

ПОЛУЧЕНИЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО СПЛАВА FeNiCoMnW КАК ЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРА ВЫДЕЛЕНИЯ КИСЛОРОДА

А.В. Шунайлов[✉], Ю.А. Шестеркин, Е.А. Корина, Е.А. Трофимов
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия
[✉]andrey_shunilov@mail.ru

Аннотация. Одной из ключевых задач современной электрохимии является поиск (в интересах «зелёной» энергетики) эффективных, стабильных и экономичных электрокатализаторов для разложения воды, способных заменить дорогостоящие катализаторы на основе платины, иридия и рутения. Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) на основе металлов с переменной валентностью представляют собой перспективный новый класс катализаторов для реакций разложения воды в общем и реакции выделения кислорода в частности. В настоящей работе исследуются свойства гальванически полученных высокоэнтропийных сплавов как нового класса каталитических материалов из неблагородных металлов для процесса выделения кислорода. В ходе гальванического осаждения на медную подложку синтезированы сплавы на основе Fe, Co, Ni, Mn и W. Основу матрицы составляют Fe, Co, Ni, являющиеся известными катализаторами выделения кислорода, стабильными в долговременных условиях.

Известно, что марганец увеличивает электропроводность катализатора, вступая в синергию с сплавами на основе кобальта, понижая энергию активации реакции. Вольфрам так же понижает энергетический барьер реакции и значительно увеличивает электрохимическую стабильность сплавов в условиях анодной поляризации. Введение вольфрама в сплав затруднено прямыми методами, но он способен гальванически соосаждаться вместе с металлами группы железа. Электроосаждение так же позволяет получать аморфные сплавы, каталитическая способность которых выше, чем у кристаллических.

Комплекс электрокаталитических характеристик (потенциалы, перенапряжения выделения кислорода, кинетические параметры) изучен с использованием вольтамперометрии с линейной развёрткой потенциала и импедансной спектроскопии. Морфология, элементный состав и фазовая структура наиболее активного покрытия детально проанализированы методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с энергодисперсионным анализом (ЭДС) и методом рентгенофазового анализа (РФА). Результаты подтверждают высокие электрокаталитические свойства гальванически полученных ВЭС-систем, содержащих вольфрам и марганец, в качестве электрокатализаторов для разложения воды.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, вольтамперометрия с линейной развёрткой потенциала, электрохимическая импедансная спектроскопия, электрокатализ

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-13-20018), <https://rscf.ru/project/24-13-20018/>

Для цитирования: Получение гальванического сплава FeNiCoMnW как электрокатализатора выделения кислорода / А.В. Шунайлов, Ю.А. Шестеркин, Е.А. Корина, Е.А. Трофимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2026. Т. 18, № 3. С. 177–185. DOI: 10.14529/chem260308

PRODUCTION OF GALVANIC ALLOY FeNiCoMnW AS AN ELECTROCATALYST FOR OXYGEN RELEASE

A.V. Shunaylov✉, Y.A. Shesterkin, E.A. Korina, E.A. Trofimov

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

✉ andrey_shunilov@mail.ru

Abstract. One of the key challenges in modern electrochemistry is the search (for the benefit of green energy) for efficient, stable, and cost-effective electrocatalysts for water splitting, capable of replacing expensive platinum, iridium, and ruthenium-based catalysts. High-entropy alloys (HEAs) based on transition metals represent a promising new class of catalysts for water splitting reactions in general and oxygen evolution reactions in particular. This study investigates the properties of electroplated high-entropy alloys as a new class of base metal catalytic materials for oxygen evolution. Alloys based on Fe, Co, Ni, Mn, and W were synthesized using electroplating on a copper substrate. The matrix is composed of Fe, Co, and Ni, which are known oxygen evolution catalysts and are stable under long-term conditions.

Manganese is known to increase the electrical conductivity of the catalyst, synergizing with cobalt-based alloys to lower the activation energy of the reaction. Tungsten also lowers the reaction energy barrier and significantly increases the electrochemical stability of alloys under anodic polarization conditions. Direct introduction of tungsten into the alloy is difficult, but it can be galvanically co-deposited with iron-group metals. Electrodeposition also allows the production of amorphous alloys with higher catalytic activity than crystalline alloys.

