и порообразующей добавки, поскольку он содержит до 90% углерода и способен вспениваться под воздействием высоких температур [17–22].

Цель работы – оценить влияние каменноугольного пека на свойства и огнезащитную эффективность композиций на основе эпоксидной смолы.

Материалы и методы

Полимерные композиции изготавливали на основе эпоксидной смолы ЭД-20 (ООО «УРАЛХИМСНАБ», Россия) и отвердителя ПЭПА (ООО «УРАЛХИМСНАБ», Россия). В качестве основного катализатора коксообразования и ингибитора окисления использовали полифосфат аммония («ТД «НОВОХИМ», Россия). В составы также вводили ингибиторы горения: борную кислоту, борат цинка («ТД «НОВОХИМ», Россия), меламин, пентаэритрит (ROSHAL Group, Россия), гидроксид алюминия (ООО «АЛПИНА», Россия). В качестве порообразующей добавки и ингибитора горения использовали карбонат кальция (NUOVA SIMA SRL, Италия).

В качестве коксо- и порообразующей добавки использовали среднетемпературный каменноугольный электродный пек марки А (СТП марки А, ОАО «Губахинский кокс», ГОСТ 10200–83).

Перед изготовлением композиционных материалов смолу ЭД-20 нагревали до 80 °С с целью снижения ее вязкости, а сыпучие компоненты измельчали в мельнице RT-02C (Rong Tsong Precision Technology Co., Тайвань) в течение 60 с.

Опытные образцы полимерных композиционных материалов (ПКМ) изготавливали путем смешения исходных компонентов в следующей последовательности: в чистую емкость смесителя с обогревом до 80 °С при атмосферном давлении загружали расчетное количество эпоксидной смолы, после чего поочередно вводили наполнители. После введения каждого компонента композицию перемешивали в течение 5 минут. После введения всех компонентов перемешивание осуществляли в течение 15 минут до получения однородной консистенции, после чего вводили отвердитель и дополнительно перемешивали смесь в течение 5 минут. Полученные композиции наносили на металлические пластины из стали марки Ст3, размером 100 на 100 ± 5 мм и толщиной 1 ± 0,5 мм. Предварительно на пластины наносили грунтовку ГФ-021 (ООО «СпецЭмаль», Россия), применяемую в качестве грунтовочного слоя под огнезащитные краски для металлических поверхностей. Толщина наносимого слоя грунта составляла не более 200 мкм. Контроль

толщины мокрого слоя композиции осуществляли гребенкой для определения толщины мокрых пленок (ООО «Машиностроительный завод КОМПРАГ», Россия) с измерительным диапазоном 25–2032 мкм. Композиции наносили в несколько слоев. Время межслойной сушки до нанесения следующего слоя при средней температуре окружающей среды 20 °С составляло не менее 6 часов, а время полного отверждения покрытия при температуре 20 °С и относительной влажности воздуха (65 ± 15) % составляло не менее 24 часов.

Исследование термического поведения образцов композитов проводили методом синхронного термического анализа на приборе TGA/DSC 3 + (Mettler Toledo, Швейцария) в температурном интервале 25÷1000 ºС со скоростью нагрева 10 °С/мин на воздухе. Держатель образца – тигель из оксида алюминия объемом 70 мкл.

Определение плотности лабораторных образцов проводили в соответствии с ГОСТ 31992.1 с использованием пикнометра объемом 100 см^3.

Контроль толщины сухого слоя осуществляли микрометром МКО-25 мм (Россия) по ГОСТ 31993.

Жизнеспособность композиций после смешения компонентов определяли в соответствии с ГОСТ 27271 по пределу приемлемого нанесения заданным методом. Метод нанесения – нанесение шпателем.

Определение времени и степени отверждения образцов осуществляли в соответствии с ГОСТ 19007. Для каждой композиции проводили по три параллельных эксперимента.

Определение массовой доли нелетучих веществ (сухого остатка) образцов проводили при температуре 125 °С в соответствии с ГОСТ 31939–2022. Образцы выдерживались в сушильном шкафу SNOL LF-60/350–VS1 в течение 1 часа. Масса навески составляла 1 ± 0,1 г.

Определение огнезащитной эффективности проводили по методике, согласно которой, критерием оценки огнезащитных свойств покрытия является время эффективности теплоизоляции – время от начала испытания металлической пластины с нанесенным на нее составом при одностороннем нагреве до момента, когда температура на необогреваемой стороне пластины достигает 500 °С. В качестве источника пламени использовали переносную газовую горелку. Толщина наносимого покрытия составляла 1,5 ± 0,1 мм. Расстояние между покрытием и соплом горелки составляло 70 ± 1 мм. Температуру на обратной стороне пластины регистрировали при помощи пирометра Thermopoint 80 (AGEMA Infrared Systems AB, Швеция) с интервалом 1 мин. Для получения достоверных результатов каждую композицию испытывали не менее трех раз.

