

Размерный эффект в гальванотехнике: метод определения и ячейка для его оценки

Т. Борцой

Институт прикладной физики, г. Кишинев, MD-2028, Молдова
e-mail: bortzoi.tudor@gmail.com

Поступила в редакцию 19.09.2022

После доработки 28.11.2022

Принята к публикации 30.11.2022

Показано, что отклик функционального свойства осадка на действие размерных факторов условий электролиза в равной степени определяет и размерное свойство электролита. Установлено, что наиболее универсальные методы оценки размерных эффектов могут быть сформированы на основе корреляции безразмерных величин ряда заданных и направленных по величине значений размерного фактора с рядом соответствующих значений функционального параметра осадка. Показано, что исследование размерных свойств электролитов и осадков в зависимости от типа размерных факторов и их масштабных шкал позволит расширить возможности применяемых электролитов, повысить управляемость формированием функционального параметра осадка, получить новые сведения о процессе осаждения наноструктурированных осадков, раскрыть факторы, которые ранее не привлекали внимания. Представлены метод определения и ячейка для количественной оценки размерных свойств осадка и электролита.

Ключевые слова: свойство электролита, размерный параметр, функциональный параметр, внутренний размерный эффект, внешний размерный эффект, масштабная иерархия, направленные значения, безразмерная величина

УДК 544.65

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.6.29>

ВВЕДЕНИЕ

В физике, химии, биологии и других науках на примере многих объектов показано, что эффект изменения их свойств под влиянием одного фактора, без изменения других факторов, можно отнести к размерным эффектам. В этом смысле наука о размерных эффектах является междисциплинарной областью знаний.

В настоящее время принято различать два типа размерных эффектов: внутренний, связанный со специфическими изменениями в поверхностных, объемных и химических свойствах объекта, и так называемый внешний, который является размерно-зависимым ответом на внешнее действие сил, независимых от внутреннего эффекта [1, 2].

Следует отметить, что для выявления размерных эффектов используются методы, основанные на обнаружении корреляции между размерными факторами внешних сил или размерами изучаемых объектов и свойствами этих объектов.

В гальванотехнике методы оценки размерных эффектов применялись задолго до появления понятия «размерный эффект» и были переосмыслены более глубоко в последнее десятилетие благодаря иерархическому проявлению размерных эффектов.

Например, в гальванотехнике основным фактором, влияющим на процесс формирования функционального осадка, является электролит. Свойство электролита оценивают, прежде всего методами, основанными на выявлении корреляции между параметрами условий электролиза и функциональным параметром осадка.

Одно из свойств электролита – макрорассеивающая способность – оценивается методом, основанным на выявлении корреляции между плотностью первичного распределения тока и количеством осадка [3, 4].

Очевидно, что при оценке макрорассеивающей способности электролита выявляется размерный эффект, а первичное распределение плотности тока является размерным фактором, не связанным с осадком, и потому относится к типу внешних факторов.

Другое свойство электролита – микрорассеивающая способность – оценивается методом, основанным на выявлении корреляции между микропрофилем поверхности катода, на котором распределение первичной плотности тока одинаково, и количеством осадка, осажденного в углублениях и на пиках микропрофиля [3, 4].

Очевидно, что при оценке микрорассеивающей способности электролита выявляется

размерный эффект, а профиль поверхности осаждения является размерным фактором, связанным с осадком, и потому относится к типу внутренних факторов.

СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РАЗМЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ В ГАЛЬВАНОТЕХНИКЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Следует отметить, что в гальванотехнике размерный эффект в равной мере выявляется при оценке свойств осадка и свойств электролита в зависимости от размерных факторов условий электролиза.

Например, в работах [5–8] размерный эффект выявлен при изучении цитратных и глюконатных электролитов методом, основанным на установлении корреляции между параметрами условий электролиза (объемной плотностью тока, размером поверхности осаждения) и функциональным свойством осадка Co-W (микротвердостью и плотностью тока коррозии).

Очевидно, что объемная плотность тока и размер поверхности осаждения являются размерными факторами, связанными с объектом (осадок), и относятся к типу внутренних факторов.

