

УДК 536.49

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА «ЖИДКОЕ СТЕКЛО–МИКРОЧАСТИЦЫ ГРАФИТА» МЕТОДОМ ТЕРМОГРАВИМЕТРИИ

А.С. Устинов^а, Е.А. Питухин^а

^а Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, 185910, Российская Федерация

Адрес для переписки: anton-ustinov@psu.karelia.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 20.07.17, принята к печати 29.08.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-826-833

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Устинов А.С., Питухин Е.А. Исследование композитного материала «жидкое стекло–микрочастицы графита» методом термогравиметрии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 5. С. 826–833. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-826-833

Аннотация

Предмет исследования. Приведены результаты исследования термоустойчивости композитного материала «жидкое стекло–микрочастицы» графита при изменении температуры, а также состава вещества в начальном состоянии, на промежуточных стадиях процесса нагрева и состава остатка. **Метод.** Исследования проводились при помощи термического анализа – методом термогравиметрии, при котором регистрируется изменение массы образца в зависимости от температуры. При этом соблюдается условие, что образцы выделяют летучие вещества в результате физических или химических процессов в них. Использовались методы рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии. **Основные результаты.** Термоаналитическим методом исследован композитный материал «жидкое стекло–микрочастицы графита». Описаны физические процессы, происходящие при нагреве композитного материала. Методом рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии определена структура этого материала, установлены фазы компонентов продуктов реакции образования микрокомпозиции. Термодинамическим методом получены стехиометрические коэффициенты химической реакции. **Практическая значимость.** Композитный материал с полученными характеристиками может использоваться в качестве защитного покрытия для строительных конструкций с целью повышения огнестойкости и снижения пожарной опасности.

Ключевые слова

композитный материал, жидкое стекло, наполнитель графит, термогравиметрия, тепловое воздействие

RESEARCH OF “WATER GLASS - GRAPHITE MICROPARTICLES” COMPOSITE MATERIAL BY THERMOGRAVIMETRY METHOD

A.S. Ustinov^а, E.A. Pitukhin^а

^а Petrozavodsk State University, (PetrSU), Petrozavodsk, 185910, Russian Federation

Corresponding author: Anton-ustinov@psu.karelia.ru

Article info

Received 20.07.17, accepted 29.08.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-826-833

Article in Russian

For citation: Ustinov A.S., Pitukhin E.A. Research of “water glass - graphite microparticles” composite material by thermogravimetry method. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 826–833 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-826-833

Abstract

Subject Research. The paper presents results of research on the thermal stability of the composite material (CM) "water glass–graphite microparticles" under temperature variation and the substance composition in the initial state at the intermediate stages of the heating process, and on the residue composition. **Method.** The study was carried out by the thermal analysis with the use of thermogravimetry method, when the sample mass change depending on the temperature is recorded. Thus, the condition is observed that samples drive off volatiles as a result of physical or chemical processes in the CM. We used methods of x-ray crystallography and electron microscopy. **Main Results.** "Water glass–graphite microparticles" composite material is studied by the thermoanalytical method. The physical processes occurring during the heating of CM are described. Composite material structure and component phases of the reaction products of microcomposition formation are defined by the x-ray diffraction analysis and electron microscopy. The stoichiometric coefficients of chemical reaction are obtained by the thermodynamic method. **Practical Relevance.** Composite material with the obtained characteristics can be used as a protective coating for building structures with the aim to increase fire resistance and reduce fire hazard.

Keywords

composite material, water glass, graphite filler, thermogravimetry, thermal effects

Введение

Быстрое внедрение инноваций, связанных с композитными материалами, открывает новые перспективы для строительных, энергетических, авиационных и других материалов. Применение углерода связано с его уникальными физическими и химическими свойствами. Также широко известны механические, тепловые и электрические свойства графитосодержащих композитов [1, 2]. В настоящее время идет интенсивная разработка эффективных огнестойких и термостойких материалов для изготовления корпусов электротехнических устройств, теплоэлектронакопителей, огнезащитных щитов, огнестойких конструкций в виде облицовки, в виде декоративного покрытия технических устройств пожарной безопасности, а также в теплотехнике [3–5].

