

СЕРЕБРЕНИЕ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ЯЧЕЙСТЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

© Н. А. Аснис¹, О. А. Василенко¹, М. Д. Гаспарян¹, И. О. Спешилов²,
Т. А. Ваграмян¹, В. Х. Алешина^{1*}

¹ Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
125047, г. Москва, Миусская пл., д. 9

² АО «НПО Энергомаш» им. академика В. П. Глушко,
141400, Московская обл., г. Химки, ул. Бурденко, д. 1

* E-mail: aleshinavh@gmail.com

Поступила в Редакцию 23 мая 2019 г.

После доработки 20 мая 2020 г.

Принята к публикации 10 июля 2020 г.

Установлено, что температурный режим спекания корундовой керамики влияет на скорость последующей металлизации и на каталитическую активность металлизированного высокопористого ячеистого материала. Разработан процесс химического серебрения изучаемого материала из раствора, содержащего ($г \cdot л^{-1}$): нитрат серебра — 2, глюкозу — 54, оксиэтилидендифосфоновую кислоту — 1.5 в качестве комплексообразующего лиганда. Установлено влияние скорости потока электролита на равномерность распределения металла внутри высокопористого ячеистого материала. Разработан технологический процесс предварительной подготовки поверхности корундовой керамики перед металлизацией, включающий обработку уайт-спиритом, травление в смеси плавиковой и серной кислот и обработку в палладиевом активаторе, позволяющий получать сплошные, мелкокристаллические, обладающие хорошей адгезией покрытия с высокой каталитической активностью.

Ключевые слова: химическая металлизация; серебрение; высокопористый ячеистый материал; каталитическая активность

DOI: 10.31857/S0044461820100059

Современные летательные аппараты оснащены системой каталитической очистки воздушной смеси от примесей озона. К катализаторам разложения озона, применяющимся в этих системах, предъявляются особые требования — низкое аэродинамическое сопротивление (с учетом расхода воздушной смеси до $20\,000\text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$) и высокая механическая прочность в сочетании с высокой степенью конверсии. Широко применяемые в настоящее время в различных технологических процессах с применением озона гранулированные катализаторы разложения озона не могут

быть использованы в системах воздухоподготовки воздушных судов, поскольку обладают высокими аэродинамическим сопротивлением, истираемостью и уносом материала катализатора из зоны реакции.

Керамические высокопористые ячеистые катализаторы с каталитически активным слоем, полученным восстановлением в токе водорода осажденных из растворов гидроксидов металлов, не имеют описанных недостатков. Характерная арочно-лабиринтная структура высокопористых ячеистых материалов, сочетающая транспортные макропоры

размером 0.5–4.5 мм с микропорами узлов и перегородок размерами 0.1–10 мкм, позволяет эффективно проводить массообменные процессы с высокой степенью перемешивания и диспергирования газовой среды и создавать малообъемные катализаторы и сорбенты с высокими удельными характеристиками при малых концентрациях реагирующих веществ. Прочный керамический каркас исключает такие присутствующие порошковым, таблетированным и экструдированным катализаторам недостатки, как истирание и унос.

Керамические высокопористые ячеистые материалы, применяемые в качестве носителя катализатора, прошли успешные испытания в различных процессах, например окисление CO до CO₂, восстановление оксидов азота и т. д. [1, 2]. Слой каталитически активного металла на высокопористом ячеистом материале, как и на гранулированных пористых носителях, традиционно формируется достаточно сложным многоступенчатым физическим способом — путем пропитки каркаса за одну или несколько операций в растворах соответствующих солей с последующей термообработкой и восстановлением газообразным водородом при высоких температурах. В связи с этим представляет интерес исследование возможности формирования каталитически активного металлического слоя на поверхности высокопористого ячеистого материала более простыми и менее энергозатратными способами химической металлизации.

Цель исследования — разработка методики химического серебрения керамических высокопористых ячеистых материалов для придания им высокой каталитической активности в процессе разложения озона.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

— установление влияния режимов спекания высокопористого ячеистого керамического материала на процесс последующего химического серебрения и на каталитическую активность металлизированных серебром высокопористых ячеистых материалов;

— исследование влияния параметров процесса предварительной обработки поверхности перед химическим серебрением на скорость серебрения и каталитическую активность металлизированных серебром высокопористых ячеистых материалов;

— изучение влияния составов раствора и режимов процесса химического серебрения высокопористых керамических образцов на каталитические свойства металлизированных высокопористых ячеистых материалов.

