



# Конденсированные среды и межфазные границы

<https://journals.vsu.ru/kcmf/>

## Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 544.653

Научная специальность ВАК - 1.4.6 Электрохимия

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13329>

## Изучение влияния микроструктуры Pt/C материалов на электрохимические характеристики полученных на их основе PtCo/C электрокатализаторов

А. К. Невельская<sup>1,2✉</sup>, С. В. Беленов<sup>1</sup>, А. А. Гаврилова<sup>1</sup>, К. О. Паперж<sup>1</sup>, Н. В. Лянгузов<sup>3</sup>, И. В. Панков<sup>4</sup>, А. А. Коханов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО “Южный федеральный университет”, Химический факультет, ул. Зорге, 7, Ростов-на-Дону 344090, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБУН “Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук” (ЮНЦ РАН), пр. Чехова, 41, Ростов-на-Дону 344006, Российская Федерация

<sup>3</sup>ФГАОУ ВО “Южный федеральный университет”, Физический факультет, ул. Зорге, 5, Ростов-на-Дону 344090, Российская Федерация

<sup>4</sup>ФГАОУ ВО “Южный федеральный университет”, Научно-исследовательский институт физической и органической химии, пр. Ставки, 194/2, Ростов-на-Дону 344090, Российская Федерация

### Аннотация

**Цель статьи:** В работе проведено исследование влияния равномерности пространственного распределения наночастиц Pt по поверхности носителя в Pt/C материалах на микроструктуру и электрохимическое поведение получаемых на их основе PtCo/C катализаторов.

**Экспериментальная часть:** Для синтеза PtCo/C катализаторов используется метод пропитки Pt/C с последующей термической обработкой в атмосфере Ar/H<sub>2</sub>.

**Выводы:** Применение Pt/C материала с массовой долей платины около 20 % и равномерным распределением наночастиц Pt по поверхности углеродного носителя позволяет получить PtCo/C катализатор, активность которого в реакции восстановления кислорода при 0.90 В составляет 1215 А/г (Pt), что превышает аналогичный показатель для коммерческого Pt/C катализатора в 4.8 раза. При этом использование Pt/C материала с неравномерным распределением наночастиц приводит к получению PtCo/C катализатора с крупным размером частиц и низкой величиной активной площади поверхности, что значительно ухудшает его активность в реакции восстановления кислорода.

**Ключевые слова:** платиносодержащие электрокатализаторы, биметаллические наночастицы, высокотемпературный синтез, термическая обработка, реакция электровосстановления кислорода

**Источник финансирования:** Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 24-79-00279. Место реализации проекта Южный федеральный университет.

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования «Высокоразрешенная электронная микроскопия» (ЦКП «ВЭМ», ЮФУ) за проведение исследований с использованием просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

**Для цитирования:** Невельская А. К., Беленов С. В., Гаврилова А. А., Паперж К. О., Лянгузов Н. В., Панков И. В., Коханов А. А. Изучение влияния микроструктуры Pt/C материалов на электрохимические характеристики полученных на их основе PtCo/C электрокатализаторов. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2025;27(4): 651–660. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13329>

✉ Невельская Алина Кирилловна, e-mail: [alina\\_nevelskaya@mail.ru](mailto:alina_nevelskaya@mail.ru)

© Невельская А. К., Беленов С. В., Гаврилова А. А., Паперж К. О., Лянгузов Н. В., Панков И. В., Коханов А. А., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

**For citation:** Nevelskaya A. K., Belenov S. V., Gavrilova A. A., Paperzh K. O., Lyanguzov N. V., Pankov I. V., Kokhanov A. A. Study of the influence of the microstructure of Pt/C materials on the electrochemical characteristics of PtCo/C electrocatalysts based on them. *Condensed Matter and Interphases*. 2025;27(4): 651–660. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27.13329>

## 1. Введение

Поиск путей повышения активности и стабильности платиносодержащих электрокатализаторов является важной задачей для развития разных областей водородной энергетики, например, таких как низкотемпературные топливные элементы (НТЭ) [1–4]. Так, легирование благородного металла различными *d*-металлами (Co, Ni, Fe, Cu и т. д.) [5–7], варьируя состав и структуру наночастиц, позволяет повысить функциональные характеристики катализатора [8–14], а также снизить его себестоимость.

Известно, что морфология катализатора, а именно: распределение металлических наночастиц по поверхности катализатора, а также форма, состав металлической компоненты, структура, средний размер и размерное распределение биметаллических наночастиц (НЧ) в значительной степени определяет его активность и стабильность [15–18]. Кроме того, катализатор, содержащий биметаллические наночастицы, может обладать повышенной стабильностью за счет более прочной связи НЧ с носителем. Таким образом, для биметаллических катализаторов все эти факторы оказывают существенное влияние на его функциональные характеристики и должны учитываться при выборе оптимальной стратегии синтеза таких материалов.

На сегодняшний день PtCo/C катализаторы считаются наиболее перспективными материалами для использования в НТЭ за счет сочетания высокой активности в реакции электровосстановления кислорода (РВК) и выдающейся стабильности данных материалов [4, 19, 20]. Высокую прикладную ценность исследований в области получения и модификации PtCo/C катализаторов также определяет использование таких систем компанией Toyota для автомобилей Mirai [21].

Химический состав и структура наночастиц биметаллических катализаторов, а также характер их распределения по поверхности углеродного носителя, определяют их функциональные характеристики. Так, например, повышение степени сплавления металлических компонентов наночастиц катализаторов является важной задачей для получения эффективных PtCo/C катализаторов, поскольку атомы кобальта, не вошедшие в состав наночастиц, растворяются в процес-

се функционирования катализаторов и отравляют полимерную мембрану, что снижает характеристики НТЭ [22]. При этом важно отметить, что в процессе синтеза трудно добиться вхождения атомов Co в состав НЧ, в ряде случаев требуется дополнительная термическая обработка, которая, однако, может приводить к укрупнению частиц и снижению площади поверхности, а значит и активности катализатора. Важно отметить, что получение биметаллических PtCo наночастиц со структурой упорядоченного твердого раствора (интерметаллид) позволяет значительно повысить стабильность материалов по сравнению с материалами со структурой неупорядоченного твердого раствора [22, 24].