The electrocatalytic characteristics (potentials, oxygen evolution overpotentials, and kinetic parameters) were studied using linear potential sweep voltammetry and impedance spectroscopy. The morphology, elemental composition, and phase structure of the most active coating were analyzed in detail using scanning electron microscopy (SEM) with energy-dispersive analysis (EDS) and X-ray diffraction (РФА). The results confirm the high electrocatalytic properties of galvanically obtained WES systems containing tungsten and manganese as electrocatalysts for water decomposition.

Keywords: high-entropy alloys, linear sweep voltammetry, electrochemical impedance spectroscopy, electrocatalysis

Acknowledgments. This work was financially supported by the Russian Science Foundation (grant no. 24-13-20018), <https://rscf.ru/en/project/24-13-20018/>

For citation: Shunaylov A.V., Shesterkin Y.A., Korina E.A., Trofimov E.A. Production of galvanic alloy FeNiCoMnW as an electrocatalyst for oxygen release. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2026;18(3):177–185. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem260308

Введение

Электролиз воды часто рассматривается как ключевая технология получения «зелёного» водорода, однако общая эффективность процесса ограничивается кинетикой анодной реакции выделения кислорода (РВК) [1]. РВК является многоэлектронной реакцией с формированием связи О–О и, как правило, требует значительных перенапряжений даже на активных оксидных/оксигидроксидных материалах [2], что стимулирует поиск недорогих, высокоактивных и стабильных электрокатализаторов на основе 3d-металлов [3, 4]. Для практического применения катализатор должен сочетать высокую активность при характерных для промышленности плотностях тока, химическую и механическую устойчивость в щелочной среде, развитую поверхность и быстрый перенос заряда и массы, возможность масштабирования синтеза с контролем состава и морфологии.

Высокоэнтروпийные сплавы (ВЭС) содержат ≥ 5 основных элементов, обычно в диапазоне 5–35 ат.% каждого, и формируют твёрдые растворы замещения [5]. Для электрокатализа это важно, поскольку разнообразие локальных конфигураций атомов создаёт широкий спектр активных центров и позволяет тонко настраивать энергии адсорбции ключевых интермедиатов РВК, потенциально обходя ограничения «однокомпонентных» материалов. Дополнительным преимуществом ВЭС является возможность целенаправленно вводить элементы, стабилизирующие струк-

туру и электронные состояния поверхности при анодной поляризации [6]. Для Ni/Fe/Co-содержащих систем, изменение морфологии и состава при помощи добавок часто приводит к формированию активных оксигидроксидных фаз, близких по природе к Ni(Me)OОН, которые могут демонстрировать различные механизмы РВК в зависимости от состава материала катализатора и приложенного потенциала [7].

Выбор элементов исследуемой системы Ni–Fe–Co–Mn–W мотивирован комплементарностью функций: Ni и Co – базовые каталитические центры, способные формировать активные оксигидроксиды при анодной поляризации и обеспечивать адсорбцию кислородсодержащих интермедиатов [8–10]. Fe встраивается в Ni/Co-матрицу и часто усиливает РВК-активность [11], меняя электронную структуру поверхности и влияя на кинетику элементарных стадий [9]. Mn является модификатором, так как имеет множество степеней окисления и по известным данным вступает в синергию с Co, увеличивая стабильность и активность [12, 13]. W – высоковалентный модификатор, который за счет большей электроотрицательности может смещать полярность связей никель-кислород и ускорять реакцию, при этом значительно увеличивать стабильность сплава [14]. Отдельно важно, что W трудно вводить в ВЭС традиционными высокотемпературными методами из-за различия температур плавления и склонности к сегрегации фаз, неравномерности распределения (что требует многократной вакуумной переплавки с перемешиванием [14]), поэтому гальваническое осаждение выглядит технологически более привлекательным за счет дешевизны и простоты [15, 16].

