







DOI 10.51885/1561-4212_2025_4_19
MPNТИ 29.19.16

РАСПЫЛЕНИЕ КАТОДА ИЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА ПЛАЗМОЙ ВАКУУМНОЙ ДУГИ И ИСПЫТАНИЕ ОБРАЗЦОВ ВЭС В ЩЕЛОЧНОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ

ЖОҒАРЫ ЭНТРОПИЯЛЫҚ ҚОРЫТПА КАТОДЫН ВАКУУМДЫҚ ДОҒАЛЫҚ ПЛАЗМАЛЫҚ ТОЗАҢДАТУ ЖӘНЕ СІЛТІЛІК ЭЛЕКТРОЛИТТЕГІ ЖЭҚ ҮЛГІЛЕРІН СЫНАУ

VACUUM ARC PLASMA SPRAYING OF HIGH-ENTROPY ALLOY CATHODE AND TESTING OF HEA SAMPLES IN ALKALINE ELECTROLYTE

А.У. Амренова ¹, Е.Е. Салимов ^{2*}, У.Б. Абдыбай ¹, А.М. Жукешов ¹

¹Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы, Казахстан

*Автор-корреспондент: Салимов Ернар Ерланулы, e-mail: ernar1996@gmail.com

Ключевые слова:

высокоэнтروпийный сплав, плазменное распыление, покрытие, металл-воздушный элемент

АННОТАЦИЯ

Сплавы с высокой внутренней энтропией (ВЭС), состоящие из металлов переходной группы, являются перспективными материалами для использования в энергетике и машиностроении. В данной работе образцы ВЭС были получены и исследованы в виде твердого сплава и покрытия. Образец катода из ВЭС, состоящий из пяти переходных металлов состава Fe-Co-Ni-Nb-Mo, был распылен плазмой на установке ВДУ. На поверхности катода обнаружены модифицированная структура и увеличенная шероховатость до 100 мкм. На подложках из меди получены сплошные слои из материала катода стехиометрического состава, с пористой структурой, толщиной 94-103 мкм. Показано улучшение энергетических характеристик металл-воздушного элемента при использовании материалов из ВЭС в качестве анода.

Түйінді сөздер:

жоғары энтропиялық қорытпа, плазмалық бүрку, жабын, металл-ауа элементі

ТҮЙІНДЕМЕ

Өтпелі металдардан тұратын жоғары ішкі энтропия (ЖЭҚ) қорытпалары энергетика мен машина жасауда қолдану үшін перспективалы материалдар болып табылады. Бұл жұмыста ҚБЖ үлгілері қатты қорытпа және жабын түрінде алынды және зерттелді. Fe-Co-Ni-Nb-Mo құрамының бес өтпелі металдарынан тұратын ЖЭҚ-тен алынған катод үлгісі ВДУ қондырғысында плазма шашыранды. Катодтың бетінде модификацияланған құрылым және 100 мкм дейін кедір-бұдырдың жоғарылауы анықталды. Мыс негіздерде қалыңдығы 94-103 мкм кеуекті құрылымы бар стехиометриялық құрамды катодты материалдың (ЖЭҚ) үздіксіз қабаттары алынды. Металл-ауа ұяшығының энергетикалық сипаттамаларының жақсаруы анод ретінде жоғары энергиялы элементтен алынған материалдарды пайдалану кезінде көрінеді.



Keywords:

high-entropy alloy, plasma spraying, coating, metal-air element

ABSTRACT

High internal entropy alloys (HIE) consisting of transition metals are promising materials for use in power engineering and mechanical engineering. In this work, HIE samples were obtained and studied in the form of a solid alloy and a coating. A HIE cathode sample consisting of five transition metals of the Fe-Co-Ni-Nb-Mo composition was plasma sputtered using a VDU setup. A modified structure and increased roughness of up to 100 μm were found on the cathode surface. Continuous layers of cathode material at stoichiometric composition with a porous structure, 94-103 μm thick, were obtained on copper substrates. Improvement of energy characteristics of metal-air element is shown when using materials from high-entropy alloy as anode.