Высокотемпературный синтез платиносодержащих электрокатализаторов для низкотемпературных топливных элементов в восстановительной атмосфере обладает целым рядом преимуществ, включая возможность масштабирования технологии синтеза и получения материалов с высокими функциональными характеристиками. Существует несколько подходов к высокотемпературному синтезу биметаллических платиносодержащих катализаторов.

Первый подход заключается в пропитке высокодисперсного углеродного материала прекурсорами платины и легирующего *d*-металла в необходимом соотношении и последующее карбонатическое восстановление этих прекурсоров в инертной атмосфере с добавкой водорода [25–27]. Равномерность получаемого материала в таком случае в значительной степени зависит от свойств углеродного носителя и условий высокотемпературного восстановления.

Другой подход основан на использовании ранее полученного Pt/C катализатора (как правило коммерчески доступного) для его пропитки прекурсором *d*-металла и осаждением этого металла в виде оксида/гидроксида с последующей термической обработкой в инертной атмосфере с небольшой добавкой водорода, в процессе чего происходит “сплавление” платины и легирующего *d*-металла [28, 29]. Очевидно, что в данном случае свойства получаемых биметаллических платиносодержащих катализаторов зависят не только от температуры и условий проведения обработки, но и от микроструктуры исходного Pt/C катализатора.

В литературе представлен ряд исследований влияния температуры обработки и состава атмосферы на свойства PtM/C катализаторов, полученных таким методом. В то же время отсутствуют систематические исследования влияния микроструктуры (под микроструктурой понимается средний размер и размерное распределение наночастиц платины, а также равномерность распределения наночастиц платины по поверхности углеродного носителя) Pt/C материалов, используемых в качестве промежуточного компонента для получения биметаллических катализаторов, на структурные характеристики и электрохимическое поведение катализаторов.

Таким образом, целью данной работы было получение ряда PtCo/C катализаторов методом высокотемпературной обработки в восстановительной атмосфере на основе пропитки прекурсорами различных по микроструктуре Pt/C катализаторов, а также сравнительное исследование состава, структуры и каталитической активности в реакции электровосстановления кислорода полученных PtCo/C катализаторов.

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Осаждение $\text{Co(OH)}_2$ на Pt/C катализатор

Поиск путей получения высокоэффективных катализаторов, содержащих неблагородный компонент, является важной и перспективной областью водородной энергетики. Предложенный метод синтеза позволяет получить катализаторы, обладающие высокой активностью в РВК и стабильностью.

Навеску Pt/C катализатора (содержание Pt около 20 мас. %) помещали в химический стакан и добавляли 60 мл этиленгликоля (чда, АО «ЭКОС-1», Москва, РФ), отмеренные цилиндром. В полученную суспензию помещали магнитный якорь и ставили перемешиваться на магнитную мешалку на 2–3 минуты, после чего данную смесь диспергировали ультразвуком 2 раза в течение 2 мин (Ultrasonic Processor FS-1200N) и возвращали на магнитную мешалку. Рассчитанный объем прекурсора кобальта  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  в виде водного раствора с концентрацией 0.071 М добавляли с помощью дозатора и оставляли при перемешивании на 1 час [30]. После этого вносили рассчитанное количество  $\text{NaOH}$ , растворенное в 20 мл бидистиллированной воды, для получения гидроксида кобальта. Смесь снова оставляли при перемешивании на магнитной мешалке на 1 час. Суспензию катализатора фильтро-

вали через воронку Бюхнера с использованием фильтровальной бумаги «синяя лента» и последовательно промывали водой, этиловым спиртом и водой не менее трех раз. Затем полученный катализатор на фильтре сушили при 80 °C в вакуумном сушильном шкафу. После сушки катализатор отделяли от фильтра и полученный порошок подвергали термической обработке в трубчатой печи при температуре 700 °C в течение 1 часа в токе инертного газа с содержанием водорода 5 %. Для получения биметаллических катализаторов использовали два типа Pt/C катализаторов: (1) с равномерным распределением наночастиц по поверхности углеродного носителя Vulcan XC-72 (рис. 1а), обозначенный как Pt/C-р, который характеризуется высокой величиной активной площади 80  $\text{m}^2/\text{г}$  (Pt), и (2) неравномерным распределением наночастиц, с высокой долей агломератов (рис. 1б) и величиной площади электрохимически активной поверхности (ЭХАП) 25  $\text{m}^2/\text{г}$  (Pt), обозначенный как Pt/C-н. После термической обработки при 700 °C образцы маркировали соответственно как PtCo/C-р и PtCo/C-н в зависимости от типа используемого Pt/C материала.

### 2.2. Исследование состава и структуры PtCo/C катализаторов

Фазовый состав полученных материалов изучали на дифрактометре ARL X'TRA (CuK $\alpha$ ), в интервале углов 20 от 15° до 55° с шагом 0.04° и скоростью регистрации 2° в минуту. Элементный состав материалов изучали методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФЛА) на спектрометре РФС-001 с полным внутренним отражением. Средний размер, форма и пространственное распределение наночастиц по поверхности углеродного носителя были изучены с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEM-F200 (JEOL). Для измерений в ПЭМ использовался держатель образцов из бериллия JEOL EM-01361RSTHB с двойным наклоном. Изображения в ПЭМ были получены при увеличении от 30000× до 600000×.