Гальваническое электроосаждение при постоянном токе – масштабируемый и технологически простой подход к получению многокомпонентных покрытий/катализаторов на токопроводящих подложках. На примере близкой по сложности системы NiFeCoMnV показано [17], что гальваническое осаждение в одну стадию позволяет получить равномерное распределение элементов и наноструктурированную морфологию с высокой эффективной электрохимической площадью поверхности, что критично для электрокатализа [16–18]. Для W-содержащих систем важно, что W не осаждается «самостоятельно» из водных растворов, но способен соосаждаться с металлами группы железа [19]. Ранее было показано также, что импульсные режимы могут снижать трещинообразование и повышать долю W в покрытии, однако даже осаждение при постоянном токе применимо при подборе режимов осаждения [20] и позволяет в широких пределах варьировать содержание вольфрама в растворе. Электроосаждение так же позволяет получить аморфные сплавы, каталитическая способность которых выше [21].

Целью данной работы является гальваническое осаждение ВЭС, содержащего марганец и вольфрам, проявляющего высокую активность в РВК. Задачами являются подбор условий электроосаждения ВЭС (плотность тока), а также изучение каталитической активности в РВК в щелочной среде.

Экспериментальная часть

В данной работе были использованы следующие реагенты: сульфат никеля 7-водный, сульфат железа 7-водный, сульфат железа 9-водный, сульфат кобальта 7-водный, хлорид марганца 4-водный, ванадил сульфат 3-водный, борная кислота и цитрат натрия (степень чистоты реактивов – ЧДА).

Электрохимическое модифицирование ВЭС подложки и изучение электрохимических свойств полученных электродов проводили с помощью гальваностата-потенциостата Corrtest CS350M (Corrtest Instruments Co. Ltd., Wuhan, China). Электрохимическую импедансную спектроскопию (ЭИС) проводили в диапазоне частот от 0,01 Гц до 100 кГц при переменном сигнале с амплитудой 10 мВ в потенциостатических условиях. Результаты ЭИС анализировали и проводили моделирование электрохимической цепи с помощью программного обеспечения ZView®. Для электрохимического осаждения гальванических высокоэнтропийных сплавов использовали двух-электродную ячейку с графитовым анодом. Для измерений электрохимических свойств ВЭС использовали трёхэлектродную ячейку. В качестве рабочих электродов использовались образцы с площадью поверхности 0,5 см². В качестве противоиэлектрода и электрода сравнения использовали платиновую пластину (2 см²) и коммерчески доступный электрод Ag/AgCl, насыщенный KCl (Corrtest Instruments Co. Ltd), соответственно. pH электролитов измеряли с помощью pH-метра «Эксперт-001-1-0.1» (Эконикс-Эксперт).

Морфология поверхности и элементный состав ВЭС были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL 6460LV, оснащённого приставкой ЭДС. Рентгенофазовый анализ образцов проводили на порошковом рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV с излучением $\text{CuK}\alpha$ ($1,5405929 \text{ \AA}$) в диапазоне 2θ от 5° до 90° с дискретностью $0,02^\circ$ и скорости сканирования $5^\circ/\text{мин}$.

Платиновые электроды предварительно обрабатывали в смеси концентрированной серной кислоты и 30%-ного раствора H_2O_2 в объёмном соотношении 3:1. Медная подложка подвергалась травлению в соляной кислоте (концентрации 10%) в течение 15 минут с последующим промыванием поверхности дистиллированной водой.

Гальваническое нанесение высокоэнтропийного сплава FeNiCoMnW на медную подложку (площадь $0,5 \text{ см}^2$) проводили при плотностях тока 25, 50, 100, 150, 200 и 300 мА/см^2 в течение 1 часа из электролита (50 мл), состав которого указан в табл. 1, электролит имел pH 6–7.

Таблица 1
Состав электролита для гальванического нанесения
высокоэнтропийного сплава FeNiCoMnW

Компонент	Масса компонента, г/50мл
$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1,4
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,6
$\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,9
$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0,8
$\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,56
H_3BO_3	0,1
$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$	3,0

Модифицированные гальваническим высокоэнтропийным сплавом FeNiCoMnW электроды промывались дистиллированной водой для устранения остатков электролита. Далее каждый образец помещался в 1 М раствор КОН. Перед каждым электрохимическим измерением производили выдержку электродов в растворе КОН в течение 20 минут до достижения равновесного потенциала разомкнутой цепи. Все электрохимические эксперименты повторялись трижды.

