ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ И НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

DOI: 10.15593/2224-9400/2021.1.04
УДК 66.018.4

А.Д. Ноздрюхин[1,2], М.В. Черепанова[1], И.С. Потапов[1], А.Р. Кобелева[1]

[1]Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
[2]Уральский государственный научно-исследовательский институт региональных экологических проблем, Пермь, Россия

УВЕЛИЧЕНИЕ ТЕРМОСТОЙКОСТИ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОРНОЙ КИСЛОТЫ

Работа посвящена разработке метода получения листового терморасширенного графита (ТРГ) с высокой термостойкостью. Листовой ТРГ применяется в качестве уплотнительного материала в трубопроводах, насосах, в элементах запорно-регулирующей арматуры и другого оборудования в химической промышленности и смежных областях.

Проведенный обзор научно-технической литературы показал, что соединения бора увеличивают способность материала противостоять воздействию высоких температур.

По результатам термодинамического анализа установлено, что при взаимодействии углерода с борной кислотой образуется оксид бора, который покрывает активные центры углерода оксидной пленкой, тем самым снижая доступ кислорода и уменьшая вероятность выгорания углерода, т.е. повышается термостойкость листового ТРГ.

Изучено влияние температуры раствора борной кислоты на термостойкие свойства листового ТРГ. Установлено, что с увеличением температуры с 25 до 75 °С изменение массы образцов увеличивается с 11,8 до 27,5 % соответственно.

Время вымачивания образцов листового ТРГ в растворе борной кислоты также оказывает влияние на изменение массы. С увеличением времени уменьшается изменение массы образцов, при вымачивании 15 мин изменение массы составляет 42,5 %, а при вымачивании 120 мин – 11,8 %.

Выявлено, что при увеличении концентрации вымачивающего раствора уменьшается масса образцов листового ТРГ. При концентрации 2,5 % изменение массы составляет 29,5 %, а при концентрации 10 % – 11,8 %.

Термический анализ показал, что экстраполированная температура начала окисления образцов увеличивается на 58,7 °С, что свидетельствует об увеличении термостойкости образцов листового ТРГ.

Ключевые слова: *терморасширенный графит, борная кислота, термостойкость, оксид бора, оксидная пленка, активные центры, изменение массы.*

A.D. Nozdriukhin[1,2], M.V. Cherepanova[1], I.S. Potapov[1], A.R. Kobeleva[1]

[1]Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
[2]Ural State Research Institute of Regional Environmental Problems, Perm, Russian Federation

INCREASING THE THERMAL RESISTANCE OF PRODUCTS BASED ON THERMAL EXPANDED GRAPHITE WITH THE USE OF BORIC ACID

The work is devoted to the development of a method for obtaining sheet thermally expanded graphite (hereinafter TEG) with high thermal stability. Sheet TEG is used as a sealing material in pipelines, pumps, elements of shut-off and control valves and other equipment in the chemical industry and related fields.

A review of the scientific and technical literature has shown that boron compounds increase the material's ability to withstand high temperatures.

According to the results of thermodynamic analysis, it was found that when carbon interacts with boric acid, boron oxide is formed, which covers the active centers of carbon with an oxide film, thereby reducing the access of oxygen and reducing the likelihood of carbon burnout, i.e. the thermal resistance of the sheet TEG increases.

In this work, the effect of the temperature of a boric acid solution on the heat-resistant properties of sheet TEG has been studied. It was found that with an increase in temperature from 25 °C to 75 °C, the change in the mass of the samples increases from 11.8 % to 27.5 %, respectively.

The time of soaking samples of sheet TEG in a boric acid solution also affects the change in weight. With an increase in time, the change in the mass of the samples decreases; when soaking for 15 minutes, the change in weight is 42.5 %, and when soaking for 120 minutes – 11.8 %.

It was revealed that with an increase in the concentration of the soaking solution, the change in the mass of samples of sheet TEG decreases. At a concentration of 2.5 %, the change in mass is 29.5 %, and at a concentration of 10 % – 11.8 %.

Thermal analysis showed that the extrapolated temperature of the beginning of oxidation of the samples increases by 58.7 °C, which indicates an increase in the thermal resistance of the samples of sheet TEG.