В работе [9] размерный эффект выявлен при изучении пирофосфатного электролита меднения на дисковых образцах методом, основанным на установлении корреляции между параметром условий электролиза (размером дискового электрода) и функциональным свойством осадка (скоростью коррозии).

Очевидно, что размер дискового электрода является размерным фактором, связанным с объектом (осадком), и относится к внутреннему типу факторов.

В работе [10] выявлен размерный эффект при изучении пирофосфатного электролита меднения методом, основанным на установлении корреляции между параметром условий электролиза (размером медных нанопроводов) и функциональным свойством осадка (скоростью коррозии).

Очевидно, что размер нанопроводов является размерным фактором, связанным с объектом (осадком), и относится к внутреннему типу факторов.

Также в [10] размерный эффект выявлен при изучении пирофосфатного электролита меднения методом, основанным на установлении корреляции между параметром условий электролиза (длительностью паузы импульсного тока) и функциональным свойством осадка (скорость коррозии медных осадков, полученных в виде нанопроволоки).

Очевидно, что длительность паузы импульсного тока является размерным фактором, не связанным с объектом (осадком), и относится к внешнему типу факторов.

В работах [11–14] размерный эффект выявлен при исследовании глюконатного электролита методом, основанным на установлении корреляции между условием электролиза (время, прошедшее после приготовления электролита) и функциональным свойством осадков Co-W (микротвердость).

Очевидно, что период отстаивания электролита является размерным фактором, связанным с объектом (осадком), и относится к внутреннему типу факторов.

В работе [15] размерный эффект выявлен при исследовании формирования наноструктур никелевого покрытия методом, основанным на установлении корреляции между параметром электролиза (скважностью импульсного тока, соотношением длительностей прямого и обратного импульса реверсированного тока) и функциональным свойством осадка (наноструктура осадка).

Очевидно, что скажность импульсного тока и соотношение длительностей прямого и обратного импульса реверсированного тока являются размерными факторами, несвязанными с объектом (осадок), и относятся к внешнему типу факторов.

Отметим, что на основании работ [3, 4, 7, 16] можно утверждать, что в гальванотехнике при оценке размерных эффектов иногда принято использовать масштабную шкалу (макро-, микро-, наноуровень), которая является элементом условности для определения свойств электролита.

Также в гальванотехнике наиболее разработаны методы оценки размерных эффектов, основанных на оценке свойств электролита (макро- и микрорассеивающие способности и др.). Они представлены большим разнообразием количественных показателей и специальных ячеек, позволяющих задавать направленные значения размерного фактора [3, 4, 17–20].

Менее разработаны методы оценки размерных эффектов свойств осадка, поскольку они представлены в основном в виде качественной оценки, а значения размерных факторов задаются в обычных ячейках [5–16].

В связи с этим *цель настоящей работы* – представить на обсуждение концепцию связи между размерными эффектами свойств осадка и свойствами электролита, предложить по возможности универсальный метод, а также показатели количественной оценки размерных эффектов и