### 2.3. Изучение электрохимических характеристик

Электрохимическое поведение электрокатализаторов исследовали с использованием трехэлектродной ячейки и вращающегося дискового электрода (ВДЭ) в электролите 0.1 М  $\text{HClO}_4$  [31]. Катализатор наносили на торец стеклографитового электрода с использованием катализитических чернил. Для приготовления чер-

нил к 0.006 г исследуемого материала добавляли 40 мкл 5%-ного раствора Nafion и 2000 мкл изопропилового спирта. Полученную суспензию диспергировали с помощью ультразвуковой обработки в течение 30 минут для достижения однородной дисперсии. На торец стеклографитового дискового электрода наносили аликвоту рассчитанного объема, обеспечивая загрузку Pt на электроде в диапазоне 19–21 мкг/см<sup>2</sup>.

Стандартизацию поверхности электрода и регистрацию циклических вольтамперограмм (ЦВА) для определения площади электрохимически активной поверхности (ЭХАП) проводили в соответствии с методикой, описанной в [31]. Активность синтезированных катализаторов в реакции электровосстановления кислорода (РВК) оценивали методом вольтамперометрии с линейной разверткой потенциалов на вращающемся дисковом электроде. Кинетический ток рассчитывали при потенциале 0.90 В с использованием уравнения Коутецкого–Левича [31]. Все потенциалы в работе приведены относительно обратимого водородного электрода (ОВЭ).

### 3. Результаты и обсуждение

Для легирования кобальтом Pt/C катализаторы были выбраны два материала с различ-

ной микроструктурой: (1) Pt/C-р с равномерным распределением наночастиц по поверхности углеродного носителя (рис. 1) и средним размером кристаллитов около 2.3 нм (табл. 1); (2) Pt/C-н материал с неравномерным распределением наночастиц, выраженной агломерацией и несколько большим средним размером кристаллитов по данным рентгенофазового анализа (РФА) – 3.0 нм.

Отметим, что несмотря на одинаковое количество прекурсоров кобальта (из расчета атомного соотношения Pt-Co – 1:1), осажденные на Pt/C материалы, состав полученных PtCo/C материалов различается в зависимости от методики синтеза. При осаждении прекурсоров кобальта на Pt/C-р материал с использованием щелочи состав полученного катализатора составляет Pt<sub>1</sub>Co<sub>1</sub>, что соответствует атомному соотношению закладываемых в процессе синтеза прекурсоров. С другой стороны, для PtCo/C-н катализатора, полученного на основе Pt/C-н материала, состав соответствует формуле PtCo<sub>1.6</sub>. Данный факт означает, что катализатор содержит меньшую долю Pt, по сравнению с материалом PtCo/C-р, что может быть связано с особенностями синтеза и потерями металлов в процессе синтеза. Отметим, что массовая доля платины