Keywords: *thermally expanded graphite, boric acid, heat resistance, boron oxide, oxide film, active centers, mass change.*

Терморасширенный графит (ТРГ) – это подвергнутый термообработке при температуре 900–1500 °С интеркалированный графит [1]. Терморасширенный графит хорошо раскатывается в гибкую графитовую фольгу, уплотняется в прокладки и уплотнительные кольца и вводится в состав многофункциональных композитов [2]. Он зарекомендовал себя как отличный уплотнительный материал, обладающий высокой химической стойкостью и широким диапазоном рабочих температур. ТРГ нашли широкое применение благодаря наличию достаточно богатых природных графитовых ресурсов для получения изделий из графита и возможности придания готовой продукции любой необходимой формы: нитей, колец, листов, набивки.

Однако с увеличением потребления растут как требования к ТРГ, так и к продукции, получаемой на его основе. Листовой графит является основной выпускаемой продукцией. Наиболее важной характеристикой листового ТРГ является его термостойкость. Термостойкость – это способность огнеупорных и других хрупких материалов противостоять, не разрушаясь, термическим напряжениям, обусловленным изменением температуры при нагреве или охлаждении [3].

Для изделий из терморасширенного графита разработан стандарт качества [4], в соответствии с которым изделия подвергают анализу на термостойкость.

В ходе исследований из интеркалированного графита по разработанной методике [5] получали листовой терморасширенный графит, который подвергали анализу на термостойкость. Основной характеристикой определения термостойкости является изменение массы образцов. В соответствии со стандартом качества разработана методика анализа, заключающаяся в том, что образец листового ТРГ размером 2х2 см помещали в муфельную печь (Тулячка-3П, Россия) и выдерживали при температуре 670 °С в течение 1 ч в атмосфере воздуха. По истечении заданного времени исследуемые образцы извлекали из печи и взвешивали на аналитических весах. Процент изменения массы определяли как отношение разности массы образца до и после анализа к массе образца до анализа.

Проведенный анализ термостойкости образцов листового ТРГ, полученных в лабораторных условиях, показал, что изменение массы образцов составляет 73,1 %. В соответствии с требованиями стандарта [4] максимальное изменение массы образцов должно составлять не более 4 %. Следовательно, полученный в лабораторных условиях образец листового ТРГ не соответствует требованиям мирового стандарта качества.

Таким образом, основной целью работы являлось увеличение термостойкости листового ТРГ и получение образцов, отвечающих требованиям мирового стандарта.

В результате проведенного обзора научно-технической литературы установлено большое количество методов и способов повышения термостойкости изделий на основе терморасширенного графита [6].

По результатам анализа научной и патентной литературы в работе в качестве реагентов, повышающих термостойкость листового ТРГ, были выбраны соединения бора и предложен метод повышения термостойкости путем вымачивания образцов листового ТРГ в различных растворах.

Авторами [7] проанализировано влияние борной кислоты на характеристики горючести материала. Экспериментально установлено, что введение порошка борной кислоты оказывает положительное влияние на пожароопасные характеристики полимеров.

Авторами патента РФ [8] разработан состав шихты для изготовления термостойких керамических изделий. В качестве одного из компонентов, повышающих термостойкость, используется борная кислота. Представленные примеры показали, что с повышением содержания борной кислоты увеличиваются физико-механические и эксплуатационные показатели керамических изделий. Одним из таких показателей является термостойкость.

В работе [9] проанализировано влияние добавления борной кислоты на термическое разрушение вспученного огнезащитного материала. Отмечается, что при добавлении борной кислоты в получаемые образцы увеличивается теплозащита подложки, на которую был закреплен исследуемый материал. Также отмечено, что борная кислота играет роль связующего и обеспечивает удержание полукокса вместе, тем самым обеспечивает целостную структуру полукокса с подложкой и защищает от воздействия высоких температур [10].

Авторами [11] проведен анализ влияния условий интеркалирования борной кислотой на термостойкие свойства полученного после интеркалирования ТРГ. Выявлено, что терморасширенный графит, полученный из графита, интеркалированного раствором борной кислоты, обладает повышенной термостойкостью.

Группой авторов [12] для повышения термостойкости и огнестойкости изделий предложен огнезащитный состав, включающий в себя растворитель, борную кислоту, диаммоний фосфат и аминоспирт.

Предложено огнезащитное покрытие из состава, содержащего карбамид, диаммонийфосфат, борную кислоту и воду [13]. По данному методу послойно наносят огнезащитный состав. Результатом является получение долговечных трудногорючих и термически устойчивых конструкций за счет получения покрытий с повышенными огнезащитными свойствами.

Разработана технология получения фенольных пен, содержащих соединения бора, которые придают пене превосходную стойкость к возгоранию и прогарам при воздействии пламени [14]. По данной технологии в качестве соединения, содержащего бор, используют борную кислоту. В результате анализа примеров к патенту выявлено, что при увеличении содержания борной кислоты в фенольных пенах возрастает их термическая стойкость и стойкость к возгоранию и прогарам, прочностные характеристики материала при этом не изменяются.

