

УДК 544.478-03

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ КАТАЛИЗАТОРОВ Ag–CeO₂ И ИХ АКТИВНОСТЬ В ОКИСЛЕНИИ САЖИ

© 2019 г. М. В. Садлиевская^а, Н. Н. Михеева^а, В. И. Зайковский^{б, в}, Г. В. Мамонтов^{а, *}

^аФГАОУ ВО Томский государственный университет, просп. Ленина, 36, Томск, 634050 Россия

^бФГБУН “Федеральный исследовательский центр “Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН”, просп. акад. Лаврентьева, 5, Новосибирск, 630090 Россия

^вФГАОУ ВО Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: GrigoriyMamontov@mail.ru

Поступила в редакцию 29.11.2018 г.

После доработки 09.03.2019 г.

Принята к публикации 14.03.2019 г.

В выхлопных газах автомобильного транспорта содержатся недогоревшие частицы сажи, которые загрязняют окружающую среду и оказывают пагубное влияние на здоровье человека. Решение этой проблемы требует разработки новых высокоэффективных каталитических систем, желательны не содержащих дорогостоящих Pt и Pd, для окисления сажи в выхлопных газах. В настоящей работе катализаторы на основе композиции Ag–CeO₂ были синтезированы двумя способами (соосаждением и пропиткой по влагеомкости) и исследованы комплексом физико-химических методов (низкотемпературная адсорбция азота, рентгенофазовый анализ (РФА), просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) и ПЭМ высокого разрешения, температурно-программированное окисление (ТПО)). Каталитические свойства полученных систем изучены в реакции окисления сажи. Показано, что катализатор Ag–CeO₂, приготовленный методом соосаждения, наиболее активен в окислении сажи. Повышенная активность катализатора связана с формированием в нем сложной структуры, представляющей агломерат сильно взаимодействующих частиц серебра и оксида церия, что, как показано методом ТПО, оказывает значительное влияние на низкотемпературную активацию кислорода на поверхности катализатора.

Ключевые слова: катализаторы Ag–CeO₂, окисление сажи, активация кислорода.

DOI: 10.1134/S0453881119040178

ВВЕДЕНИЕ

Транспорт – один из основных источников загрязнения окружающей среды. В выхлопных газах автотранспорта содержатся летучие органические соединения (ЛОС), оксиды азота (NO_x), твердые частицы сажи (soot) и несгоревшие углеродные соединения [1–3]. Частицы сажи не только приносят вред окружающей среде, но также провоцируют частые головные боли и слабость, нарушение сна, являются раздражителями легких и дыхательных путей, оказывают негативное влияние на работу сердечно-сосудистой системы человека [4]. По оценкам ЕС в 2015 г. загрязнение воздуха вызвало 100 млн больничных и 350 тыс. преждевременных смертей в Европе [5]. В связи с ростом количества автомобилей с дизельными двигателями, представляющих собой основные источники выбросов сажи, следует ожидать усугубление этой проблемы.

Образующаяся из выхлопных газов дизельного топлива сажа может выгорать при температурах выше 600°C, в то время как значения типичных

температур выхлопа дизельных двигателей находятся в пределах от 200 до 500°C [6, 7]. Поэтому необходимы катализаторы для увеличения скорости окисления сажи при относительно низких температурах. Среди катализаторов окисления наиболее перспективны катализаторы на основе CeO₂, поскольку они обладают превосходными окислительно-восстановительными свойствами [8]. Как активность, так и стабильность оксида церия могут быть дополнительно увеличены при добавлении редкоземельных, переходных, щелочных и щелочноземельных или благородных металлов. Кроме того, оксид церия способен защищать нанесенные частицы металла от спекания при высоких температурах [9], стабилизировать благородные металлы в одноатомном состоянии [10, 11]. Перенос (*spillover*) активного кислорода от оксида церия к металлу обеспечивает повышение активности систем “благородный металл–оксид церия” и сильно зависит от морфологии и размера частиц оксида церия [12, 13], а также от особенностей границы раздела металл–оксид церия [14].

Широко исследованы для различных окислительных процессов катализаторы на основе палладия, платины и золота, нанесенных на оксид церия и другие оксидные носители [5, 15]. В настоящей работе акцент сделан на изучении каталитической композиции Ag–CeO₂, которая более привлекательна для практического использования из-за относительно низкой стоимости серебра по сравнению с другими благородными металлами и которая все чаще используется в окислительном катализе, в том числе фотокатализе и электрокатализе [16]. Предполагается, что синергетический эффект серебра и активного носителя CeO₂ [17], а также сильное взаимодействие металл–носитель в катализаторах Ag–CeO₂ [18, 19] может эффективно способствовать окислению сажи (soot).