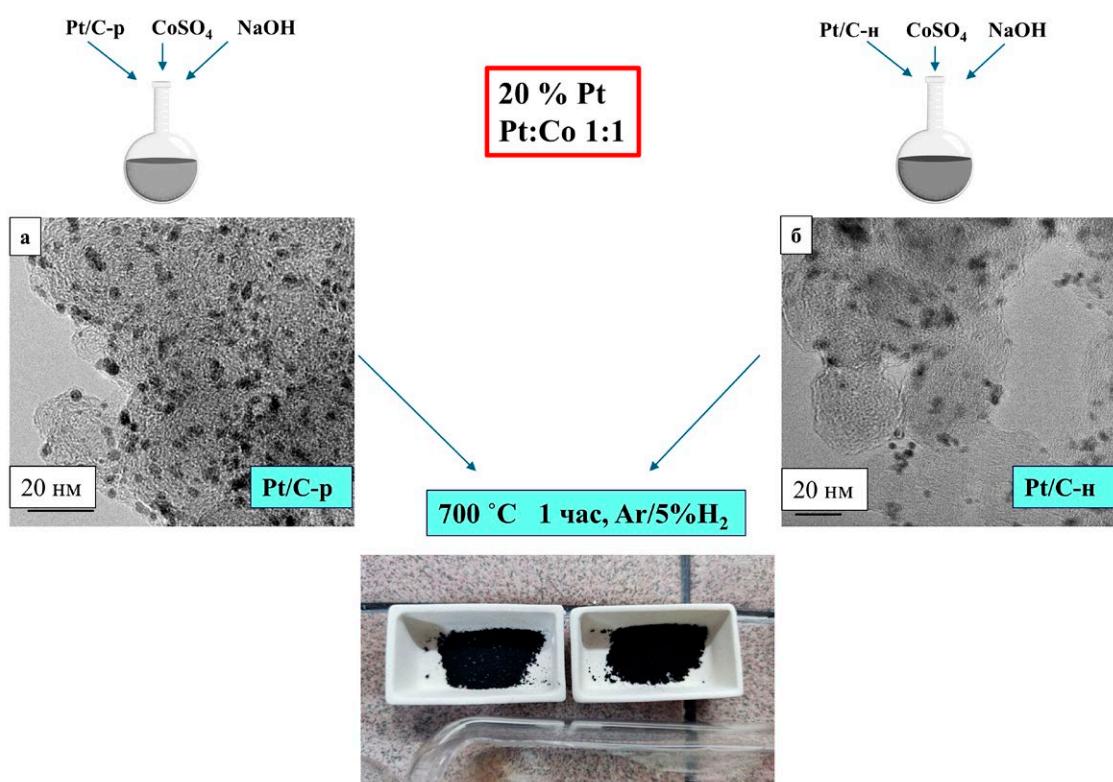


Рис. 1. Схема синтеза PtCo/C катализаторов на различных Pt/C

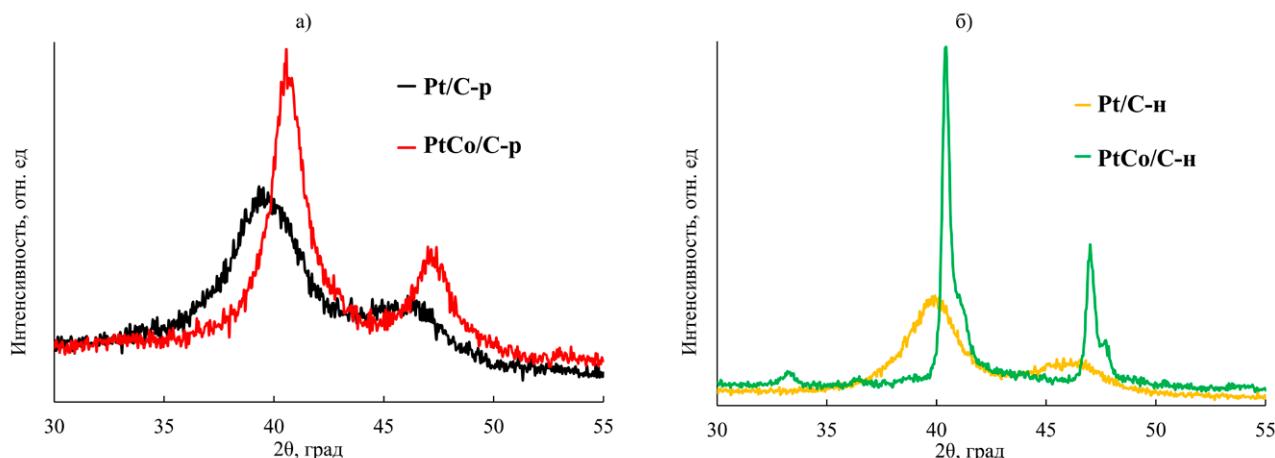
**Таблица 1.** Структурные характеристики PtCo/C катализаторов, полученных на основе различных Pt/C материалов

Материал	$\omega(\text{Pt})$ , %	Состав РФЛА	Параметр кристаллической решетки, Å	Состав РФА	Средний размер кристаллитов, нм
Pt/C-р	21±1	Pt	3.94(6)	–	2.3±0.2
	18±1	Pt	3.93(3)	–	3.0±0.2
PtCo/C-р	18±1	PtCo <sub>1.0</sub>	3.85(3)	PtCo <sub>0.23</sub>	4.5±0.2
	14±1	PtCo <sub>1.6</sub>	3.86(6) 3.81(1)	PtCo <sub>0.18</sub> PtCo <sub>0.44</sub>	30±3 10±1

для материала PtCo/C-н составила 14 % (табл. 1), что ниже ожидаемого из загрузки прекурсоров и подтверждает предположение о потерях металлов в процессе синтеза.

При осаждении кобальта на Pt/C основу с последующей термической обработкой материала в инертной атмосфере могут происходить как процессы формирования биметаллических PtCo наночастиц за счет диффузии атомов, так и процесс укрупнения металлических наночастиц за счет агломерации. Показано, что после осаждения прекурсоров кобальта на Pt/C материалы с последующей термической обработкой формируются биметаллические наночастицы, поскольку по данным РФА происходит сдвиг отражений, соответствующих гранецентрированной структуре платины, в область больших значений углов  $2\theta$  (рис. 2а). Данный факт свидетельствует об уменьшении параметра кристаллической решетки (табл. 1) за счет формирования твердого раствора платины с кобальтом. При этом величина сдвига максимума отражения и особенности фазового состава получаемых PtCo/C катализаторов зависят от типа используемо-

го Pt/C материала. Для PtCo/C-р катализатора, полученного осаждением прекурсора кобальта на Pt/C материале с равномерным распределением наночастиц, наблюдается формирование фазы PtCo с параметром решетки 3.853 Å. Для PtCo/C-н катализатора по данным РФА можно выделить две отдельные металлические фазы (табл. 1). По величине параметра кристаллической решетки можно оценить состав твердого раствора Pt-Co (закон Вегарда), который для материала PtCo/C-н составил PtCo<sub>0.23</sub>, а для материала PtCo/C-н составляет PtCo<sub>0.18</sub> и PtCo<sub>0.44</sub> соответственно для фаз с меньшим и большим содержанием кобальта. Отметим расхождение в составе твердых растворов для биметаллических фаз в полученных PtCo/C материалах и составам катализаторов по данным элементного анализа, что может быть связано с неполным вхождением кобальта в состав твердого раствора с платиной. Кобальт, не вошедший в состав PtCo, может находиться в материале в виде отдельной фазы, которая предположительно представляется собой рентгеноаморфный оксид или гидроксид кобальта. Анализ среднего размера кристал-

**Рис. 2.** Рентгеновские дифрактограммы Pt/C материалов и PtCo/C катализаторов, полученных на их основе с равномерным (а) и неравномерным (б) распределением наночастиц по поверхности углеродного носителя

литов полученных биметаллических катализаторов, выполненный по формуле Шеррера [31], показал, что термическая обработка приводит к различным изменениям в структуре материалов. Для материала PtCo/C-р, синтезированного на основе равномерного Pt/C-р, наблюдается незначительное увеличение размера наночастиц до 4.5 нм. В то же время для материала PtCo/C-н характерно более существенное укрупнение наночастиц, размер которых достигает 10–30 нм.

Кроме того, после термической обработки на рентгенограмме материала PtCo/C-н появляются дополнительные отражения. Наличие таких отражений может свидетельствовать о формировании интерметаллических соединений Pt-Co. Однако из-за низкой интенсивности этих отражений их точная идентификация затруднена.