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 (Hao-Fan Wang & Xu, 2019). 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 Parker, Chervin, Nelson, Rolison и Long (2014) предложили трехмерную губчатую цинковую губку со взаимосвязанными порами и электропроводностью, но результаты только обнадеживают. В работе Liu, Ling, Zhong, Deng, Han и Hu (2019) 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 импульсными 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 Fu, Ma, Zhao, Li и Su (2021) 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 высокой емкостью (700 Ф/см³) и циклической стабильностью (>3000 циклов). Однако о воздушных аккумуляторах сведений нет. Пористые материалы также активно пытаются получить для окислительно-восстановительных реакций и катализа. Авторы работы Tang, Xu, Ye, Li и Luo (2021) получили высокоэффективный пористый ВЭС CoCrFeNiMo методом микроволнового спекания: избыточный потенциал достигает 220 мВ



при плотности тока 10 mA/cm^2 . Это связано с возможностью пористой структуры обеспечивать электронный перенос. Полученные методом магнетронного распыления высокоэнтропийные оксидные пленки ($\text{FeCrCoNiAl}_{0,1}$) Ох обеспечивали избыточный потенциал 381 мВ и электролизную стабильность в течение 120 ч. в щелочном растворе при плотности тока 10 mA/cm^2 (Zhao et al., 2021). 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 (Boxman, Martin, & Sanders, 1995). 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 (Pilch, Soderstrom, Lundin, & Helmersson, 2014; Aksenov, Konovalov, & Pershy, 1988). Помимо энергетических параметров, определяющими факторами в работе импульсного дугового разряда являются состав плазмы, ее температура, а также наличие или отсутствие магнитного и электрического полей (Lafferty, 1980; Jüttner, 2001; Hantzsche, 2003). 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 составляющих, 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 в осаждаемом покрытии.

Традиционные методы проектирования сплавов методом подбора состава достигли своих ограничений из-за растущей сложности сплавов, таких как ВЭС. Кроме этого, большая разница температур плавления может привести к проблемам с нерасплавленными частицами, что ограничивает их применимость к сложным системам сплавов, таким как среднеэнтропийные сплавы на основе железа FeCoCrNiMo (FeMEA) (Lee, Lee, & Koo, 2025).

Таким образом, целью настоящей работы является выяснить особенности распыления катода из ВЭС и получить покрытие из него. В последние несколько лет в мире активировались исследования МАВ с анодами из лития и магния, а также по применению МАВ в электромобилях (Liu, Placke, & Chau, 2022; Sun et al., 2022; Wang et al., 2022b). Рассматриваются также варианты электрически заряжаемых МАВ на основе пористых электродов (Wang, Snihirova, Deng, Vaghefinazari, Xu, H'oché, Lamaka, & Zheludkevich, 2022; Li, Zhang, Wang, & Peng, 2022; Liu et al., 2021; Parker, Chervin, Nelson, Rolison, & Long, 2014). Поэтому практический интерес представляет собой испытание ВЭС в качестве анода в металл-воздушных батареях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Твердые образцы катодов из ВЭС, изготовленные по технологии низкотемпературного синтеза, были поставлены компанией Hebei Metal Construction Corporation (заказное), с исходной чистотой 99,9 %. Катоды в виде цилиндров диаметром 5 см состоят из металлов переходной группы состава Fe-Co-Ni-Nb-Mo (все по 20 Аг %). Далее катоды распыляли на установке ВДУ (вакуумное дуговое распыление), а продукты распыления осаждали на подложках из меди. Для осаждения покрытия из ВЭС использовались подложки из меди М01, фабричные штампы в виде пластин размерами $20 \times 20 \times 1$ мм. Распыление катодов ВЭС проводилось при уровне вакуума 10^{-4} 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, оптическом микроскопе Leika DM 5000 и РФА дифрактометре Rigaku.

Для обработки применяли вакуумную установку ВДУ (Zhukeshov, Gabdullina, Amrenova, & Fermakhan, 2020). Принципиальная схема импульсного ускорителя плазмы показана на рис. 1. В вакуумной камере 5 имеются два цилиндрических электрода – анод 1 и катод 2, расположенные на расстоянии $d = 3-6$ см друг от друга. При подаче постоянного напряжения на эти электроды пробоя не наблюдается, так как вакуум является очень хорошим изолятором. При принудительной инициации разряда через электрод поджига 3 вначале плазма формируется при искровом пробое между катодом и поджигающим электродом. Затем плазма распространяется (ускоряется) от поверхности катода к полюсу аноду и далее выходит на подложку 4. Подложка находилась на держателе из керамики, т.е. находилась под плавающим потенциалом.