Экспериментальная часть

На первом этапе разработки процесса химической металлизации керамики серебро осаждали на плоских беспористых керамических образцах. Для исследования каталитической активности в процессе разложения озона образцы катализаторов изготавливали путем металлизации керамических высокопористых ячеистых материалов.

Для приготовления высокопористого ячеистого материала в качестве полимерного прекурсора использовали ретикулированный пенополиуретан марки Regicell с плотностью 30 ppi производителя Porolon®, NOR. Блоки из пенополиуретана резали раскаленной нихромовой проволокой на предварительные заготовки, из которых с учетом усадки при обжиге (~10 об%) по шаблону изготавливали полимерные матрицы нужного размера. Полученные заготовки пропитывали шликером на основе оксида алюминия со спекающей добавкой системы CaO–ZnO–Al₂O₃–SiO₂ (CZAS) [3, 4]. Компоненты массы Al₂O₃ и спекающую добавку получали отдельно, путем прокаливания Al(OH)₃ и смеси CaCO₃, ZnO, Al(OH)₃, SiO₂ с последующим измельчением термообработанных продуктов и смешиванием их в заданном соотношении.

Операции измельчения и смешивания проводили в шаровой мельнице в корундовом барабане с корундовыми шарами в среде ацетона при соотношении материал:шары:ацетон примерно 1:2:1 по массе.

В качестве временной технологической связки для формования слоев керамики использовали 5%-ный водный раствор поливинилового спирта. Заготовки обжигали в воздушной среде в электрической печи с нагревателями из хромита лантана при скорости нагревания 3 град·мин⁻¹ с выдержкой при конечной температуре в течение 2 ч. Температура обжига была выбрана в интервале 1400–1550°C с шагом 50°.

Плоские беспористые образцы изготавливали аналогично высокопористым без использования полимерных матриц [5]. Обжиг плоских беспористых керамических заготовок проводили в интервале температур 1400–1550°C с шагом 50°.

В качестве обезжиривающего раствора для обработки поверхности перед травлением был использован органический растворитель уайт-спирит Нефрас С4-155/200 по ГОСТ 3134–78 производителя «Химвавто».

Для определения каталитической активности высокопористых ячеистых материалов с серебряными покрытиями был исследован процесс разложения озона на металлизированных керамических и ме-

таллических ячеистых материалах. В U-образный реактор загружали образцы исследуемых катализаторов объемом $V = 2 \text{ см}^3$, затем пропускали через них озono-воздушную смесь в течение 20 мин на каждую температурную точку. Объемный расход озono-воздушной смеси составлял $1.8 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$ при концентрации озона $0.03 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$. Объем остаточного озона определяли методом обратной иодометрии.

Обсуждение результатов

Были определены величины водопоглощения, открытой пористости и плотности плоских беспористых керамических образцов, а также исследована структура поверхности керамических образцов, обожженных при температурах 1400, 1450 и 1500°C до и после серебрения (рис. 1, *a–e*).

Образцы, обожженные при температуре 1400°C (рис. 1, *a*), имели развитую поверхность с высокой открытой пористостью, состоящую из мелких зерен без выраженного спекания. С повышением температуры обжига наблюдалось уменьшение числа и диаметра пор (рис. 1, *b*), и при температуре 1500°C формировалась плотная, практически беспористая структура (рис. 1, *в*).

При серебрении керамических образцов, полученных при температуре обжига 1400°C, формируются слои покрытия с большим размером кристаллитов

игольчатой и ромбоэдрической формы (рис. 1, *з*), что можно объяснить небольшим количеством центров кристаллизации. В процессе серебрения образцов, полученных при температурах обжига 1450 и 1500°C, формируются слои с небольшим размером кристаллитов (рис. 1, *д*, *e*) вследствие увеличения количества центров кристаллизации.