По данным просвечивающей электронной микроскопии (рис. 3) катализатор PtCo/C-р характеризуется равномерным распределением металлических наночастиц по поверхности углеродного носителя. При этом по результатам ПЭМ установлено, что в состав полученного материала входят наночастицы различного размера от 2 до 8 нм (рис. 3б), а также крупные агломераты наночастиц размером до 30 нм (рис. 3б). На основе анализа изображений просвечивающей электронной микроскопии была построена гистограмма размерного распределения наночастиц (рис. 3в) и рассчитан средний размер металлических наночастиц, который составил 4.7 нм. Гистограмма размерного распределения наночастиц характеризуется широкой дисперсией, что показывает наличие как мелких (около 2 нм), так и крупных наночастиц более 8 нм. Важно отметить, что крупные агломераты наночастиц не

были учтены при расчетах среднего размера наночастиц и построении гистограммы вследствие методических сложностей такого учета. Установлено, что для материала PtCo/C-р средний размер наночастиц по данным ПЭМ практически совпадает со средним размером кристаллитов PtCo, рассчитанного с использованием формулы Шеррера (табл. 1). Таким образом, биметаллический катализатор, полученный на основе равномерного Pt/C материала, с одной стороны, характеризуется равномерным распределением наночастиц по поверхности углеродного носителя, с другой стороны, характеризуется очень широким размерным распределением наночастиц и наличием агломератов, что является негативным фактором при получении высокоеффективного катализатора. По-видимому, для получения катализатора с более узким размерным распределением, особенности нанесения прекурсоров кобальта и условия термической обработки требуют дальнейшей оптимизации.

Оценка величины ЭХАП по данным циклической вольтамперометрии (рис. 4) показала значительные различия для PtCo/C материалов, полученных на основе Pt/C материалов с разной равномерностью. Величина ЭХАП для материала PtCo/C-р составила около  $50 \text{ м}^2/\text{г}$  (Pt) (табл. 2), что несколько ниже по сравнению с коммерческим Pt/C аналогом с величиной ЭХАП  $84 \text{ м}^2/\text{г}$  (Pt), и, возможно, может быть связано с более крупным размером и широким размерным распределением наночастиц для полученного биметаллического материала. Отметим, что при осаждении кобальта с последующей термической обработкой величина ЭХАП для материала PtCo/C-р снизилась по сравнению с Pt/C-р (табл. 2), что мо-

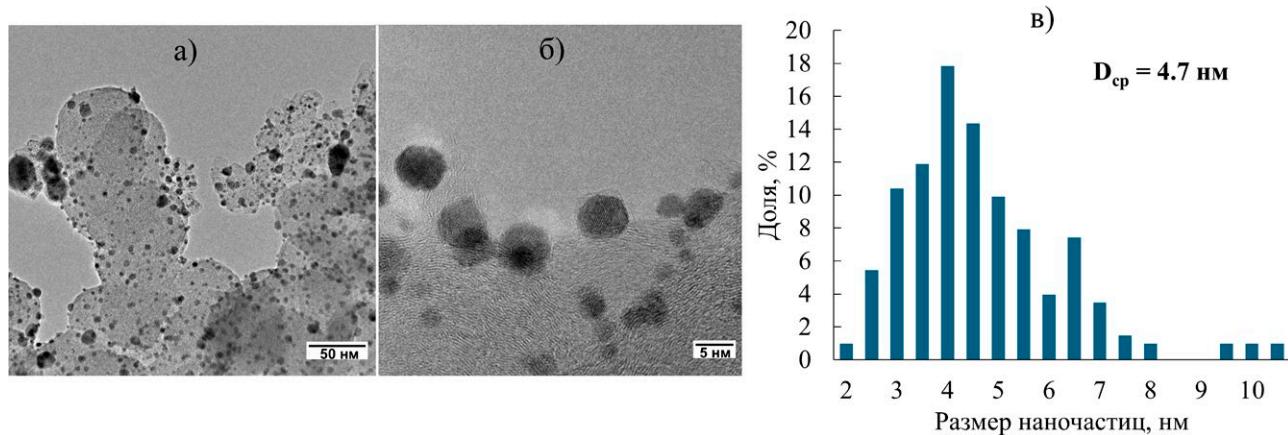
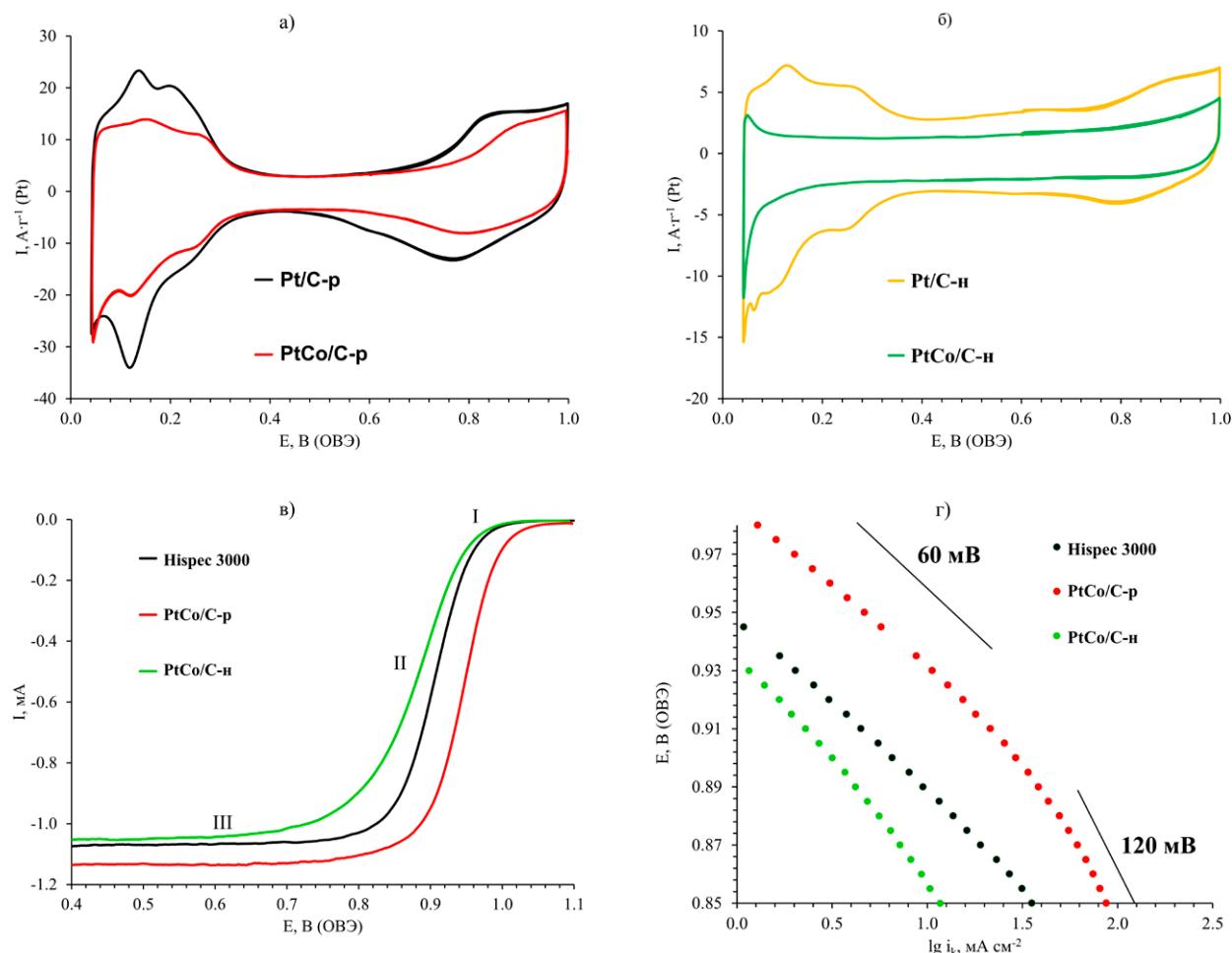