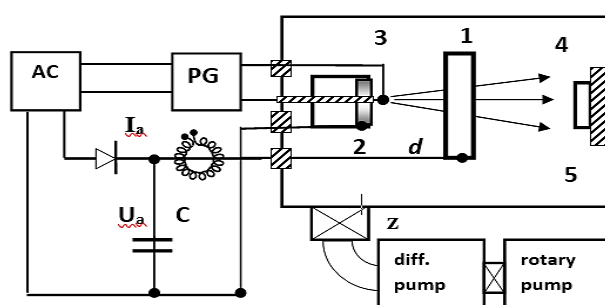


Рисунок 1. Принципиальная схема ускорителя плазмы ВДУ-1

Примечание – составлено авторами

Первичная плазма образуется на катоде 2 в результате искры от поджигающего электрода 3, на который подавался высоковольтный импульс $V_p \sim 10$ кВ, 300 нс от вторичной обмотки импульсного трансформатора. На первичную сторону трансформатора разряжали емкость 60 мкФ, 500 В через тиристор. Частота следования импульсов генератора PG была 5 Гц. Для питания анода использовался сетевой автотрансформатор AC на 220 В, 40 А. Постоянное напряжение U_a величиной 400 - 200 В на промежуток анод (+) - катод (-) подавали с однополупериодного выпрямителя Д. Разрядная емкость С состояла из батареи импульсных конденсаторов ИМ-100 по 100 мкФ, в основной части экспериментов использовалось суммарно 400 мкФ.

Испытания по электрохимии ВЭС сплава проводили на электрохимической ячейке, изготовленной в лаборатории. В установке электролит из резервуара прогонялся с постоянной скоростью через ячейку из оргстекла с цилиндрической камерой - реактором диаметром 3 см. Ячейка состоит из реактора с фиксированным объемом и двух электродов. Воздушный электрод состоит из наружной сетки – токосъемника (+) и из углеродного полимерного катода. В качестве анода (-) в химической ячейке используется испытуемый материал, т.е. образец ВЭС (катод в ВДУ).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из РФА спектра на рис. 2, исходная структура сплава Fe-Co-Ni-Nb-Mo кристаллическая, но присутствует диффузная составляющая спектра, связанная с подъемом кривой спектра до 40° из-за действия фильтра аппарата. Образец ВЭС содержит интенсивные линии ОЦК γ -Ni и интерметаллида никеля-ниобия (Nb_{0,19}Ni_{0,81}), а линии железа-молибдена (Fe₃Mo) и кобальта слабее. В целом можно сказать, что на этапе формирования сплава возникло три основные фазы: никель, образовавший две новые



фазы, и железо с молибденом. Кобальт из-за своей высокой температуры плавления наблюдается в виде кристаллических включений. Размеры кристаллитов удалось определить только для гамма-фазы никеля – 83 Å. Данные о кристаллической решетке сплава приведены в табл. 1. Особенностью структуры являются длинные кристаллы железа-молибдена (25 Å) и относительно большие размеры кристаллов кобальта.

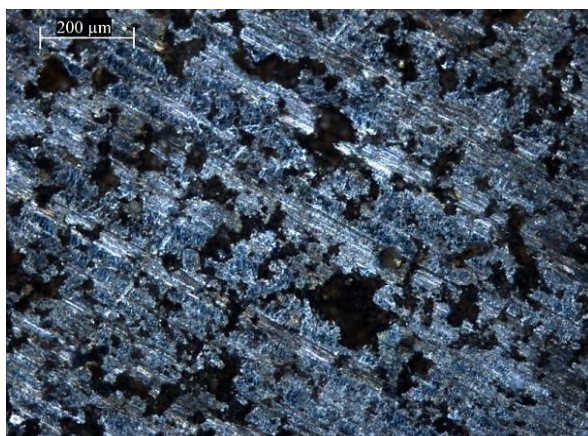


Рисунок 2. Рентгенограмма образца ВЭС

Примечание – составлено авторами

Таблица 1. Кристаллические характеристики сплава ВЭС

фаза	a(Å)	b(Å)	c(Å)
gamma-Ni	3,578371	3,578371	3,578371
NickelNiobium	2,581155	2,581155	4,235052
IronMolybdenum	4,751151	4,751151	25,602956
Cobalt	8,244845	8,244845	10,315437

Примечание – составлено авторами

Анализ фото на рис. 3 показывает многофазную структуру с ярко выраженной границей зерен. Визуально наблюдаются как минимум две фазы: светлые участки на основе железа-никеля и темные на основе железа и его оксидов/карбидов. В итоге имеем пористую в смысле неравномерной плотности структуру на микроуровне уже на исходном образце.