После серебрения поверхность плоских беспористых керамических образцов, спеченных при температуре 1450°C, полностью закрыта серебром (рис. 1, *д*), и его слой толще при одном и том же времени осаждения по сравнению с осадком серебра на керамических образцах, обожженных при температурах 1400 и 1500°C. Это позволило сделать вывод об оптимальной температуре спекания высокопористых ячеистых материалов, равной 1450°C, и на последующих этапах исследования использовались образцы из плоской беспористой и высокопористой ячеистой керамики, полученной при этой температуре спекания.

Представлялось целесообразным исследовать влияние режимных параметров различных стадий процесса предварительной подготовки поверхности перед нанесением металлических покрытий на высокопористый ячеистый материал (а именно, стадий обработки поверхности перед травлением, травления, прямого активирования и акселерации) на процесс металлизации и каталитическую активность

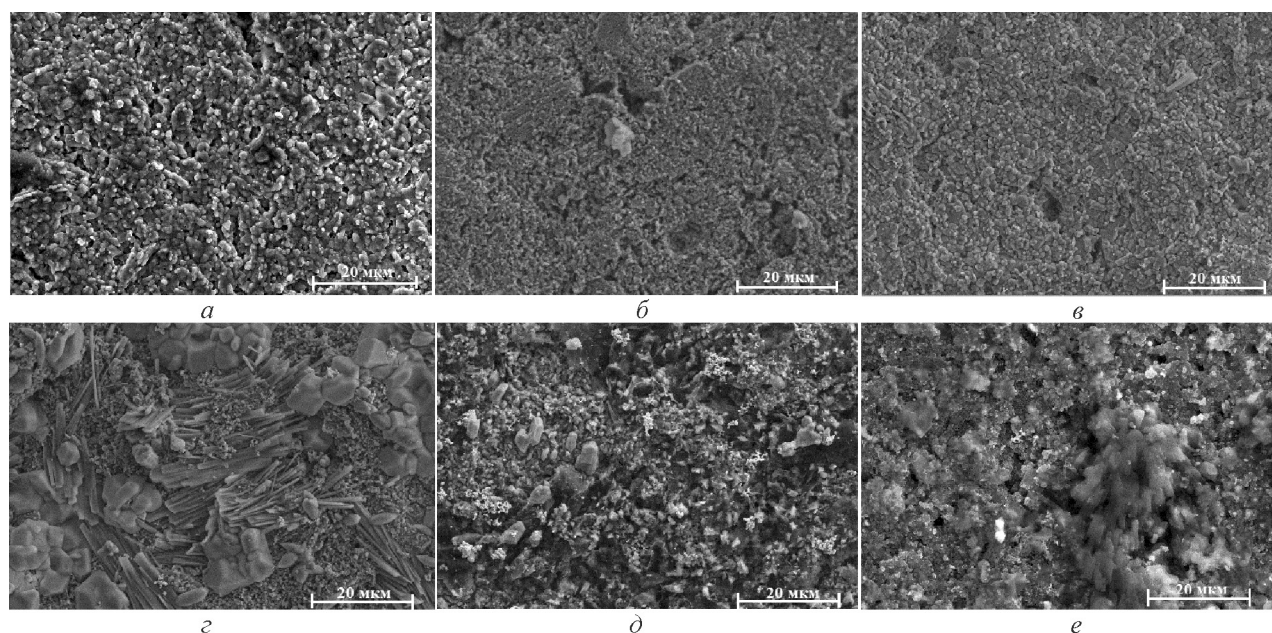


Рис. 1. Фотографии поверхности керамических образцов, обожженных при различных температурах: до металлизации (*a* — 1400, *b* — 1450, *в* — 1500°C) и после серебрения (*з* — 1400, *д* — 1450, *e* — 1500°C) из раствора: AgNO_3 — $2 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$, глюкоза — $18 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$, NH_4OH (25%) — $230 \text{ мл} \cdot \text{л}^{-1}$, pH 13.

Продолжительность процесса 20 мин, температура процесса 40°C.