Полученные в результате анализа научно-технической и патентной литературы данные свидетельствуют о том, что соединения бора являются веществами, повышающими термостойкие свойства различных материалов.

Предложен метод повышения термостойкости листового ТРГ путем вымачивания образцов в растворе борной кислоты. По разработанной методике готовили исходный раствор борной кислоты с заданной концентрацией и объемом 50 мл. После приготовления в емкость с раствором помещали образцы листового ТРГ размером 2х2 см и выдерживали в растворе определенное время. Процесс проводили в статических условиях и в емкости с обогревом. После вымачивания образцы листового ТРГ отправляли в сушильный шкаф и сушили при температуре 120 °С до постоянной массы.

С целью определения возможности протекания химического взаимодействия между борной кислотой и ТРГ проведен термодинамический анализ [15] в диапазоне температур от 25 до 670 °С, который соответствует температуре вымачивания образцов листового ТРГ в растворе борной кислоты и температуре проведения анализа на термостойкость образцов листового обработанного ТРГ. Результаты представлены в таблице.

Установлено, что химическое взаимодействие между ТРГ и борной кислотой возможно в условиях проведения процесса вымачивания, при сушке листового ТРГ после стадии вымачивания и при проведении анализа на термостойкость.

Влияние температуры на величину термодинамических потенциалов и константу равновесия

T, °C	$\Delta H°_{х.р}$, кДж	$\Delta S°_{х.р}$, кДж	$\Delta G°_{х.р}$, кДж	$K_р$
$C + 2H_3BO_3 + O_2 = B_2O_3 + CO_2 + 3\ H_2O$				
25	–334,914	89,214	–361,513	2,192E+63
50	–331,838	99,125	–363,870	6,631E+58
75	–328,856	108,013	–366,461	9,695E+54
120	–318,388	134,659	–378,063	3,685E+44
270	–364,904	30,203	–381,309	4,714E+36
370	–358,846	40,196	–384,698	1,764E+31
470	–324,251	88,615	–390,105	2,643E+27
570	–312,034	104,040	–399,755	5,856E+24
670	–299,928	117,610	–410,851	5,704E+2
$H_3BO_3 = HBO_2 + H_2O$				
25	3,577	30,206	–5,429	8,936E+000
50	4,754	33,996	–6,232	1,017E+001
75	5,860	37,296	–7,124	1,172E+001
120	9,515	46,618	–11,143	2,059E+001
270	–0,135	20,923	–11,500	1,276E+001
370	3,199	26,482	–13,833	1,329E+001
470	7,441	32,613	–16,795	1,516E+001
570	11,684	37,970	–20,330	1,818E+001
670	15,927	42,725	–24,369	2,237E+001
$2H_3BO_3 = B_2O_3 + 3H_2O$				
25	58,591	86,335	32,850	1,755E–006
50	61,684	96,299	30,565	1,145E–005
75	64,678	105,225	28,044	6,195E–005
120	75,200	132,006	16,701	1,075E–002
270	28,791	27,764	13,711	4,801E–002
370	35,009	38,026	10,552	1,390E–001
470	69,800	86,729	5,348	4,208E–001
570	82,228	102,421	–4,128	1,802E+000
670	94,550	116,232	–15,074	6,838E+000
$B_2O_3 + 3H_2O = 2H_3BO_3$				
25	–58,591	–86,335	–32,850	5,698E+005
50	–61,684	–96,299	–30,565	8,730E+004
75	–64,678	–105,225	–28,044	1,614E+004
120	–75,200	–132,006	–16,701	9,306E+001
270	–28,791	–27,764	–13,711	2,083E+001
370	–35,009	–38,026	–10,552	7,196E+000
470	–69,800	–86,729	–5,348	2,376E+000
570	–82,228	–102,421	4,128	5,550E–001
670	–94,550	–116,232	15,074	1,462E–001

Окончание таблицы

T, °C	$\Delta H°_{х.р}$, кДж	$\Delta S°_{х.р}$, кДж	$\Delta G°_{х.р}$, кДж	$K_р$
$C + O_2 = CO_2$				
25	–393,505	2,879	–394,364	1,249E+069
50	–393,522	2,826	–394,435	5,789E+063
75	–393,534	2,788	–394,505	1,565E+059
120	–393,588	2,653	–394,764	3,429E+046
270	–393,694	2,439	–395,019	9,820E+037
370	–393,855	2,170	–395,250	1,270E+032
470	–394,051	1,886	–395,453	6,280E+027
570	–394,262	1,619	–395,628	3,250E+024
670	–394,478	1,378	–395,777	8,341E+021

С ростом температуры усиливается взаимодействие между борной кислотой и листовым ТРГ, образуется оксид бора. При этом оксид бора будет покрывать активные центры углерода, находящиеся на поверхности листового ТРГ, оксидной пленкой, тем самым уменьшая вероятность протекания реакции между углеродом и кислородом воздуха.