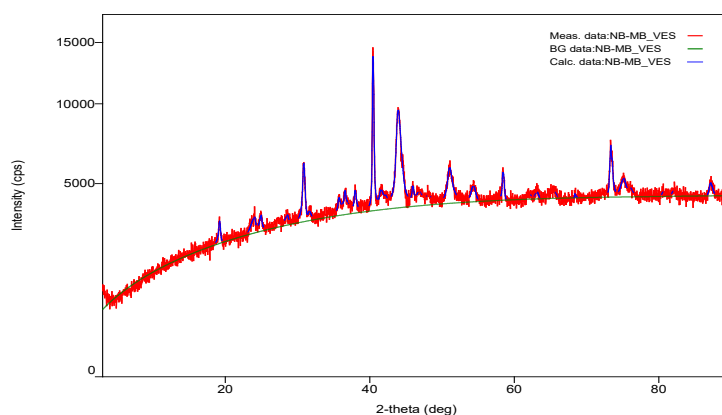


Рисунок 3. Топография исходной (Fe-Co-Ni-Nb-Mo, 1:1:1:1 At%) поверхности ВЭС (оптика, 10X)

Примечание – составлено авторами

В результате распыления на ВДУ поверхность монолитного ВЭС катода подвергалась эрозии. На фотографии катода (рис. 4) видно образование зоны расплавления в центральной части. При увеличении этой поверхности в 10 раз на рисунке 5 заметны микроскопические углубления. Таким образом, после распыления на ВДУ на поверхности катода формируется рельеф с микроскопическими углублениями размером порядка 250 мкм. Природа этих углублений, очевидно, связана с током дуги на поверхности, который концентрируется в катодных пятнах. Однако из-за своеобразной структуры сплава пятна могут неравномерно двигаться по поверхности и расплавлять поверхность в определенных местах, создавая углубления.



Рисунок 4. Фотография катода

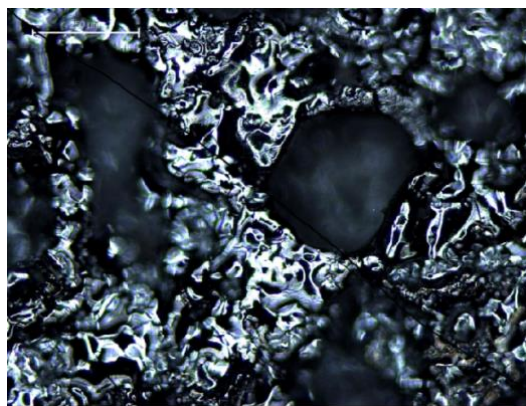


Рисунок 5. Топография поверхности из ВЭС диаметром 5 см обработанной плазмой катода из ВЭС при ув. 10 (шкала 250 мкм).

Примечание – составлено авторами

Оптическим микроскопом DM 5000 методом последовательной фокусировки было определено, что углубления имеют размер до 100-150 мкм. Профиль поверхности обработанного плазмой катода показан на рис. 6.

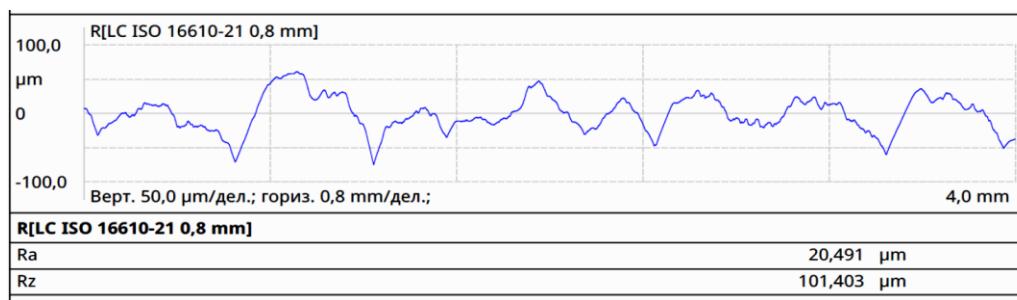


Рисунок 6. Профиль поверхности ВЭС катода после распыления

Примечание – составлено авторами

В микроскопическом рассмотрении наличие множества углублений на поверхности можно рассматривать как пористость на микроуровне. Дополнительно к этому, как было показано выше, существует и пористость на объемном уровне, связанная с фазовой структурой ВЭС.