Композитный материал (КМ) «жидкое стекло–микрочастицы графита» относится к термостойким, огнестойким и теплоизоляционным материалам и может быть использован в качестве покрытий, предназначенных для уменьшения тепловых потерь и устойчивых к воздействию высоких температур, использоваться в качестве защитного покрытия для строительных конструкций с целью повышения огнестойкости и снижения пожарной опасности [6–9]. Изначально получают микропорошок с размером частиц 1–10 мкм путем помола исходного материала графита. Помол графита осуществляется с помощью лабораторной планетарно-центробежной мельницы – активатора ГЕФЕСТ-2 (АГО-2У). Порошок наполнителя микрометрового диапазона частиц обеспечивает большую поверхность смачивания и площади фазового контакта, связь между приведенными в контакт разнородными поверхностями, увеличение адгезии. В качестве связующего компонента используется жидкое натриевое стекло $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO})_n$. Предельное зафиксированное значение разрывной нагрузки для материала составляет 1,2 МПа без образования трещин по структуре. Предел огнестойкости для данного КМ определен по потере теплоизолирующей способности (I) и имеет значение 115. Коэффициент теплопроводности в температурном диапазоне до 1000°C находится в пределах 0,85–1,2 Вт/(м·К). Низкий коэффициент теплопроводности подтверждает высокие теплоизоляционные свойства исследуемого КМ [10, 11].

Целью работы является исследование термостойкости композитного материала «жидкое стекло–микрочастицы графита» при изменении температуры, а также состава вещества в начальном состоянии, на промежуточных стадиях процесса нагрева и состава остатка.

Методика испытаний композитного материала

Термоаналитические методы служат для исследования химических реакций, фазовых и других физико-химических превращений, происходящих под влиянием тепла в химических соединениях или (в случае многокомпонентных систем) между отдельными соединениями. Термические процессы, будь то химические реакции, изменение состояния или превращение фазы, всегда сопровождаются более или менее значительным изменением внутреннего теплосодержания системы. Превращения во многих случаях также связаны с изменением массы образца, которая может быть, в свою очередь, с большой точностью определена при помощи термогравиметрического метода.

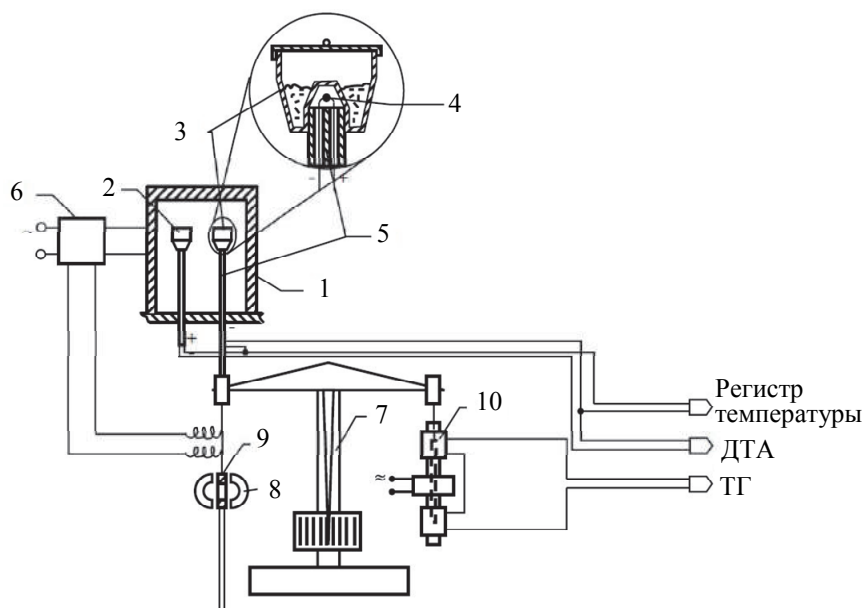


Рис. 1. Принципиальная схема: 1 – печь; 2 – держатель для инертного вещества; 3 – держатель образца (контейнер); 4 – термодара; 5 – керамическая трубка; 6 – регулятор нагрева; 7 – весы; 8 – магнит; 9 – катушка; 10 – дифференциальный трансформатор преобразования термогравиметрии

Под термическими методами понимается группа методов физико-химического анализа, в которых измеряется какой-либо физический параметр системы в зависимости от температуры. Калориметрия и термогравиметрия относятся к термическим методам анализа. В термогравиметрии (ТГ) измеряемым параметром является масса вещества, в калориметрии – теплота. Дифференциальный термический анализ (ДТА) основан на регистрации разности температур исследуемого вещества и инертного образца сравнения при их одновременном нагревании или охлаждении. Таким образом, термогравиметрия – это развитие метода исследования, заключающегося в измерении изменения массы образцов при нагревании. Графически изображенные результаты измерения дают термогравиметрическую кривую [12]. На основании термогравиметрической кривой можно судить о том, каким образом изменялась при нагревании масса пробы. Принципиальная схема метода исследования приведена на рис. 1.

