

МРНТИ 29.19.16

<https://doi.org/10.26577/JPEOS202527344>

А.У. Амренова , А.М. Жукешов\* , Е.Е. Салимов ,  
У.Б. Абдыбай , М.И. Пшиков 

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

\*e-mail: zhukeshov@physics.kz

## ОСОБЕННОСТИ РАСПЫЛЕНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА ПЛАЗМОЙ ВАКУУМНОЙ ДУГИ И ИСПЫТАНИЕ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ

Металлы переходной группы и их сплавы активно применяются в электрохимических топливных элементах, одним из которых являются металл-воздушные батареи (МВБ). В данном исследовании для создания электродов МВБ предлагается использование высокоэнтропийного сплава (ВЭС) из металлов переходной группы. Методом низкотемпературного синтеза был изготовлен образец катода в виде твердого сплава из переходных металлов состава Fe-Co-Ni-Nb-Mo и проведено его распыление плазмой на установке ВДУ. На подложках из меди осаждены сплошные слои толщиной 94–103 мкм стехиометрического состава идентичного распыляемому катоду. В структуре однородных покрытий, осажденных при распылении в условиях среднего вакуума, присутствуют микроскопические включения с высоким содержанием кислорода и углерода. На поверхности распыляемых катодов обнаружены круглые углубления размером 100–200 мкм, природа которых связана с током дуги на поверхности, который концентрируется в катодных пятнах. Показано увеличение энергетических показателей МВБ при испытаниях материалов из ВЭС с обработанной плазмой поверхностью в качестве анодов. При обработке интегрального катода из ВЭС на его поверхности формируется шероховатый рельеф, что понижает плотность тока и способствует улучшению химической стойкости материала.

**Ключевые слова:** высокоэнтропийный сплав, плазменное распыление, покрытие, электрохимия, металл-воздушные батареи.

A.U. Amrenova, A.M. Zhukeshov\*, Ye.E. Ssalimov,  
U.B. Abdybai, M.I. Pshikov

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: zhukeshov@physics.kz

## Characteristics of high entropy alloy spraying by vacuum arc plasma and test in electrolyte

Transition metals and their alloys are widely used in chemical catalysis and successfully employed in electrochemical fuel cells, one of which is metal-air batteries (MABs). This study proposes the use of a high-entropy alloy (HEA) made of transition metals to create MAB electrodes. A cathode sample, a solid transition metal alloy of Fe-Co-Ni-Nb-Mo composition, was fabricated using low-temperature synthesis and plasma-sputtered using a VDU system. Continuous layers 94–103  $\mu\text{m}$  thick and of stoichiometric composition identical to the sputtered cathode were deposited on copper substrates. The structure of the homogeneous coated layers, deposited by sputtering under medium vacuum conditions, contains microscopic inclusions with high oxygen and carbon contents. Circular depressions measuring 100–250  $\mu\text{m}$  were found on the surface of sputtered cathodes. These depressions are related to the arc current on the surface, which is concentrated in the cathode spots. An increase in the energy performance of the MAB was demonstrated when testing HEA materials with plasma-treated surfaces as anodes. When treating an integral HEA cathode, a rough relief is formed on its surface, which reduces the current density and improves the chemical resistance of the material.