Определение коэффициента вспучивания проводили согласно ГОСТ Р 71618–2024. Толщина покрытия составляла 0,5 мм. Коэффициент вспучивания $К_{вс}$ был определен как отношение толщины вспученного слоя h к исходной толщине покрытия:

$$K_{вс} = \frac{h}{h_0} \quad (1)$$

Для каждого образца огнезащитной композиции проводили три параллельных испытания. Коэффициент вспучивания определяли как среднеарифметическое трех измерений. Покрытие считали вспучивающимся, если среднеарифметическое значение коэффициента вспучивания его образцов составляло не менее 10.

Изучение структуры пенококса, полученного после сжигания образцов, проводили на растровом электронном микроскопе FEI Quanta 650FEG (FEI Company, США). Использовали увеличение от 500х до 1000х. Ускоряющее напряжение до 30 кВ.

Результаты и обсуждение

В данной работе были изготовлены и исследованы три состава, каждый из которых содержал полимерную матрицу, меламин, пентаэритрит и полифосфат аммония. В состав Ф-1 дополнительно вводили ингибиторы горения и пламегасящие добавки: борную кислоту, гидроксид алюминия, борат цинка и карбонат кальция. Состав Ф-2, помимо указанных добавок, содержал каменноугольный пек. Состав Ф-3 содержал только каменноугольный пек без перечисленных выше добавок (таблица 1). Сравнение характеристик разработанных композиционных материалов проводили с огнезащитным составом Пламкор-5 (образец сравнения).

Таблица 1.

Состав разработанных материалов

Table 1.

Composition of the samples

Компонент Compound	Содержание компонента, мас. % Content		
	Ф-1	Ф-2	Ф-3
ЭД 20 | ED 20	53	44	60
Меламин | Melamine	6	6	6
Пентаэритрит | Pentaerythritol	6	6	6
Полифосфат аммиака Ammonia polyphosphate	12	12	12

Компонент Compound	Содержание компонента, мас. % Content		
	Ф-1	Ф-2	Ф-3
Борная кислота | Boric acid	5	5	0
Гидроксид подвергается Hydroxide undergoes	2	2	0
ПЭПА | PEPA	6	5	6
Борат цинка | Zinc borate	7	7	0
Каменноугольный пека Coal tar pitch	0	10	10
Карбонат преобразования Carbonate conversion	3	3	0

Данные термических исследований разработанных ПКМ и образца сравнения (таблица 2) свидетельствуют о том, что термоокислительная деструкция всех составов протекает в 3–4 стадии. Разложение сопровождается потерей массы и образованием коксового остатка. Количество коксового остатка у разработанных образцов возрастает в ряду Ф-3, Ф-1, Ф-2, что согласуется с увеличением суммарного содержания наполнителей в составах. Значения экстраполированной температуры начала разложения для разработанных составов близки. Образец сравнения характеризуется наименьшей температурой начала разложения и наибольшим выходом коксового остатка.

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом: более высокая температура начала разложения разработанных ПКМ свидетельствует о большей термокислительной стабильности, в то же время более низкая температура начала разложения образца сравнения свидетельствует о более раннем срабатывании состава в условиях пожара и, соответственно, о более раннем формировании защитного слоя. Кроме того, большее количество коксового остатка у образца сравнения свидетельствует о более выраженном теплоизолирующем эффекте.

С учетом близких значений температуры начала разложения и отсутствия однозначных преимуществ по совокупности термических характеристик дальнейшие исследования были сосредоточены на составе Ф-3 как на системе с более простой рецептурой по сравнению с составами Ф-1 и Ф-2.

Таблица 2.

Характеристика образцов полимерных композиционных материалов по данным совмещенного термического анализа

Table 2.