С увеличением температуры уменьшается вероятность взаимодействия оксида бора и воды с образованием борной кислоты. Кроме того, с увеличением температуры усиливается взаимодействие между углеродом и кислородом, в результате усиливается процесс выгорания углерода. Также с увеличением температуры усиливается процесс разложения борной кислоты, тем самым образуется дополнительное количество оксида бора, который покрывает активные центры углерода.

В связи с этим основной задачей работы является снижение массы образцов листового ТРГ при проведении анализа на термостойкость, т.е. увеличение термостойкости образцов листового ТРГ.

В ходе исследований проведены лабораторные испытания вымачивания листового ТРГ в растворе борной кислоты. Ввиду ограниченного растворения борной кислоты в воде [16] исследования проведены с концентрациями раствора 2,5; 5; 10 %. С повышением температуры растворителя растворимость борной кислоты увеличивается, поэтому проведены эксперименты по вымачиванию при температурах раствора (25, 50, 75 °C). Процесс проводили в статических условиях, выдержка образцов листового ТРГ в растворе борной кислоты составляла 15, 30, 60, 120 мин.

Таким образом, для определения влияния концентрации вымачивающего раствора борной кислоты на термостойкие свойства листово-

го ТРГ вымачивание необходимо проводить при повышенной температуре, поэтому процесс вымачивания проводили при температуре 50 °С, время вымачивания 1 ч. Результаты представлены на рис. 1.

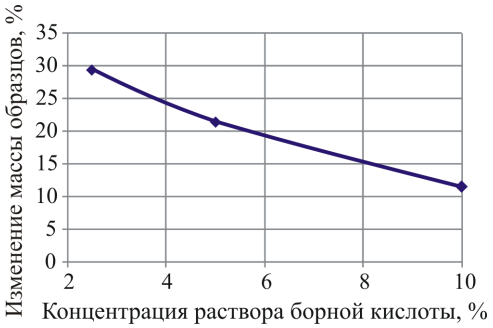

Рис. 1. Влияние концентрации вымачивающего раствора борной кислоты на изменение массы образцов листового обработанного ТРГ

Анализ данных (см. рис. 1) показал, что с увеличением концентрации раствора борной кислоты уменьшается масса образцов. Это связано с тем, что с ростом концентрации борной кислоты в растворе повышается степень взаимодействия между борной кислотой и углеродом, в результате возрастает число активных центров углерода, покрытых оксидной пленкой. Таким образом, повышается его стойкость к окислению, т.е. увеличивается термостойкость листового ТРГ. Установлено, что наилучший результат в серии достигается при вымачивании в 10%-ном по массе растворе борной кислоты. При вымачивании в 2,5%-ном и в 10%-ном растворах изменение массы образцов листового ТРГ составляет 29,5 и 11,8 % соответственно. Следовательно, при вымачивании в 10%-ном растворе борной кислоты изменение массы образцов листового ТРГ по сравнению с исходным образцом снижается на 61,3 %.

В ходе дальнейших исследований определили влияние времени вымачивания образцов листового ТРГ в 5%-ном растворе борной кислоты при температуре 25 °С на изменение массы образцов (рис. 2).

Результаты, представленные на рис. 2, показывают, что с увеличением времени выдержки снижается масса образцов листового ТРГ. Это можно объяснить тем, что с увеличением времени выдержки в растворе борной кислоты возрастает полнота протекания реакции между борной кислотой и углеродом, в результате повышается количество активных центров, покрытых оксидной пленкой, в свою очередь это обусловливает снижение взаимодействия между кислородом воздуха и уменьшением изменения массы образцов листового ТРГ. При вымачивании в течение 15 мин изменение массы образцов листового ТРГ составляет 42,5 %, а при вымачивании 120 мин – 11,8 %. Следовательно, изменение массы образцов листового ТРГ снижается на 61,3 % по сравнению с исходным образцом.