**Keywords:** high-entropy alloy, plasma spraying, coating, electrochemistry, metal-air batteries.

А.У. Амренова, А.М. Жукешов\*, Е.Е. Салимов,

Ұ.Б. Әбдібай, М.И. Пшиков

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

\*e-mail: zhukeshov@physics.kz

### **Вакуумдық доғалық плазма арқылы жоғары энтропиялық қоспаны бүршіктеу ерекшеліктері және электролитте сынау**

Өтпелі металдар және олардың қорытпалары химиялық катализде кеңінен қолданылады және электрохимиялық отын элементтерінде сәтті қолданылады, олардың бірі металл-ауа батареялары (МAB). Бұл зерттеу МAB электродтарын жасау үшін өтпелі металдардан жасалған жоғары энтропиялық қорытпаны (ЖЭК) пайдалануды ұсынады. Катод үлгісі, Fe-Co-Ni-Nb-Mo композициясының қатты өтпелі металл қорытпасы төмен температуралық синтезді қолдану арқылы дайындалды және ВДУ-1 жүйесі арқылы плазмалық шашыратылды. Мыс субстраттарында 94-103 мкм қалыңдықтағы және шашыраған катодқа ұқсас стехиометриялық құрамдағы үздіксіз қабаттар тұндырылды. Орташа вакуум жағдайында шашырату арқылы тұндырылған біртекті қапталған қабаттардың құрылымында жоғары оттегі мен көміртегі бар микроскопиялық қосындылар бар. Шашыраған катодтардың бетінде өлшемі 100-250 мкм болатын шеңберлі ойыстар табылды. Бұл ойыстар катодты нүктелерде шоғырланған бетіндегі доғалық токпен байланысты. МAB энергетикалық өнімділігінің жоғарылауы анодтар ретінде плазмамен өңделген беттері бар ЖЭК материалдарын сынау кезінде көрсетілді. Интегралды ЖЭК катодын өңдеу кезінде оның бетінде токтың тығыздығын төмендететін және материалдың химиялық төзімділігін жақсартатын өрескел рельеф пайда болады. Оған себеп металл бетінде плазмалық өңдегеннен соң микро деңгейде қалыптасатын рельеф сырт беттің ауданын үлкейтеді ал ток тығыздығын азайтады.

**Түйін сөздер:** жоғары энтропиялық қорытпа, плазмалық бүрку, қаптау, электрохимия, металл-ауа батареялары.

## **Введение**

Металло-воздушные батареи (МВБ) имеют высокую теоретическую плотность энергии, и их предполагается использовать в качестве решения для электрохимического накопления энергии следующего поколения для приложений, включая электромобили или хранение энергии в сети. Однако они не полностью реализовали свой потенциал из-за проблем, связанных с металлическим анодом, воздушным катодом и электролитом. В целом, в металло-воздушных батареях с металлическими электродами проблемами являются металлические дендриты, изменения формы электродов, коррозия, побочные реакции и поверхностная пассивация [1]. Для разных типов металлов ключевые проблемы и стратегии смягчения последствий могут быть разными. На настоящий момент наиболее исследованы цинковые, литиевые и алюминиевые электроды. В работе [2] Паркер и др. предложили трехмерную губчатую цинковую губку с взаимосвязанными порами и электропроводностью, но результаты только обнадеживают. В работе [3] разработан вид пористого Zn-электрода с большой удельной поверхностью, синтезированный пузырьковым методом. Было обнаружено, что уменьшение размера пор может повысить производительность воздушно-цинковой батареи. Эти и множество других литературных данных позволяют сделать предположение, что

увеличение удельной поверхности электрода однозначно приводит к повышению энергетических показателей анодных материалов МВБ. Повышение удельной поверхности можно достигать с применением обработки импульсным потоками энергии.

К ВЭС относятся сплавы, состоящие из пяти и более элементов с атомной концентрацией между 5 и 35 %. Высокая энтропия смешения элементов в сплаве рассматривается как мера вероятности сохранения их системы в данном состоянии. Это обеспечивает повышенную термическую стабильность фазового состава и структурного состояния, следовательно, и механических, физических, химических свойств. В обзорной работе [4] проанализированы теоретические и экспериментальные результаты по структуре, свойствам, способам получения ВЭС с акцентом на их использование в областях, связанных с энергетикой. Для литий-ионных аккумуляторов материалы на основе высокоэнтропийных оксидов могут применяться в качестве анодов и катодов. Для натрий-ионных аккумуляторов отмечено 83 % сохранения емкости после 500 циклов. Синтезированный нанопористый ВЭС AlCoCrFeNi, используемый в качестве электрода, обладает высокими емкостью (700 Ф/см<sup>3</sup>) и циклической стабильностью (>3000 циклов). Однако для воздушных аккумуляторов сведений нет. Пористые материалы также активно пытаются получить для окислительно-

восстановительных реакций и катализа. Авторы работы [5] получили высокоэффективный пористый ВЭС CoCrFeNiMo методом микроволнового спекания: избыточный потенциал достигает 220 мВ при плотности тока 10 мА/см<sup>2</sup>. Это связано с возможностью пористой структуры обеспечивать электронный перенос. Полученные методом магнетронного распыления высокоэнтропийные оксидные пленки (FeCrCoNiAl<sub>0,1</sub>O)<sub>x</sub> обеспечивали избыточный потенциал 381 мВ и электролизную стабильность в течение 120 ч в щелочном растворе при плотности тока 10 мА/см<sup>2</sup> [6]. Таким образом, ВЭС также можно разрабатывать в пористом виде, однако методы синтеза отличаются. Так как ВЭС это твердый сплав, то его обработка плазмой также может быть успешно проведена с использованием имеющейся аппаратуры.