В настоящей работе синтезированы и исследованы катализаторы Ag–CeO₂ при варьировании способа получения: соосаждения и пропитки. Изучено влияние способа приготовления катализатора на его текстурные характеристики, распределение серебра на поверхности оксида церия, способность активации молекулярного кислорода и каталитическую активность в окислении углерода.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез катализаторов

Оксид церия и серебросодержащие катализаторы на его основе готовили методами осаждения [20] и пропитки по влагоемкости [21]. Методом осаждения получали образец CeO₂ и катализатор Ag–CeO₂. Для синтеза катализатора навески AgNO₃ (2.14 г) и Ce(NO₃)₃ · 6H₂O (16.39 г) растворяли в 40 мл дистиллированной воды, затем к смеси нитратов при интенсивном перемешивании приливали водный раствор аммиака (25 мас. %) до достижения pH ~ 10, выдерживали в автоклаве 10 мин при 120°C. Образовавшийся осадок отфильтровывали, промывали дистиллированной водой до достижения нейтрального pH, затем прокаливали при 500°C в течение 5 ч. Образец CeO₂ синтезировали в аналогичных условиях при осаждении нитрата церия(III) раствором аммиака.

Приготовленный методом осаждения оксид церия использовали в качестве носителя для получения катализатора методом классической пропитки по влагоемкости с применением водного раствора нитрата серебра (образец Ag/CeO₂). Катализатор сушили при 120°C в течение 10 ч и затем прокаливали при 500°C в течение 5 ч. Расчетное содержание Ag во всех серебросодержащих образцах составляло 20 мол. % (~13.6 мас. %).

Методы исследования

Определение характеристик пористой структуры образцов проводили по данным адсорбции

азота при температуре –196°C на автоматическом газо-адсорбционном анализаторе TriStar 3020 (“Micromeritics”, США). Величину удельной поверхности ($S_{уд}$) находили с использованием многопоточного метода БЭТ по спрямлению изотермы адсорбции в диапазоне P/P_0 от 0.05 до 0.30. Перед началом измерений навески образцов массой 100–120 мг дегазировали в вакууме при температуре 200°C в течение 2 ч.

Фазовый состав образцов исследовали методом рентгенофазового анализа (РФА) с помощью дифрактометра Miniflex 600 (“Rigaku”, Япония) с применением CuK α -излучения ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) с монохроматором. Условия съемки: скорость сканирования 2 град/мин, шаг 0.2 град/мин, диапазон углов $2\theta = 10^\circ\text{--}90^\circ$. Анализ фазового состава проводили с использованием баз данных PCPDFWIN и программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4.

Структуру образцов, а также морфологические и кристаллографические особенности нанесенного серебра и оксида церия изучали методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМ ВР) на микроскопе JEM-2200 FS (“JEOL”, Япония) с разрешением 0.1 нм при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Активацию молекулярного кислорода на поверхности восстановленных образцов исследовали методом температурно-программируемого окисления (ТПО-O₂) на приборе AutoChem HP (“Micromeritics”, США) в токе газовой смеси 10% O₂ в He (20 мл/мин) при линейном нагреве от –50 до 700°C со скоростью 10 град/мин. Для работы в области отрицательных температур использовали специальную приставку SyuoCooler (“Micromeritics”, США), дозирующую жидкий азот в печь прибора. Перед ТПО-экспериментом образцы предварительно восстанавливали в токе газовой смеси 10% H₂ в Ar (20 мл/мин) при 500°C в течение 20 мин.

Каталитический эксперимент

Перед каталитическим экспериментом все катализаторы предварительно обрабатывали в токе воздуха при 500°C в течение 20 мин. Каталитические свойства образцов изучали в реакции окисления сажи на приборе синхронного термического анализа STA 449 F1 Jupiter analyzer (“NETZSCH-GeraetebauGmbH”, Германия), сопряженном с газовым масс-спектрометром QMS 403 Aeolos (“NETZSCH-GeraetebauGmbH”, Германия). При интенсивном истирании в ступке смешивали 95 мг катализатора и 5 мг углерода CarbonBlack (“Micromeritics”, США) для более плотного и равномерного контакта между частицами катализатора и сажи [7]. Из полученной смеси отбирали ~10 мг и помещали в корундовый тигель для проведения каталитического эксперимента. Эксперимент осуществляли при нагрева-