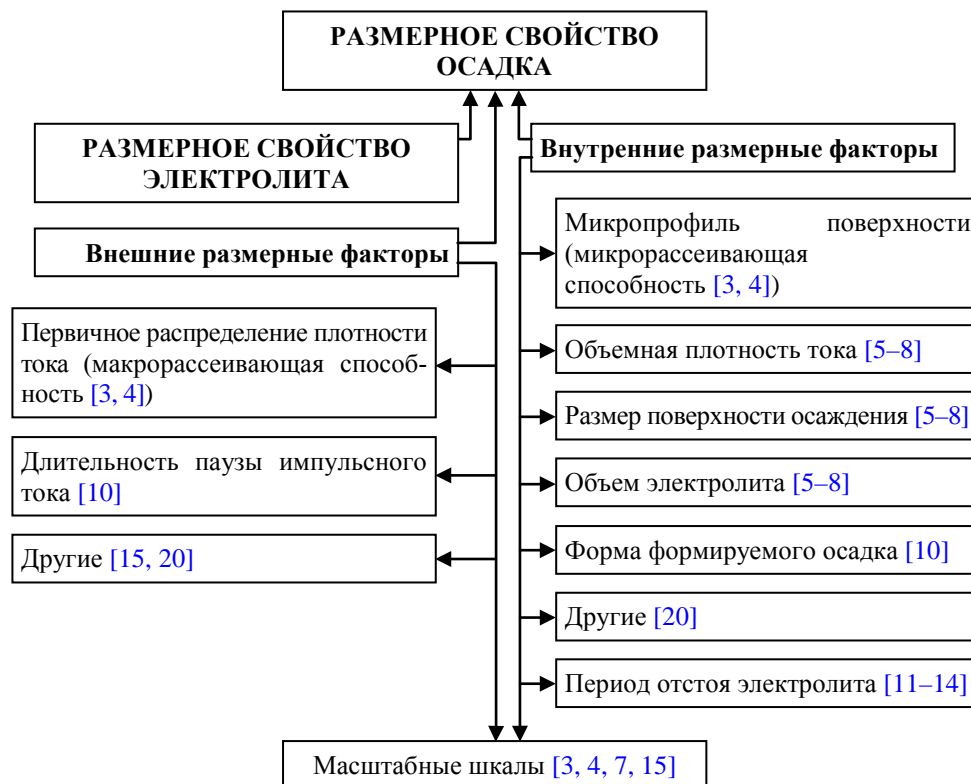


Рис. 1. Схема доминирующей концепции идентичности размерных эффектов свойств осадка и свойств электролита.

ячейку для их количественной оценки с направленными изменениями значений внутреннего размерного фактора.

КОНЦЕПЦИЯ, МЕТОД, ПАРАМЕТР И ЯЧЕЙКА ДЛЯ ОЦЕНКИ РАЗМЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ В ГАЛЬВАНОТЕХНИКЕ

В соответствии с определением размерного эффекта в других областях науки [1, 2] в гальванике его можно отнести к свойствам осадка. Однако, согласно работам по определению макро- и микрорассеивающей способности электролита [3, 4], размерный эффект можно отнести и к свойствам электролита.

Кроме того, внутренние размерные эффекты свойств осадков могут проявляться как вследствие размерных факторов поверхности осаждения, так и вследствие размерных факторов электролита (объем, объемная плотность тока, период отстаивания электролита и др.).

Таким образом, представление об автономии размерных эффектов свойств осадка и электролита не является абсолютным. Более того, в основном доминирует их идентичность, что и показано на рис. 1.

Отметим, что наиболее многочисленные факторы, влияющие на размерное свойство электролита, – это внутренние факторы, а наименее многочисленные – внешние влияющие факторы (рис. 1).

Кроме того, для обоих типов факторов могут быть созданы масштабные шкалы, а методы их оценки могут образовать масштабную иерархию.

Отметим, что исследование размерных свойств электролитов и осадков в зависимости от типа размерных факторов и их масштабных шкал позволит расширить возможности применяемых электролитов, повысить управляемость формированием функциональных параметров осадка, получить новую информацию о процессе осаждения осадков, в том числе наноструктурированных, обнаружить факторы, которые ранее не принимались во внимание.

Однако в связи с большим количеством и разнообразием влияющих на размерные эффекты факторов для их оценки необходимо использовать более универсальные методы. Они могут быть сформированы на основе корреляции безразмерных величин ряда заданных и направленных по величине значений размерного фактора с рядом полученных значений функционального параметра осадка.