Вакуумная дуга – это атмосферная дуга при низком давлении. Мощность стационарной дуги составляет не менее 1,5 кВт [7]. Импульсная дуга, в отличие от стационарной характеризуется невысокой средней электрической мощностью 0,1–0,3 кВт, что является существенным преимуществом при использовании плазмы импульсной дуги в процессах PVD [8,9]. Помимо энергетических параметров, определяющими факторами в работе импульсного дугового разряда являются состав плазмы, ее температура, а также наличие или отсутствие магнитного и электрического полей [10–12]. Существенной проблемой для использования электрической дуги в нанотехнологиях является наличие в ее плазме микрочастиц в виде капель металла и пылинок. В целом можно сказать, что дуговая плазма состоит из ионной и пылевой составляющей, а также радиации. При распылении многокомпонентного катода могут возникнуть неравновесные условия формирования плазмы различного состава, что может привести к перераспределению частиц как в плазме, так и осаждаемом покрытии.

Таким образом, целью настоящей работы является выяснить особенности распыления такого сложного материала как многокомпонентный катод из ВЭС и получить покрытия. Практический интерес представляет собой испытание ВЭС в качестве анода в метал-воздушных батареях.

### Материалы и оборудование

Для изготовления катодов из ВЭС использовалась технология низкотемпературного синтеза компании XebeMetal construction corporation (заказное), получены катоды чистотой 99,9 %.

Композит состоит из металлов переходной группы состава Fe-Co-Ni-Nb-Mo (по ат. 20%). Подложки для осаждения из меди M01, фабричные штампы в виде пластин размерами 20x20x1 мм. Распыляемый материал осаждали на подложках из меди. В результате экспериментов осаждены слои ВЭС с применением вакуумного дугового распыления. Распыление катодов ВЭС проводилось при уровне вакуума 10<sup>-4</sup> мбар, содержание остаточных газов не более 0,3%. Время напыления изменяли от 10 до 30 минут. Топография поверхности изучалась на сканирующем электронном микроскопе Zeiss 3000, с PCA анализатором INCA.

Для обработки применяли вакуумную установку ВДУ-1 [13] в режиме повторяющихся импульсов. Частота следования импульсов задавалась цифровым генератором и равнялась 15 Гц. Подложки располагались на керамическом изоляторе внутри камеры. Для откачки вакуумной камеры использовали последовательно роторный масляный насос Advavac 50 и диффузионный паромасляный насос NVDM 250. Измерения проводили универсальными вакуумными датчиками Erstvac. Все эксперименты проводили при давлении в камере, соответствующему  $p = (2-4) \cdot 10^{-4}$  мбар среднему уровню вакуума.

Для того чтобы тестировать материалы была сконструирована экспериментальная ячейка МВБ. В устройстве электролит заполняет реакционную камеру между воздушным катодом и анодом. Испытуемый анод погружался в электролит и фиксировался на расстоянии 2 см от катода. Предварительные испытания показали, что ток анода практически не зависит от этого расстояния. В качестве электролита использовался раствор едкого калия в концентрации (4–6) моль/л. В качестве воздушного катода использовался промышленный образец на основе углерода и гидрофобного пластификатора с внутренней проводящей сеткой. Катод представлял собой сетку из металла, на которую фиксировался токосъемник. Ток измерялся с помощью мультиметра Appal09N в режиме автоматического сохранения измерений в программном приложении.

### Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показана топография слоя из ВЭС, осажденного на подложке из полированной меди. Как видно, покрытие осаждается сплошным слоем и имеет однородную в целом структуру с микроскопическими включениями. Состав слоев указаны в табл. 1 и 2.

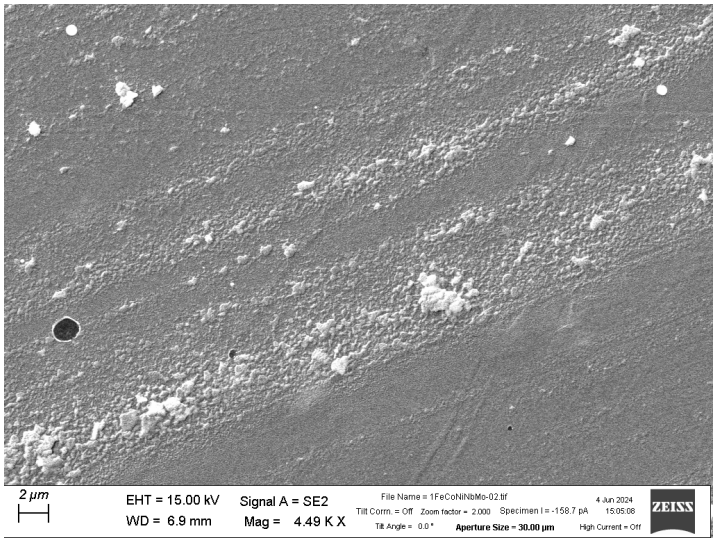


Рисунок 1 – Топография покрытия из ВЭС осажденного на поверхности подложки из меди