Обсуждение результатов

Вольтамперограммы для образцов покрытий на основе сплавов FeNiCoMnW, осажденных при различных плотностях тока, представлены на рис. 1а. Данные свидетельствуют об отсутствии значимых корреляций электрохимических свойств с плотностью тока осаждения.

Согласно результатам вольтамперометрии с линейной развёрткой при 5 мВ/с наименьшее перенапряжение демонстрирует образец, полученный при плотности тока 200 мА/см^2 . Величина перенапряжения в этом случае составляет 269 мВ. Вторым по этому показателю является образец, имеющий перенапряжение 287 мВ и осажденный при плотности тока 150 мА/см^2 . Данные линейной вольтамперометрии предоставлены в табл. 2.

Таблица 2
Электрохимические характеристики гальванически нанесенного высокоэнтропийного сплава FeNiCoMnW
в зависимости от тока осаждения при плотности тока 10 мА/см^2

Образец	Перенапряжение (η), мВ	Наклон Тафеля, мВ/дек
FeNiCoMnW (25 мА/см^2)	387	105
FeNiCoMnW (50 мА/см^2)	351	154
FeNiCoMnW (100 мА/см^2)	432	160
FeNiCoMnW (150 мА/см^2)	287	76
FeNiCoMnW (200 мА/см^2)	269	89
FeNiCoMnW (300 мА/см^2)	367	169
Fe (образец сравнения)	496	141

Анализ кривых наклона Тафеля (рис. 1б) при 10 мА/см^2 так же однозначно свидетельствует о том, что лучшими каталитическими свойствами обладают образцы осажденные при токах 150 мА/см^2 и 200 мА/см^2 , имеющие наклон Тафеля 76 и 89 мВ/дек, соответственно. Наклон Тафеля представляет информацию о предполагаемом механизме реакции и показывает, насколько

эффективна реакция в рассматриваемой области, т. е. наклоны Тафеля используются для прогнозирования лимитирующей стадии реакции [22]. Полученные значения наклонов Тафеля для сплавов FeNiCoMnW соответствуют лимитирующей электрохимической «стадии механизма эволюции адсорбатов» [2], что означает последовательность химических превращений адсорбированных частиц. Сравнение электрокаталитических свойств сплава FeNiCoMnW (150 мА/см^2) с другими катализаторами РВК предоставлено в табл. 3. Возможно значительное улучшение свойств сплава, при повышении его эффективной электрохимической площади, чего можно достичь дальнейшей оптимизацией условий осаждения.

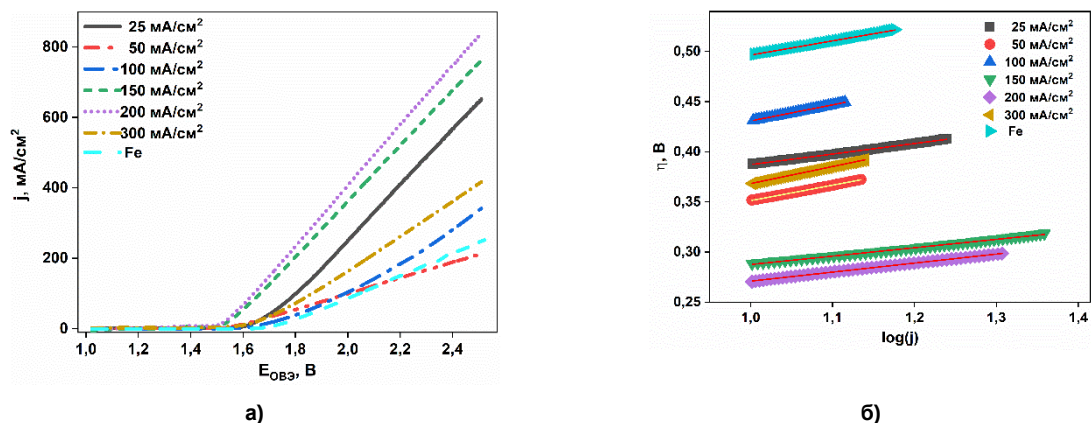


Рис. 1. (а) Поляризационные кривые вольтамперометрии с линейной разверткой потенциала покрытий FeNiCoMnW, полученных при различной плотности тока; (б) кривые наклона Тафеля покрытий FeNiCoMnW, полученных при различной плотности тока