Безразмерная величина может быть сформирована на основе отношения разности между значением параметра и средним значением диапазона ряда измерений к среднеквадратичному значению диапазона [17] или

$$t_j(X) = \frac{x_j - \bar{x}}{s_x}, \quad (1)$$

где $t_j(X)$ – безразмерное значение измерения j из ряда X , состоящее из n измерений и полученное

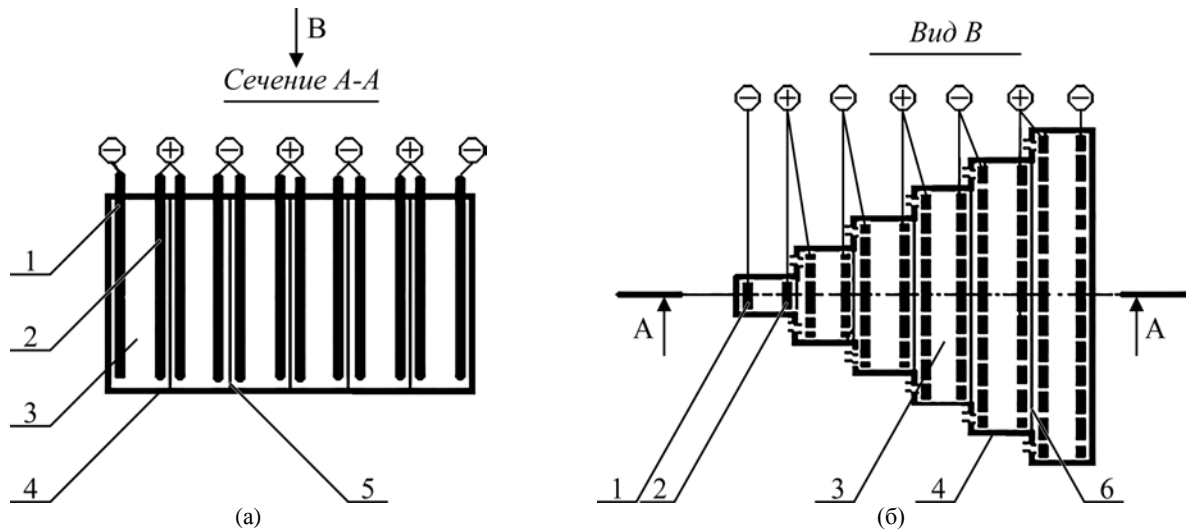


Рис. 2. Многосекционная ячейка, которая в сечении А-А (а) состоит из катодов (1), анодов (2), рабочих секций (3), дна (4), кожуха (5) и секционных стенок (6) – вид В (б).

отношением разности j измерения и средним значением ряда $\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n}$ к среднеквадратичному значению диапазона ряда значений

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j - \bar{x}}{n-1}}$$

Количественное сравнение безразмерных величин двух рядов может быть оценено показателем (R_A), значение которого можно определить по сумме произведений одноименных безразмерных величин рядов, отнесенной к сумме абсолютных величин этих произведений, или

$$R_A(X_i X_f) = \frac{\sum_{j=1}^n t_j(X_i) \times t_j(X_f)}{\sum_{j=1}^n |t_j(X_i) \times t_j(X_f)|}, \quad (2)$$

где X_i и X_f – сравнимые ряды внешнего размерного фактора (i) и соответственно функционального параметра осадка (f).

Из выражения (2) видно, что показатель R_A может количественно сравнивать ряды безразмерных величин двух параметров и в интервале ± 1 , в зависимости от их относительного совпадения или несовпадения, изменения в ряду безразмерных величин одного параметра с изменениями другого параметра.

Также количественное сравнение безразмерных величин двух рядов может быть оценено по показателю (R_B), значение которого можно определить по сумме показателя R_A с отношением разности между единицей и R_A , деленной на два, или

$$R_B(X_i X_f) = \left[R_A + \frac{(1 - R_A)}{2} \right] \times 100\%. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что показатель R_B может количественно сравнивать ряды безразмерных величин двух параметров и в интервале

0–1 или 0–100%, в зависимости от доли совпадения, изменения в ряду безразмерных величин одного параметра с изменениями в ряду другого параметра.

Таким образом, ряды значений двух параметров можно количественно сравнивать по рядам их безразмерных величин как в частности, так и в целом.

Следует отметить, что для оценки размерных свойств осадка или электролита ряды значений размерных факторов должны быть направлены по величине. Также должны оставаться неизменными значения остальных факторов условий электролиза.

Для формирования направленных значений некоторых внутренних размерных факторов предлагается использовать многосекционную ячейку.