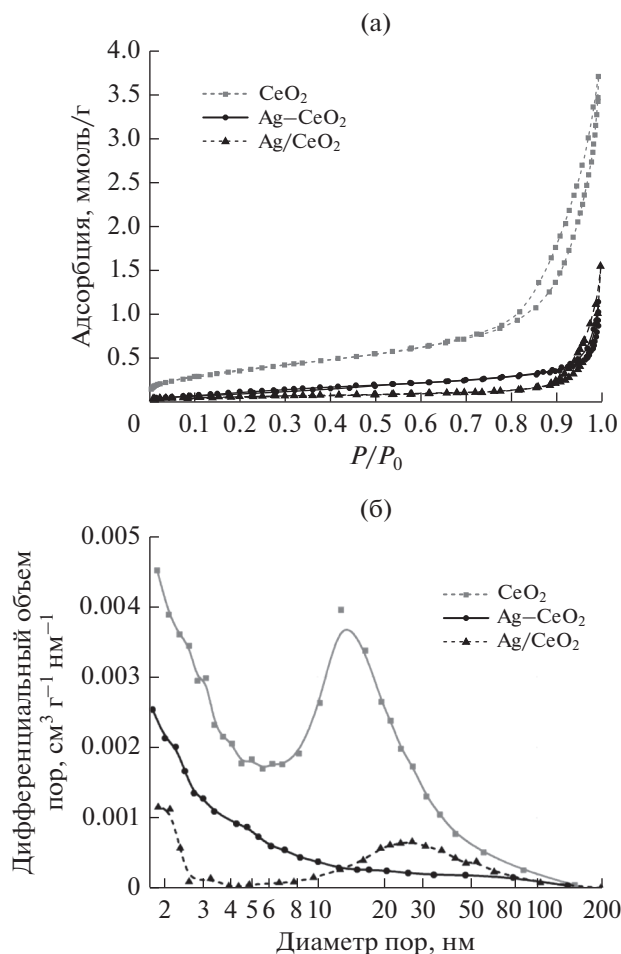


Рис. 1. Изотермы адсорбции–десорбции азота (а) и распределение пор по размерам (по методу ВЛН-desorption) (б) для полученных образцов.

нии смеси катализатора с сажей до 800°C со скоростью нагрева 10 град/мин в токе синтетического воздуха (60 мл/мин). Для исследования некаталитического горения сажи углерод смешивали с кварцем в массовом соотношении 95 : 5. Процесс каталитического и некаталитического окисления сажи оценивали по потере массы образца, экзотермическому пику и масс-спектрометрическому сигналу выделения CO₂ в качестве основного продукта окисления углерода.

Таблица 1. Текстульные характеристики полученных образцов

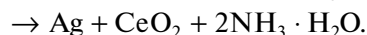
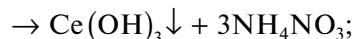
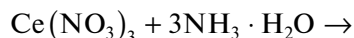
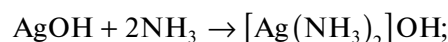
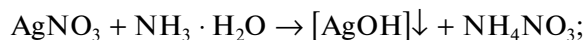
Образец	$S_{уд}$, м ² /г	$V_{пор}$, см ³ /г
CeO ₂	30.4	0.129
Ag–CeO ₂	11.9	0.039
Ag/CeO ₂	5.6	0.053

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Свойства катализаторов

Характеристики пористой структуры образцов по данным низкотемпературной адсорбции азота приведены на рис. 1 и в табл. 1. Все образцы имеют преимущественно мезопористую структуру, на что указывает наличие на изотермах адсорбции–десорбции азота петли гистерезиса в области относительных давлений от 0.8 до 1.0 [22]. Образец CeO₂ имеет удельную поверхность $S_{уд} = 30.4$ м²/г с преобладанием пор размером 6–60 нм.

Из представленных данных видно, что для образца Ag–CeO₂ по сравнению с CeO₂ наблюдается значительное уменьшение удельной поверхности и объема пор ($V_{пор}$), что обусловлено окислительно-восстановительной реакцией между Ag⁺ и Ce³⁺ при осаждении в щелочной среде [20]:



В результате протекания представленных выше реакций формирование частиц Ag происходит непосредственно в процессе соосаждения. Значительное изменение пористой структуры Ag–CeO₂ по сравнению с образцом CeO₂, полученным в близких условиях, указывает на сильное влияние серебра на формирование Ag–CeO₂ катализатора на стадии осаждения.

Катализатор, приготовленный пропиткой по влагоемкости, характеризуется более низкими значениями $S_{уд}$ и $V_{пор}$, но близким в сравнении с CeO₂ распределением пор по размерам (рис. 1б). Таким образом, при синтезе катализатора методом пропитки введение серебра не оказывает существенного влияния на предварительно сформированные частицы оксида церия, однако внесение большого количества (20 мол. %) серебра в катализатор значительно снижает его удельную поверхность и объем пор. Из распределений пор по размерам видно, что катализатор Ag/CeO₂ характеризуется меньшим вкладом пор размером 30 нм по сравнению с исходным носителем CeO₂, что указывает на распределение серебра преимущественно в мелких и средних мезопорах носителя.