Далее рассмотрим результаты исследования структуры покрытий, полученных при распылении ВЭС катода на установке ВДУ. На рис. 7, а и 7, б показан рельеф поверхности покрытия из ВЭС, осажденного на подложке из полированной меди при различном



разрешении. Как видно, покрытие осаждается сплошным слоем, но имеет пористую структуру.

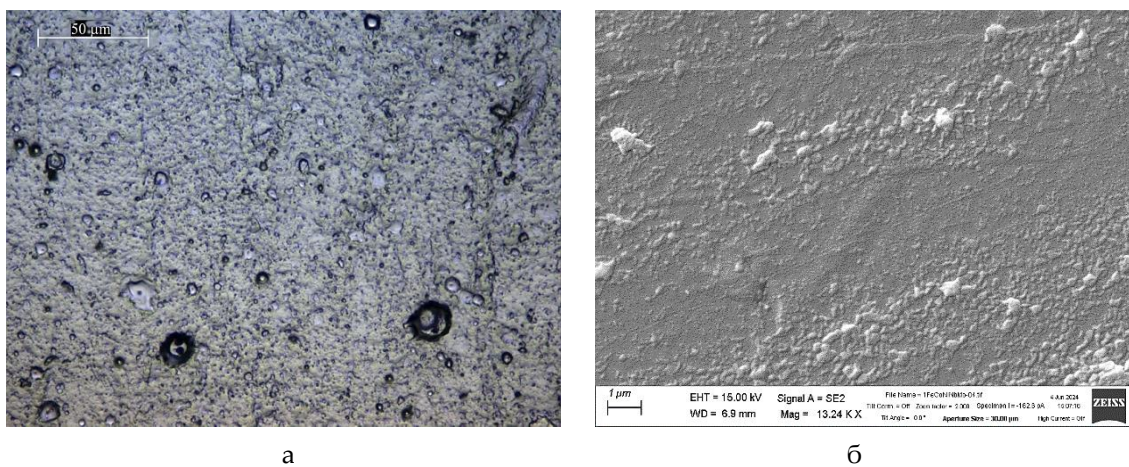


Рисунок 7. Покрытия из ВЭС, осажденные на поверхности подложки из меди:
а – при увеличении 50х (оптика); б – 2000Х (РЭМ)

Примечание – составлено авторами

Для того чтобы оценить состав осажденных из плазмы слоев, проведен рентгено-спектральный анализ поверхности. Результаты показаны на рис. 8. Атомный состав покрытия полностью соответствует исходному составу ВЭС катода с отклонением $\pm 5\%$. 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 рис. 9.

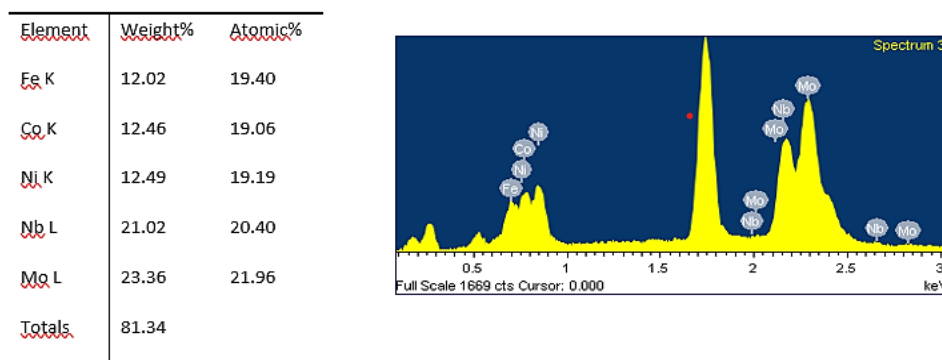


Рисунок 8. Химический состав и РСА спектр сплошных слоев из ВЭС,
осажденных на поверхности подложки из меди

Примечание – составлено авторами

Значительное содержание активных газов в пятнах связано с масляной откачкой. Белые пятна, присутствующие на покрытии, обусловлены реакцией остаточных активных газов в вакууме с материалом подложки с образованием фаз и процессами сорбции в процессе формирования покрытия. Их состав расшифрован на рис. 9.

Толщина осажденных покрытий исследовалась с применением СЭМ на фотографиях поперечного сечения покрытий. На рис. 10 покрытие из ВЭС осаждено равномерно, а толщина составляет от 94 до 103 мкм. Структура покрытия однородная, но с присутствием включений в виде мелких черных точек, которые могут быть оксидами.