Таблица 1

Зависимость удельной массы металлического осадка Ag и скорости формирования покрытия от способа обработки поверхности

Состав раствора химического серебрения: AgNO_3 — 2 г·л⁻¹, глюкоза — 18 г·л⁻¹, NH_4OH (25%) — 230 мл·л⁻¹, pH 13

Показатель	Стадия обработки поверхности перед травлением				
	щелочной раствор	без обезжиривания	этиловый спирт	ацетон	уайт-спирит
Удельная масса осадка Ag $m_{\text{уд}}$, мг·см ⁻²	1.150	0.600	1.238	1.225	2.200
Скорость формирования покрытия $V_{\text{Пк}}$, мг·см ⁻² ·мин ⁻¹	0.580	0.030	0.062	0.061	0.110
	Стадия травления				
	без травления	раствор № 1 (HF – 50 мл)	раствор № 2 (HF – 100 мл)	раствор № 3 (HF – 250 мл)	
Удельная масса осадка Ag $m_{\text{уд}}$, мг·см ⁻²	0.021	2.069	2.265	3.008	
Скорость формирования покрытия $V_{\text{Пк}}$, мг·см ⁻² ·мин ⁻¹	0.001	0.103	0.113	0.150	

металлизированных высокопористых ячеистых материалов.

В качестве показателей качества для плоских беспористых образцов были выбраны сплошность покрытия, удельная масса металлического осадка и скорость формирования покрытия.

Для обработки поверхности перед травлением были использованы различные органические и неорганические растворители. В табл. 1 представлены результаты исследования влияния растворителей на количество осажденного серебра и скорость процесса осаждения.

Изначально предполагалось, что обработка керамической поверхности органическими растворителями перед травлением не нужна (поскольку образцы получены при высоких температурах), однако при исключении данной стадии скорость серебрения керамических высокопористых ячеистых материалов значительно уменьшалась.

Наибольшие скорости формирования покрытия наблюдались для образцов, обработанных уайт-спиритом, который и использовался в дальнейшем для обработки керамических высокопористых ячеистых материалов перед травлением.

Стадия травления используется для увеличения микрошероховатости поверхности. Согласно [6], це-

Таблица 2

Составы растворов и режимы травления керамической поверхности

Состав раствора и режим травления	Раствор		
	№ 1	№ 2	№ 3
H_2SO_4 (98%), мл·л ⁻¹	100	100	100
HF (70%), мл·л ⁻¹	50	100	250
Температура, °C	50	50	50
Продолжительность, мин	1	1	1

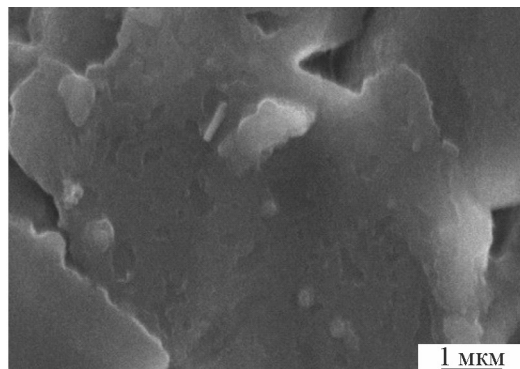
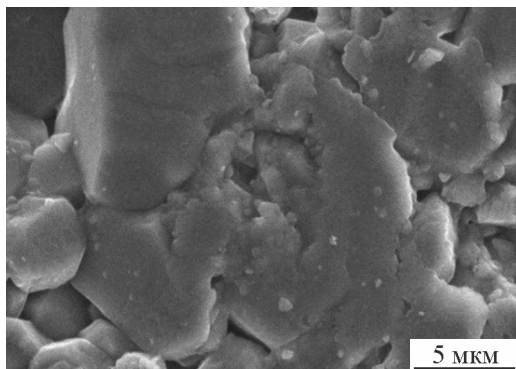


Рис. 2. Фотографии поверхности металлизированных (Ag) керамических образцов, не подвергавшихся стадии травления.