Изучено влияние температуры 5%-ного раствора борной кислоты на термостойкие свойства листового ТРГ, время вымачивания составляет 1 ч. Результаты представлены на рис. 3.

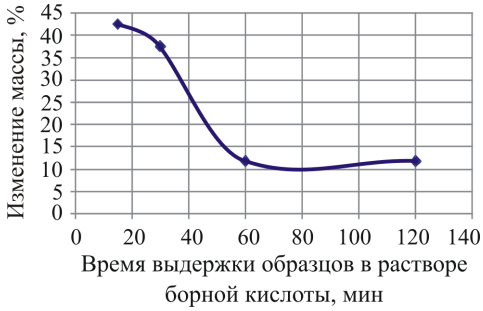

Рис. 2. Влияние длительности выдержки образцов листового ТРГ в растворе борной кислоты на изменение массы образцов листового ТРГ

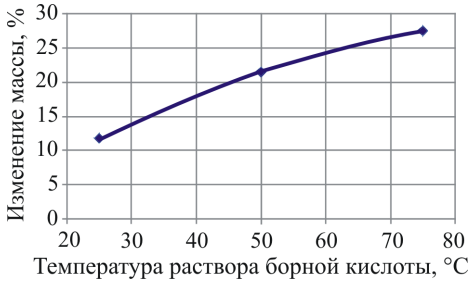

Рис. 3. Влияние температуры раствора борной кислоты на изменение массы образцов листового ТРГ

Выявлено, что с повышением температуры вымачивающего 5%-ного раствора увеличивается изменение массы образцов листового ТРГ. Это обусловливается тем, что с увеличением температуры вымачивающего раствора взаимодействие между борной кислотой и листовым ТРГ замедляется, следовательно, уменьшается количество активных центров, покрытых оксидной пленкой. При проведении анализа на термостойкость происходит взаимодействие активных центров с кислородом воздуха, тем самым происходит выгорание углерода и увеличение изменения массы образцов. При температуре 25 °С изменение массы образцов листового ТРГ составляет 11,8 %, а при температуре вымачивания 75 °С изменение массы составляет 27,5 %. Таким образом, при вымачивании в 5%-ном растворе борной кислоты в течение 1 ч при температуре 25 °С изменение массы образцов листового ТРГ снижается на 61,3 % по сравнению с необработанным образцом, следовательно, увеличивается термостойкость образцов.

Проведен термический анализ листового ТРГ (рис. 4). Установлено, что температура начала окисления образца листового ТРГ составляет 650,5 °С, а температура окончания окисления составляет 1094,0 °С.

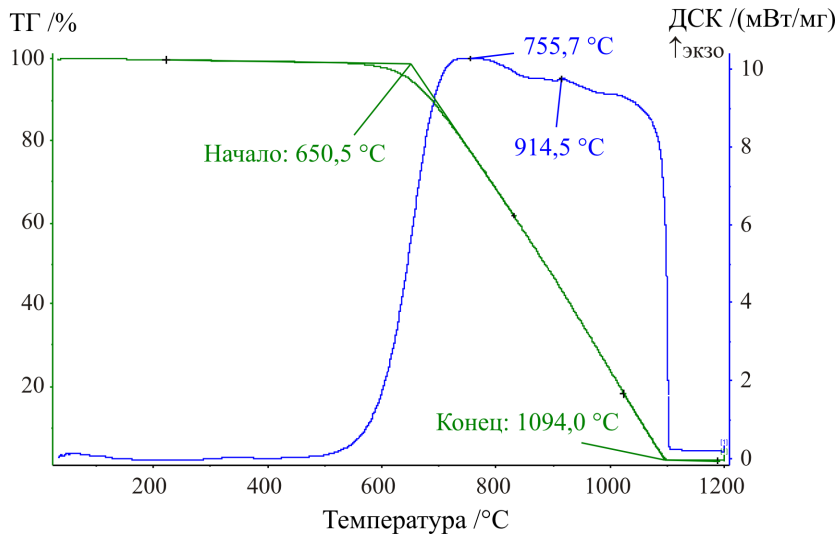

Рис. 4. Термограмма исходного образца листового ТРГ

На рис. 5 представлена термограмма образца листового ТРГ, вымоченного в 5%-ном растворе борной кислоты в течение 1 ч при температуре 25 °С.