Element	Weight%	Atomic%
C K	27.42	69.60
O K	12.13	23.12
Fe K	2.59	1.41
Co K	3.27	1.69
Ni K	3.35	1.74
Nb L	3.32	1.09
Mn L	4.23	1.34
Totals	56.31	

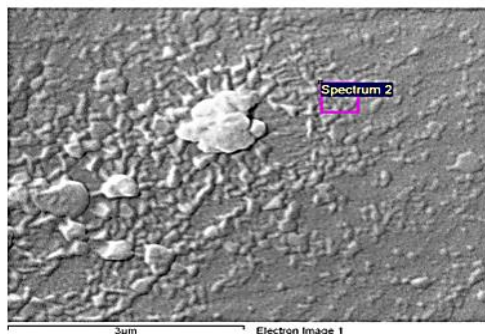
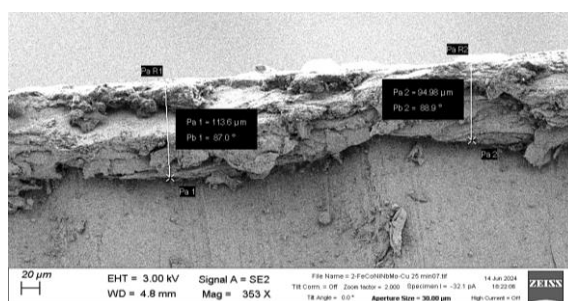


Рисунок 9. Химический состав и изображение РЭМ белых пятен, осажденных на поверхности подложки

Примечание – составлено авторами



а

б

Рисунок 10. Толщина сплошных слоев из ВЭС, осажденных на поверхности подложки из меди на поперечном шлифе

Примечание – составлено авторами

В целом практически все покрытия, получаемые методом распыления на ВДУ, обладали пористой структурой в той или иной мере. Структурные особенности осажденных покрытий из меди, алюминия и других металлов мы приводим в работах (Boxman, Martin, & Sanders, 1995; Pilch, Soderstrom, Lundin, & Helmersson, 2014).

Испытания ВЭС образцов в электролите

Далее приведена информация о результатах испытаний образцов целых катодов с обработкой и без. Испытаниям подверглись аноды из ВЭС, показанные на рис. 6, а также серия отдельных чистых анодов Fe, Co, Ni и др. В табл. 2 и 3 представлены результаты испытаний анодов из ВЭС в испытательной ячейке. Испытания проводились с электролитами КОН и NaOH, наиболее часто применяемыми для анодов МВБ на основе железа, в течение 15 -25 мин.

Таблица 2. Данные испытаний анода из ВЭС с обработкой поверхности

Анод из ВЭС	Электролит	Время	I _{max} , А	U _{max} ,В
Fe-Co-Ni-Nb-Mo обработанный	КОН	5 мин	0,27	0,99
	КОН	15 мин	0,24	1,02
	КОН	20 мин	0,221	1,02
	КОН	25 мин	0,2	1,02

Примечание – составлено авторами



Таблица 3. Данные испытаний исходного анода из ВЭС

Анод из ВЭС	Электролит	Время	I_{max}	U_{max}
Fe-Co-Ni-Nb-Mo исходный	КОН	5 мин	0,033	0,7
	КОН	15 мин	0,045	0,81
	КОН	20 мин	0,051	0,85
	КОН	25 мин	0,057	0,88

Примечание – составлено авторами

Анализируя данные таблиц, можно сделать вывод, что при испытании в наиболее сильном щелочном электролите КОН образцы катодов из ВЭС демонстрируют более высокие показатели по избыточному напряжению 1,0 и 0,7 В, в сравнении с указанными выше литературными данными. Показатели тока для обработанного плазмой образца катода оказались почти в четыре раза выше показателей тока необработанного образца – 200 мА против 57 мА. Далее на рис. 11 и 12 показаны кривые напряжения и тока на испытываемых электродах.

На рис. 11 ток после начального замедления выходит на участок роста, что позволяет судить о высокой нагрузочной способности обработанного анода. Начальный рост напряжения на рис. 11 и 12 мы связываем с динамическими процессами в электролите. В ВЭС основным компонентом является железо, но нам было интересно проследить поведение остальных элементов в составе ВЭС при испытаниях в разных электролитах. Для этого брали аноды из чистых металлов и проводили аналогичное испытание в ячейке МВБ.