Термографическим методом были исследованы четыре образца КМ «жидкое стекло–микрочастицы графита» с частицами наполнителя (графита) размером 1–10 мкм. Масса каждого из них до эксперимента составляла 6,269 мг, 12,788 мг, 15,84 мг и 9,5 мг соответственно (рис. 2, а). Исследования проводились на термогравиметре HITACHI STA 7300 (рис. 2, б). В ходе эксперимента нагрев всех образцов осуществлялся до температуры 1000 °С (рис. 3). Скорость нагрева составляла 40 °С/мин. Начальная температура исследования составляла 40 °С. При данной температуре опытный образец выдерживался 5 мин. Исследования проводились при продуве аргоном (200 мл/мин) с целью исключения воздуха (кислорода, который содержится в воздухе) в области эксперимента.

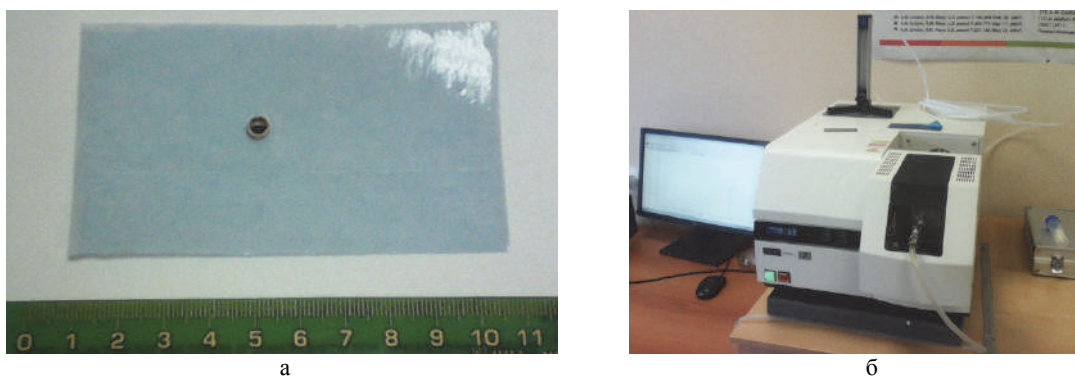


Рис. 2. Фотография исследуемого образца композитного материала: образец композитного материала в контейнере (а); термогравиметр HITACHI STA 7300 (б)

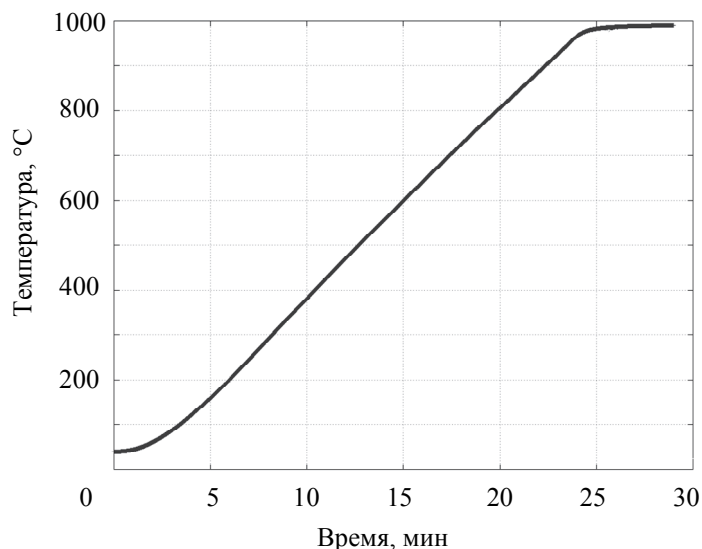


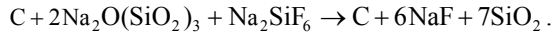
Рис. 3. График зависимости температуры нагрева от времени

Исследование строения и физических свойств композитного материала

На первом этапе приготавливался композитный материал при следующем соотношении компонентов: графит (42% по массе), жидкое стекло $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ (50% по массе) с силикатным модулем $n=3$, и отвердитель – натрий кремнефтористый Na_2SiF_6 (8% по массе). Процесс осуществлялся при комнатной температуре, смачивание частиц связующим компонентом протекало в течение 7 суток [10].

