Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 13

ТВЕРЬ 2021

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Издательство Тверского государственного университета, 2021. – Вып. 13. – 956 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2021

© Тверской государственной
университет, 2021

УДК 54.057, 62-405.8

Оригинальная статья

СОЗДАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ПОРИСТЫХ ГОРЕЛОК

А.А. Пономарева^{1,2}, В.Е. Ситникова¹, К.А. Цой²

¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»

197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

²ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»

690922, Россия, Приморский край, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10

ap_k@inbox.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.760

Аннотация: Экологические параметры энергетического оборудования важны с точки зрения минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Интерметаллидные инфракрасные пористые беспламенные горелки являются новым поколением горелочных устройств с улучшенными характеристиками. Газовые горелки относятся к наиболее эффективным устройствам прямого преобразования теплоты горения в энергию инфракрасного излучения. Несмотря на улучшенные по сравнению с традиционными горелками экологические характеристики инфракрасных пористых горелок, при работе они могут выделять нежелательные и опасные продукты горения газовых смесей (или других топлив), особенно при переходных и высокомоощных режимах. В этой работе были получены каталитические покрытия оксидных систем на основе церия с небольшим добавлением оксидов кремния. Осаждение каталитического материала на пористые интерметаллидные подложки фиксировалось с применением весового метода, оптической системы анализа и сканирующей электронной микроскопии, а изучение химической структуры – с помощью ИК-спектроскопии. Выявлено равномерное распределение покрытия по поверхности подложки и соответствие ИК-пииков химическому составу синтезированных систем.

Ключевые слова: каталитические покрытия, металлооксидные структуры, пористые горелки, золь-гель технология, инфракрасная спектроскопия.

1. Введение

При внедрении перспективного теплотехнического оборудования для нужд малой распределенной энергетики создаются новые газовые горелочные устройства с пористыми излучающими насадками [1-4]. Для увеличения мощности и сохранения экологических характеристик в норме необходимо применять катализаторы [5].

Металлооксидные каталитические системы на основе оксидов церия давно привлекли к себе внимание ученых для использования их в качестве катализаторов процессов окисления промежуточных продуктов при горении органического топлива. Такие катализаторы используют в качестве катализаторов процессов окисления монооксида углерода [6, 7]. Результаты теоретических расчетов показывают [8], что Ce^{3+} в системе CeO_x/Me (например, $Cu(111)$) способствует адсорбции O_2 , диссоциации молекулы и высвобождению атома O для реакции с CO эффективным образом [6, 8]. Каталитическая система $Ni-CeO_2$ способствует разрыву $C-H$

связей при «сухом риформинге» метана [9, 10]. Ранние наши работы [11] показали, что получение растворными методами и нанесение катализатора на основе диоксида церия на пористый насадок повышает экологическую эффективность, сужая область режимов работы горелочного устройства, при которых наблюдается образование монооксида углерода превышающих значения в 300 ppm, а также дает возможность увеличить мощность горелки примерно на 20 % при сохранении экологических характеристик в норме.

Интерес к каталитическим материалам на основе перовскитов возник сравнительно недавно, и связан он с развитием растворных методов создания материалов, позволяющих формировать материалы на молекулярном уровне и значительно экономить ресурсы. Перовскиты обладают высокой термостойкостью, отличной окислительной активностью и невысокой ценой, поэтому всё больше работ ведется по исследованию различных перовскитных систем в качестве каталитических материалов [12]. Предприняты успешные попытки использования перовскитов в таких реакциях, как горение с химическим циклом (CLC – chemical looping combustion) [12, 13] и фотокаталитическое расщепление воды [12, 14].

В нашей работе исследуется возможность создания многокомпонентной системы каталитического материала, содержащего перовскитную фазу оксида церия, стабилизированного оксидом самария, с добавлением малого количества диоксида кремния. Диоксид кремния добавлялся с целью увеличить коксостойкость и стабильность окислительных функций катализатора [15].

2. Экспериментальная часть

Синтез материалов для пористых подложек проводился схожим методом, которые описаны в работах [16, 17], с использованием стандартных порошков никеля – ПНК УТ-1, ПНК УТ-4 и ПНК Л-7 (Норильский никель, Россия) и алюминия – АСП-4, АСП-10 (РусАл, Россия). Вид и геометрические размеры полученных подложек представлены на рис. 1.

Рис. 1. Вид и размеры пористой подложки, которые использовались для нанесения каталитических покрытий.