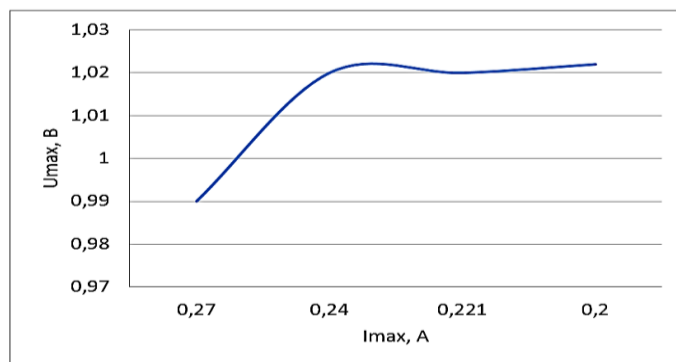


Рисунок 11. Кривая ВАХ для анода с обработанной поверхностью

Примечание – составлено авторами

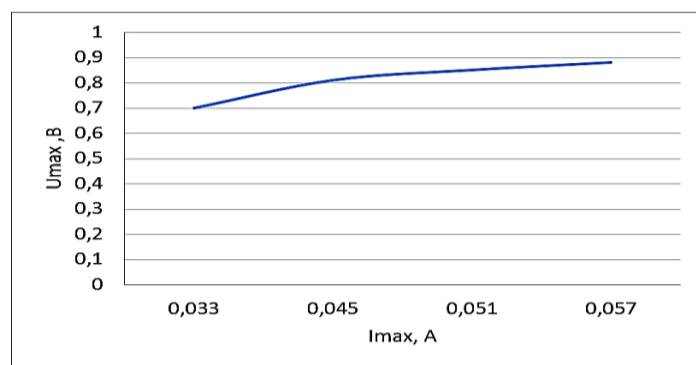


Рисунок 12. Кривая ВАХ для анода с исходной поверхностью

Примечание – составлено авторами



Далее в табл. 4 показаны результаты испытаний остальных материалов, входящих в состав ВЭС.