Таблица 1 – Химический состав сплошного слоя

Элемент	Fe K	Co K	Ni K	Nb L	Mo L	Totals
Масс. %	12.02	12.46	12.49	21.02	23.36	81.34
Ат. %	19.40	19.06	19.19	20.40	21.96	

Таблица 2 – Химический состав включений

Элемент	Fe K	Co K	Ni K	Nb L	Mo L	O K	C K	Totals
Масс. %	2.59	3.27	3.35	3.32	4.23	27.42	12.13	56.31
Ат. %	1.41	1.69	1.74	1.09	1.34	69.60	23.12	

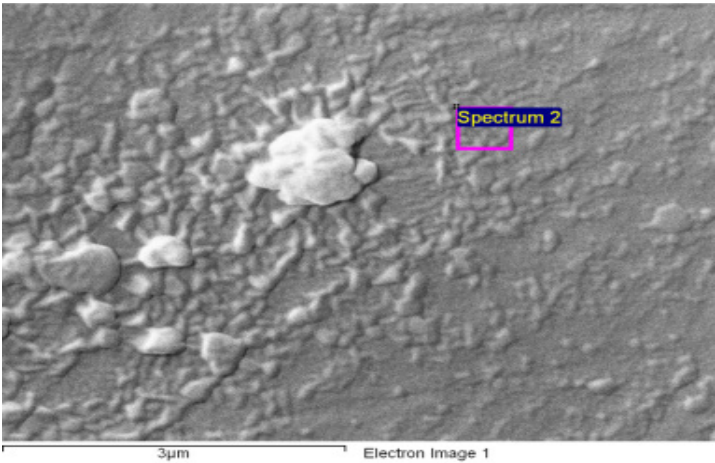


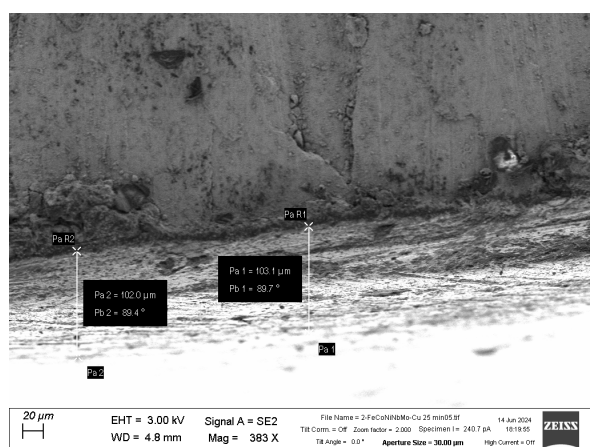
Рисунок 2 – Микроскопические включения на осажденных слоях из ВЭС



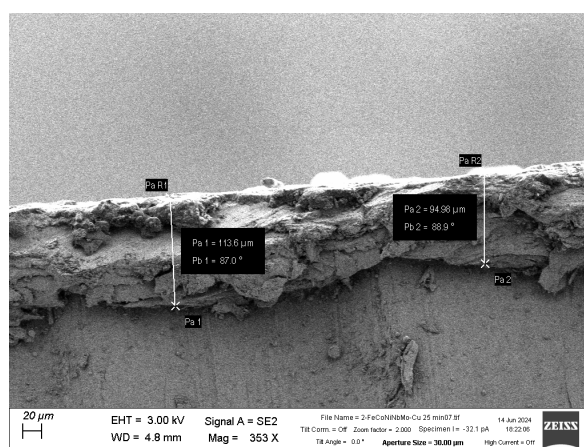
Для того чтобы оценить состав слоев, проведен рентгеноспектральный анализ поверхности. Результат химического анализа показан в таблицах 1 и 2. Как видно, атомный состав покрытия полностью соответствует исходному составу композитного катода с отклонением  $\pm 2\%$ . Отсутствие меди в составе покрытия свидетельствует о его достаточной толщине. Тем не менее, в материале покрытия также присутствуют углерод и кислород в процентном отношении 12 и 27 %, но только в белых пятнах, как видно на рисунке 2. Значительное содержание активных газов в пятнах связано с масляной откаткой. Бе-

лые пятна, присутствующие на покрытии, связаны реакцией остаточных активных газов в вакууме с материалом подложки с образованием фаз и процессами десорбции водорода в процессе формирования покрытия.