Comparison of polymer thermal property

Образец Sample	Ступень Step	Температурный диапазон, соответствующий изменению массы, °C Temperature range corresponding to mass change, °C	Потеря/прирост массы, % Weight loss/gain, %	Остаток, % при 600 °C Remainder, % at 600 °C	Экстраполированная температура начала разложения, °C Extrapolated decomposition start temperature, °C	T_{max} по ДТГ, °C *Max* for DTG, °C	Скорость изменения массы, %/°C Mass change rate, %/°C	T_{max} по ДСК, °C On the DSK, °C	Тепловой эффект, Дж/г Thermal effect, J/g
Ф-1	1	48÷310	-13,8	28,6	291	356	2,71	348	173
	2	310÷504	-45,3			567	0,79	560	3595
	3	504÷693	-20,2			727	0,05	803	78
	4	693÷1000	-5,5			-	-	894	107
Ф-2	1	47÷518	-53,0	34,9	283	350	2,23	376	207
	2	518÷695	-24,1			617	0,92	584	3078
	3	695÷1000	-4,9			733	0,06	-	-
Ф-3	1	43÷468	-57,6	25,0	287	342	2,74	351	237
	2	468÷618	-19,4			530	0,35	523	1855
	3	617÷1000	-19,3			697	0,55	709	387
Пламкор-5	1	42÷252	-13,2	37,2	121	155	0,37	157	-179
	2	252÷582	-49,0			311	1,93	329	260
	3	582÷1000	-11,7			649	0,19	563	208
	4	46÷242	-11,6			-	-	744	907

Основной характеристикой, определяющей эффективность вспенивающихся огнезащитных композиций, является коэффициент вспучивания, который должен составлять не менее 10 [15]. По данным трех параллельных испытаний (таблица 3) для образца Ф-3 средний коэффициент вспучивания составляет 22,7, т. е. состав с каменноугольным пеком способен образовывать пористый теплоизолирующий слой (пенококс) при нагреве.

Определение огнезащитной эффективности [4] составов показало, что ни пластина с образцом Ф-3, ни пластина с образцом сравнения не достигли предельного состояния, т. е. ни у одного образца в процессе испытаний на необогреваемой части пластины не была зафиксирована температура 500 °C и выше в течение 60 минут.

Таблица 3.
Результаты определения коэффициента вспучивания композиции Ф-3

Table 3.
The intumescent factor of the sample F-3

Начальная толщина покрытия (h_0), мм Initial coating thickness ($h0$), mm	Средняя толщина вспененного покрытия ($h_{ср}$), мм Average thickness of foam coating (hcp), mm	Коэффициент вспучивания ($K_{вс}$) Exfoliation coefficient (K_{vs})
0,5	10,8	21,5
0,5	10,0	19,9
0,5	13,3	26,7

По полученным экспериментальным данным были построены графики зависимости изменения температуры пластины на необогреваемой стороне от времени. При этом кривая Ф-3 демонстрирует снижение температуры в ходе испытания, кривая образца сравнения Пламкор-5 – повышение. Для состава Ф-3 температура достигала максимального значения 277 °С через 10 минут от начала испытания, после чего снижалась и к 60-й минуте составила 224 °С. Для образца сравнения Пламкор-5 температура возрастала и к 60-й минуте составила 187 °С.

Несмотря на более высокую температуру на необогреваемой стороне пластины для Ф-3 по сравнению с Пламкор-5, оба покрытия обеспечили требуемый уровень огнезащитной эффективности в условиях данного испытания.

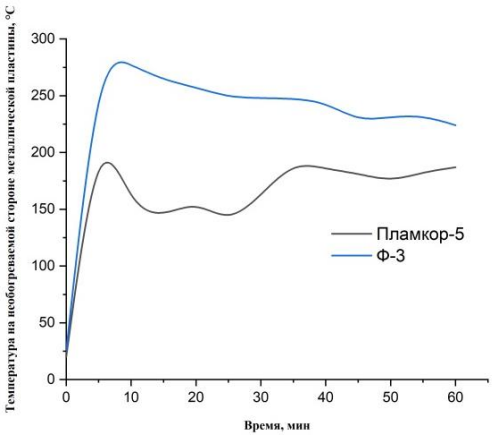


Рисунок 1. Сравнение температур на необогреваемой стороне металлической пластины при испытании огнезащитных композиций Ф-3 и Пламкор-5 воздействием пламени газовой горелки

Figure 1. Experimental evaluation of fire resistance limits for steel constructions with sample F-3 and sample Plamkor-5

В ходе проведения испытания велось визуальное наблюдение за поведением огнезащитных составов под воздействием пламени горелки (рисунки 2 и 3).

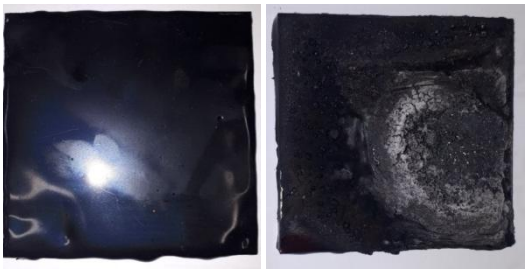


Рисунок 2. Внешний вид образца покрытия Ф-3 до и после воздействия пламени газовой горелки

Figure 2. Sample F-3 images before (left) and after (right) the combustion test



Рисунок 3. Внешний вид образца покрытия Пламкор-5 до и после воздействия пламени газовой горелки

Figure 3. Sample Plamkor-5 images before (left) and after (right) the combustion test

В обоих случаях после вспенивания состава наблюдали частичное разрушение покрытия (растрескивание), прогар кокса и увеличение площади прогара с течением времени.