На рис. 2 представлена такая ячейка, состоящая из катодов (1) и анодов (2), размещенных в каждой рабочей секции (3), у которой дно (4) и кожух (5) являются общими для всех секций, а стенки секций (6) могут образовывать направленный ряд значений размерного фактора в секциях (рис. 2б).

Отметим, что в такой ячейке могут формироваться два и более ряда значений размерных факторов (объемная плотность тока, размер поверхности осаждения и т.д.).

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА, ОЦЕНИВАЕМОГО ПОКАЗАТЕЛЯ И ЯЧЕЙКИ

В работе [8] представлены результаты исследования глюконатного электролита путем установления корреляции между размерными параметрами условий электролиза (внешний фактор) и функциональным параметром осадка Co-W (плотность тока коррозии).

Таблица 1. Заданные значения размерных параметров электролиза и полученные значения функционального параметра для осадков Co-W [7]

Объем электролита, X_1 , мл	Плотность тока коррозии, X_f , А/см ²	Объемная плотность тока, X_2 , мА/л	Плотность тока коррозии, X_f , А/см ²	Поверхность осаждения, X_3 , см ²	Плотность тока коррозии, X_f , А/см ²
50	5,16	10	4,76	0,1	8,560
100	3,85	20	4,84	0,5	4,840
200	4,73	50	4,73	1,25	3,740
500	4,84	100	3,85	2,5	3,690
1000	4,76	200	5,16		

Таблица 2. Безразмерные величины заданных размерных параметров электролиза и полученного функционального параметра для осадков Co-W. Расчетное значение корреляционных показателей R_A и R_B

$t(X_1)$	$t(X_f)$	$t(X_2)$	$t(X_f)$	$t(X_3)$	$t(X_f)$
-0,814	1,004	-0,850	0,123	-0,934	1,459
-0,687	-1,680	-0,721	0,287	-0,557	-0,160
-0,432	0,123	-0,335	0,061	0,151	-0,639
0,331	0,348	0,309	-1,742	1,330	-0,661
1,603	0,184	1,60	0,943		
$R_A = 0,29$		$R_A = 0,267$		$R_A = -0,927$	
$R_B = 64,3\%$		$R_B = 63,4\%$		$R_B = 3,7\%$	

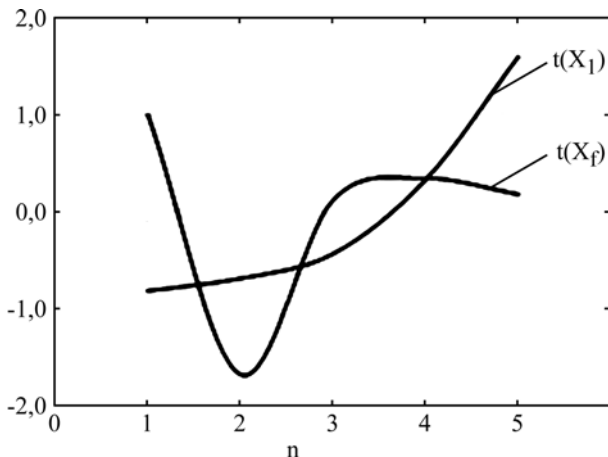


Рис. 3. Зависимость безразмерных величин плотности тока коррозии осадка $t(X_1)$ от объема электролита осаждения $t(X_f)$, где n – число сравниваемых измерений в рядах.

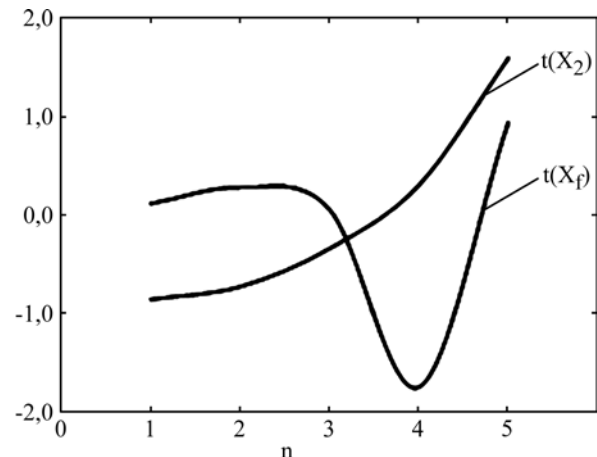


Рис. 4. Зависимость безразмерных величин скорости коррозии осадка $t(X_2)$ от объемной плотности тока осаждения $t(X_f)$, где n – число сравниваемых измерений в рядах.