Толщина осажденных покрытий исследовалась с применением СЭМ фотографий поперечного сечения покрытий. На рисунке 3 показаны результаты этих исследований. Как видно, толщина покрытия достаточно равномерна и составляет от 94 до 103 мкм. Структура покрытия однородная, с присутствием включений в виде мелких черных точек.



а



б

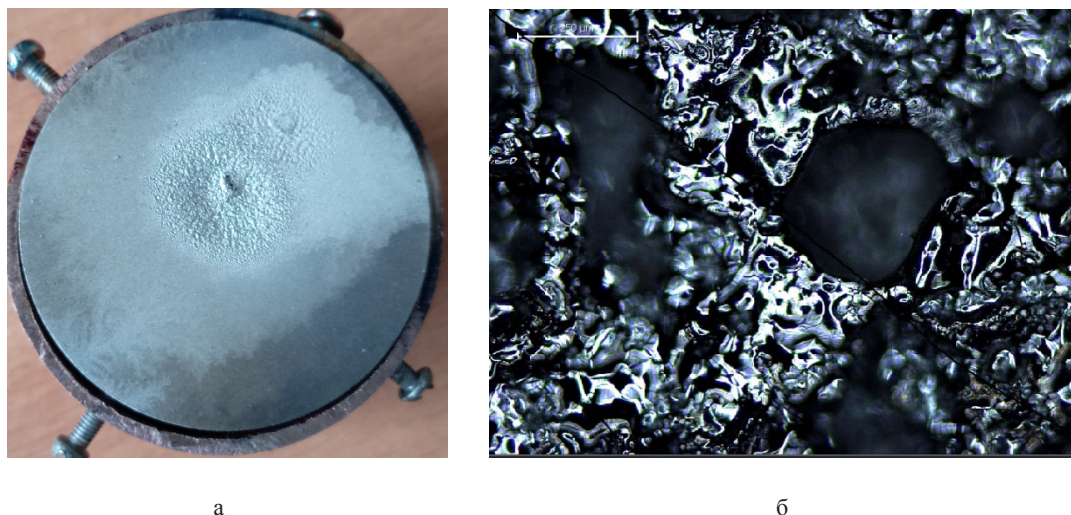
**Рисунок 3** – Толщина сплошных слоев из ВЭС, осажденных на поверхности подложки из меди на поперечном шлифе (а) и с края образца (б)

В целом можно констатировать, что получаемые методом распыления на ВДУ, обладают пористой структурой. При распылении многокомпонентного катода формируется поток дуговой плазмы различного состава, и в результате перераспределения частиц из-за их различной массы и заряда в плазме, возникают неоднородности в осаждаемом покрытии.

### **Поверхность катода из ВЭС**

В результате распыления на ВДУ поверхность монолитного ВЭС катода подвергалась эрозии. На рисунке 4а на поверхности катода видно образование зоны расплавления в центральной части. При увеличении этой поверхности в 10 раз на рисунке 4 б заметны микро-

скопические углубления размером 100 – 200 мкм. В результате обработки плазмой на поверхности катода формируется шероховатый рельеф с микроскопическими углублениями расположенными хаотически по поверхности. Природа этих углублений очевидно связана с током дуги на поверхности, который концентрируется в катодных пятнах по принципу минимизации энергии. Однако из-за своеобразной структуры сплава, пятна не могут равномерно двигаться по поверхности, а застревают в определенных местах, создавая углубления. Очевидно существенную роль в этом процессе играет и магнитное поле, так как в результате пинчевания его величина увеличивается в пятнах.



**Рисунок 4** – Фотография катода из ВЭС (а) и топография его поверхности при ув. 50. Шкала 150 мкм

Оптическим микроскопом методом послойной фокусировки было определено, что глубина кратеров также размером порядка 100 мкм. По этим результатам, далее показано, что шероховатость поверхности играет существенную роль в формировании тока при помещении такой поверхности в среду электролита. В микроскопическом рассмотрении, наличие множества углублений на поверхности можно рассматривать как пористость на микроуровне. Нематрля на это, как мы знаем, существует и пористость на наноуровне, связанная с фазовой структурой ВЭС, описанной выше в литературе.