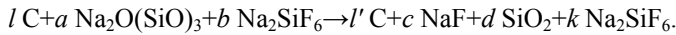
На втором этапе методом рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии было установлено, что полученные исследуемые образцы КМ многофазны. Исследования проводились на дифрак-

тометре ДРОН-3 в FeK α излучении, а также с помощью электронного микроскопа Hitachi SU 1510. Фаза графита принадлежит гексагональному графиту. Диоксид кремния SiO₂ находится в кристаллическом состоянии α -кварц, также присутствует аморфный диоксид кремния SiO₂. Кроме этого, виден фторид натрия NaF в виде кристаллов. Фаза натрия кремнефтористого Na₂SiF₆ в кристаллическом виде показывает, что химическая реакция образования геля кремниевой кислоты, который связывает фазу наполнителя, прошла не полностью [11]. Таким образом, правильную химическую реакцию образования композитного материала «жидкое стекло–микрочастицы графита» можно записать следующим образом:



При этом углерод не вступает в химическую реакцию ни с одним из компонентов.

В нашем случае реакция принимает следующий вид:



Молярные соотношения между веществами – участниками реакции показывают коэффициенты, которые определяются как стехиометрические. Здесь l, l', a, b, c, d, k – стехиометрические коэффициенты. В нашем случае это молярные доли. Молярные доли исходных веществ определяются по формуле

$$x_j^{in} = \frac{\frac{\omega_j^{in}}{\mu_j^{in}}}{\sum_{j=1}^3 \frac{\omega_j^{in}}{\mu_j^{in}}},$$

где ω_j^{in} – массовая доля j -го компонента исходных веществ; μ_j^{in} – молярная масса j -го компонента исходных веществ (табл. 1). Молярные доли продуктов реакции определяются по формуле

$$x_i^{out} = \frac{\frac{\omega_i^{out}}{\mu_i^{out}}}{\sum_{i=1}^4 \frac{\omega_i^{out}}{\mu_i^{out}}},$$

где ω_i^{out} – массовая доля i -го компонента продукта реакции; μ_i^{out} – молярная масса i -го компонента продукта реакции (табл. 2), которые определяются методом рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии КМ.

При этом $j = 1...3$, т.е. было три исходных вещества, а по результатам исследования полученного композитного материала $i = 1...4$.

Исходное вещество	Массовая доля, ω_j^{in} , %	Молярная масса, μ_j^{in} , г/моль	Молярная доля, x_j^{in}
C	42	12	0,89
Na ₂ O(SiO) _n	50	122,06	0,10
Na ₂ SiF ₆	8	188	0,01

Таблица 1. Результаты расчета молярных долей исходных веществ

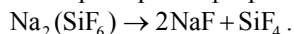
Фаза	Массовые доли компонентов в образцах, %			Среднее значение ω_i^{out} , %	Молярная масса μ_i^{out} , г/моль	Молярная доля, x_i^{out}
	№ 1	№ 2	№ 3			
C	42,1	42	44,2	42,6	12	0,76
NaF	22,8	21	21,7	22,1	41,98	0,11
SiO ₂	33	32,7	30,9	32,8	60,08	0,12
Na ₂ SiF ₆	2,1	4,3	1,7	2,5	188	0,01

Таблица 2. Значения массовых и молярных долей компонентов КМ

В результате исследования образцов КМ были получены термогравиметрические кривые (рис. 4–6) [12–14]. Как видно из графиков, для всех трех образцов на кривых 3, которые показывают скорость изменения массы по времени, наблюдаются пики. Общим для всех является пик в диапазоне температуры нагрева от 40 °С до 200 °С – точка a . Изменение массы образцов в данной области температур связано с испарением как внешней, так и внутренней влаги. Внешняя влага присутствует на поверхности

частиц КМ и обусловлена содержанием в воздухе водяного пара. При этом она химически не связана с материалом. Присутствие внутренней влаги обусловлено наличием гидроксильной группы в жидком стекле, которое представляет собой водный щелочной раствор силикатов натрия или калия. Изменение массы образцов контролируется термогравиметрическим методом на основании термогравиметрических кривых, которые показывают, каким образом изменялась при нагревании масса образцов. При этом наблюдается изменение теплового потока для всех образцов на кривых 2 для данного интервала температур, которое носит схожий характер, а именно – снижение интенсивности поглощения тепла – точка *b*.