Рис. 3. ПЭМ-изображения (а, б) и гистограмма размерного распределения наночастиц (в) PtCo/C-р катализатора, полученного на основе Pt/C катализатора с равномерным распределением наночастиц



**Рис. 4.** Циклические вольтамперограммы PtCo/C катализаторов, полученных с использованием различных Pt/C катализаторов (а, б); вольтамперограммы с линейной разверткой потенциалов (в), и зависимость Тафеля для полученных PtCo/C катализаторов, а также коммерческого Pt/C катализатора Hispec 3000 (г)

**Таблица 2.** Электрохимические характеристики полученных PtCo/C катализаторов, а также коммерческого Pt/C катализатора Hispec 3000

Материал	ЭХАП, м <sup>2</sup> /г (Pt)	$I_k$ , мА	$I_m$ , А/г (Pt) (при 0.90 В)	$I_s$ , А/м <sup>2</sup> (Pt) (при 0.90 В)	$E_{1/2}$ , В
PtCo/C-p	50±5	5.0±0.5	1215±122	24.3±2.4	0.94±0.01
PtCo/C-h	< 3	0.6±0.1	192±19	—	0.88±0.01
Hispec 3000	84±8	1.2±0.1	254±25	3.0±0.3	0.91±0.01

ожет быть связано с увеличением размера частиц в процессе термической обработки при синтезе биметаллического катализатора. Величина ЭХАП для материала PtCo/C-h, полученного на основе неравномерного Pt/C материала, значительно ниже по сравнению с материалом PtCo/C-p, что может быть связано как с меньшей величиной ЭХАП Pt/C-h материала, на основе которого он был получен, так и с большим размером металлических частиц для материала PtCo/C-h (табл. 1).

Кривые на рис. 4 имеют типичный вид для платиносодержащих катализаторов. От потенциала 1.10 В до потенциала выхода около 0.98 В для материалов PtCo/C-h и Pt/C и около 1.00 В для материала PtCo/C-p соответственно (рис. 4в область I, 4г) наблюдается нулевой ток – реакция электровосстановления кислорода не протекает. При достижении потенциала выхода наблюдается увеличение катодного тока при уменьшении потенциала. Данная область не зависит от ско-

рости вращения электрода, и скорость реакции определяется только замедленной кинетикой РВК. При дальнейшем уменьшении потенциала начинает вносить свой вклад диффузия кислорода к поверхности электрода, и данная область (рис. 4в область II) характеризуется смешанным диффузионно-кинетическим контролем. При дальнейшем уменьшении потенциала величина катодного тока не зависит от значения потенциала, поскольку лимитируется только скоростью подвода кислорода к поверхности электрода – область предельного диффузионного тока (рис. 4в область III). Каталитическая активность при потенциале 0.90 В, нормированная как на массу Pt ( $I_m$ ), так и на величину ЭХАП ( $I_s$ ), материала PtCo/C-р, равная 1215 А/г (Pt) и 24.3 А/м<sup>2</sup> (Pt) соответственно, намного превосходит коммерческий Pt/C аналог с активностью 254 А/г (Pt) несмотря на меньшую величину ЭХАП (табл. 2). При этом показано, что материал PtCo/C-н обладает значительно меньшей величиной активности по сравнению с коммерческим Pt/C аналогом, что может быть связано с крайне низкой величиной ЭХАП для данного неравномерного материала. По величине потенциала полуволны  $E_{1/2}$  изученные образцы можно расположить в ряду по увеличению активности следующим образом: PtCo/C-н – Pt/C – PtCo/C-р. Величина потенциала полуволны является показателем активности наравне со значением кинетических токов. Таким образом, еще раз подтверждается, что катализатор PtCo/C-р, обладающий наибольшим потенциалом полуволны 0.94 В из всех приведенных, проявляет наибольшую активностью в РВК.