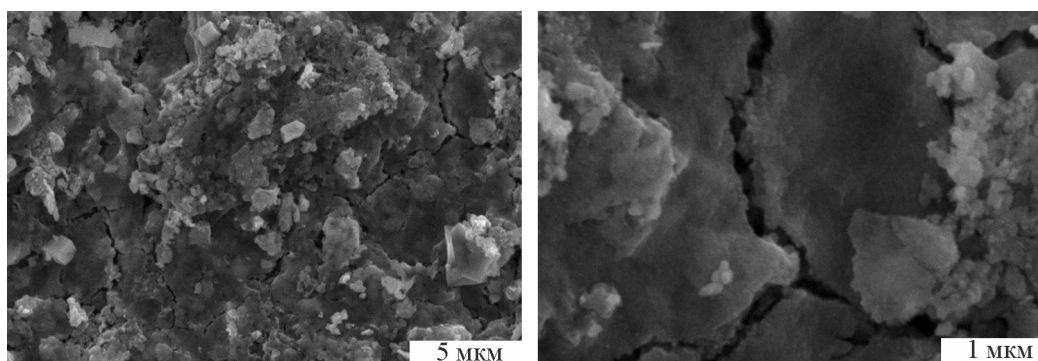


Рис. 3. Фотографии поверхности металлизированных (Ag) керамических образцов, обработанных в растворе, содержащем $250 \text{ мл} \cdot \text{л}^{-1}$ HF (70%) и $100 \text{ мл} \cdot \text{л}^{-1}$ H_2SO_4 (98%).

лесообразность включения этой стадии в процесс предварительной подготовки керамики зависит от состояния ее поверхности. Использование растворов, содержащих серную кислоту и окислители, не привело к изменению шероховатости поверхности керамики. Для травления керамических образцов были опробованы растворы с различным содержанием плавиковой кислоты (табл. 2), результаты исследования влияния которой на количество осажденного серебра и скорость процесса осаждения представлены в табл. 1. Было установлено, что исключение стадии травления приводит к значительному уменьшению удельной массы осадка (табл. 1), а также снижению шероховатости осаждаемого покрытия (рис. 2).

Обработка в растворах с плавиковой кислотой приводит к росту шероховатости поверхности. Наилучшие результаты были получены на образцах, подвергшихся травлению в растворе с наибольшим содержанием плавиковой кислоты (рис. 3). Удельная масса осадка составила $3 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2}$, скорость металлизации — $0.15 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$ (табл. 1). При содержании плавиковой кислоты в травильном растворе более $250 \text{ мл} \cdot \text{л}^{-1}$ не происходит заметного увеличения скорости металлизации и шероховатости поверхности осаждаемого металла.

Стадия прямого активирования, заключающаяся в химическом осаждении на активируемую поверхность металлического палладия, необходима для инициирования последующего процесса химического осаждения серебра. Активирование проводилось в растворе HCl — $40 \text{ мл} \cdot \text{л}^{-1}$, SnCl_2 — $5.7 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$, PdCl_2 — $0.05\text{--}0.10 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$, NaCl — $240 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ при температуре 40°C в течение 5 мин [6]. При включении этой стадии в процесс предобработки удается избежать двух последовательных стадий обработки: сенсibilизации и активации.

Стадия акселерации, заключающаяся в обработке активированной поверхности в кислом растворе неорганических восстановителей, повышает эффективность активации и начальную скорость химического осаждения металла в тех случаях, когда каталитические свойства поверхности после прямого активирования недостаточны для инициирования реакции химической металлизации [7]. Для металлизации диэлектриков был использован раствор акселерации состава [6]: H_2SO_4 — $50\text{--}80 \text{ мл} \cdot \text{л}^{-1}$, $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ — $50\text{--}150 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$, $T = 40^\circ\text{C}$, $\tau = 5 \text{ мин}$. Скорость формирования покрытия составила $0.092 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$, удельная масса металлического осадка — $3.50 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2}$.

На основании данных о скорости металлизации, удельной массы и каталитической активности металлизированных керамических образцов определены оптимальные составы растворов и режимы процессов предварительной подготовки керамической поверхности к металлизации:

- обработка уайт-спиритом;
- травление в растворе, содержащем $250 \text{ мл} \cdot \text{л}^{-1}$ HF и $100 \text{ мл} \cdot \text{л}^{-1}$ H_2SO_4 ; $T = 50^\circ\text{C}$; $\tau = 1 \text{ мин}$;
- прямое активирование в растворе, содержащем $5.7 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ SnCl_2 , $0.05\text{--}0.10 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ PdCl_2 , $40 \text{ мл} \cdot \text{л}^{-1}$ HCl и $240 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ NaCl ; $T = 40^\circ\text{C}$; $\tau = 5 \text{ мин}$;
- акселерация в растворе, содержащем $50\text{--}80 \text{ мл} \cdot \text{л}^{-1}$ H_2SO_4 и $50\text{--}100 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ NaPO_2H_2 ; $T = 40^\circ\text{C}$; $\tau = 5 \text{ мин}$.