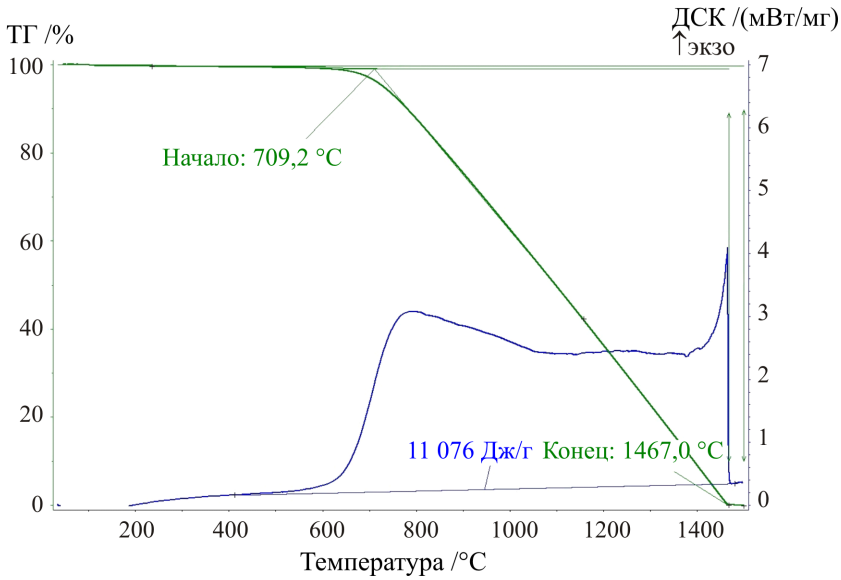

Рис. 5. Термограмма образца листового ТРГ, вымоченного в 5%-ном растворе борной кислоты при температуре 25 °С в течение 1 ч

Анализ термограммы (см. рис. 5) показал, что температура начала окисления образца листового ТРГ составляет 709,2 °С, а окончания окисления – 1467,0 °С. Таким образом, при вымачивании образца листового

ТРГ в 5%-ном растворе борной кислоты в течение 1 ч при температуре 25 °С его температура начала окисления увеличивается на 58,7 °С, что свидетельствует об увеличении термостойкости образцов листового ТРГ.

Выводы:

1. По результатам проведенного обзора научно-технической и патентной литературы установлено, что соединения бора являются веществами, повышающими термостойкие свойства материалов.

2. Термодинамический анализ процесса вымачивания листового ТРГ в борной кислоте показал, что взаимодействие между борной кислотой и углеродом протекает с образованием оксида бора. Можно сделать вывод, что активные центры, находящиеся на поверхности углерода покрываются оксидной пленкой, в результате этого снижается взаимодействие между углеродом и кислородом воздуха, т.е. возрастает стойкость к окислению.

3. В результате проведенных лабораторных исследований доказано, что вымачивание образцов листового ТРГ в растворе борной кислоты оказывает положительное влияние на термостойкость образцов листового ТРГ. С увеличением концентрации раствора борной кислоты уменьшается масса образцов. При вымачивании в 2,5%-ном и в 10%-ном растворах изменение массы образцов листового ТРГ составляет 29,5 и 11,8 % соответственно. Проанализировано влияние времени выдержки в растворе борной кислоты на термостойкие свойства листового ТРГ, при вымачивании 15 мин изменение массы образцов листового ТРГ составляет 42,5 %, а при вымачивании 120 мин – 11,8 %. Выявлено, что с увеличением температуры вымачивающего раствора увеличивается масса образцов, при температуре 25 °С изменение массы образцов листового ТРГ составляет 11,8 %, а при температуре вымачивания 75 °С изменение массы составляет 27,5 %.

5. Установлено, что наиболее экономически и технологически выгодным методом является вымачивание образцов листового ТРГ в 5%-ном растворе борной кислоты при температуре 25 °С и времени вымачивания 1 ч.

6. Анализ термограммы исходного образца листового ТРГ показал, что температуры начала и окончания окисления составляют 650,5 и 1094 °С соответственно. При этом у образца, вымоченного в 5%-ном растворе борной кислоты в течение 1 ч при температуре 25 °С, температуры начала и окончания окисления выше, чем для исходного образца, и составляют 709,2 и 1467,0 °С соответственно.

Данные проведенного термического анализа подтверждают, что после вымачивания образца листового ТРГ в растворе борной кислоты температуры начала и окончания процесса окисления возрастают, т.е. термостойкость ТРГ увеличивается.

7. Вымоченный в растворе борной кислоты образец листового ТРГ не соответствует требованиям мирового стандарта, так как изменение массы составляет 11,8 %, а по требованиям стандарта максимально допустимое изменение массы – 4 %. Таким образом, работы в данном направлении являются перспективными.

Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП «Центр наукоемких химических технологий и физико-химических исследований» ПНИПУ.

Список литературы

1. ТУ 2573-002-12058737–2005. Набивки сальниковые плетеные / ЗАО «НОВОМЕТ-ПЕРМЬ». – Пермь, 2005. – 46 с.

2. Thermally expanded graphite: synthesis, properties, and prospects for use / A.V. Yakovlev, A.I. Finaenov, S.L. Zabud'kov, E.V. Yakovleva // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2006. – Vol. 79. – P. 1741–1751.

3. Большая советская энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.

4. ASTM F2191/F2191M-13(2020)E1 Standard Specification for Packing Material, Graphitic or Carbon Braided Yarn. – URL: https://standards.globalspec.com/std/14218366/ASTM%20F2191/F2191M (дата обращения: 20.10.2020).

5. Ноздрюхин А.Д., Черепанова М.В., Потапов И.С. Определение условий терморасширения интеркалированного графита в печи с электрообогревом // Южно-сибирский научный вестник. – 2020. – № 1. – С. 102–106.

6. Ноздрюхин А.Д., Черепанова М.В., Потапов И.С. Увеличение термостойкости листового терморасширенного графита // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2019. – № 1. – С. 83–92.

7. Мельникова Т.В., Назаренко О.Б. Влияние борной кислоты на характеристики горючести эпоксидных полимеров // Вестник науки Сибири. – 2015. – № 15. – С. 108–112.

8. Шихта для изготовления термостойких керамических изделий: пат. 2657878 Рос. Федерация / Торлова А.С., Виткалова И.А., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г., Чухланов В.Ю. – № 2017111920; заявл. 07.04.2017; опубл. 18.06.2018, Бюл. № 17. – 5 с.

9. Effects of ammonium polyphosphate and boric acid on the thermal degradation of an intumescent fire retardant coating / Sami Ullaha, Faiz Ahmadb, Azmi

M. Shariffa, Mohamad A. Bustama, Girma Gonfaa, Qandeel. F. Gillanib // Progress in Organic Coatings. – 2017. – Vol. 109. – P. 70–82.

10. Nyambo C., Kandare E., Wilkie C.A. Thermal stability and flammability characteristics of ethylene vinyl acetate (EVA) composites blended with a phenyl phosphonate-intercalated layered double hydroxide (LDH), melamine polyphosphate and/or boric acid // Polymer Degradation and Stability. – 2009. – Vol. 94. – P. 513–520.

11. Hongmei Zhao, Ruinian Lin. Preparation of boric acid modified expandable graphite and its influence on polyethylene combustion characteristics // Journal of the Chilean Chemical Society. – 2016. – Vol. 61. – P. 2767–2771.

12. Огнебиозащитный трудновымываемый препарат для древесины и материалов на ее основе: пат. 2650685 Рос. Федерация / Максименко С.А., Максименко Н.А., Мельников Н.О. – № 2016119098; заявл. 18.05.2016; опубл. 23.11.2017, Бюл. № 33. – 1 с.

13. Огнезащитное покрытие «Клод-01» для строительных конструкций и способ выполнения огнезащитного покрытия: пат. 2140403 Рос. Федерация / Кривцов Ю.В., Ладыгина И.Р. – № 98122891/03; заявл. 23.12.1998; опубл. 27.10.1999. – 5 с.

14. Heatresestant phenolic foam compostions: Patent 3740358 USA / Christie H.W., Byerley T.J. – 1973.

15. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. К.П. Мищенко, А.А. Равделя. – Л.: Химия, 1974. – 200 с.

16. Ксензенко В.И., Кононово Г.Н. Теоретические основы процессов переработки галургического сырья. – М.: Химия, 1982. – 328 с.

References

1. TU 2573-002-12058737-2005 Nabivki salnikovye pletenye [Braided gland packing] Perm: ZAO «NOVOMET-PERM», 2005. – 46 p.

2. Yakovlev A.V., Finaenov A.I., Zabud'kov S.L., Yakovleva E.V. Thermally expanded graphite: synthesis, properties, and prospects for use. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2006, Vol. 79, pp. 1741–1751.

3. Bolshaia sovetskaia entciklopediia [Great Soviet encyclopedia] Moscow, *Sovetskaia entsiklopediia* 1969–1978.

4. ASTM F2191/F2191M-13(2020)E1 Standard Specification for Packing Material, Graphitic or Carbon Braided Yarn. – URL: https://standards.globalspec.com/std/14218366/ASTM%20F2191/F2191M (accessed 20.10.2020).