Фазовый состав полученных образцов исследовали методом РФА. Образец CeO₂ характеризуется кубической фазой оксида церия со значеними области когерентного рассеивания (ОКР) 8.8 нм (рис. 2, табл. 2). Для образца Ag–CeO₂, приготовленного соосаждением, наблюдается существенное увеличение ОКР для фазы оксида це-

рия (16.7 нм), что подтверждает влияние серебра на процесс формирования структуры образца $\text{Ag}-\text{CeO}_2$ и объясняет уменьшение удельной поверхности до $11.9 \text{ м}^2/\text{г}$. Также для этого образца на рентгенограмме наблюдаются выраженные рефлексы металлического серебра, что доказывает протекание окислительно-восстановительной реакции на стадии осаждения с восстановлением предшественника серебра до металлического состояния.

Для Ag/CeO_2 размер кристаллитов CeO_2 возрастает незначительно, что также свидетельствует о малом влиянии серебра на структуру предварительно сформированного оксида церия при получении катализатора методом пропитки. Отсутствие рефлексов Ag -содержащих фаз для образца Ag/CeO_2 указывает на его высокодисперсное рентгеноаморфное состояние или формирование частиц размером менее 3–4 нм, т.е. вне области детектирования методом РФА.

Структуру образцов изучали методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. ПЭМ-изображения катализатора $\text{Ag}-\text{CeO}_2$, приготовленного методом соосаждения, представлены на рис. 3. Для этого образца характерно образование сферических агломератов размером 400–500 нм. В центре эти агломераты светлее (рис. 3а), что указывает на их меньшую толщину в этой области, соответственно, агломераты предположительно полые. На снимках высокого разрешения видно, что они состоят из смеси частиц серебра ($d_{111} = 2.3 \text{ \AA}$) и оксида церия ($d_{111} = 3.1 \text{ \AA}$). На микроснимке ПЭМ-ВР (рис. 3в) заметно, что на поверхности более крупных частиц оксида церия (~20 нм) стабилизированы мелкие частицы серебра размером 3–8 нм.

Катализатор Ag/CeO_2 , полученный методом пропитки, представляет собой агломерат частиц оксида церия размером ~5–10 нм (рис. 4), что согласуется с данными низкотемпературной адсорбции азота и РФА. На поверхности частиц CeO_2 стабилизированы частицы металлического серебра ($d_{111} = 2.3\text{--}2.4 \text{ \AA}$) размером 1–3 нм.

Известно, что при нанесении серебра на поверхность оксида церия наблюдается изменение окислительно-восстановительных свойств оксида церия. Так, ранее методом ТПВ- H_2 было показано, что восстановление поверхности оксида церия (переход Ce^{4+} в Ce^{3+}) происходит в диапазоне температур 350–600°C [23], но при наличии контакта между частицами серебра и CeO_2 область восстановления смещается до 100–250°C [18, 19]. В окислительно-восстановительных каталитических процессах, помимо склонности систем к восстановлению, важную роль играет их способность к реокислению, и именно стадия активации молекулярного кислорода на предварительно восстановленных активных центрах катализатора может быть лимитирующей. Особенности окис-

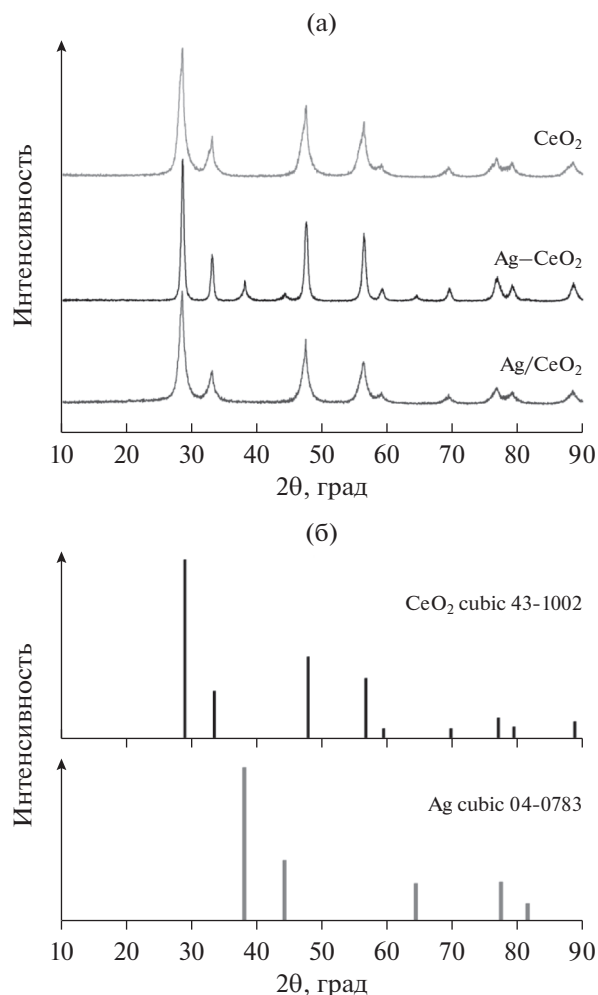


Рис. 2. Рентгенограммы исследуемых образцов (а) и рефлексы фаз оксида церия и серебра, согласно базе PDF (б).