Перед нанесением каталитических покрытий подложки проходили

процедуру очищения путем обработки в растворителях в ультразвуковой ванне ТТЦ 1,3 л (Сапфир, Россия), и после этого оценивалась морфология поверхности материала. Для анализа морфологии поверхности и рельефа полученных подложек применялась оптическая система анализа изображений микрообъектов. Оптическая система анализа изображений микрообъектов (ЛОМО, Россия) включает в себя: микроскоп поляризационный «ПОЛАМ-312», оптический ТВ-адаптер, цифровую цветную камеру (с разрешением 782×782), персональный компьютер, программное обеспечение фирмы «Видео-Тест».

Для создания многокомпонентных покрытий использовали двухступенчатый синтез. На первой ступени создавались два раствора: 1) в 5 мл метанола CH_3OH растворяли нитраты самария $Sm(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ($M = 444,47$ г/моль) и церия $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ($M = 434,24$ г/моль) в мольном соотношении 1:9 ; 2) в 5 мл дистиллированной воды добавляли тетраэтоксисилан $C_8H_{20}O_4Si$ (208,33 г/моль), как прекурсор оксида кремния, разных объемов в соответствии мольным процентам 0,5; 2; 3,5 и 5 из расчета на весь объем раствора получаемого на втором этапе. Оба раствора выдерживались 24 часа при комнатной температуре. Вторым этапом растворы сливались вместе и перемешивались с помощью магнитной мешалки Ulab US-1500A (Ulab, КНДР) со скоростью 100 об/мин. Затем получившийся раствор выдерживали 24 часа при комнатной температуре. После этого материал наносили на пористые подложки методом пропитки. Пропитанные раствором подложки подвергали термической обработке по трёхступенчатой методике в муфельной печи (Сикрон, Россия): 1) 40-минутный нагрев до $300^\circ C$ и выдержка в течение 1 часа (удаление растворителей), 2) 40-минутный нагрев до $600^\circ C$ и выдержка в течение 1 часа (формирование оксидной структуры перовскита), 3) 40-минутный нагрев до $850^\circ C$ и выдержка в течение 1 часа (стабилизация структуры при рабочей температуре инфракрасных пористых горелок [18, 19]).

Результат формирования пленки оценивался органолептическим методом с использованием оптического микроскопа и с использованием микрофотографий, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-7000 (JEOL, Япония). Химические особенности материалов исследовались с помощью инфракрасной (ИК) спектроскопии порошков, полученных методом выпаривания из растворов по той же методике термической обработки, что и пленочные покрытия. ИК-спектры регистрировали на спектрометре Tensor 37 (Bruker, Германия) с помощью приставки MIRacle фирмы Pike, позволяющей снимать спектры методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), в области $600 - 4000\text{ см}^{-1}$ с разрешением 2 см^{-1} и усреднением по 32 сканам.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены микрофотографии, полученные с помощью оптического микроскопа до нанесения каталитических покрытий и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) после нанесения. Как видно из фотографий, материал подложки имеет гранулярную пористую структуру с размерами зерен ~ 10 мкм. Формирование пленки на поверхности пористой подложки можно было оценить визуально по изменению цвета материала, образованию светлого налёта. На СЭМ-изображениях заметно, что покрытие равномерно распределено по материалу подложки и имеет также пористую структуру с размерами пор до ~ 1 мкм (см. рис. 2 в).

Рис. 2. Изображения поверхности пористых подложек, полученных оптической спектроскопией (а) до нанесения каталитического покрытия и сканирующей электронной микроскопией (б, в) после нанесения слоя составом $95\%Ce_{0,9}Sm_{0,1}O_{2-\delta} - 5\%SiO_2$.

Стабильность полученного покрытия тестировалась путем обжига при 850°C в несколько подходов по 3 часа воздействия. Температура выбрана исходя из информации, что каркас пористого материала горелок во время функционирования разогревается в среднем до 800°C . Контроль образцов с помощью весового метода и оптического анализа морфологии подложек во время исследования показал, что покрытия не деградируют при длительном разогреве интерметаллидной матрицы подложек.