#### **Испытания образцов в электролите**

В данном пункте статьи приведена информация о результатах испытаний образцов целых катодов с обработкой и без, на электрохимической ячейке. Испытаниям подверглись аноды из ВЭС показанные на рисунке 1, а также серия из отдельных элементарных анодов Fe, Co, Ni и др.

В таблице 3 представлены результаты испытаний анодов из ВЭС в испытательной ячейке. Испытания проводились с электролитом КОН, наиболее часто применяемый для анодов МВБ на основе железа, в течение 15-25 мин.

**Таблица 3** – Данные испытаний анода из ВЭС Fe-Co-Ni-Nb-Mo с исходной и обработанной плазмой поверхностью в электролите КОН

Время	Анод	$I_{max}$ , А	$U_{max}$ , В	Анод	$I_{max}$ , А	$U_{max}$ , В
5 мин	исходный	0,033	0,7	обработанный	0,27	0,99
15 мин		0,045	0,81		0,24	1,02
20 мин		0,051	0,85		0,221	1,02
25 мин		0,057	0,88		0,20	1,02

Анализируя данные таблицы 3 можно сделать вывод, что при испытании в наиболее сильном щелочном электролите КОН, образцы катодов из ВЭС показывают более высокие показатели по избыточному напряжению 1,0 и 0,7 В, в сравнении с указанными выше литературными данными. Показатели тока для обра-

ботанного плазмой образца катода оказались почти в четыре раза выше тока необработанного образца – 200 мА против 57 мА. Далее на рисунках 5 и 6 показаны кривые напряжения и тока на испытуемых электродах. На рис. 5 ток после начального замедления выходит на участок роста, что позволяет судить о высокой на-

грузочной способности обработанного анода. Начальный рост напряжения на рисунках 5 и 6 мы связываем с динамическими процессами в электролите. В ВЭС основным компонентом является железо, но нам было интересно проследить поведение остальных элементов в со-

ставе ВЭС при испытаниях в разных электролитах. Для этого брали аноды из чистых металлов и проводили аналогичное испытание в ячейке МВБ. Далее в таблице 4 показаны результаты испытаний остальных материалов, входящих в состав ВЭС.