В таблице 4 представлены характеристики состава Ф-3 в сравнении с Пламкор-5 по итогам проведенных испытаний.

Сравнительный анализ промышленного и разработанного составов по ключевым характеристикам показал, что состав Ф-3 отличается более коротким временем отверждения до степени 3 и более высоким коэффициентом вспучивания по сравнению с образцом Пламкор-5. Более быстрое отверждение позволяет повысить производительность работ по нанесению состава Ф-3, сократить срок межслойной сушки [23]. Больший коэффициент вспучивания обеспечивает формирование более толстого защитного слоя при вспучивании, повышает теплоизолирующие свойства кокса и, соответственно, предел огнестойкости конструкции.

Таблица 4.
Характеристика вспенивающихся огнезащитных композиций

Table 4.
Characteristics of different fire-retardant compounds

Показатель | Index	Материал Material	
	Пламкор5	Ф-3
Плотность, г/см^3 | Density, g/cm^3	1,27	1,35
Сухой остаток, % | Dry residue, %	–	98±0,5
Жизнеспособность после смешения при 25 °С, мин, не менее Pot life after mixing at 25°C, min, not less than	60	60
Время отверждения до степени 3 в соответствии с ГОСТ 19007, не более, час Curing time to degree 3 in accordance with GOST 19007, not more than, hours	12	7
Коэффициент вспучивания, раз Swelling coefficient, times	10	20

При этом теплоизолирующие свойства вспененного кокса во многом зависят от его микроструктуры.

Размеры пор оказывают сильное влияние на тепло- и огнезащитную эффективность пенококса. Известно [24], что мелкоячеистая структура позволяет уменьшить в несколько раз величину эффективного коэффициента теплопроводности и, соответственно, повысить огне- и теплозащитные характеристики материала. Важным фактором является и характер пористости: пенококс с закрытыми порами обладает лучшими защитными свойствами, чем системы с открытыми порами, способствующие более быстрому прогреву и выгоранию материала [25].

Пенококс образца Ф-3 и образца сравнения (рисунок 4 и 5) имеют плотную поверхность и пористую структуру, что указывает на типичную морфологию пенококса, образующегося под действием газов, выделяющихся при горении [25]. Микроструктура кокса композиции Ф-3 представлена крупными и мелкими, преимущественно открытыми ячейками, что может снижать теплоизолирующую способность пенококса. В микроструктуре кокса Пламкор-5 также преобладают открытые мелкоячеистые поры. Вместе с тем на микрофотографиях присутствует множество осколков, что может свидетельствовать о невысокой прочности кокса (рисунок 5), и, следовательно, о его склонности к растрескиванию и уносу под действием пламени и теплового потока. Таким образом, для обеих систем целесообразна оптимизация состава с целью модификации структуры пенококса.

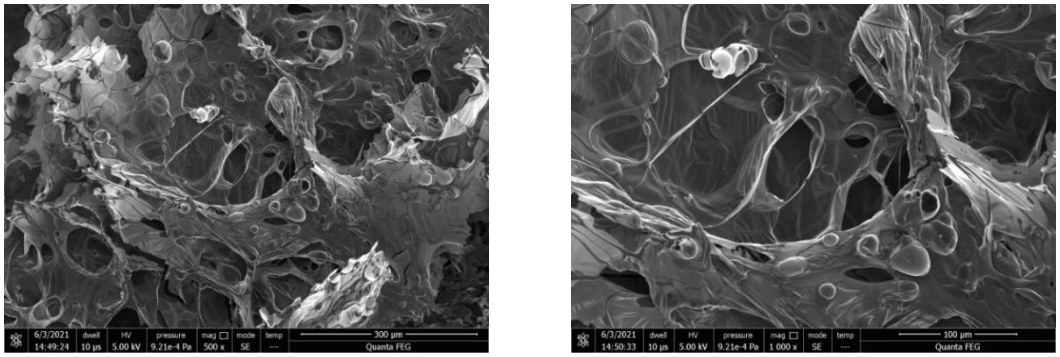


Рисунок 4. Микроструктура пенококса образца композиции Ф-3, сформировавшегося после воздействия пламени газовой горелки