Для оценки химических структурных особенностей полученных материалов использовалась ИК-спектроскопия. На рис. 3 представлены ИК-спектры полученных порошков соответствующих покрытиям составов. Широкий пик в диапазоне $600\text{--}800\text{ см}^{-1}$ и полосы поглощения с максимумами 711 см^{-1} и 690 см^{-1} можно отнести к колебаниям связи $\text{Ce}\text{--}\text{O}$ [20, 21], а плечо с максимумом 650 см^{-1} , которое меняет свою интенсивность в зависимости от содержания оксида кремния, по-видимому, обусловлено $\text{Si}\text{--}\text{O}$ колебаниями двойных и четырехчленных колец [22, 23] или $\text{O}\text{--}\text{Si}\text{--}\text{O}$ изгибающими колебаниями [24]. Двойные пики с максимумами 1520 см^{-1} и 1325 см^{-1} могут быть объяснены валентными колебаниями $\text{Sm}\text{--}\text{O}$ и деформационными $\text{Sm}\text{--}\text{O}\text{--}\text{Sm}$ колебаниями [25]. Пик около 1055 см^{-1} может быть приписан асимметричному колебанию полосы $\text{Sm}\text{--}\text{O}\text{--}\text{Sm}$ [25] или $\text{Ce}\text{--}\text{O}\text{--}\text{Sm}$ растягивающим колебаниям [26]. Пик при 842 см^{-1} также приписываются к колебаниям $\text{Sm}\text{--}\text{O}\text{--}\text{Sm}$ [25]. Появление пика при 3924 см^{-1} , по-видимому, связано с колебаниями, которые возникают из-за того, что во время обработки не удалился органический растворитель [27], например, из-за наличия закрытых пор.

Рис. 3. Инфракрасная спектроскопия материалов для каталитических покрытий, полученных золь-гель методом.

Широкая полоса поглощения в диапазоне $2800\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ с максимумом 3400 см^{-1} соответствует валентному колебанию $\text{O}\text{--}\text{H}$ остаточной или, благодаря высокой пористости материалов, адсорбированной воды, а также связанных гидроксильных групп, в то время как полоса поглощения при 1630 см^{-1} обусловлена изгибным режимом колебаний связанной воды [20, 21, 27].

4. Заключение

Использование интерметаллидных инфракрасных пористых горелок является одним из инновационных подходов в энергетическом секторе.

Для улучшения экологичности и стабильности работы таких горелок требуется применение катализаторов. Формирование каталитических структур осложняется сложной геометрией интерметаллидного материала. Растворные методы синтеза являются универсальными технологиями [28], позволяющими получать порошки и тонкие плёнки, а также покрывать пористые каркасы с образованием композиционных материалов с малыми размерами конденсированных фаз.

В работе показана возможность создания стойких каталитических покрытий сложного состава на интерметаллидных пористых структурах золь-гель методом. Изучены химические структурные особенности полученных материалов в зависимости от мольного процентного содержания оксида кремния. Обнаружены полосы поглощения химическими связями, характерными для формируемого материала. Видна корреляция полученных спектров с точки зрения введения в материал кремнеоксидной фазы.

Библиографический список:

1. Пат. 2640305, Российская Федерация МПК F23D 14/16. Радиационная газовая горелка / Минаев С.С., Гушин А.Н., Цой К.А. и др.: заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Синтез-СВ» – № 2017107577; заявл. 07.03.2017; опубл. 27.12.2017, Бюл. № 36. – 11 с.
2. **Yakovlev, I.** Pore-scale study of complex flame stabilization phenomena in thin-layered radial porous burner / I. Yakovlev, A. Maznoy, S. Zambalov // *Combustion and Flame*. – 2021. – V. 231. – Art. № 111468. – 18 p. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111468.
3. **Maznoy, A.** Fuel interchangeability for lean premixed combustion in cylindrical radiant burner operated in the internal combustion mode / A. Maznoy, N. Pichugin, I. Yakovlev et al. // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – V. 186. – Art. № 115997. – 14 p. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115997.
4. **Maznoy, A.** Development of a new infrared heater based on an annular cylindrical radiant burner for direct heating applications / A. Maznoy, A. Kirdyashkin, N. Pichugin et al. // *Energy*. – 2020. – V. 204. – Art. № 117965. – 11 p. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117965.
5. **Gangopadhyay, Sh.** Structure and properties of cerium oxides in bulk and nanoparticulate forms/ Sh. Gangopadhyay, D.D. Frolov, A.E. Masunov et al. // *Journal of Alloys and Compounds* – 2013. – V. 584. – P. 199-208. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.09.013.
6. **Rodriguez, J.A.** Ceria-based model catalysts: fundamental studies on the importance of the metal–ceria interface in CO oxidation, the water–gas shift, CO₂ hydrogenation, and methane and alcohol reforming / J.A. Rodriguez, D.C. Grinter, Z. Liu, et al. // *Chemical Society Reviews*. – 2017. – V. 46. – I. 7. – P. 1824-1841. DOI: 10.1039/C6CS00863A.
7. **Jung, C.R.** Selective oxidation of CO over CuO–CeO₂ catalyst: effect of calcination temperature / C.R. Jung, J. Han, S.W. Nam et al. // *Catalysis Today*. – 2004. – V. 93-95. – P. 183-190. DOI: 10.1016/j.cattod.2004.06.039.
8. **Burange, A.S.** Oxidation of benzylic alcohols to carbonyls using tert-butyl hydroperoxide over pure phase nanocrystalline CeCrO₃ / A.S. Burange, R.V. Jayaram, R. Shukla, A.K. Tyagi // *Catalysis Communications*. – 2013. – V. 40. – P. 27-31. DOI: 10.1016/j.catcom.2013.05.019.
9. **Liu, Z.** Dry reforming of methane on a highly-active Ni–CeO₂ catalyst: Effects of metal-support interactions on C–H bond breaking / Z. Liu, D.C. Grinter, P.G. Lustemberg et al. // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2016. – V. 55. – I. 26. – P. 7455-7459. DOI: 10.1002/anie.201602489.
10. **Marinho, A.L.A.** Development of catalytic process for biogas upgrading study of structure and oxygen mobility on Ni and Pt nanoparticles encapsulated catalysts: Doctor's thesis in Catalysis: defended 30.10.2020 / Marinho Andre Luiz Alvarenga. – Universidade federal do Rio de Janeiro, 2020. – 222 p.
11. **Тригуба, А.М.** Влияние наноструктурного катализатора на основе диоксида церия на экологические