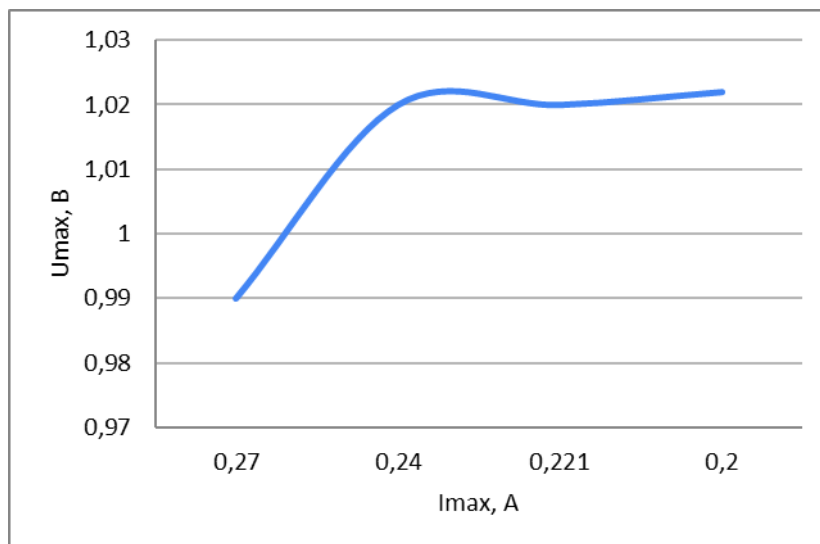


Рисунок 5 – Кривая ВАХ для анода с обработанной поверхностью

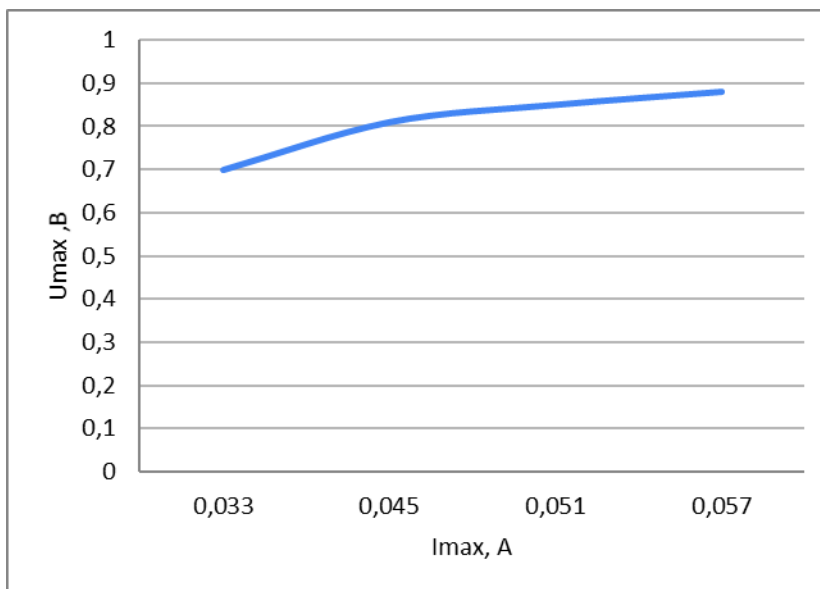


Рисунок 6 – Кривая ВАХ для анода с исходной поверхностью

**Таблица 4** – Данные испытаний чистых анодов из различных металлов из состава ВЭС в электролите NaOH

Анод	Время	$I_{\max}$ , А	$U_{\max}$ , В
Магний	5 мин	0,002	1,34
-	15 мин	0,002	1,18
Кобальт	5 мин	0,004	0,8
-	15 мин	0,005	0,807
Железо	5 мин	0,004	0,8
-	15 мин	0,005	0,62
Никель	5 мин	0,002	0,295
-	15 мин	0,005	0,62
Ванадий	5 мин	0,03	0,67
-	15 мин	0,021	0,68

Как видно из таблицы 4, все материалы, кроме никеля, дают хороший электрохимический потенциал и перспективны для использования в составе ВЭС. Железо и кобальт дают наибольший ток, так как являются сильными катализаторами реакции окисления. Остальные элементы служат для обеспечения коррозионной стойкости, улучшения электропроводности и др. Важный вывод состоит в том, что из данных испытаний невозможно определить оптимальный состав ВЭС, но можно понять динамику процесса окисления. Так, железо быстро теряет потенциал за 15 мин испытаний, а никель наоборот увеличивает его.

## Заключение

Таким образом, методом низкотемпературного синтеза был изготовлен образец катода из ВЭС из переходных металлов состава Fe-Co-Ni-Nb-Mo в виде монолитного диска и проведено его распыление плазмой на установке ВДУ. На подложках из меди осаждены сплошные слои толщиной (94-103) мкм из материала катода (ВЭС). Слои имеют высокую однородность и соответствие химическому составу исходного материала катода, однако имеются многочисленные включения, которые при детальном рассмотрении выдают пористую структуру покрытия. Технология обработки, использованная в данном исследовании, обеспечивает новый подход к получению пористых материалов на основе ВЭС, а также способствует разработке соответствующих материалов в области катализа и хранения энергии.

Проведены испытания анода из ВЭС на предмет токоотдачи в электрохимической ячейке МВБ. Существенным результатом является то, что увеличение удельной поверхности электрода путем создания шероховатости поверхности приводило к повышению энергетических показателей анодов из ВЭС. Повышение удельной поверхности было достигнуто применением обработки импульсным потоком плазмы на установке ВДУ. Данная методика может быть использована для создания новых источников энергии.