В процессе металлизации подготовленной таким образом поверхности керамики формировались плотные шероховатые осадки серебра с хорошей адгезией. Образцы из керамических высокопористых ячеистых материалов с химически осажденными покрытиями серебра испытывали в качестве катализаторов в процессе разложения озона. Было установлено, что каталитическая активность образцов возрастает с уве-

личением шероховатости, толщины осадка серебра и равномерности его распределения по толщине внутри образцов высокопористых ячеистых материалов (рис. 4). Возможно, рост каталитической активности вызван тем, что с увеличением средней толщины покрытия повышается степень заполнения серебром внутренних поверхностей высокопористых ячеистых материалов и повышается шероховатость поверхности серебряного осадка, что приводит к увеличению рабочей поверхности каталитически активного слоя. Данные показатели в существенной мере определяются соотношением концентраций компонентов раствора серебрения и режимами процесса осаждения, в том числе гидродинамическим режимом потока раствора внутри высокопористого ячеистого материала.

Помимо недостаточной скорости осаждения покрытия недостатками аммиачных растворов серебре-

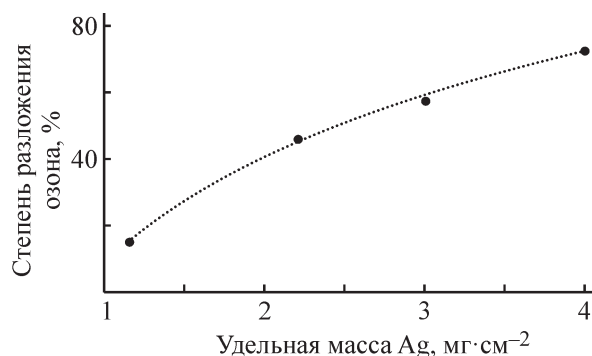


Рис. 4. Зависимость степени разложения озона при температуре 25°C от удельной массы осаденного на высокопористый ячеистый материал серебра.

ния, используемых для металлизации пластических масс, являются их низкая стабильность и снижение