- характеристики пористых грелок / А.М. Тригуба, К.А. Цой, А.А. Пономарева // Наука настоящего и будущего. – 2018. – Т. 1. – С. 646-648.
12. **Labhasetwar, N.** Perovskite-type catalytic materials for environmental applications / N. Labhasetwar, G. Saravanan, S.K. Megarajan et al. // Science and Technology of Advanced Materials. – 2015. – V. 16. – Art. № 036002. – 13 p. DOI: 10.1088/1468-6996/16/3/036002.
13. **Zhao, K.** *CaO/MgO* modified perovskite type oxides for chemical-looping steam reforming of methane / K. Zhao, F. He, Z. Huang et al. // Journal of fuel chemistry and technology. – 2016. – V. 44. – I. 6. – P. 680-688. DOI: 10.1016/S1872-5813(16)30032-9.
14. **Khan, R.** Role of perovskites as a bi-functional catalyst for electrochemical water splitting: A review / R. Khan, M.T. Mehran, S.R. Naqvi et al. // International journal of energy research. – 2020. – V. 44. – I. 12. – P. 9714-9747. DOI: 10.1002/er.5635.
15. **Zhang, J.** Coke-resistant *Ni@SiO₂* catalyst for dry reforming of methane / J. Zhang, F. Li // Applied Catalysis B: Environmental. – 2015. – V. 176-177. – P. 513-521. DOI: 10.1016/j.apcatb.2015.04.039.
16. **Sochugov, N.S.** Advanced fuel cell development in Russia / N.S. Sochugov, T.I. Sigfusson, A.A. Solovyev et al. // Energy Procedia. – 2012. – V. 29. – P. 594-605. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.09.069.
17. **Solovyev, A.A.** Solid oxide fuel cell with *Ni–Al* support / A.A. Solovyev, S.V. Rabotkin, A.V. Shipilova et al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2015. – V. 40. – I. 40. – P. 14077-14084. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.07.151.
18. **Maznoy, A.** A study on the effects of porous structure on the environmental and radiative characteristics of cylindrical *Ni–Al* burners / A. Maznoy, A. Kirdyashkin, S. Minaev et al. // Energy. – 2018. – V. 160. – P. 399-409. DOI: 10.1016/j.energy.2018.07.017.
19. **Fursenko, R.** Temperature and radiative characteristics of cylindrical porous *Ni–Al* burners / R. Fursenko, A. Maznoy, E. Odintsov et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – V. 98. – P. 277-284. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.048.
20. **Kumar, E.** Preparation and studies of cerium dioxide (*CeO₂*) nanoparticles by microwave-assisted solution method / E. Kumar, P. Selvarajan, K. Balasubramanian // Recent Research in Science and Technology. – 2010. – V. 2. – I. 40. – P. 37-41.
21. **Kundu, S.** Fabrication of catalytically active nanocrystalline samarium (*Sm*)-doped cerium oxide (*CeO₂*) thin films using electron beam evaporation / S. Kundu, N. Sutradhar, R. Thangamuthu et al. // Journal of Nanoparticle Research. – 2012. – V. 14. – I. 8. – Art. № 1040. – 16 p. DOI: 10.1007/s11051-012-1040-0.
22. **Pop, O.L.** FT-IR studies of cerium oxide nanoparticles and natural zeolite materials / O.L. Pop, Z. Diaconeasa, A. Mesaroş et al. // Bulletin UASVM Food Science and Technology. – 2015. – V. 72. – I. 1. – P. 50-55. DOI: 10.15835/buasvmcn-fst:11030.
23. Silicon compounds: silanes & silicones / ed. by B. Arkles, P.J. Launer. – 3rd ed. – Morrisville: Gelest Inc., 2013. – 608 p.
24. **Zaid, M.H.M.** Synthesis and characterization of samarium doped calcium soda–lime–silicate glass derived wollastonite glass–ceramics/ M.H.M. Zaid, H.A.A. Sidek, R. El-Mallawany et al. // Journal of materials research and technology. – 2020. – V. 9. – I. 6. – P. 13153–13160. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.09.058.
25. **Zheng, X.** *Ag* -decorated core-shell *Sm₂O₃@TiO₂* nanocomposites with enhanced visible-light photocatalytic performance / X. Zheng, X. Li, H. Peng, J. Wen // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2018. – V. 123. – P. 206-215. DOI: 10.1016/j.jpcs.2018.07.022.
26. **Njoku, C.B.** Physical chemical properties of *Ce_{0.8}Sm_{0.2}Ir_yCo_{1-y}O_{3-δ}* ($y=0,03-0,04$) and preliminary testing as cathode material for low-temperature SOFC / C.B. Njoku, B. Omondi, P.G. Ndungu // South African Journal of Chemistry. – 2017. – V. 70. – P. 171-180. DOI: 10.17159/0379-4350/2017/v70a24.
27. **Mahdi, B.A.** Biosorption of lead from industrial wastewater using some part of date palm trees / B.A. Mahdi, A.A. Maki, Z.A. Abdulnabi, A. Altaee // Pollution Research. – 2019. – V. 38. – I. 4. – P. 853-861.
28. **Максимов, А.И.** Основы золь-гель-технологии нанокмпозитов / А.И. Максимов, В.А. Мошников, Ю.М. Таиров и др. – СПб: Изд-во «Элмор», 2008. – 255 с.

References:

1. Minaev S.S., Gushchin A.N., Tcoj K.A. et al. *Radiacionnaya gazovaya gorelka* [Radiation gas burner], Patent RF 2640305, 2017. (In Russian).
2. Yakovlev I., Maznoy A., Zambalov S. Pore-scale study of complex flame stabilization phenomena in thin-layered radial porous burner, *Combustion and Flame*, 2021, vol. 231, art. no. 111468, 18 p. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111468.
3. Maznoy A., Pichugin N., Yakovlev I. et al. Fuel interchangeability for lean premixed combustion in