На примере этих результатов покажем значение безразмерной величины, показателей R_A и R_B для оценки корреляции между числовыми рядами сравниваемых параметров.

Отметим, что глюконатный электролит представляет собой смесь (моль/л): FeSO_4 – 0,2; лимонная кислота – 0,17; цитрат натрия – 0,33, рН 6,9. Температура ванны – 80 °С и плотность тока 20 мА/см².

В качестве размерных параметров условий электролиза (внешний фактор) принимались: объем электролита, объемная плотность тока и размер поверхности осаждения.

Функциональным параметром осадка решили считать плотность тока коррозии, определенную в среде 10^{-3} М H_2SO_4 и при скорости 1 мВ/с.

В табл. 1 приведены значения рядов размерных параметров электролиза и полученные значения функционального пара-

метра осадка, а в табл. 2 – безразмерные величины этих рядов и расчетное значение показателей корреляции R_A и R_B .

Как видно из табл. 1, для ряда заданных и направленных по величине параметров условий электролиза X_1 и X_2 значения функционального параметра X_f изменяются неоднозначно, а для направленных значений ряда параметра X_3 значения функционального параметра изменяются в обратном направлении.

Таким образом, можно констатировать, что значения размерных параметров объема электролита и объемная плотность тока влияют на плотность тока коррозии осадка неоднозначно. Однако численно оценить неоднозначность влияния этих параметров на функциональный параметр осадка по этим рядам значений не представляется возможным.

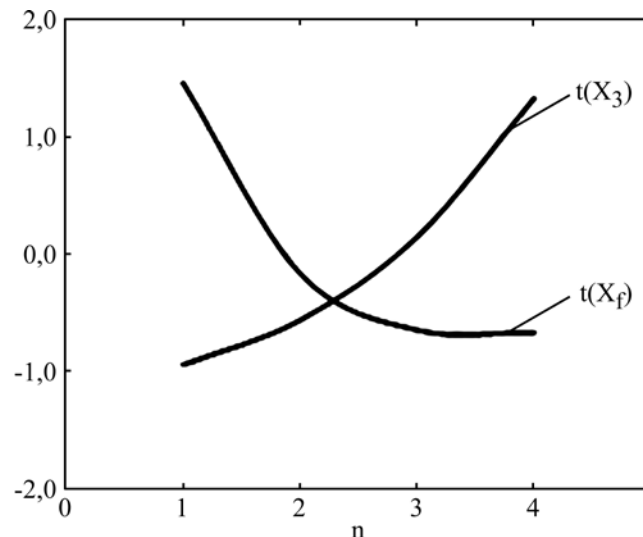


Рис. 5. Зависимость безразмерных величин плотности тока коррозии осадка $t(X_3)$ от объема электролита осаждения $t(X_p)$, где n – число сравниваемых измерений в рядах.

В табл. 2 приведены значения рядов безразмерных величин параметров условий электролиза ($t(X_1)$ – $t(X_3)$) и функционального параметра осадка $t(X_p)$, а на рис. 3–5 – графические значения этих величин.

Данные табл. 2 и рис. 3–5 подтверждают сделанные выше выводы, но здесь можно увидеть степень и направленность влияния значений параметров электролиза на одноименные значения функционального параметра осадка.

Кроме этого, в табл. 2 представлены численные значения степени влияния параметров электролиза на значения функционального параметра осадка в виде показателей R_A и R_B .

Отметим, что показатель R_A количественно определяет относительное совпадение или несовпадение изменений безразмерных величин ряда одного показателя с направленными изменениями одноименного ряда другого показателя.