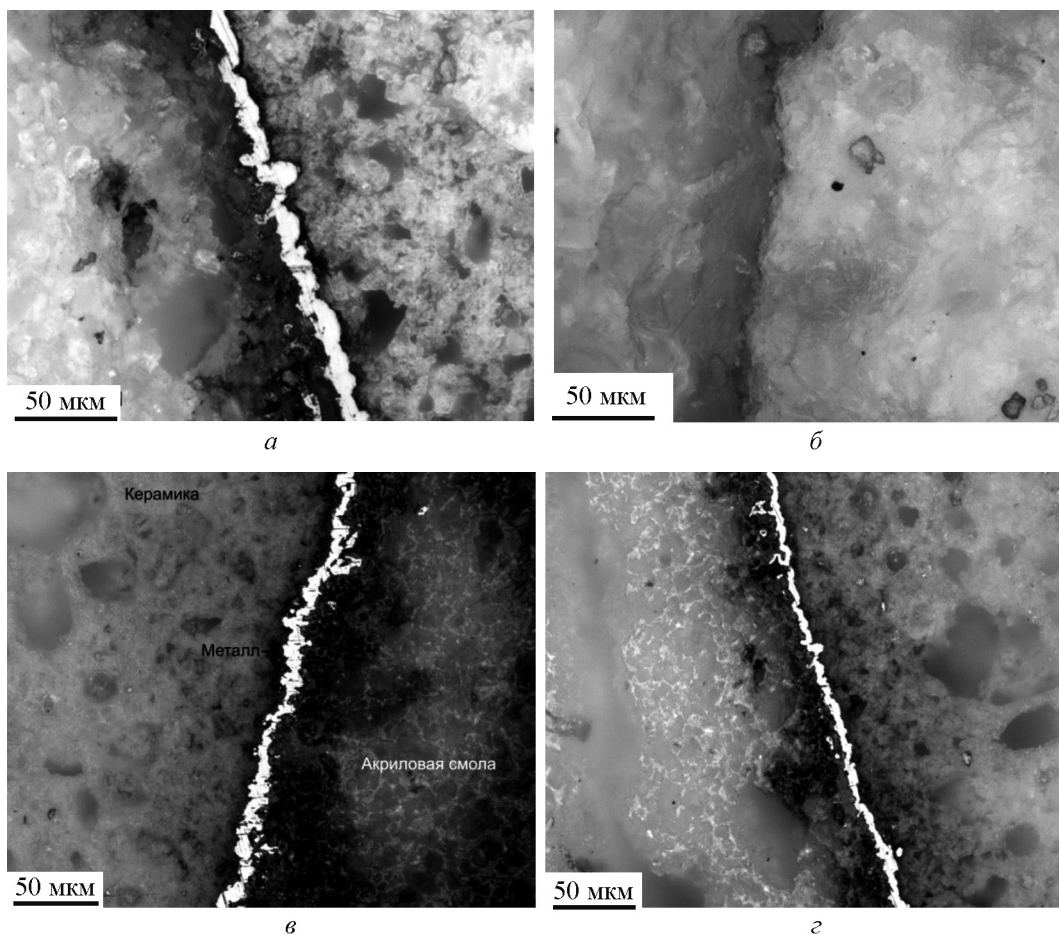


Рис. 5. Фотографии шлифов металлизированных высокопористых ячеистых материалов.

а — 1 мм от края образца без циркуляции электролита, *б* — 10 мм от края образца без циркуляции электролита, *в* — 1 мм от края образца при линейной скорости течения электролита 15 см·мин⁻¹, *г* — 10 мм от края образца при линейной скорости течения электролита 15 см·мин⁻¹.

Состав раствора серебрения: AgNO₃ — 2 г·л⁻¹, глюкоза — 54 г·л⁻¹, оксиэтилендифосфоновая кислота — 1.5 г·л⁻¹, pH 13.

Продолжительность процесса 20 мин, температура процесса 40°C.

адгезии покрытия к керамической основе при увеличении шероховатости покрытия. Замена аммиака на оксиэтилендифосфоновую кислоту в качестве комплексообразующего лиганда позволила в 4.5 раза увеличить скорость осаждения Ag и получить покрытие большей толщины с большей шероховатостью и хорошей адгезией.

Было изучено влияние линейной скорости потока раствора химического серебрения через высокопористый ячеистый материал на равномерность распределения осадка серебра внутри высокопористого ячеистого материала (рис. 5) методом исследования поперечных шлифов образцов с нанесенным серебряным покрытием с последующим изучением их поверхности на микроскопе.

Установлено, что достаточная для обеспечения каталитической активности равномерность распределения осадка серебра внутри высокопористого ячеистого материала достигается при линейной скорости течения раствора внутри высокопористого ячеистого материала, равной $15 \text{ см} \cdot \text{мин}^{-1}$ (рис. 5, в, з). Большие скорости течения не приводят к существенным изменениям в распределении металла внутри высокопористого ячеистого материала, при более медленном движении электролита осаждение металла происходит преимущественно на внешней поверхности высокопористого ячеистого материала (рис. 5, а, б), что приводит к снижению удельной массы осадка и каталитической активности металлизированных серебром высокопористых ячеистых материалов.

Катализаторы на основе керамических высокопористых ячеистых материалов, металлизированных серебром из раствора, содержащего $1.5\text{--}2.5 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ оксиэтилендифосфоновой кислоты в качестве комплексообразующего лиганда, $1.5\text{--}2.5 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ AgNO_3 и $51\text{--}55 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ глюкозы, были испытаны в процессе разложения озона. Степень конверсии озона на них составляла не менее 95%, в то время как на покрытых серебром металлических высокопористых ячеистых материалах она составляет 75% [8].

Выводы

Полученные в работе результаты позволяют сделать вывод о том, что способы подготовки поверхности высокопористых ячеистых материалов перед химическим серебрением оказывают влияние на каталитическую активность металлизированных серебром высокопористых ячеистых материалов.

Равномерность по толщине химически осаждаемых серебряных покрытий внутри керамических

высокопористых ячеистых материалов зависит от скорости потока раствора серебрения через них в процессе металлизации.