- cylindrical radiant burner operated in the internal combustion mode, *Applied Thermal Engineering*, 2020, vol. 186, art. no. 115997, 14 p. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115997.
4. Maznoy A., Kirdyashkin A., Pichugin N. et al. Development of a new infrared heater based on an annular cylindrical radiant burner for direct heating applications, *Energy*, 2020, vol. 204, art. no. 117965, 11 p. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117965.
5. Gangopadhyay Sh., Frolov D.D., Masunov A.E. et al. Structure and properties of cerium oxides in bulk and nanoparticulate forms, *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 584, pp. 199-208. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.09.013.
6. Rodriguez J.A., Grinter D.C., Liu Z. et al. Ceria-based model catalysts: fundamental studies on the importance of the metal–ceria interface in *CO* oxidation, the water–gas shift, *CO*₂ hydrogenation, and methane and alcohol reforming, *Chemical Society Reviews*, 2017, vol. 46, issue 7, pp. 1824-1841. DOI: 10.1039/C6CS00863A.
7. Jung C.R., Han J., Nam S.W. et al. Selective oxidation of *CO* over *CuO–CeO*₂ catalyst: effect of calcination temperature, *Catalysis Today*, 2004, vol. 93-95, pp. 183-190. DOI: 10.1016/j.cattod.2004.06.039.
8. Burange A.S., Jayaram R.V., Shukla R., Tyagi A.K. Oxidation of benzylic alcohols to carbonyls using tert-butyl hydroperoxide over pure phase nanocrystalline *CeCrO*₃, *Catalysis Communications*, 2013, vol. 40, pp. 27-31. DOI: 10.1016/j.catcom.2013.05.019.
9. Liu Z., Grinter D.C., Lustemberg P.G. et al. Dry reforming of methane on a highly-active *Ni–CeO*₂ catalyst: Effects of metal-support interactions on *C–H* bond breaking, *Angewandte Chemie International Edition*, 2016, vol. 55, issue 26, pp. 7455-7459. DOI: 10.1002/anie.201602489.
10. Marinho A.L.A. *Development of catalytic process for biogas upgrading study of structure and oxygen mobility on Ni and Pt nanoparticles encapsulated catalysts*. Doctor's thesis in Catalysis. Universidade federal do Rio de Janeiro, 2020. 222 p.
11. Triguba A.M., Tcoj K.A., Ponomareva A.A. Vliyanie nanostrukturnogo katalizatora na osnove dioksida ceriya na ekologicheskie harakteristiki poristyh grelok [Influence of a nanostructured catalyst based on cerium dioxide on the ecological characteristics of porous heating pads], *Nauka nastoyashchego i budushchego [Science of the present and the future]*, 2018, vol. 1, pp. 646-648. (In Russian).
12. Labhasetwar N., Saravanan G., Megarajan S.K., et al. Perovskite-type catalytic materials for environmental applications, *Science and Technology of Advanced Materials*, 2015, vol. 16, art. no. 036002, 13 p. DOI: 10.1088/1468-6996/16/3/036002.
13. Zhao K., He F., Huang Z. et al. *CaO/MgO* modified perovskite type oxides for chemical-looping steam reforming of methane, *Journal of fuel chemistry and technology*, 2016, vol. 44, issue 6, pp. 680-688. DOI: 10.1016/S1872-5813(16)30032-9.
14. Khan R., Mehran M.T., Naqvi S.R. et al. Role of perovskites as a bi-functional catalyst for electrochemical water splitting: A review, *International journal of energy research*, 2020, vol. 44, issue 12, pp. 9714-9747. DOI: 10.1002/er.5635.
15. Zhang J., Li F. Coke-resistant *Ni@SiO*₂ catalyst for dry reforming of methane, *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, vol. 176-177, pp. 513-521. DOI: 10.1016/j.apcatb.2015.04.039.
16. Sochugov N.S., Sigfusson T.I., Solovyev A.A. et al. Advanced fuel cell development in Russia, *Energy Procedia*, 2012, vol. 29, pp. 594-605. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.09.069.
17. Solovyev A.A., Rabotkin S.V., Shipilova A.V. et al. Solid oxide fuel cell with *Ni–Al* support, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, vol. 40, issue 40, pp. 14077-14084. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.07.151.
18. Maznoy A., Kirdyashkin A., Minaev S., et al. A study on the effects of porous structure on the environmental and radiative characteristics of cylindrical *Ni–Al* burners, *Energy*, 2018, vol. 160, pp. 399-409. DOI: 10.1016/j.energy.2018.07.017.
19. Fursenko R., Maznoy A., Odintsov E., et al. Temperature and radiative characteristics of cylindrical porous *Ni–Al* burners, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 98, pp. 277-284. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.048.
20. Kumar E., Selvarajan P., Balasubramanian K. Preparation and studies of cerium dioxide (*CeO*₂) nanoparticles by microwave-assisted solution method, *Recent Research in Science and Technology*, 2010, vol. 2, issue 4, pp. 37-41.
21. Kundu S., Sutradhar N., Thangamuthu R. et al. Fabrication of catalytically active nanocrystalline samarium (*Sm*)-doped cerium oxide (*CeO*₂) thin films using electron beam evaporation, *Journal of Nanoparticle Research*, 2012, vol. 14, issue 8, art. no. 1040, 16 p. DOI: 10.1007/s11051-012-1040-0.
22. Pop O.L., Diaconeasa Z., Mesaroş A. et al. FT-IR studies of cerium oxide nanoparticles and natural zeolite