5. Nozdriukhin A.D., Cherepanova M.V., Potapov I.S. Opredelenie uslovii termorasshireniia interkalirovannogo grafita v pechi s elektroobogrevom [Determination of the conditions for thermal expansion of intercalated graphite in an electrically heated furnace]. *South Siberian Scientific Bulletin*, 2020, no. 1, pp. 102–106.

6. Nozdriukhin A.D., Cherepanova M.V., Potapov I.S. Uvelichenie termostoikosti listovogo termorasshirennogo grafita [Increase in heat resistance of sheet thermally expanded graphite]. *Bulletin PNRPU,* 2019, no. 1, pp. 83–89.

7. Melnikova T.V., Nazarenko O.B. Vliianie bornoi kisloty na kharakteristiki goriuchesti epoksidnykh polimerov [Effect of boric acid on the flammability characteristics of epoxy polymers]. *Siberian Science Bulletin*, 2015, no. 15, pp. 108–112.

8. Torlova A.S., Vitkalova I.A., Pikalov E.S., Selivanov O.G., Chukhlanov V.Iu. Shikhta dlia izgotovleniia termostoikikh keramicheskikh izdelii [Charge for the manufacture of heat-resistant ceramic products]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2017111920 (2018).

9. Sami Ullaha, Faiz Ahmadb, Azmi M. Shariffa, Mohamad A. Bustama, Girma Gonfaa, Qandeel. F. Gillanib. Effects of ammonium polyphosphate and boric acid on the thermal degradation of an intumescent fire retardant coating. *Progress in Organic Coatings,* 2017, vol. 109, pp. 70–82.

10. Nyambo C., Kandare E., Wilkie C.A. Thermal stability and flammability characteristics of ethylene vinyl acetate (EVA) composites blended with a phenyl phosphonate-intercalated layered double hydroxide (LDH), melamine polyphosphate and/or boric acid. *Polymer Degradation and Stability*. 2009, vol. 94, pp. 513–520.

11. Hongmei Zhao, Ruinian Lin. Preparation of boric acid modified expandable graphite and its influence on polyethylene combustion characteristics *Journal of the Chilean Chemical Society*. 2016, Vol. 61, pp. 2767–2771.

12. Maksimenko S.A., Maksimenko N.A., Melnikov N.O. Ognebiozashchitnyi trudnovymyvaemyi preparat dlia drevesiny i materialov na ee osnove [Fire-retardant, hardly washable preparation for wood and wood-based materials]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2016119098 (2017).

13. Krivtcov Iu.V. Ladygina I.R. Ognezashchitnoe pokrytie "Klod-01" dlia stroitelnykh konstruktcii i sposob vypolneniia ognezashchitnogo pokrytiia [Fire retardant coating "Claude-01" for building structures and a method of making a fire retardant coating]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 98122891/03 (1999).

14. Heatresestant phenolic foam compostions. Howard W. Christie, Thomas J. Byerley. U.S. 3740358, (1973).

15. Kratkii spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin [A quick reference book of physical and chemical quantities], Ed. K.P. Mishchenko i A.A. Ravdelia. Leningrad, Chemistry, 1974, 200 p.

16. Ksenzenko V.I. Kononovo G.N. Teoreticheskie osnovy protcessov pererabotki galurgicheskogo Syria [Theoretical foundations of the processing of halurgic raw materials]. Moscow, Chemistry, 1982, 328 p.

Получено 02.11.2020

Об авторах

Ноздрюхин Александр Дмитриевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29); инженер отдела экологических проблем загрязнения водных объектов, Уральский государственный научно-исследовательский институт региональных экологических проблем (614039, г. Пермь, Комсомольский пр., 61а, e-mail: nozd@ecologyperm.ru).

Черепанова Мария Владимировна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: syromyatnikova.maria@yandex.ru).

Потапов Игорь Сергеевич (Пермь, Россия) – инженер кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: asp-potapov@mail.ru).

Кобелева Асия Рифовна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: kobelevaasya@mail.ru).

About the authors

Alexander D. Nozdryukhin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm); Engineer, Department of Ecological Problems Due to Water Bodies Contamination, Ural State Research Institute of Regional Environmental Problems (61a, Komsomolsky av., Perm, 614039; e-mail: nozd@ecologyperm.ru).

Maria V. Cherepanova (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: syromyatnikova.maria@yandex.ru).

Igor' S. Potapov (Perm, Russian Federation) – Engineer, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: asp-potapov@mail.ru).

Asiia R. Kobeleva (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: kobelevaasya@mail.ru).