Например, направленность безразмерного ряда плотности тока коррозии 0,29 от единицы меньше направленности одноименного ряда объема электролита (рис. 3) и на 0,267 меньше направленности ряда объемной плотности тока (рис. 4). Однако направленность безразмерного ряда плотности тока коррозии на $-0,927$ от единицы меньше направленности одноименного ряда поверхности осаждения (рис. 5).

Заметим, что значения показателя R_B , представленные в табл. 2, указывают на долю совпадения изменений безразмерного ряда одного параметра с изменениями одноименного ряда другого параметра.

Например, направленность безразмерного ряда плотности тока коррозии составляет 64,3% (рис. 3) от направленности одноименного ряда объема электролита, 63,4% от объемной

плотности тока (рис. 4) и 3,7% от площади осаждения (рис. 5).

ВЫВОДЫ

В гальванотехнике методы оценки размерных эффектов применялись задолго до появления понятия «размерный эффект» и были переосмыслены более глубоко в последнее десятилетие в связи с иерархическим проявлением размерных эффектов свойств электролита и выделением размерных факторов по типу влияния: внешние или внутренние.

Полученный к настоящему времени материал позволяет утверждать, что отклик функционального свойства осадка на действие размерных факторов условий электролиза в равной степени определяет и размерное свойство электролита.

Можно также утверждать, что в гальванотехнике при оценке размерных эффектов иногда условно принято использовать масштабную шкалу (макро-, микро-, наноуровень).

Установлено, что наиболее универсальные методы оценки размерных эффектов могут быть сформированы на основе корреляции безразмерных величин ряда заданных и направленных по величине значений размерного фактора условий электролиза с рядом полученных значений функционального параметра осадка. С помощью таких методов можно количественно оценивать относительное совпадение или несовпадение изменений заданного ряда значений размерного параметра с полученными значениями ряда параметров осадка либо по доле совпадения изменений в ряде значений размерного параметра с изменениями в ряде значений параметра осадка.

Установлено также, что исследование размерных свойств электролитов и осадков в зависимости от типа размерных факторов и их