Figure 4. Microstructure of the investigated coke sample F-3

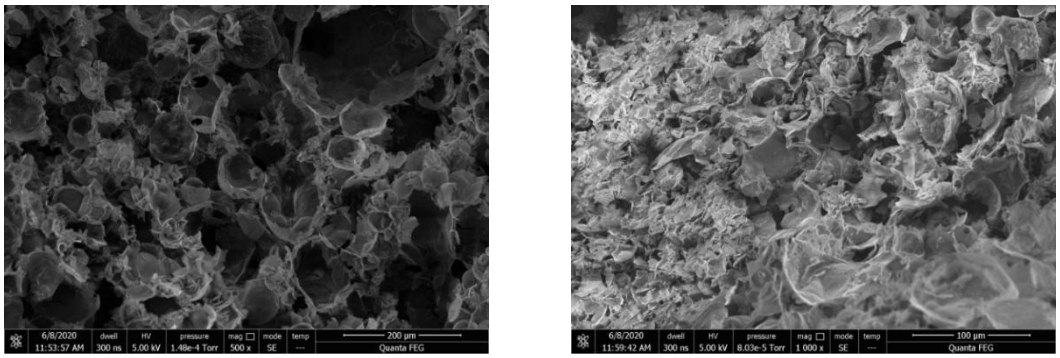


Рисунок 5. Микроструктура пенококса образца композиции Пламкор-5, сформировавшегося после воздействия пламени газовой горелки

Figure 5. Microstructure of the investigated coke sample Plamkor-5

Заключение

Разработана вспенивающаяся огнезащитная композиция на основе эпоксидной смолы, содержащая 10 мас. % каменноугольного пека. Установлено, что введение каменноугольного пека обеспечивает формирование выраженного вспучивающегося теплоизолирующего слоя при нагреве, среднее значение коэффициента вспучивания состава превышает 20. В условиях лабораторного испытания покрытие на основе разработанной полимерной композиции обеспечивает огнезащитную эффективность не менее 60 мин, при этом температура на необогреваемой стороне пластины не достигает критического значения в 500 °С. Разработанный состав характеризуется быстрым отверждением до степени 3 и высоким сухим остатком, что делает его технологически удобным при нанесении. Полученные результаты подтверждают перспективность использования каменноугольного пека в качестве модифицирующей добавки для эпоксидных вспенивающихся огнезащитных материалов и обосновывают целесообразность дальнейшей оптимизации рецептуры для повышения защитных свойств и стабильности формирующегося пенококса.

Благодарности

Коллектив авторов выражает благодарность к.т.н., с.н.с лаборатории структурно-химической модификации полимеров «ИТХ УрО РАН» Киселькову Д.М. за помощь в проведении исследования микроструктуры пенококса; ведущему инженеру лаборатории структурно-химической модификации полимеров «ИТХ УрО РАН» Ощепковой Т.Е. за помощь в проведении исследования термических свойств образцов.

Работа выполнена в рамках государственного задания; номер государственной регистрации 124022100088-6.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН.

Литература

1 Mariappan, T. Recent Developments of Intumescent Fire Protection Coatings for Structural Steel: A Review / T. Mariappan // Journal of Fire Sciences. – 2016. – Vol. 34. – P. 120–163. – DOI: 10.1177/0734904115626720.

2 Puri, R.G. Intumescent Coatings: A Review on Recent Progress / R.G. Puri, A.S. Khanna // Journal of Coatings Technology and Research. – 2017. – Vol. 14. – P. 1–20. – DOI: 10.1007/s11998–016–9815–3.

3 Global Buckling Analysis of IFC-Protected Steel Members with Irregular Sections under Fire // Journal of Constructional Steel Research. – 2025. – Vol. 224, part A. – Article no. 109158. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2024.109158.

4 Gravit, M. et al. Fire Protection of Steel Structures of Oil and Gas Facilities: Multilayer, Removable, Non-Combustible Covers // Fire. – 2024. – Vol. 7, № 3. – P. 86. – DOI: 10.3390/fire7030086.

5 de Silva, D. et al. Intumescent coatings for fire resistance of steel structures: Current approaches for qualification and design // Coatings. – 2022. – Vol. 12, № 5. – P. 696. – DOI: 10.3390/coatings12050696.

6 Golovanov, V. et al. Steel structures fire resistance assessment under standardized fire temperature regimes // Fires and Incidents: Prevention, Accident Response. – 2021. – № 3. – P. 52–60.

7 Eremina, T.Y. et al. Study of the effect of fire temperature regime on the effectiveness of intumescent fire protection coatings for steel structures // Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety. – 2023. – Vol. 32, № 2. – P. 44–58. – DOI: 10.22227/0869–7493.2023.32.02.44–58.