Таблица 4. Данные испытаний чистых анодов из различных металлов из состава ВЭС

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

Примечание – составлено авторами

Как видно из таблицы, 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-1. 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 более пористых материалов и 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. Исходя из анализа параметров тока и напряжения отдельных компонентов при испытаниях в выбранном типе электролита, в дальнейшем будет определяться конкретный химический состав ВЭС для электродов с конкретными физическими характеристиками.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена при поддержке гранта BR21882187 комитета науки МНиВО РК.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Wang, H.-F., & Xu, Q. (2019). Materials design for rechargeable metal-air batteries. *Matter*, 1(3), 565–595.
- Parker, J. F., Chervin, C. N., Nelson, E. S., Rolison, D. R., & Long, J. W. (2014). Wiring zinc in three dimensions re-writes battery performance—dendrite-free cycling. *Energy & Environmental Science*, 7, 1117–1124.
- Liu, P., Ling, X., Zhong, C., Deng, Y., Han, X., & Hu, W. (2019). Porous zinc anode design for Zn-air chemistry. *Frontiers in Chemistry*, 7, Article 656. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00656>
- Fu, M., Ma, X., Zhao, K., Li, X., & Su, D. (2021). High-entropy materials for energy-related applications. *Science*, 24(3), 102177. <https://doi.org/10.1016/j.science.2021.102177>
- Tang, J., Xu, J. L., Ye, Z. G., Li, X. B., & Luo, J. M. (2021). Microwave sintered porous CoCrFeNiMo high entropy alloy as an efficient electrocatalyst for alkaline oxygen evolution reaction. *Journal of Materials Science and Technology*, 79, 171–177.
- Zhao, S., Wu, H., Yin, R., Wang, X., Zhong, H., Fu, Q., ... Ren, F. (2021). Preparation and electrocatalytic properties of (FeCrCoNiAl_{0.1})₂O₃ high-entropy oxide and NiCo-(FeCrCoNiAl_{0.1})₂O₃ heterojunction films. *Journal of Alloys and Compounds*, 868, 159108. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159108>
- Boxman, R.L., Martin, P.J., & Sanders, D.M. (Eds.). (1995). *Handbook of vacuum arc science and technology*. Noyes.
- Pilch, D., Soderstrom, D., Lundin, U., & Helmersson, U. (2014). The use of highly ionized pulse plasmas for the synthesis advances thin films and nanoparticles. *Kona Powder and Particle Journal*, 31, 171–180.
- Aksenov, I. I., Konovalov, I. I., & Pershy, V. F. (1988). About low-pressure arc cathode erosion. *Thermophysics of High Temperatures*, 26(3), 442–449.
- Lafferty, J. M. (Ed.). (1980). *Vacuum arcs: Theory and application*. Wiley.
- Jüttner, B. (2001). Cathode spots of electric arcs. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34, R103.
- Hantzsche, E. (2003). Mysteries of the arc cathode spot: A retrospective glance. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 31, 799–808.
- Lee, J. H., Lee, J. Y., Koo, B. W., et al. (2025). Accelerated discovery and testing of Fe–Co–Cr–Ni–Mo ferrous medium-entropy alloys: Advanced in-situ alloying via direct energy deposition. *Journal of Materials Research and Technology*, 37, 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.06.001>
- Liu, W., Placke, T., & Chau, K. T. (2022). Overview of batteries and battery management for electric vehicles. *Energy Reports*, 8, 4058–4084. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.016>
- Sun, Q., Dai, L., Luo, T., Wang, L., Liang, F., & Liu, S. (2022). Recent advances in solid-state metal-air batteries. *Carbon Energy*, 1–23. <https://doi.org/10.1002/cey.2.276>
- Wang, Y., Sun, Y., Ren, W., Zhang, D., Yang, Y., Yang, J., ... NuLi, Y. (2022). Challenges and prospects of Mg-air batteries: A review. *Energy Materials*, 2, 200024. <https://doi.org/10.20517/energymater.2022.20>
- Wang, L., Snihirova, D., Deng, M., Vaghefinazari, B., Xu, W., Höche, D., ... Zheludkevich, M. L. (2022). Sustainable aqueous metal-air batteries: An insight into electrolyte system. *Energy Storage Materials*, 52, 573–597. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.08.032>
- Li, J., Zhang, K., Wang, B., & Peng, H. (2022). Light-assisted metal-air batteries: Progress, challenges, and perspectives. *Angewandte Chemie International Edition*, 61. <https://doi.org/10.1002/anie.202213026>
- Liu, Y., Lu, X., Lai, F., Liu, T., Shearing, P. R., Parkin, I. P., He, G., & Brett, D. J. L. (2021). Rechargeable aqueous Zn-based energy storage devices. *Joule*, 5, 2845–2903. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.10.011>
- Parker, J. F., Chervin, C. N., Nelson, E. S., Rolison, D. R., & Long, J. W. (2014). Wiring zinc in three dimensions re-writes battery performance—Dendrite-free cycling. *Energy & Environmental Science*, 7(1–3), 1–14.



Zhukeshov, A. M., Gabdullina, A. T., Amrenova, A. U., & Fermakhan, K. (2020). The pulse vacuum-arc plasma generator for nanoengineering application. Applied Physics A: Materials Science and Processing, 126(9), 742. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03807-2>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Амренова Асем Уахитовна – ф.м. ғ.к., әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университетінің аға оқытушы, Алматы қ., Қазақстан

Амренова Асем Уахитовна – к. ф.-м. н., старший преподаватель Казахского национального университета им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

Asem Amrenova – doctor PHD in Physics, al-Farabi Kazakh National university, Almaty, Kazakhstan

e-mail: Amrenova.ase77@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6945-3644>



Салимов Ернар Ерланулы – техника және технологиялар магистрі, Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

Салимов Ернар Ерланулы – магистр техники и технологии, Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы, Казахстан

Salimov Yernar Yerlanuly – Master of technique and technology, Almaty university of power engineering and telecommunication named after Gumarbek Daukeev, Almaty, Kazakhstan

e-mail: ernar1996@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7712-6263>



Әбдібай Ұлан Болатулы – техника және технология магистрі, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

Абдыбай Ұлан Болатулы – магистр техники и технологии, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

Abdibai Ulan Bolatuly – Master of technique and technology, al-Farabi Kazakh National university, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: ernar1996@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5309-582>



Жукешов Ануар – ф.м. ғ.д., профессор, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

Жукешов Ануар – д. ф.-м. н., профессор, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

Zhukeshov Anuar – doctor PHD in Physics, professor, al-Farabi Kazakh National university, Almaty, Kazakhstan

e-mail: Zhukeshov@physics/kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9153-323X>