Сравнение гальванически нанесенного высокоэнтропийного сплава FeNiCoMnW с другими катализаторами РВК

Таблица 3

Сплав	Перенапряжение (η), мВ	Наклон Тафеля, мВ/дек	Ссылка
FeNiCoMnW (150 мА/см^2)	287	76	Эта работа
NiFeCoCrW _{0.2}	220	36.8	[14]
NiFeCuCoW	247,3	62.9	[17]
NiFeMnCuCo	226	58.2	[23]
NiFeCo	316	43	[24]
NiCoP допированный Mo	233	52	[25]
NiCoP допированный Mn	266	53	[13]
FeCoMoW	212	–	[24]
NiFeMo	180	–	[24]
IrOx/SrIrO3	270	–	[25]
Fe (образец сравнения)	496	141	Эта работа

Анализ диаграмм Найквиста для спектров электрохимического импеданса (рис. 2а) показывает, что до проведения окисления посредством анодной поляризации сплав не содержит оксигидроксидных включений и ведет себя наподобие идеального поляризуемого электрода. После поляризации происходит окисление поверхности с образованием оксигидроксидной фазы, о чем свидетельствует характерный полукруг (рис. 2б). Наименьшее активное сопротивление переноса заряда $\sim 20 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ наблюдается у образца, полученного при плотности тока 200 мА/см^2 (рис. 2б, вставка), что обеспечивает более быстрый обмен электронами на границе раздела фаз поверхность гальванического сплава/электролит, обеспечивая более высокие токи при меньшем перенапряжении (рис. 1а). Следовательно, полученный ВЭС, имеет более высокую электрохимическую активность и обладает более лучшими электрокаталитическими свойствами для РВК.

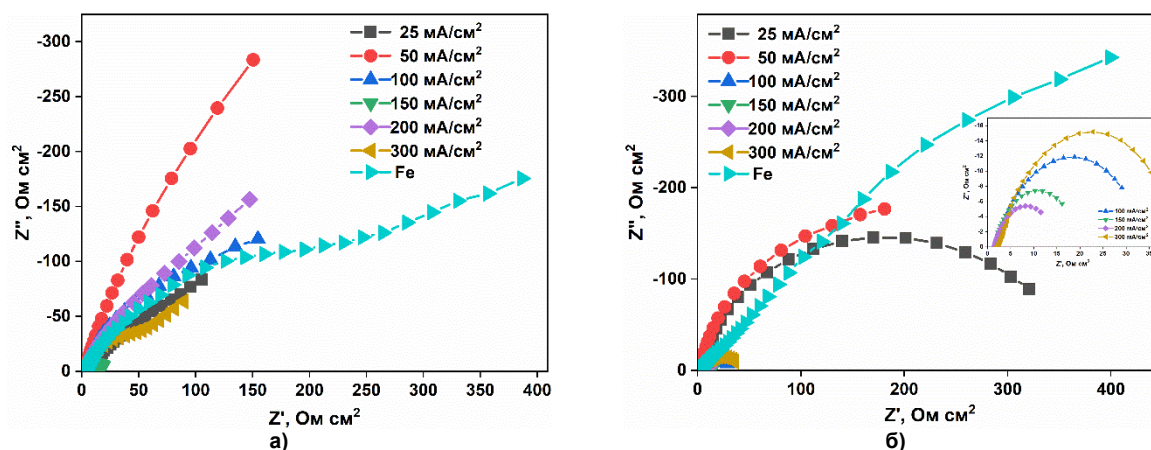


Рис. 2. Диаграммы Найквиста для покрытий FeNiCoMnW, полученных при различной плотности тока до анодного окисления (а) и после (б)

Морфология и состав образца с плотностью тока осаждения 150 mA/cm^2 была охарактеризована методами СЭМ/ЭДС. Образец имеет ярко выраженную морфологию «высохшей грязи» («англ. mud-cracked») (рис. 3а, б) и средний элементный состав определенный энергодисперсионной спектроскопией близкий к допустимому для отнесения сплава к высокоэнтропийным. Картирование элементов показывает, что они распределены равномерно (рис. 3 в–д).