Также общими для исследуемых образцов композитного материала «жидкое стекло–микрочастицы графита» являются пики в области температур от 473 °С до 570 °С – точки *c* и *c'*. Данные пики, которые связаны с увеличением скорости потери массы, можно объяснить следующим. Так как химическая реакция образования геля кремниевой кислоты прошла не полностью, то в композитном материале присутствует фаза натрия кремнефтористого Na_2SiF_6 . При нагревании это вещество разлагается:



При этом образуются фторид натрия NaF в виде кристаллов, а также тетрафторид кремния SiF_4 . Тетрафторид кремния в таких условиях представляет собой бесцветный газ, который улетучивается.

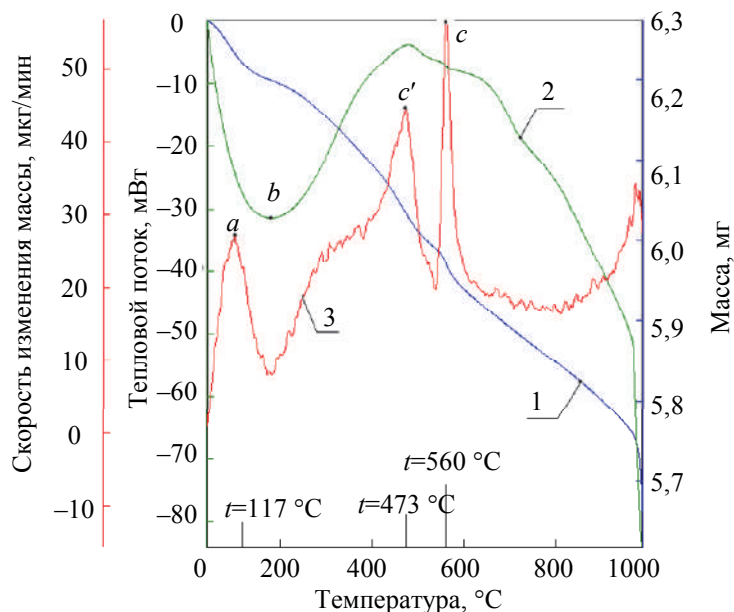


Рис. 4. Термогравиметрические кривые образца №1 массой 6,269 мг при нагреве от 40 °С до 1000 °С: 1 – изменение массы, мг; 2 – изменение теплового потока, мВт; 3 – скорость изменения массы, мкг/мин

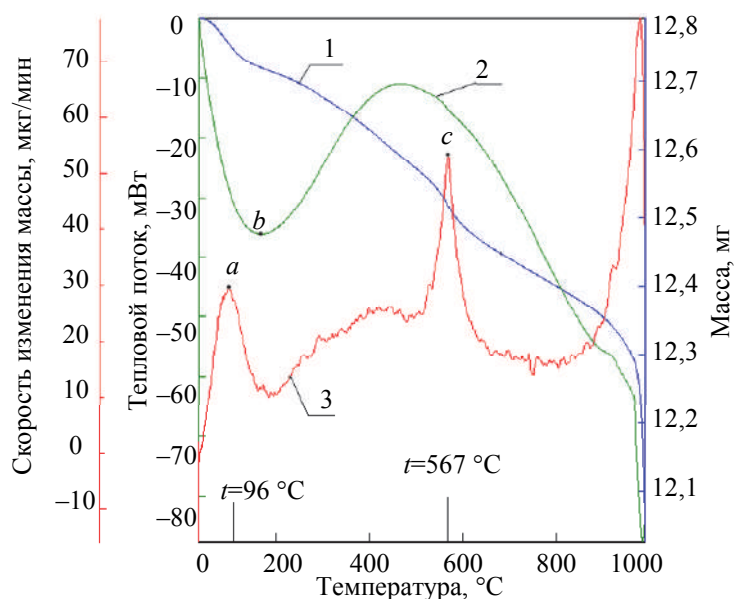


Рис. 5. Термогравиметрические кривые образца №2 массой 12,788 мг при нагреве от 40 °С до 1000 °С: 1 – изменение массы, мг; 2 – изменение теплового потока, мВт; 3 – скорость изменения массы, мкг/мин