ления катализаторов исследовали методом температурно-программируемого окисления кислородом (ТПО- O_2). На рис. 5 представлены профили ТПО- O_2 для образцов, предварительно восстановленных при 500°C. Окисление CeO_2 наблюдается с ~25°C с характерными пиками по-

Таблица 2. Результаты РФА для исследуемых образцов

Образец	Фазы	$d_{111}(\text{CeO}_2)$, нм	ОКР (CeO_2^{111}), нм	ОКР (Ag^{111}), нм
CeO_2	CeO_2	0.3131	8.8	—
$\text{Ag}-\text{CeO}_2$	CeO_2, Ag	0.3121	16.7	17.0
Ag/CeO_2	CeO_2	0.3130	9.9	—

Прочерки означают, что определение ОКР не проводили из-за отсутствия рефлексов серебра.

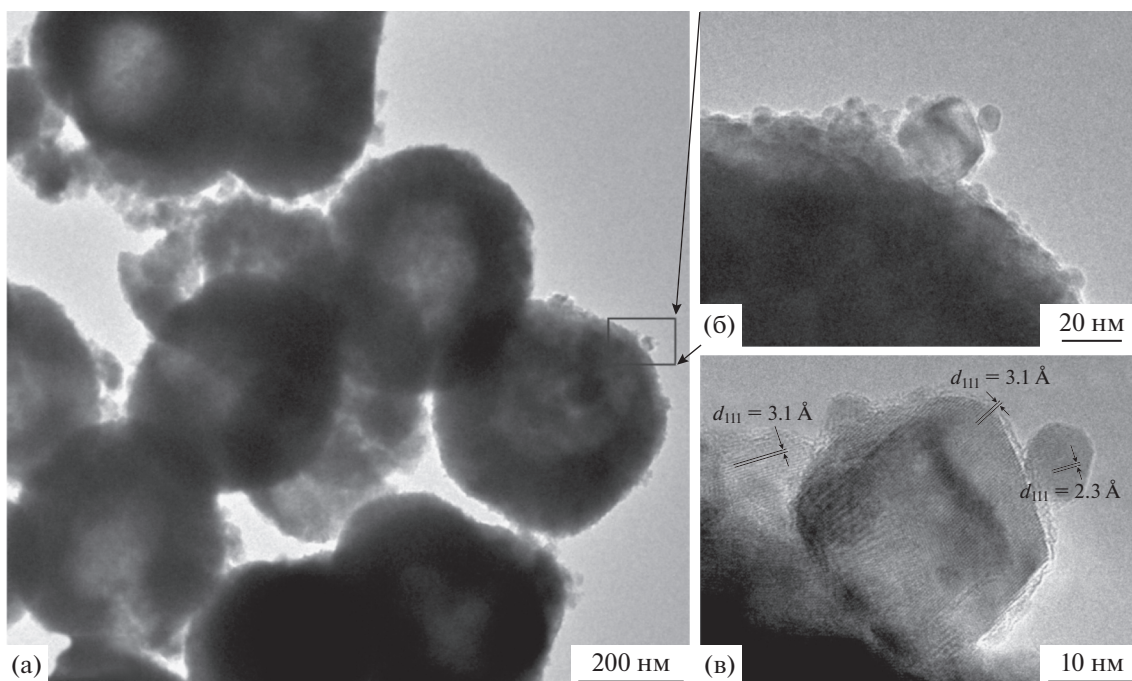


Рис. 3. Изображения ПЭМ и ПЭМ-ВР для образца Ag–CeO₂.