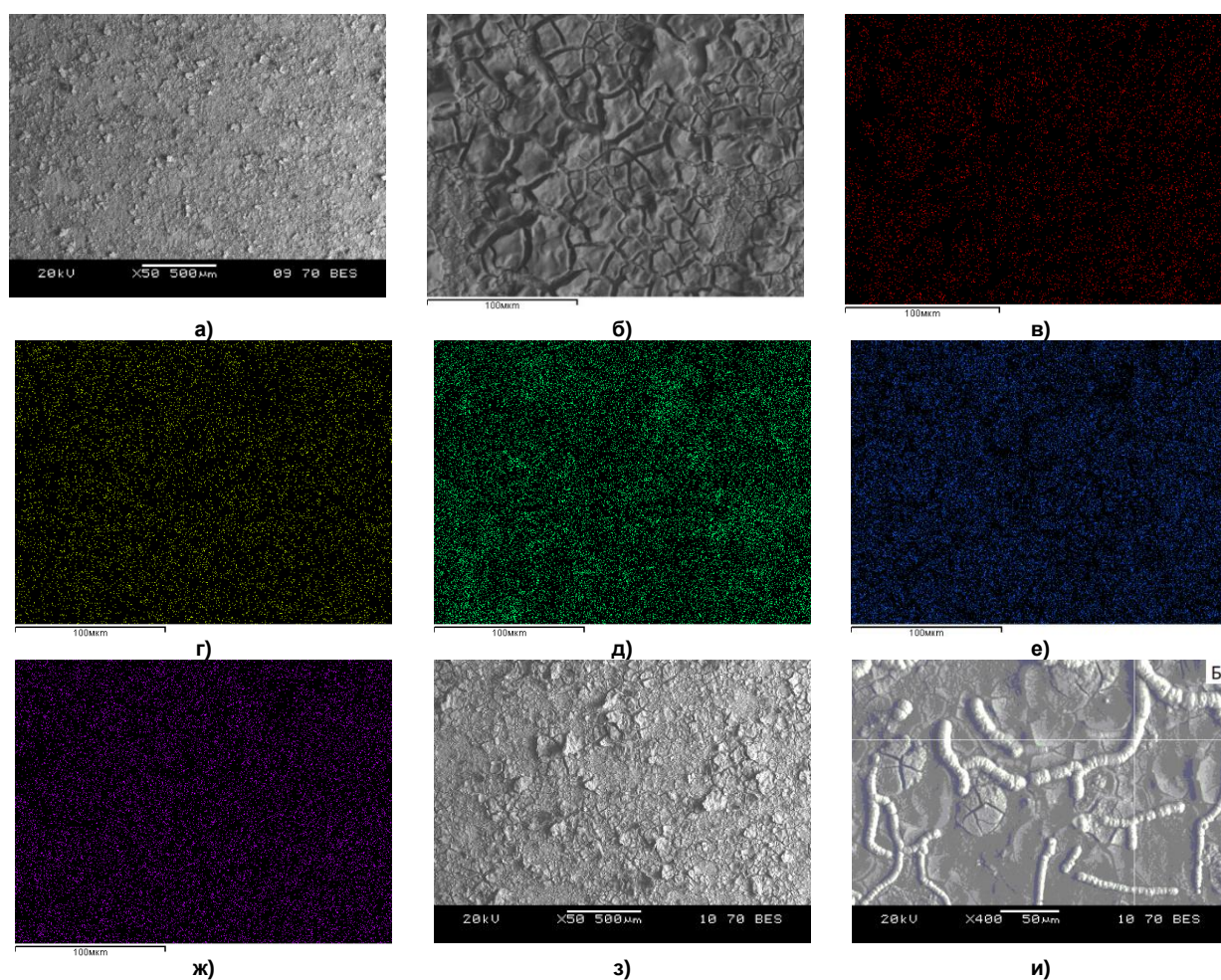


Рис. 3. (а, б) СЭМ-микрофотографии покрытия FeNiCoMnW, полученного при плотности тока 150 mA/cm^2 ; (в-з) распределение элементов при ЭДС-картировании W (в) Mn (г) Co (д) Fe (е) Ni (ж), (з, и) СЭМ-микрофотографии покрытия FeNiCoMnW, полученного при плотности тока 300 mA/cm^2

Образец, полученный при плотности тока осаждения 300 мА/см^2 , также имеет ярко выраженную морфологию «высохшей грязи», его состав формально не является высокоэнтропийным (содержание вольфрама составляет около 2 ат.%. Но при этом наблюдаются включения, близкие по составу к ВЭС и имеющие до 11 ат.% вольфрама (30 масс.%). Составы представлены в табл. 4.