*Работа выполнена при поддержке гранта BR21882187 комитета науки МНУВО РК.*

## References

1. Hao-FanWang and QiangXu. Materials Design for Rechargeable Metal-Air Batteries. Matter. Volume 1, Issue 3, 4 September 2019, Pages 565-595
2. Parker, J.F., Chervin, C.N., Nelson, E.S., Rolison, D.R., and Long, J.W.. Wiring zinc in three dimensions re-writes battery performance-dendrite-free cycling. Energy Environ.Sci. 2014, 7, 1117–1124.
3. Peiyuan Liu, Xiaofei Ling, Cheng Zhong, Yida Deng, Xiaopeng Han and Wenbin Hu . Porous Zinc Anode Design for Zn-air Chemistry . Frontiers in Chem. -2019, Volume 7 , Article 656
4. Fu M., Ma X., Zhao K., Li X., Su D. High-entropy materials for energy-related applications // Science. 2021. Vol. 24. No. 3. Article 102177.
5. Tang J., Xu J.L., Ye Z.G., Li X.B., Luo J.M. Microwave sintered porous CoCrFeNiMo high entropy alloy as an efficient electrocatalyst for alkaline oxygen evolution reaction. Journal of Materials Scienceand Technology. 2021, vol. 79, pp. 171–177.
6. Zhao S., Wu H., Yin R., Wang X., Zhong H., Fu Q., Wan W., Cheng T., Shi Y., Cai G., Jiang C., Ren F. Preparation and electrocatalytic properties of (FeCrCoNiAl<sub>0.1</sub>)Ox high-entropy oxide and NiCo-(FeCrCoNiAl<sub>0.1</sub>)Ox heterojunction films. Journal of Alloys and Compounds. 2021, vol. 868, article 159108.
7. Boxman R.L., Martin P.J. and Sanders D.M. (Eds.), Handbook of Vacuum Arc Science and Technology; Noyes, New York, 1995.
8. I. Pilch, D. Soderstrom, D. Lundin, U.Helmersson. The use of highly ionized pulse plasmas for the synthesis advances thin films and nanoparticles. Kona Powder and Particle journal, 31, 2014, p. 171 – 180.



9. Aksenov I. I., Konovalov I. I., PershyV. F. About Low-Pressure Arc Cathode Erosion, Thermophysics of high temperatures, 1988, 26, 3, P. 442
10. Lafferty J.M. (Ed.), Vacuum Arcs – Theory and Application; Wiley, New York, 1980.
11. Jüttner B. Cathode spots of electric arcs // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2001. – V. 34. – R103.
12. Hantzsch E. Mysteries of the arc cathode spot: A retrospective glance // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2003. – V. 31. – P. 799–808.
13. Zhukeshov A.M., Gabdullina A.T., Amrenova A.U., FermakhanK. The pulse vacuum-arc plasma generator for nanoengineering application. // Applied Physics A: Materials Science and Processing, 2020, V. 126(9), -Iss.742 .

**Сведения об авторах:**

Амренова Асем Уахитовна – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры физики плазмы КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: amrenova.aset@gmail.com).

Жукешов Ануар Муратович (корреспондент-автор) – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики плазмы, нанотехнологии и компьютерной физики КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: zhukeshov@physics.kz).

Салимов Ернар Ерланұлы – постдокторант кафедры физики плазмы, нанотехнологии и компьютерной физики КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: salimov\_ernar@mail.ru).

Абдыбай Ұлан Болатбекұлы – докторант 2 курса кафедры физики плазмы, нанотехнологии и компьютерной физики КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: Abdibay\_ulan@mail.ru).

Пишиков Мустахим Искиндинович – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры физики плазмы, нанотехнологии и компьютерной физики КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: mustahim.pshikov@gmail.com).

**Information about authors:**

Asem Uakhitovna Amrenova – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Plasma Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: amrenova.aset@gmail.com)

Anuar Muratovich Zhukeshov (corresponding-author) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: zhukeshov@physics.kz)

Ernar Erlanuly Salimov – Postdoctoral Researcher at the Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: salimov\_ernar@mail.ru)

Ulan Bolatbekuly Abdibay – 2nd-year PhD student at the Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Abdibay\_ulan@mail.ru)

Mustakhim Iskindirovich Pshikov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: mustahim.pshikov@gmail.com)

**Авторлар туралы мәлімет:**

Аміренова Әсем Уахитовна – физика-математика ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің плазма физикасы кафедрасының аға оқытушысы (Алматы қ., Қазақстан, e-mail: amrenova.aset@gmail.com)

Жүкешов Ануар Муратович (корреспондент-автор) – физика-математика ғылымдарының докторы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасының профессоры (Алматы, Қазақстан, e-mail: zhukeshov@physics.kz)

Салимов Ернар Ерланұлы – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасының постдокторанты (Алматы, Қазақстан, e-mail: salimov\_ernar@mail.ru)

Абдыбай Ұлан Болатбекұлы – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасының 2-курс докторанты (Алматы, Қазақстан, e-mail: Abdibay\_ulan@mail.ru)

Пишиков Мұстахим Искіндірұлы – физика-математика ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасының аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: mustahim.pshikov@gmail.com)

Поступила на рассмотрение 02.04.25

Принята 15.10.25