#### 4. Выводы

По результатам проведенного исследования на модельных Pt/C образцах с равномерным и неравномерным распределением наночастиц платины по поверхности углеродного носителя было показано определяющее влияние этого фактора на характеристики получаемых на их основе биметаллических PtCo/C катализаторов. Установлено, что PtCo/C катализатор, полученный на основе Pt/C материала с равномерным распределением наночастиц платины, характеризуется большей величиной площади электрохимически активной поверхности, а также более чем в 6 раз превышает массовую активность катализатора, полученного на основе Pt/C материала с неравномерным распределением наночастиц. Кроме того, величина массовой активности наиболее активного PtCo/C катализатора превы-

шает аналогичный показатель для коммерческого Pt/C катализатора в 4.8 раза.

Таким образом, данный метод высокотемпературного синтеза PtCo/C электрокатализаторов продемонстрировал свою перспективность и масштабируемость для получения высокоеффективных биметаллических катализаторов. В рамках дальнейшего развития данного подхода планируется синтез материалов с различным содержанием металлов на углеродном носителе и тестирование полученных материалов в составе мембранные-электродных блоков низкотемпературных топливных элементов.

#### Заявленный вклад авторов

Невельская А. К. – проведение исследования, проведение литературного обзора, интерпретация полученных данных, написание текста. Беленов С. В. – научное руководство, концепция исследования, написание текста, итоговые выводы. Гаврилова А. А. – проведение исследования. Паперж К. О. – проведение исследования. Лянгузов Н. В. – проведение исследования. Панков И. В. – исследование материалов методом просвечивающей электронной микроскопии. Коханов А. А. – проведение исследования.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

#### Список литературы

1. Stamenkovic V. R., Mun B. S., Arenz M.,... Markovic, N. M. Trends in electrocatalysis on extended and nanoscale Pt-bimetallic alloy surfaces. *Nature Materials*. 2007;6: 241–247. <https://doi.org/10.1038/nmat1840>
2. Ярославцев А. Б., Добровольский Ю. А., Шаглаева Н. С., Фролова Л. А., Герасимова Е. В., Сангинов Е. А. Наноструктурированные материалы для низкотемпературных топливных элементов. *Успехи химии*. 2012;81: 191–220. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17392021>
3. Peng Z, Yang H. Designer platinum nanoparticles: control of shape, composition in alloy, nanostructure and electrocatalytic property. *Nano Today*. 2009;4: 143–164. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2008.10.010>
4. Xu G., Yang L., Li J., Liu C., Xing W., Zhu J. Strategies for improving stability of Pt-based catalysts for oxygen reduction reaction. *Advanced Sensor and Energy Materials*. 2023;2: 100058. <https://doi.org/10.1016/j.asems.2023.100058>
5. Xiao F., Wang Y., Wu Z., ... Shao M. Recent advances in electrocatalysts for proton exchange membrane fuel cells and alkaline membrane fuel cells. *Advanced Materials*. 2021;33: 2006292. <https://doi.org/10.1002/adma.202006292>