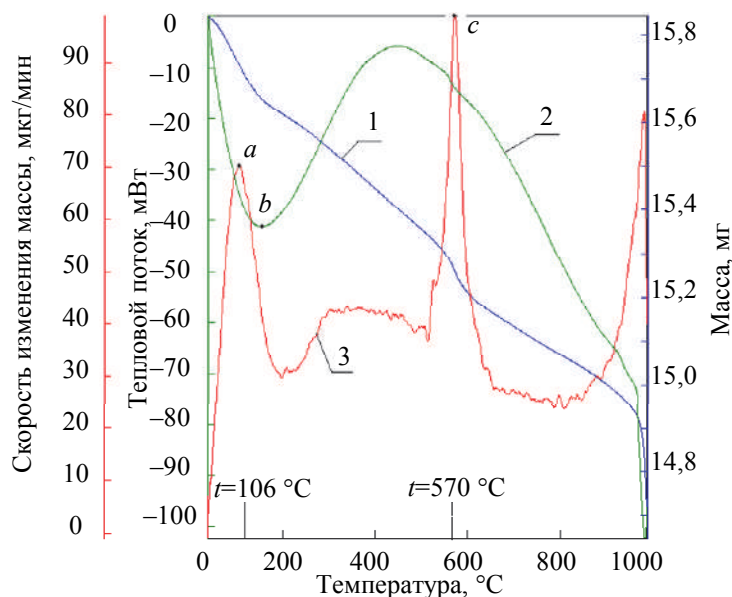


Рис. 6. Термогравиметрические кривые образца №3 массой 15,84 мг при нагреве от 40 °С до 1000 °С: 1 – изменение массы, мг; 2 – изменение теплового потока, мВт; 3 – скорость изменения массы, мкг/мин

Термогравиметрические кривые показывают, что при дальнейшем нагреве свыше 900 °С происходит ускоренная потеря массы КМ (рис. 7) – точка *d*.

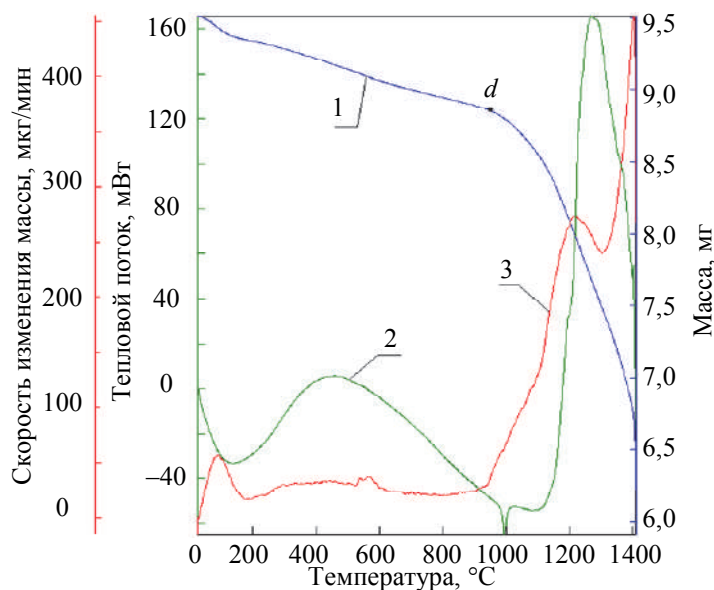


Рис. 7. Термогравиметрические кривые образца №4 массой 9,5 мг при нагреве от 40 °С до 1400 °С: 1 – изменение массы, мг; 2 – изменение теплового потока, мВт; 3 – скорость изменения массы, мкг/мин

Это можно объяснить следующим образом. Аморфные вещества, как правило, не имеют четкой температуры плавления. Смеси веществ совершают переход из одного состояния в другое в некотором диапазоне температур. Так, для натрия кремнефтористого Na_2SiF_6 температура плавления составляет 846 °С, для углерода С температура 3547 °С, для фторида натрия NaF она равна 993 °С, а для диоксида кремния SiO_2 равняется 1710 °С [15]. Следовательно, разрушение образцов исследуемого композитного материала «жидкое стекло–микрочастицы графита» происходит из-за достижения температуры плавления одного из компонентов, при этом данная температура не имеет определенного значения, так как КМ представляет собой смесь компонентов, благодаря чему саморазрушение происходит постепенно.

Заключение

Одно из основных преимуществ композиционных материалов, по сравнению с традиционными конструктивными элементами, состоит в том, что процесс их изготовления может быть совмещен с процессом изготовления изделия. Методы нанесения огнестойких покрытий – это метод обмазки и метод

торкретирования (распыление, набрызг, разбрызгивание, пульверизирование, пульверизация). Под способ нанесения подбирается исходная консистенция огнезащитного состава.