масштабных шкал позволит расширить возможности применяемых электролитов, повысить управляемость формированием функционального параметра осадка, получить новые сведения о процессе осаждения наноструктурированных осадков, раскрыть факторы, которым ранее мало уделяли внимание.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Настоящая работа выполнена в рамках проекта ANCD 20.80009.5007.18 (2020–2023) «Получение новых микро- и наноструктурированных материалов физико-химическими методами и разработка технологий на их основе».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Kreibig, U. and Vollmer, M., *Optical Properties of Metal Clusters*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1995. 532 p.
- Сергеев, Г.Б., Размерные эффекты в нанохимии, *Рос. Хим. Журн.* 2002, т. XLVI, № 5, с. 22.
- Каданер, Л.И., *Равномерность гальванических покрытий*. Харьков: Изд. Харьковского госунив., 1961. 312 с.
- Лайнер, В.И., *Защитные покрытия металлов*. М.: Металлургия, 1974. 560 с.
- Готеляк, А.В., Цынцару, Н.И., Дикусар, А.И., Размерный эффект микротвердости нанокристаллических Co-W покрытий, получаемых из цитратных и глюконатных растворов, *ЭОМ*, 2015, т. 51, № 3, с. 25.
- Силкин, С.А., Готеляк, А.В., Цынцару, Н.И., Дикусар, А.И., Электроосаждение сплавов металлов группы железа с вольфрамом из цитратных и глюконатных растворов. Размерный эффект микротвердости, *ЭОМ*, 2017, т. 53, № 1, с. 1.
- Белевский, С.С., Готеляк, А.В., Силкин, С.А., Дикусар, А.И., Макроскопический размерный эффект микротвердости покрытий из сплавов металлов группы железа с вольфрамом: роль электродного потенциала и кислородсодержащих примесей, *ЭОМ*, 2018, т. 54, № 2, с. 9.
- Мырзак, В., Готеляк, А.В., Дикусар, А.И., О размерных эффектах свойств поверхностей, полученных при электроосаждении сплавов металлов группы железа с вольфрамом, *ЭОМ*, 2020, т. 56, № 6, с. 1.
- Мырзак, В., Дикусар, А.И., О размерном эффекте скорости коррозии ансамбля нанопроводов меди. Часть 2. Размерный эффект скорости коррозии меди в пирофосфатном растворе, *ЭОМ*, 2016, т. 52, № 2, с. 14.
- Мырзак, В.А., Глоба, П.Г., Сидельникова, С.П., Дикусар, А.И., О размерном эффекте скорости коррозии ансамбля нанопроводов меди. Часть I. Изменение коррозионного потенциала, *ЭОМ*, 2012, т. 48, № 5, с. 42.
- Tsyntaru, N., Cesiulis, H., Donten, M., Sorf, J., et al., Modern trends in tungsten alloys electrodeposition with iron group metals, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2012, vol. 48, no. 6, p. 499.
- Weston, D.P., Gill, S.P.A., Fay, M., Harris, S.J., et al., Nano-structure of Co-W alloy electrodeposited from gluconate bath, *Surf. Coat. Technol.*, 2013, vol. 236, p. 75.
- Shul'man, A.I., Belevskii, S.S., Yushchenko, S.P. and Dikusar, A.I., Role of complexation in forming composition of Co—W coatings electrodeposited from gluconate electrolyte, *Surf. Eng. Appl. Electrochim.*, 2014, vol. 50, no. 1, p. 9.
- Belevskii, Stanislav, Dikusar, Alexandr, Shuliman Anna, Bobanova Jana, et al., Process for preparing an aqueous gluconate electrolyte for deposition of nanocrystalline Co-W coatings. Patent № 4331 MD, BOPI 2/2015.
- Петрий, О.А., Цирлина, Г.А., Размерные эффекты в электрохимии, *Успехи химии*, 2001, т. 70, № 4, с. 330.
- Кушнер, Л.К., Хмыль, А.А., Полевиков, В.М., Чижик, С.А., Формирование наноструктур гальванического покрытия на основе никеля, *БЕЛСЗМ-6*, Минск, 12–15 октября 2004 г.
- Madore, C., West, A.C., Matlosz, M. and Landolt, D., Design considerations for a cylindrical hull cell with forced convection, *Electrochim. Acta*, 1992, vol. 37, no. 1, p. 69.
- Борцой, Т.В., Статистические методы оценки связи между параметрами электрохимической системы с рассредоточенными значениями на электроде, *ЭОМ*, 2006, № 4, с. 24.
- Bortoi, T.V., Estimation of distributed parameters at electrochemical deposit formation, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2008, vol. 44, no. 1, p. 9.
- Bortoi, T., Cell for determining the electrolyte scattering capacity. Patent № 2778 MD, BOPI № 5/2005.

Summary

It is shown that the response of the functional property of the precipitate to the action of dimensional factors of the electrolysis conditions equally determines the dimensional property of the electrolyte. It was established that the most universal methods for estimating size effects can be formed on the basis of the correlation of dimensionless values of a number of given and magnitude-directed values of the size factor with a number of corresponding values of the sediment functional parameter. With the help of such methods, it is possible to quantify the relative coincidence or mismatch of changes in a given series of values of a size parameter with the obtained values of a series of sediment parameters, or by the proportion of coincidence of changes in a number of values of a size

parameter with changes in a number of values of a sediment parameter. It is also shown that the study of the dimensional properties of electrolytes and deposits, depending on the type of dimensional factors and their scales, can expand the possibilities of the electrolytes used, increase the controllability of the formation of the functional parameter of the deposit, obtain new information about the process of the deposition of nanostructured deposits, and reveal the factors that were

not previously in the focus of attention. A method of determination and a cell for the quantitative evaluation of the dimensional properties of the precipitate and the electrolyte from internal and external dimensional factors are presented.

Keywords: electrolyte property, method, indicator, scaling hierarchy, dimensional parameter, directed values, influence level, functional parameter, dimensionless value, dimensional effect