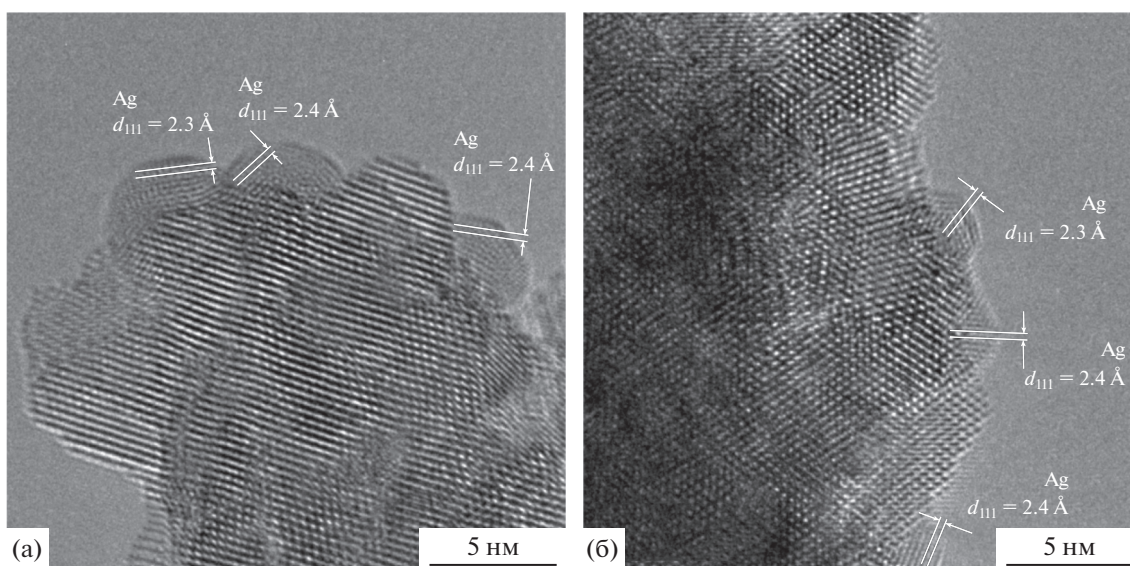


Рис. 4. Изображения ПЭМ-ВР для катализатора Ag/CeO₂.

глошения кислорода при 60 и 100°C, а также небольшим пиком с максимумом при 350°C.

Для катализатора Ag–CeO₂ реокисление начинается при температуре ~15°C, затем следует интенсивный пик поглощения кислорода с максимумом при 40°C и плечом при 90°C. Поглощения кислорода в области выше 200°C не происходит. Низкотемпературная активация кислорода может происходить на частицах серебра, которые

легко реокисляются при комнатной температуре [24, 25]. Смещение основных пиков поглощения кислорода в присутствии серебра в более низкотемпературную область указывает на то, что взаимодействие Ag с CeO₂ способствует не только повышению восстанавливаемости оксида церия, но и его склонности к реокислению.

Для катализатора Ag/CeO₂, полученного методом пропитки, профиль ТПО имеет форму, схо-

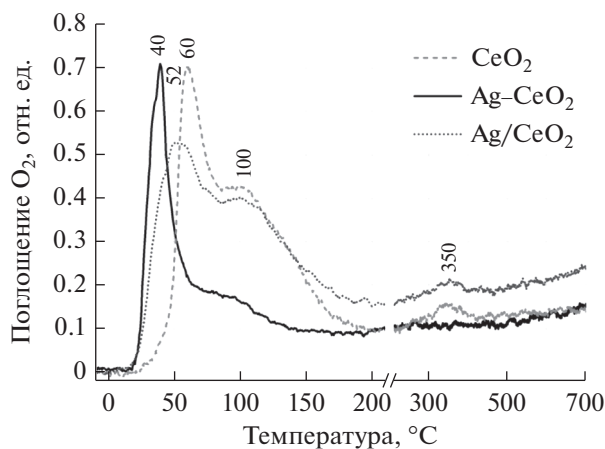


Рис. 5. Профили ТПО- O_2 для полученных образцов.

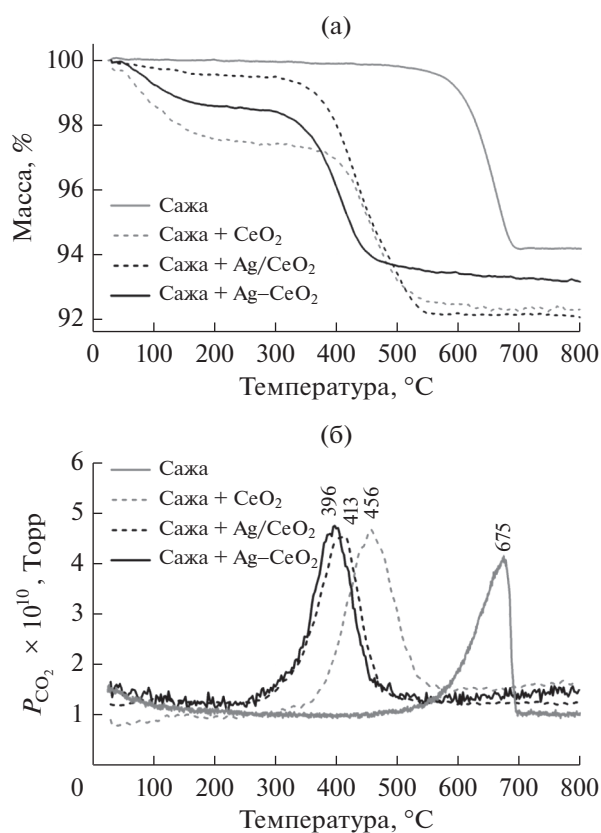


Рис. 6. Каталитические свойства синтезированных образцов в реакции окисления сажи: термогравиметрический сигнал (а) и масс-спектрометрические данные выделения CO_2 (б).