8 Мелдер, Э.В. Эффективность комбинации вспучивающихся покрытий для огнезащиты стальных конструкций / Э.В. Мелдер, А.Б. Сивенков // Технологии техносферной безопасности. – 2022. – № 1. – С. 49–65.

9 Zhang, Y. Research on tunnel vehicle fire temperature field simulation considering the latent heat of vaporization inside concrete linings / Y. Zhang, J. Ye, C. Lin // Case Studies in Thermal Engineering. – 2024. – Vol. 60. – Article no. 104768. – DOI: 10.1016/j.csite.2024.104768.

10 Минайлов, Д.А. Исследование огнестойкости стальных конструкций складских зданий при различных температурных условиях / Д.А. Минайлов // Пожаро-взрывобезопасность. – 2020. – Т. 29, № 3. – С. 54–65.

11 Wang, Z. et al. Research Progress of Carbon-Based Materials in Intumescent Fire-Retardant Coatings: A Review // European Polymer Journal. – 2024. – Vol. 220. – Article no. 113486. – DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2024.113486.

12 Yasir, M. Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: a review / M. Yasir, F. Ahmad, P.S.M.M. Yusoff [et al.] // Journal of Fire Sciences. – 2020. – DOI: 10.1080/02670844.2019.1636536.

13 Kukushkin, V.A. et al. Epoxy Intumescent Fire-Protective Materials: An Overview of Key Components and Their Effect on Coating Properties // Reviews and Advances in Chemistry. – 2025. – Vol. 15. – P. 348–364.

14 Bourbigot, S. Intumescence: Past, Present and Future / S. Bourbigot // Journal of Fire Safety. – 2026. – Vol. 161. – Article no. 104656. – DOI: 10.1016/j.firesaf.2026.104656.

15 Zybina, O. Intumescent Coatings for Fire Protection of Building Structures and Materials / O. Zybina, M. Gravit. – Cham : Springer International Publishing, 2020. – XI, 210 p. – (Springer Series on Polymer and Composite Materials). – ISBN 978–3–030–59421–3. – DOI: 10.1007/978–3–030–59422–0.

16 Nazrun, T. A comprehensive review on intumescent coatings: formulation, manufacturing methods, research development, and issues / T. Nazrun, M.K. Hassan, M.R. Hasnat [et al.] // Fire. – 2025. – Vol. 8, № 4. – P. 155. – DOI: 10.3390/FIRE8040155.

17 Zang, X. Upgrading Carbonaceous Materials: Coal, Tar, Pitch, and Beyond / X. Zang, Y. Dong, C. Jian [et al.] // Matter. – 2022. – Vol. 5, № 2. – P. 430–447. – DOI: 10.1016/j.matt.2021.11.022.

18 Sheng, Z. Design and Fabrication of PVC-Modified Coal Tar Pitch-Based N/O Co-Doped Porous Carbon Nanosheets for High-Performance Zinc Ion Hybrid Capacitors / Z. Sheng, Y. Sun, E. Chen [et al.] // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2026. – Vol. 193, part 2. – Article no. 107372. – DOI: 10.1016/j.jaap.2025.107372.

19 Yang, Y. Structural engineering of pitch-based porous carbon and its application in supercapacitors: a review / Y. Yang, Z. Li, J. Zhao, S. Qu // Journal of Energy Storage. – 2023. – Vol. 74. – Article no. 109334. – DOI: 10.1016/j.est.2023.109334.

20 Zhuang, Q. Direct synthesis of oxygen-enriched 3D porous carbons via NaCl template derived from oxidized coal tar pitch for excellent cycling stability electric double layer capacitor / Q. Zhuang, J. Cao, Y. Wu [et al.] // Journal of Power Sources. – 2021. – Vol. 508. – Article no. 230330. – DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.230330.

21 Huang, R. Carbon precursors in coal tar: Extraction and preparation of carbon materials / R. Huang, X. Yuan, L. Yan [et al.] // Science of The Total Environment. – 2021. – Vol. 788. – 20 September. – Article no. 147697. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147697.

22 Lu, Y. Methods of Production and Challenges in the Application of Carbon Materials from Coal Tar for Energy Storage / Y. Lu, H. Liu, B. Li [et al.] // Chemical Communications. – 2025. – Vol. 61, № 53. – P. 9596–9609. – DOI: 10.1039/d5cc01803j.