Термоаналитическим методом исследован композитный материал «жидкое стекло–микрочастицы графита» при следующем соотношении компонентов: графит (42% по массе), жидкое стекло $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ (50% по массе) с силикатным модулем $n=3$ и отвердитель – натрий кремнефтористый Na_2SiF_6 (8% по массе). Изменения массы образцов КМ при нагреве до 1000 °С показаны на термогравиметрических кривых. Показано, что на первом этапе нагрева при температуре от 40 °С до 200 °С происходит испарение как внешней, так и внутренней влаги образцов. При последующем нагреве в интервале температур от 473 °С до 570 °С происходит разложение натрия кремнефтористого Na_2SiF_6 с образованием фторида натрия NaF , а также тетрафторида кремния SiF_4 , который улетучивается. Методом рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии определена структура композитного материала, установлены фазы компонентов продуктов реакции образования микрокомпозиции. Термодинамическим методом получены стехиометрические коэффициенты химической реакции. При проведении эксперимента установлено, что экспериментальными образцами поглощается теплота. Изменения теплоты также отражены на термогравиметрических кривых. При нагреве образцов свыше 900 °С установлено, что они начинают постепенно разрушаться. Это связано с достижением температуры плавления компонентов смеси.

Высокая огнестойкость и термостойкость обуславливают возможность применения композитного материала в качестве футеровки оборудования в теплоэнергетической и металлургической промышленности. Композитный материал с полученными характеристиками может использоваться в качестве защитного покрытия для строительных конструкций с целью повышения огнестойкости и снижения пожарной опасности. Применение композитных материалов с подобными термодинамическими свойствами возможно также в технике, применяемой в чрезвычайных ситуациях.

Литература

References

- Han J.-H., Zhang H., Chu P.-F., Imani A., Zhang Z. Friction and wear of high electrical conductive carbon nanotube buckypaper/epoxy composites // *Composites Science and Technology*. 2015. V. 114. P. 1–10. doi: 10.1016/j.compscitech.2015.03.012
- He P., Yang Z., Yang J., Duan X., Jia D. et. al. Preparation of fully stabilized cubic-leucite composite through heat-treating Cs-substituted K-geopolymer composite at high temperatures // *Composites Science and Technology*. 2015. V. 107. P. 44–53. doi: 10.1016/j.compscitech.2014.11.009
- Jakubinek M.B., Ashrafi B., Zhang Y., Martinez-Rubi Y. et. al. Single-walled carbon nanotube–epoxy composites for structural and conductive aerospace adhesives // *Composites: Part B*. 2015. V. 69. P. 87–93. doi: 10.1016/j.compositesb.2014.09.022
- Moghadam A.D., Omrani E., Menezes P.L., Rohatgi P.K. Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene - a review // *Composites Part B*. 2015. V. 77. P. 402–420. doi: 10.1016/j.compositesb.2015.03.014
- Романенков И.Г., Левитес Ф.А. Огнезащита строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1991. 320 с.
- Карпов Я.С., Ивановская О.В. Композиционные материалы: компоненты, структура, переработка в изделия. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т, 2001. 153 с.
- Еремина Н.В. Огнезащитные композиции на основе жидкого стекла и механически активированных оксидов алюминия и магния: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2007. 156 с.
- Волкова В.К. Теплофизические свойства композиционных материалов с полимерной матрицей и твердых растворов. М.: Наука образования, 2011. 104 с.
- Gumula T., Rudawski A., Michalowski J., Blazewicz S. Fatigue behavior and oxidation resistance of carbon/ceramic composites reinforced with continuous carbon fibers // *Ceramics International*. 2015. V. 41. N 6. P. 7381–7386. doi: 10.1016/j.ceramint.2015.02.046
- Гостев В.А., Питухин Е.А., Устинов А.С., Яковлева Д.А. Исследование теплозащитных свойств композитного материала жидкое стекло–микрочастицы графита // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 3 (91). С. 82–88.
- Питухин Е.С., Устинов А.С. Исследование предела огнестойкости композитного материала жидкое стекло–микрочастицы графита // Научно-технический вестник
- Han J.-H., Zhang H., Chu P.-F., Imani A., Zhang Z. Friction and wear of high electrical conductive carbon nanotube buckypaper/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 2015, vol. 114, pp. 1–10. doi: 10.1016/j.compscitech.2015.03.012
- He P., Yang Z., Yang J., Duan X., Jia D. et. al. Preparation of fully stabilized cubic-leucite composite through heat-treating Cs-substituted K-geopolymer composite at high temperatures. *Composites Science and Technology*, 2015, vol. 107, pp. 44–53. doi: 10.1016/j.compscitech.2014.11.009
- Jakubinek M.B., Ashrafi B., Zhang Y., Martinez-Rubi Y. et. al. Single-walled carbon nanotube–epoxy composites for structural and conductive aerospace adhesives. *Composites: Part B*, 2015, vol. 69, pp. 87–93. doi: 10.1016/j.compositesb.2014.09.022
- Moghadam A.D., Omrani E., Menezes P.L., Rohatgi P.K. Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene - a review. *Composites Part B*, 2015, vol. 77, pp. 402–420. doi: 10.1016/j.compositesb.2015.03.014
- Romanenkov I.G., Levites F.A. *Ognezhachita stroitel'nykh konstruksii* [Fire protection of building constructions]. Moscow, Stroizdud Publ., 1991, 320 p. (In Russian)
- Karpov Ya.S., Ivanovskaya O.V. *Kompozitsionnye Materialy: Komponenty, Struktura, Pererabotka v Izdeliya* [Composite Materials: Components, Structure, Processing into Products]. Khar'kov, National Aircraft Univ. Publ., 2001, 153 p. (In Russian)
- Eremina N.V. *Ognezhachitnye Kompozitsii na Osnove Zhidkogo Stekla i Mekhanicheski Aktivirovannykh Oksidov Alyuminiya i Magniya. Dis. Kand. Tekhn. Nauk.* Tomsk, 2007, 156 p. (In Russian)
- Volkova V.K. *Teplofizicheskie Svoystva Kompozitsionnykh Materialov s Polimernoj Matritsei i Tverdyykh Rastvorov* [Thermophysical Properties of Composite Materials with Polymeric Matrix and Solid Solutions]. Moscow, Nauka Obrazovaniya Publ., 2011, 104 p.
- Gumula T., Rudawski A., Michalowski J., Blazewicz S. Fatigue behavior and oxidation resistance of carbon/ceramic composites reinforced with continuous carbon fibers. *Ceramics International*, 2015, vol. 41, no. 6, pp. 7381–7386. doi: 10.1016/j.ceramint.2015.02.046
- Gostev V.A., Pitukhin E.A., Ustinov A.S., Yakovleva D.A. Thermal insulation properties research of the composite material water glass-graphite microparticles. *Scientific and*

- информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 2. С. 277–283. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-277-283
12. Альмяшев В.И., Гусаров В.В. Термические методы анализа: Учеб. пособие. СПб.: СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 1999. 40 с.
 13. DIN 51007-1994. Thermal analysis; differential thermal analysis; principles. 11 p.
 14. ISO 11357-1:2016. Plastics - Differential scanning calorimetry (DSC) - Part 1: General principles. Geneva, International Organization for Standardization. 33 p.
 15. Химическая энциклопедия: В 5 т. / Гл. ред. И.Л. Кнунянц, Н.С. Зефилов. М.: Советская энциклопедия, 1998.
11. Pitukhin E.A., Ustinov A.S. Fire-resistance properties research of “water glass - graphite microparticles” composite material. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 3, pp. 82–88. (In Russian)
 12. Al'myashev V.I., Gusarov V.V. *Thermal Analysis Methods. Textbook*. St. Petersburg, SPbGETU (LETI) Publ., 1999, 40 p. (In Russian)
 13. DIN 51007-1994. Thermal analysis; differential thermal analysis; principles, 11 p.
 14. ISO 11357-1:2016. Plastics - Differential scanning calorimetry (DSC) - Part 1: General principles. Geneva, International Organization for Standardization, 33 p.
 15. *Chemical Encyclopedia* / Ed. I.L. Knunyants, N.S. Zefirov. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya Publ., 1998. (In Russian)

Авторы

Устинов Антон Сергеевич – старший преподаватель, Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, anton-ustinov@psu.karelia.ru

Питухин Евгений Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор, Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, Eugene@petsu.ru

Authors

Anton S. Ustinov – Senior Lecturer, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, 185030, Russian Federation, anton-ustinov@psu.karelia.ru

Eugene A. Pitukhin – D.Sc., Full Professor, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, 185030, Russian Federation, Eugene@petsu.ru