- material, *Bulletin UASVM Food Science and Technology*, 2015, vol. 72, issue 1, pp. 50-55. DOI: 10.15835/buasvmcn-fst:11030.
23. *Silicon compounds: silanes & silicones*, ed. by B. Arkles, P.J. Launer, 3rd ed. Morrisville, Gelest Inc., 2013, 608 p.
24. Zaid M.H.M., Sidek H.A.A., El-Mallawany R. et al. Synthesis and characterization of samarium doped calcium soda–lime–silicate glass derived wollastonite glass–ceramics, *Journal of materials research and technology*, 2020, vol. 9, issue 6, pp. 13153-13160. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.09.058.
25. Zheng X., Li X., Peng H., Wen J. Ag -decorated core-shell $Sm_2O_3@TiO_2$ nanocomposites with enhanced visible-light photocatalytic performance, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2018, vol. 123, pp. 206–215. DOI: 10.1016/j.jpcs.2018.07.022.
26. Njoku C.B., Omondi B., Ndungu P.G. Physical chemical properties of $Ce_{0.8}Sm_{0.2}Ir_yCo_{1-y}O_{3-\delta}$ ($y = 0,03-0,04$) and preliminary testing as cathode material for low-temperature SOFC, *South African Journal of Chemistry*, 2017, vol. 70, pp.171-180. DOI: 10.17159/0379-4350/2017/v70a24.
27. Mahdi B.A., Maki A. A., Abdulnabi Z.A., Altaee A. Biosorption of lead from industrial wastewater using some part of date palm trees, *Pollution Research*, 2019, vol. 38, issue 4, pp. 853-861.
28. Maksimov A.I., Moshnikov V.A., Tairov Yu.M. et al. *Osnovy sol'-gel'-tekhnologii nanokompozitov* [Fundamentals of sol-gel nanocomposite technology], Saint Petersburg, Elmor Publ., 2008, 255 p. (In Russian).

Original paper

FORMATION OF SOL-GEL CATALYTIC COATINGS TO IMPROVE THE ECOLOGICAL PARAMETERS OF INTERMETALLIC POROUS BURNERS

A.A. Ponomareva^{1,2}, V.E. Sitnikova¹, K.A. Tcoi²

¹*ITMO University, St. Petersburg, Russia*

²*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.760

Abstract: The environmental parameters of power equipment are important in terms of minimizing the negative impact on the environment. Intermetallic infrared porous flameless burners are a new generation of burners with improved performance. Gas burners are among the most efficient devices for direct conversion of combustion heat into infrared energy. Despite the improved environmental characteristics of infrared porous burners compared to traditional burners, during operation they can emit unwanted and hazardous combustion products of gas mixtures (or other fuels), especially during transient and high-power modes. In this work, catalytic coatings based on cerium-based oxide systems with a small addition of silicon oxides were obtained. The deposition of the catalytic material on porous intermetallic substrates was controlled using the gravimetric method, optical analysis system, and scanning electron microscopy, and its chemical structure was investigated using IR spectroscopy. The uniform distribution of the coating over the substrate surface and the correspondence of the IR peaks with the chemical composition of the synthesized systems were detected.

Keywords: catalytic coatings, metal oxide structures, porous burners, sol-gel technology, infrared spectroscopy.

Пономарева Алина Александровна – к.т.н., доцент в Центре химической инженерии ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», старший научный сотрудник в Международной лаборатории горения и энергетики ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»

Ситникова Вера Евгеньевна – к.х.н., доцент в Центре химической инженерии ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Цой Константин Алексеевич – старший преподаватель в департаменте энергетических систем Политехнического института ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»

Alina A. Ponomareva – Ph. D., Docent, Center for Chemical Engineering, ITMO University, Senior Researcher, International Combustion and Energy Laboratory, Far Eastern Federal University

Vera E. Sitnikova – Ph. D., Docent, Center for Chemical Engineering, ITMO University

Konstantin A. Tcoi – Senior Lecturer, Department of Energy Systems of the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University

Поступила в редакцию/received: 28.08.2021; после рецензирования/revised: 19.09.2021; принята/accepted 21.09.2021.