23 Марченко, С.А. Влияние температуры на время высыхания и жизнеспособность шпатлевки на основе эпоксивинилэфирной смолы / С.А. Марченко, П.В. Скивко // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2024. – № 10 (130). – С. 84–93. – DOI: 10.18577/2307–6046–2024–0–10–84–93.

24 Гравит, М.В. Оценка порового пространства пенококса огнезащитных вспучивающихся покрытий / М.В. Гравит, О.А. Зыбина [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2019. – Т. 28, № 5. – С. 45–56.

25 Morys, M. et al. Revealing the Inner Secrets of Intumescence: Advanced Standard Time-Temperature Oven (STT Mufu+)–μ-Computed Tomography Approach // Fire and Materials. – 2017. – Vol. 41, № 8. – DOI: 10.1002/fam.2426.

References

1 Mariappan, T. (2016). Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. Journal of Fire Sciences, 34, 120–163. https://doi.org/10.1177/0734904115626720

2 Puri, R.G., & Khanna, A.S. (2017). Intumescent coatings: A review on recent progress. Journal of Coatings Technology and Research, 14, 1–20. https://doi.org/10.1007/s11998–016–9815–3

3 (2025). Global buckling analysis of IFC‑protected steel members with irregular sections under fire. Journal of Constructional Steel Research, 224 (part A), 109158. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.109158

4 Gravit, M., Prusakov, V., Shcheglov, N., & Kotlyarskaya, I. (2024). Fire protection of steel structures of oil and gas facilities: Multilayer, removable, non‑combustible covers. Fire, 7(3), 86. https://doi.org/10.3390/fire7030086

5 de Silva, D., Nuzzo, I., Nigro, E., & Occhiuzzi, A. (2022). Intumescent coatings for fire resistance of steel structures: Current approaches for qualification and design. Coatings, 12(5), 696. https://doi.org/10.3390/coatings12050696

6 Golovanov, V., & Kryuchkov, G. (2021). Steel structures fire resistance assessment under standardized fire temperature regimes. Fires and Incidents: Prevention, Accident Response, (3), 52–60.

7 Eremina, T.Y., & Minaylov, D.A. (2023). Study of the effect of fire temperature regime on the effectiveness of intumescent fire protection coatings for steel structures. Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety, 32(2), 44–58. https://doi.org/10.22227/0869–7493.2023.32.02.44–58

8 M elder, E.V., & Sivenkov, A.B. (2022). Efficiency of combining intumescent coatings for fire protection of steel structures. Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technologies of Technosphere Safety, (1), 49–65.

9 Zhang, Y., Ye, J., & Lin, C. (2024). Research on tunnel vehicle fire temperature field simulation considering the latent heat of vaporization inside concrete linings. Case Studies in Thermal Engineering, 60, 104768. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104768

10 Minaylov, D.A. (2020). Investigation of fire resistance of steel structures in warehouse buildings under various temperature conditions. Pozharo-vzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety, 29(3), 54–65.

11 Wang, Z., Xu, Z., Chen, L., et al. (2024). Research progress of carbon‑based materials in intumescent fire‑retardant coatings: A review. European Polymer Journal, 220, 113486. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113486

12 Yasir, M., Ahmad, F., Yusoff, P.S.M.M., et al. (2020). Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: A review. Journal of Fire Sciences. https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1636536

13 Kukushkin, V.A., Yashin, N.V., Subbotin, V. Ye., et al. (2025). Epoxy intumescent fire‑protective materials: An overview of key components and their effect on coating properties. Reviews and Advances in Chemistry, 15, 348–364.

14 Bourbigot, S. (2026). Intumescence: Past, present and future. Journal of Fire Safety, 161, 104656. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2026.104656

15 Zybina, O., & Gravit, M. (2020). Intumescent coatings for fire protection of building structures and materials. Cham: Springer International Publishing. (Springer Series on Polymer and Composite Materials). ISBN 978–3–030–59421–3. https://doi.org/10.1007/978–3–030–59422–0

16 Nazrun, T., Hassan, M.K., Hasnat, M.R., et al. (2025). A comprehensive review on intumescent coatings: Formulation, manufacturing methods, research development, and issues. Fire, 8(4), 155. https://doi.org/10.3390/FIRE8040155

17 Zang, X., Dong, Y., Jian, C., et al. (2022). Upgrading carbonaceous materials: Coal, tar, pitch, and beyond. Matter, 5(2), 430–447. https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.11.022

18 Sheng, Z., Sun, Y., Chen, E., et al. (2026). Design and fabrication of PVC‑modified coal tar pitch‑based N/O co‑doped porous carbon nanosheets for high‑performance zinc ion hybrid capacitors. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 193 (part 2), 107372. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107372