жую с таковой для исходного носителя CeO_2 . Поглощения кислорода начинается при температуре $\sim 15^\circ C$, что может быть связано с окислением дисперсного серебра. Пики поглощения кислорода при 100 и $350^\circ C$ идентичны пикам для образца CeO_2 и относятся к реокислению поверхности CeO_2 , по-видимому, без участия серебра в активации кислорода. Таким образом, на основании

данных ТПО- O_2 можно сделать выводы, что серебро способствует более легкому реокислению предварительно восстановленного оксида церия, а сильное взаимодействие серебра с оксидом церия, наблюдаемое для катализатора $Ag-CeO_2$, значительно повышает реокисляемость катализатора.

Каталитические свойства приготовленных катализаторов исследовали в реакции окисления сажи при смешении катализатора с углеродом в массовом соотношении 95 : 5. Некаталитическое окисление сажи происходит при температуре $550-700^\circ C$ (рис. 6). Присутствие катализатора сдвигает процесс окисления в область более низких температур. Так, на чистом CeO_2 сажа окисляется при $360-550^\circ C$ (пик выделения CO_2 с максимумом при $456^\circ C$).

Активность серебрясодержащих катализаторов в окислении сажи выше по сравнению с чистым оксидом церия. Катализаторы, полученные методом пропитки и соосаждения, имеют близкие активности, однако пик выделения CO_2 для образца $Ag-CeO_2$ смещен в низкотемпературную область ($396^\circ C$). По-видимому, структура $Ag-CeO_2$, полученного методом соосаждения, более благоприятна для протекания процесса окисления сажи.

Высокая активность оксида церия и катализаторов на его основе в окислении сажи определяется, в первую очередь, возможностью обратимых переходов $Ce^{4+} \rightleftharpoons Ce^{3+}$ в структуре оксида церия и образованием соответствующих поверхностных и объемных кислородных вакансий [16, 26]. Введение серебра на поверхность оксида церия, несмотря на значительное уменьшение удельной поверхности, приводит к росту активности в окислении сажи. С одной стороны, причиной возрастания активности может быть увеличение количества кислородных вакансий на поверхности оксида церия в присутствии серебра, что было показано в ряде работ методом КР-спектроскопии [19, 27]. С другой стороны, повышенную активность катализатора, полученного методом соосаждения, можно связать с большей дефектностью получаемой системы за счет сильного взаимодействия серебра и оксида церия, обусловленного протеканием окислительно-восстановительной реакции между Ce^{3+} и Ag^+ при образовании смешанного осадка. Катализатор, приготовленный соосаждением, характеризуется сложной структурой: агломератов, состоящих из смеси частиц серебра и оксида церия. В работе [28] при исследовании композитов $Ag-CeO_2$ со структурой “core-shell” (“ядро-оболочка”) показано, что усиленное межфазное взаимодействие Ag и CeO_2 является основной причиной роста активности катализаторов в реакции окисления СО благодаря увеличению количества кислородных вакансий и соответствующему повышению скорости активации кислорода.

Активность в окислительных процессах определяется способностью активации молекулярного кислорода поверхностью катализатора. Из данных ТПО-О₂ (рис. 4) следует, что оксид церия обладает высокой способностью к активации кислорода, начиная с комнатной температуры, а введение серебра приводит к возрастанию скорости реокисления. Таким образом, серебро играет ключевую роль не только в увеличении количества кислородных вакансий на поверхности CeO₂, но и в способности катализатора активировать молекулярный кислород при пониженных температурах. В работе [20] при исследовании аналогичных агломератов Ag–CeO₂ со структурой “rice-ball” (“рисовые шарики”) в качестве катализаторов окисления сажи было показано, что серебро способствует более низкотемпературной активации кислорода с последующим переносом адсорбированного кислорода от серебра к CeO₂. Исходя из этого, синергетический эффект серебра и активного носителя CeO₂ при их сильном межфазном взаимодействии облегчает активацию молекулярного кислорода как на серебряных, так и Ce-содержащих центрах, что приводит к росту активности в окислении сажи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, синтезированные катализаторы Ag–CeO₂ эффективны в окислении сажи. Способ получения катализатора – пропитка или соосаждение – влияет на их структуру и активность в реакции. Ag–CeO₂, приготовленный методом соосаждения, проявляет повышенную активность за счет более сложной структуры и сильного взаимодействия серебра и оксида церия. Введение серебра на поверхность оксида церия приводит к увеличению реакционной способности катализатора в поверхностной активации молекулярного кислорода, что является одной из ключевых причин роста активности катализаторов в окислительных процессах, в частности, в окислении сажи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-73-10109).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aneggi E., de Leitenburg C., Trovarelli A.* / Catalysis by ceria and related materials, 2nd ed., London: Imperial College Press, 2013. P. 565.
2. *Heck R.M., Farrauto R.J., Gulati S.T.* / Catalytic air pollution control: commercial technology, 3rd ed., Hoboken, New Jersey: Wiley-VCH, 2006. P. 518.
3. *Lox E.S.J., Ertl G., Knözinger H., Schüth F., Weitkamp J.* // Handbook of Heterogeneous Catalysis (2nd ed.). Weinheim: Wiley-VCH, 2008. P. 2274.
4. *Frank B., Schlögl R., Su D.S.* // Env. Sci. Technol. 2013. V. 47. P. 3026.