Таблица 4
Элементный состав покрытий FeNiCoMnW, полученных при плотностях тока 150 мА/см^2 и 300 мА/см^2

Элемент	150 мА/см^2 , среднее, ат.%	300 мА/см^2 , среднее, ат.%	300 мА/см^2 , включения, ат.%
Mn	5,9	10,5	6,7
Fe	31,8	24,7	28,5
Co	33,8	32,5	41,2
Ni	23,5	30,5	12,7
W	4,8	1,7	10,9
Σ	100,0	100,0	100,0

Фазовый состав образца (рис. 4) был охарактеризован методом РФА. Он показал полностью аморфную фазу, что свидетельствует о том, что скорость осаждения достаточно велика, для предотвращения образования кристаллитов и формирования наиболее активной полностью аморфной фазы [20].

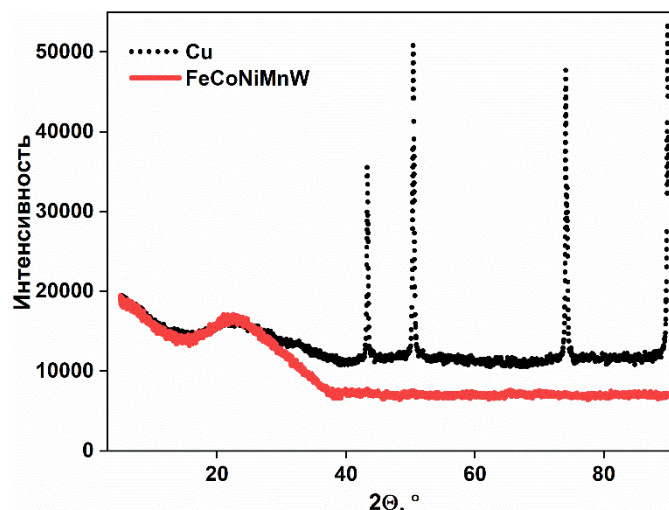


Рис. 4. РФА-спектр покрытия FeNiCoMnW, полученного при плотности тока 300 мА/см^2 в сравнении со спектром меди

Заключение

Впервые путём гальванического нанесения ВЭС состава FeNiCoMnW на медную подложку получены электрокатализаторы выделения кислорода для работы в щелочной среде. Образец, нанесенный при плотности тока 150 мА/см^2 показал самый низкий потенциал перенапряжения выделения кислорода в 269 мВ, а также низкий наклон Тафеля 70–90 мВ/дек. Данные результаты электрохимических свойств полученного сплава FeNiCoMnW сопоставимы с ранее опубликованными результатами для ВЭС других составов. Гальванически осажденный при оптимальной плотности тока ВЭС обладает перспективами дальнейшего развития, так как наименьшее сопротивление переноса заряда $\sim 20 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ указывает на более быстрый перенос электронов в двойном электрическом слое на границе ВЭС/электролит (более высокие токи при меньшем перенапряжении) и на снижение диффузионных ограничений для РВК. Согласно данным РФА, ВЭС состава FeNiCoMnW имеет аморфное строение, а результаты СЭМ указывают на сложную микро- и макроструктуру пористой поверхности, что удовлетворяет морфологическим требованиям, предъявляемым к высокоэффективным электрокаталитическим сплавам.