19 Yang, Y., Li, Z., Zhao, J., & Qu, S. (2023). Structural engineering of pitch‑based porous carbon and its application in supercapacitors: A review. Journal of Energy Storage, 74, 109334. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109334

20 Zhuang, Q., Cao, J., Wu, Y., et al. (2021). Direct synthesis of oxygen‑enriched 3D porous carbons via NaCl template derived from oxidized coal tar pitch for excellent cycling stability electric double layer capacitor. Journal of Power Sources, 508, 230330. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230330

21 Huang, R., Yuan, X., Yan, L., et al. (2021). Carbon precursors in coal tar: Extraction and preparation of carbon materials. Science of The Total Environment, 788, 147697. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147697

22 Lü, Y., Liu, H., Li, B., et al. (2025). Methods of production and challenges in the application of carbon materials from coal tar for energy storage. Chemical Communications, 61(53), 9596 – 9609. https://doi.org/10.1039/d5cc01803j

23 Marchenko, S.A., & Skivko, P.V. (2024). Influence of temperature on drying time and viability of epoxy vinyl ester resin‑based putty. Trudy VIAM / Proceedings of VIAM: Electronic Scientific and Technical Journal, (10), 84 – 93. https://doi.org/10.18577/2307–6046–2024–0–10–84–93

24 Gravit, M.V., & Zybina, O.A., et al. (2019). Assessment of the pore space of intumescent fire‑protective coating char. Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety, 28(5), 45–56.

25 Morys, M., et al. (2017). Revealing the inner secrets of intumescence: Advanced standard time temperature oven (STT Mufu+)–μ computed tomography approach. Fire and Materials, 41(8), 745–758. https://doi.org/10.1002/fam.2426

Сведения об авторах

Светлана А. Астафьева к.т.н., заведующий лабораторией, лаборатория структурно-химической модификации полимеров, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук, ул. Академика Королева, 3, г. Пермь, 614068, Россия, astafeva.s@itcras.ru
https://orcid.org/0000-0003-2018-2908

Игорь В. Вальцифер к.т.н., и.о. ведущий научный сотрудник, лаборатория многофазных дисперсных систем, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук, ул. Академика Королева, 3, г. Пермь, 614068, Россия, valtsifer.i@itcras.ru
https://orcid.org/0000-0002-9135-2487

Татьяна С. Истомина к.т.н., научный сотрудник, лаборатория структурно-химической модификации полимеров, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук, ул. Академика Королева, 3, г. Пермь, 614068, Россия, istominas@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-6668-9574

Елена А. Лебедева к.т.н., старший научный сотрудник, лаборатория структурно-химической модификации полимеров, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук, ул. Академика Королева, 3, г. Пермь, 614068, Россия, itch.elena@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5847-0396

Вячеслав В. Морозов научный сотрудник, лаборатория синтеза активных реагентов, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук, ул. Академика Королева, 3, г. Пермь, 614068, Россия, nikopol88@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2318-5338

Information about authors

Svetlana A. Astaf'eva Cand. Sci. (Engin.), Head of the Laboratory, Laboratory of Structural and Chemical Polymer Modification, Institute of Technical Chemistry of UB RAS, Akademika Koroleva str., 3, Perm 614068, Russia, astafeva.s@itcras.ru
https://orcid.org/0000-0003-2018-2908

Igor V. Valtsifer Cand. Sci. (Engin.), Acting Leading Researcher, Laboratory of Multiphase Disperse Systems, Institute of Technical Chemistry of UB RAS, Akademika Koroleva str., 3, Perm 614068, Russia, valtsifer.i@itcras.ru
https://orcid.org/0000-0002-9135-2487

Tatyana S. Istomina Cand. Sci. (Engin.), Researcher, Laboratory of Structural and Chemical Polymer Modification, Institute of Technical Chemistry of UB RAS, Akademika Koroleva str., 3, Perm 614068, Russia, istominas@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-6668-9574

Elena A. Lebedeva Cand. Sci. (Engin.), Senior Researcher, Laboratory of Structural and Chemical Polymer Modification, Institute of Technical Chemistry of UB RAS, Akademika Koroleva str., 3, Perm 614068, Russia, itch.elena@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5847-0396

Vyacheslav V. Morozov Researcher, Laboratory of Structural and Chemical Polymer Modification, Institute of Technical Chemistry of UB RAS, Akademika Koroleva str., 3, Perm 614068, Russia, nikopol88@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2318-5338

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 31/05/2026	После редакции 18/06/2026	Принята в печать 20/07/2026
Received 31/05/2026	**Accepted in revised** 18/06/2026	Accepted 20/07/2026