6. Wu D., Shen X., Pan Y., Yao L., Peng Z. Platinum alloy catalysts for oxygen reduction reaction: advances, challenges and perspectives. *ChemNanoMat.* 2020;6: 32–41. <https://doi.org/10.1002/cnma.201900319>
7. Wang X. X., Swihart M. T., Wu G. Achievements, challenges and perspectives on cathode catalysts in proton exchange membrane fuel cells for transportation. *Nature Catalysis.* 2019;2: 578–589. <https://doi.org/10.1038/s41929-019-0304-9>
8. Glüsen A., Dionigi F., Paciok P.,... Stolten D. Dealloyed PtNi-core–shell nanocatalysts enable significant lowering of Pt electrode content in direct methanol fuel cells. *ACS Catalysis.* 2019;9: 3764–3772. <https://doi.org/10.1021/acscatal.8b04883>
9. Jeyabharathi C., Hodnik N., Baldizzone C., ... Mayrhofer K. J. J. Time evolution of the stability and oxygen reduction reaction activity of PtCu/C nanoparticles. *ChemCatChem.* 2013;5: 2627–2635. <https://doi.org/10.1002/cctc.201300287>
10. Koh S., Strasser P. Electrocatalysis on bimetallic surfaces: modifying catalytic reactivity for oxygen reduction by voltammetric surface dealloying. *Journal of the American Chemical Society.* 2007;129: 12624–12625. <https://doi.org/10.1021/ja0742784>
11. Lopez-Haro M., Dubau L., Guétaz L., ... Maillard F. Atomic-scale structure and composition of Pt<sub>3</sub>Co/C nanocrystallites during real PEMFC operation: a STEM–EELS study. *Applied Catalysis B: Environmental.* 2014;152–153: 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.01.034>
12. Gan L., Heggen M., O’Malley R., Theobald B., Strasser P. Understanding and controlling nanoporosity formation for improving the stability of bimetallic fuel cell catalysts. *Nano Letters.* 2013;13: 1131–1138. <https://doi.org/10.1021/nl304488q>
13. Lyu X., Jia Y., Mao X.,... Yao X. Gradient-concentration design of stable core–shell nanostructure for acidic oxygen reduction electrocatalysis. *Advanced Materials.* 2020;32: 2003493. <https://doi.org/10.1002/adma.202003493>
14. Gan L., Yu R., Luo J., Cheng Z., Zhu J. Lattice strain distributions in individual dealloyed Pt–Fe catalyst nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry Letters.* 2012;3: 934–938. <https://doi.org/10.1021/jz300192b>
15. Paperzh K. O., Alekseenko A. A., Safronenko O. A., Volochayev V. A., Pankov I. V., Guterman V. E. Stability and activity of platinum nanoparticles in the oxygen electroreduction reaction: is size or ordering of primary importance? 2021: 593–606. <https://doi.org/10.3762/bxiv.2021.27.v1>
16. Paperzh K. O., Pavlets A. S., Alekseenko A. A., Pankov I. V., Guterman V. E. The integrated study of the morphology and the electrochemical behavior of Pt-based ORR electrocatalysts during the stress testing. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2023;48: 22401–22414. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.079>
17. Paperzh K., Moguchikh E., Pankov I., Belenov S., Alekseenko A. Effect of AST atmosphere on Pt/C electrocatalyst degradation. *Inorganics (Basel).* 2023;11: 237. <https://doi.org/10.3390/inorganics11060237>
18. Paperzh K., Alekseenko A., Danilenko M., Pankov I., Guterman V. E. Advanced methods of controlling the morphology, activity, and durability of Pt/C electrocatalysts. *ACS Applied Energy Materials.* 2022;5: 9530–9541. <https://doi.org/10.1021/acsmaem.2c01151>
19. Wen Y.-H., Zhang L.-H., Wang J.-B., Huang R. Atomic-scale insights into thermal stability of Pt<sub>3</sub>Co nanoparticles: a comparison between disordered alloy and ordered intermetallics. *Journal of Alloys and Compounds.* 2019;776: 629–635. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.274>
20. Jung W. S., Popov B. N. Effect of pretreatment on durability of fct-structured Pt-based alloy catalyst for the oxygen reduction reaction under operating conditions in polymer electrolyte membrane fuel cells. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering.* 2017;5: 9809–9817. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01728>
21. Konno N., Mizuno S., Nakaji H., Ishikawa Y. Development of compact and high-performance fuel cell stack. *SAE International Journal of Alternative Powertrains.* 2015;4: 2015-01–1175. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1175>
22. Yan W., Sun P., Luo C., .... Du F. PtCo-based nanocatalyst for oxygen reduction reaction: Recent highlights on synthesis strategy and catalytic mechanism. *Chinese Journal of Chemical Engineering.* 2023;53: 101–123. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2022.03.024>
23. Tong L., Fan L., Liang H.-W. Platinum intermetallic nanoparticle cathode catalysts for proton-exchange-membrane fuel cells: Synthesis and ordering effect. *Current Opinion in Electrochemistry.* 2023;39: 101281. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2023.101281>
24. Liu X., Liang J., Li Q. Design principle and synthetic approach of intermetallic Pt–M alloy oxygen reduction catalysts for fuel cells. *Chinese Journal of Catalysis.* 2023;45: 17–26. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(22\)64165-2](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(22)64165-2)
25. Yang B., Yu X., Hou J., Xiang Z. Secondary reduction strategy synthesis of Pt–Co nanoparticle catalysts towards boosting the activity of proton exchange membrane fuel cells. *Particuology.* 2023;79: 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2022.11.010>
26. Wan K., Wang J., Zhang J., .... Zhang C. Ligand carbonization in-situ derived ultrathin carbon shells enable high-temperature confinement synthesis of PtCo alloy catalysts for high-efficiency fuel cells. *Chemical Engineering Journal.* 2024;482: 149060. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149060>
27. Lima F. H. B., de Castro J. F. R., Santos L. G. R. A., Ticianelli E. A. Electrocatalysis of oxygen reduction on carbon-supported Pt–Co nanoparticles with low Pt content. *Journal of Power Sources.* 2009;190: 293–300. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.12.128>
28. Mai Y., XIE X., Wang Z., Yan C., Liu G. Effect of heat treatment temperature on the Pt<sub>3</sub>Co binary metal catalysts for oxygen reduced reaction and DFT calculations. *Journal of Fuel Chemistry and Technology.* 2022;50: 114–121. [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(21\)60099-3](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(21)60099-3)
29. Koh S., Hahn N., Yu C., Strasser P. Effects of composition and annealing conditions on catalytic activities of dealloyed Pt–Cu nanoparticle electrocatalysts for PEMFC. *Journal of The Electrochemical Society.* 2008;155: B1281. <https://doi.org/10.1149/1.2988741>
30. Belenov S., Mauer D., Moguchikh E...Alekseenko A. New approach to synthesizing cathode PtCo/C catalysts for low-temperature fuel cells. *Nanomaterials.* 2024;14: 856. <https://doi.org/10.3390/nano14100856>

31. Belenov S., Nevelskaya A., Nikulin A., Tolstunov M. The effect of pretreatment on a PtCu/C catalyst's structure and functional characteristics. *International Journal of Molecules*. 2023;24: 2177. <https://doi.org/10.3390/ijms24032177>

## Информация об авторах

*Невельская Алина Кирилловна*, к. х. н., н. с. кафедры электрохимии, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация); м. н. с. Федерального исследовательского центра Южный научный центр Российской академии наук" (ЮНЦ РАН) (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-5799-9925>  
alina\_nevelskaya@mail.ru

*Беленов Сергей Валерьевич*, к. х. н., в. н. с. кафедры электрохимии, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-2980-7089>  
serg1986chem@mail.ru

*Гаврилова Анна Александровна*, студентка, стажер-исследователь, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0006-7596-6821>  
ganna2800@mail.ru

*Паперж Кирилл Олегович*, м. н. с. кафедры электрохимии, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-4878-9728>  
paperzh@sfedu.ru

*Ляңгузов Николай Владимирович*, к. х. н., доцент кафедры «Нанотехнология», Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-9802-9335>  
nvlyanguzov@sfedu.ru

*Панков Илья Владимирович*, к. х. н., ведущий инженер центра коллективного пользования «Высокоразрешенная электронная микроскопия».

<https://orcid.org/0000-0001-5302-4792>  
ipankov@sfedu.ru

*Коханов Андрей Александрович*, студент, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0003-6546-0710>  
akokhanov@sfedu.ru

*Поступила в редакцию 06.02.2025; одобрена после рецензирования 11.03.2025; принята к публикации 17.03.2025; опубликована онлайн 25.12.2025.*