Список источников

1. Zhang B, Zheng X, Voznyy O. et al. // Science. 2016. V. 352, No. 6283. P. 333. DOI: 10.1126/science.aaf1525.
2. Song J., Wei C., Huang Z. et al. // Chem. Soc. Rev. 2020. V. 49, No. 7. P. 2196. DOI: 10.1039/c9cs00607a.
3. Zhang B., Song J., Cao Z. et al. // Nat. Catal. 2020. V. 3, No. 12. P. 985. DOI: 10.1038/s41929-020-00525-6.
4. Ou Y., Twilight L., Samanta B. et al. // Nat. Commun. 2023. V. 14, No. 1. DOI: 10.1038/s41467-023-43305-z.
5. Yeh J., Chen S., Lin S. et al. // Adv. Eng. Mater. 2004. V. 6, No. 5. P. 299. DOI: 10.1002/adem.200300567.
6. Fu Z., Jiang L., Wardini J. et al. // Sci. Adv. 2018. V. 4. P. 8712. DOI: 10.1126/sciadv.aat8712.
7. Wang Z., Goddard W. A., Xiao H. // Nat. Commun. 2023. V. 14, No. 1. DOI: 10.1038/s41467-023-40011-8.
8. Sun Q. Dong Y., Wang Z. et al. // Small. 2018. V. 14, No. 14. DOI: 10.1002/sml.201704137.
9. Xu X., Song F., Hu X. // Nat. Commun. 2016. V. 7. DOI: 10.1038/ncomms12324.
10. Jiang J. Sun F., Zhou S. et al. // Nat. Comm. 2018. V. 9, No. 1. DOI: 10.1038/s41467-018-05341-y.
11. Wang F., Xu X., Li Y. et al. // Appl. Catal. 2025. V. 363. DOI: 10.1016/j.apcatb.2024.124838.
12. Tsai K. Y., Tsai M. H., Yeh J. W. // Acta Mater. 2013. V. 61, No. 13. P. 4887. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.04.058.
13. Ma G. Qin M., Sun T., Tan W. et al. // Nano Energy. 2023. V. 115. DOI: 10.1016/j.nanoen.2023.108679.
14. Zhang T., Zhao H., Chen Z. et al. // Nat. Commun. 2025. V. 16, No. 1. DOI: 10.1038/s41467-025-58648-y.
15. Bian H., Wang R., Zhang K. et al. // Surf. Coat. Technol. 2023. V. 459. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129407.
16. Ghaferi Z., Sharafi S., Bahrololoom M. E. // Appl. Surf. Sci. 2015. V. 355. P. 766. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.07.083.
17. Zhu Z., Meng H., Ren P. // Colloids Surf. A Physicochem. 2022. V. 648. P. 129404. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.129404.
18. Liu Z., Ma H., Kang N. et al. // Mater. Today Chem. 2024. V. 42. DOI: 10.1016/j.mtchem.2024.102404.
19. Gong Z., Liu J., Ye G. et al. // Chem. Commun. 2023. V. 59, No. 38. P. 5661. DOI: 10.1039/D3CC00225J.
20. Anantharaj S., Noda S. // Mat. En. 2022. V. 29. DOI: /10.1016/j.mtener.2022.101123.
21. Bian H., Wang C., Zhao S. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2024. V. 57. P. 651. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.12.271.
22. Barati Darband G., Aliofkhazraei M., Rouhaghdam A. S. // J. Colloid Interface. 2019. V. 547. P. 407. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.03.098.
23. Wang X., Yu M., Lv C. et al. // FlatChem. 2024. V. 45. DOI: 10.1016/j.flatc.2024.100660.
24. Zhang B., Wang L., Cao Z. et al. // Nat. Catal. 2020. V. 3, No. 12. P. 985. DOI: 10.1038/s41929-020-00525-6.
25. Seitz L., Dickens C., Nishio K. et al. // Science. 2016. V. 353 P. 1011. DOI: 10.1126/science.aaf5050.

Шунайлов Андрей Владимирович – аспирант «Материаловедение и физико-химия материалов», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: andrey_shunilov@mail.ru

Шестеркин Юрий Алексеевич – студент магистратуры кафедры «Экология и химическая технология», Институт естественных и точных наук; лаборант-исследователь лаборатории экологических проблем постиндустриальной агломерации, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: shesterkin@usu.ru.

Корина Елена Александровна – PhD, старший научный сотрудник Лаборатории экологических проблем постиндустриальной агломерации, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: korinaea@susu.ru

Трофимов Евгений Алексеевич – доктор химических наук, профессор, кафедра «Материаловедение и физико-химия материалов», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: trofimovea@susu.ru

Статья поступила в редакцию 13 марта 2026 г.

The article was submitted 13 March 2026.