5. *Fino D., Bensaid S., Piumetti M., Nunzio M.P.* // Appl. Catal. A: Gen. 2015. V. 509. P. 75.
6. *Oi-Uchisawa J., Obuchi A., Wang S., Nanba T., Ohi A.* // Appl. Catal. B: Env. 2003. V. 43. P. 117.
7. *Neyertz C.A., Banus E.D., Miró E.E., Querini C.A.* // Chem. Eng. J. 2014. V. 248. P. 394.
8. *Trovarelli A., Llorca J.* // ACS Catal. 2017. V. 7. P. 4716.
9. *Farmer J.A., Campbell C.T.* // Science. 2010. V. 329. P. 933.
10. *Dvorak F., Farnesi Camellone M., Tovt A., Tran N.D., Negreiros F.R., Vorokhta M., Skala T., Matolinova I., Myslivecek J., Matolin V., Fabris S.* // Nat. Commun. 2016. V. 7. Article number: 10801.
11. *Jones J., Xiong H.F., Delariva A.T., Peterson E.J., Pham H., Challa S.R., Qi G.S., Oh S., Wiebenga M.H., Hernandez X.I.P., Wang Y., Datye A.K.* // Science. 2016. V. 353. P. 150.
12. *Carrettin S., Concepcion P., Corma A., Nieto J.M.L., Puentes V.F.* // Angew. Chem. Int. Ed. 2004. V. 43. P. 2538.
13. *Vayssilov G.N., Lykhach Y., Migani A., Staudt T., Petrova G.P., Tsud N., Skala T., Bruix A., Illas F., Prince K.C., Matolin V., Neyman K.M., Libuda J.* // Nat. Mater. 2011. V. 10. P. 310.
14. *Mudiyanselage K., Senanayake S.D., Feria L., Kundu S., Baber A.E., Graciani J., Vidal A.B., Agnoli S., Evans J., Chang R., Axnanda S., Liu Z., Sanz J.F., Liu P., Rodriguez J.A., Stacchiola D.J.* // Angew. Chem. Int. Ed. 2013. V. 52. P. 5101.
15. *Wei Y., Wu Q., Xiong J., Li J., Liu J., Zhao Z.* // Catal. Today. 2019. V. 327. P. 143.
16. *Grabchenko M.V., Mikheeva N.N., Mamontov G.V., Sallaev M.A., Liotta L.F., Vodyankina O.V.* // Catalysts. 2018. V. 8. № 7. Article number: 285.
17. *Mamontov G.V., Grabchenko M.V., Sobolev V.I., Zaikovskii V.I., Vodyankina O.V.* // Appl. Catal. A: Gen. 2016. V. 528. P. 161.
18. *Грабченко М.В., Мамонтов Г.В., Зайковский В.И., Водянкина О.В.* // Кинетика и Катализ. 2017. Т. 58. № 5. С. 654.
19. *Grabchenko M.V., Mamontov G.V., Zaikovskii V.I., Parola V.La, Liotta L.F., Vodyankina O.V.* // Catal. Today. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.05.014>
20. *Yamazaki K., Kayama T., Dong F., Shinjoh H.* // J. Catal. 2011. V. 282. P. 289.
21. *Liu S., Wu X., Liu W., Chen W., Ran R., Li M., Weng D.* // J. Catal. 2016. V. 337. P. 188.
22. *Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Kenneth S.W.* // Pure Appl. Chem. 2015. V. 87. P. 1052.
23. *Mikheeva N.N., Zaikovskii V.I., Mamontov G.V.* // Micropor. Mesopor. Mater. 2019. V. 277. P. 10.
24. *Dutov V.V., Mamontov G.V., Zaikovskii V.I., Vodyankina O.V.* // Catal. Today. 2016. V. 278. P. 150.
25. *Dutov V.V., Mamontov G.V., Zaikovskii V.I., Liotta L.F., Vodyankina O.V.* // Appl. Catal. B: Env. 2018. V. 221. P. 598.
26. *Fino D., Bensaid S., Piumetti M., Russo N.* // Appl. Catal. A: Gen. 2016. V. 509. P. 75.
27. *Kibis L.S., Svintsiiskiy D.A., Kardash T.Yu., Slavinskaya E.M., Gotovtseva E.Yu., Svetlichnyi V.A., Boronin A.I.* // Appl. Catal. A: Gen. 2019. V. 570. P. 51.
28. *Zhang J., Li L., Huang X., Li G.* // J. Mater. Chem. 2012. V. 22. P. 10480.