Скорость потока раствора химического серебрения через высокопористый ячеистый материал выше $15 \text{ см} \cdot \text{мин}^{-1}$ существенного влияния на равномерность осаждаемых покрытий не оказывает. Выявленные закономерности позволяют получать серебряные покрытия на высокопористом ячеистом материале, обладающие высокой каталитической активностью в процессе разложения озона.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация о вкладе авторов

Н. А. Аснис разработал лабораторную установку для нанесения серебряного покрытия на высокопористый ячеистый материал, обосновал скоростные характеристики процесса. М. Д. Гаспарян провел эксперименты по определению каталитической активности металлизированных серебром высокопористых ячеистых материалов. Т. А. Ваграмян обосновал технологию нанесения металлических покрытий на высокопористый ячеистый материал. И. О. Спешиллов провел исследования по влиянию предварительной подготовки поверхности высокопористых ячеистых материалов перед химическим серебрением на каталитическую активность металлизированных серебром высокопористых ячеистых материалов. О. А. Василенко и В. Х. Алешина участвовали в написании текста статьи. Все авторы участвовали в обсуждении результатов.

Информация об авторах

Аснис Наум Аронович, к.т.н.,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5392-0869>

Василенко Оксана Анатольевна, к.т.н.,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1820-3880>

Гаспарян Микаэл Давидович, д.т.н.,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0387-8631>

Спешиллов Иван Олегович,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4779-906X>

Ваграмян Тигран Ашотович, д.т.н., проф.,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8447-235X>

Алешина Венера Халитовна,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2799-7774>

Список литературы

- [1] Анциферов В. Н., Калашикова М. Ю., Макаров А. М., Порозова С. Е., Филимонова И. В. Блочные катализаторы дожигания углеводородов и монооксида углерода на основе высокопористых ячеистых материалов // ЖПХ. 1997. Т. 70. № 1. С. 105–111 [Antsiferov V. N., Kalashnikova M. Yu., Makarov A. M., Porozova S. E., Filimonova I. V. Block catalysts based on highly porous cellular materials for afterburning of hydrocarbons and carbon monoxide // Russ. J. Appl. Chem. 1997. V. 70. N 1. P. 104–107].
- [2] Pat. CN102481549 (publ. 2014). Oxidation catalyst and method for destruction of CO, VOC and halogenated VOC.
- [3] Макаров Н. А., Свердлик В. Л. Композиционный материал системы корунд — диоксид циркония — спекающая добавка // Стекло и керамика. 2005. № 11. С. 16–18. [Makarov N. A., Sverdlikov V. L. Composite material of the corundum-zirconium dioxide-sintering additive system // Glass Ceram. 2005. V. 62. N 11. P. 352–354. <https://doi.org/10.1007/s10717-006-0005-0>].
- [4] Евтеев А. А., Макаров Н. А., Лемешев Д. О., Житнюк С. В. Керамика в системе $ZrO_2-Al_2O_3$ с добавками эвтектических составов // Стекло и керамика. 2011. № 8. С. 23–27. [Evtsev A. A., Makarov N. A., Lemeshev D. O., Zhitnyuk S. V. $ZrO_2-Al_2O_3$ ceramic with eutectic additives // Glass Ceram. 2011. V. 68. N 7–8. P. 258–262. <https://doi.org/10.1007/s10717-011-9367-z>].
- [5] Спешилов И. О., Вартанян М. А., Макаров Н. А., Грунский В. Н., Абрашов А. А., Ваграмян Т. А. Химическое серебрение керамических диэлектриков на основе оксида алюминия // Стекло и керамика. 2016. № 12. С. 19–22. [Speshilov I. O., Vartanyan M. A., Makarov N. A., Grunskii V. N., Abrashov A. A., Vagramyan T. A. Chemical silvering of ceramic dielectrics based on aluminum oxide // Glass Ceram. 2016. V. 72. N 11–12. P. 451–453. <https://doi.org/10.1007/s10717-016-9809-8>].
- [6] Вансовская К. М. Металлические покрытия, нанесенные химическим способом. Л.: Машиностроение, 1985. С. 36, 40, 43.
- [7] Шалкаускас М., Ваикялис А. Химическая металлизация пластмасс. Л.: Химия, 1985. С. 39–43.
- [8] Винникова С. А., Говоруха Е. Р., Дьяконов В. А., Чащин В. А., Нефедова Н. В. Термодеструкция озона на серебряных катализаторах // Успехи в химии и хим. технологии. 2016. Т. 30. № 3. С. 66–68.