

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ  
ЗАЩИТЫ МАТЕРИАЛОВ

УДК 541.124:542.952.6:547.313

АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА  
КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ  
НА ОСНОВЕ СПЛАВА ОЛОВО–НИКЕЛЬ

© 2023 г. А. В. Пянко<sup>1,\*</sup>, О. А. Алисиенок<sup>1</sup>, А. В. Поспелов<sup>1</sup>, Е. Ф. Чернявская<sup>1</sup>, А. А. Черник<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет,  
ул. Свердлова, 13а, Минск, 220006 Беларусь

\*e-mail: hanna.pianka@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2022 г.

После доработки 11.05.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

Получены композиционные электрохимические покрытия на основе сплава олово–никель с композитом типа “ядро  $\text{SiO}_2$ –оболочка  $\text{TiO}_2$ ”. Изучены коррозионные свойства покрытий в 3% растворе хлорида натрия. Изучены антибактериальные свойства покрытий по отношению к штаммам *Escherichia coli* ATCC 8739 и *Staphylococcus aureus* ATCC 6538. Установлено, что для придания поверхности антибактериальных свойств минимальная концентрация композита в электролите должна составлять 4 г/дм<sup>3</sup>.

**Ключевые слова:** композиционные электрохимические покрытия, сплав олово–никель, композит “ядро  $\text{SiO}_2$ –оболочка  $\text{TiO}_2$ ”, антибактериальность

DOI: 10.31857/S0044185623700274, EDN: SZQBWJ

ВВЕДЕНИЕ

Диоксид титана и композиты на его основе обладают ярко выраженными фотокатализитическими свойствами [1, 2]. В ряде исследований [3–13] установлено, что введение  $\text{TiO}_2$  в состав электрохимических покрытий, придает поверхности повышенную коррозионную стойкость, твердость и антибактериальность. В работах [3, 4] показано влияние диоксида титана на антибактериальные свойства, химический и фазовый состав электрохимического сплава медь–олово. Установлено, что введение  $\text{TiO}_2$  в состав электролита до 4 г/дм<sup>3</sup> позволяет получать покрытия Cu–Sn, обладающие биоцидными свойствами, особенно в присутствии УФ-излучения. В ряде работ показано, что увеличение содержания диоксида титана приводит к повышению микротвердости цинковых [5] и Zn–Ni [6, 7] покрытий, а также к росту гидрофобных свойств и износстойкости никелевых [8–11] покрытий.

Сплав олово–никель и композиционные покрытия на его основе обладают совокупностью важных физико-химических свойств [12–18], например: твердостью, износстойкостью, коррозионной стойкостью, декоративностью, что позволяет таким покрытиям найти широкое приме-

нение в машиностроении, приборостроении и в ряде других областях промышленности.

Электрохимическое формирование сплава олово–никель возможно из комплексных электролитов. Фторидно-хлоридный электролит позволяет получать покрытия сплавом с содержанием олова 55–65 мас. % и никеля – 45–35 мас. %. Введение  $\text{TiO}_2$  в электролит осаждения сплава олово–никель позволяет получать покрытия с повышенными антибактериальными свойствами по отношению к бактериям *S. aureus* и *E. coli*, обладающие микротвердостью до 439 HV и адгезией 0.65 МПа см<sup>-2</sup> [13].

Композит “ядро  $\text{SiO}_2$ –оболочка  $\text{TiO}_2$ ” обладает высокой удельной поверхностью и фотокатализитической активностью [19]. Использование его в качестве инертной фазы в составе композиционных электрохимических покрытий позволяет улучшить физико-химические характеристики. Наличие такого композита в электролите уменьшает поляризуемость и смещает область осаждения сплава олово–никель в электроположительную сторону [20].

В данной работе приводятся результаты исследований физико-химических и антибактериальных свойств таких покрытий.

**Таблица 1.** Характеристика микроорганизмов, используемых для оценки антимикробных свойств

Штамм микроорганизма	Характеристика	Источник
1	2	3
<i>Escherichia coli</i> ( <i>E. coli</i> ATCC 8739)	Грамотрицательные прямые палочки. Факультативные анаэробы. Оптимальная температура 37°C	Коллекция кафедры биотехнологии БГТУ
<i>Staphylococcus aureus</i> ( <i>S. aureus</i> ATCC 6538)	Грамположительные неподвижные сферические клетки. Неспорообразующие. Факультативные анаэробы. Оптимальная температура 37°C	Коллекция кафедры биотехнологии БГТУ

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Сплав олово–никель и композиционные электрохимические покрытия на его основе осаждали на поверхность медной фольги из фторидно-хлоридного электролита, согласно методике [20] при температуре 70°C и плотности тока 1 А/дм<sup>2</sup>. Толщина покрытий составляла 10 мкм. Концентрация композита “ядро SiO<sub>2</sub>–оболочка TiO<sub>2</sub>” в электролите осаждения композиционного электрохимического покрытия составляла 2–6 г/дм<sup>3</sup>.

Композит “ядро SiO<sub>2</sub>/оболочка TiO<sub>2</sub>” синтезировали в соответствии с методикой [19].

Шероховатость покрытий определяли профилографом-профилометром “Абрис ПМ7” при отсечке 0.8 мм.

Элементный состав покрытий определяли методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа (EDX) с использованием системы химического микрорентгеноспектрального анализа EDX JED-2201.

Фазовый состав покрытий определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре Siemens D5000. Съемку рентгенограмм проводили в диапазоне углов 2θ = 5°–90° со скоростью 0.07 град/мин. Положение максимумов анализируемых линий измеряли с точностью до ±0.05°.

Все электрохимические исследования проводили в трехэлектродной ячейке с помощью потенциостата Autolab PGSTAT 302N. Вспомогательный электрод – платина, электрод сравнения – хлоридсеребряный. Коррозионной средой являлся 3%-ный раствор NaCl. Потенциодинамические поляризационные кривые снимали после выдержки образцов в среде хлорида натрия в течение 15 мин для установления стационарного потенциала.

Для оценки антимикробных свойств покрытий использовали тест-культуры санитарно-показательных бактерий *Escherichia coli* ATCC 8739 и

*Staphylococcus aureus* ATCC 6538, описанные в табл. 1.

Антибактериальные свойства композиционных электрохимических покрытий определяли в соответствии с ISO 27447:2009 со следующими изменениями:

- 1) в физиологический раствор для лучшего смыва добавлен детергент Твин 40 (~0.01%),
- 2) время облучения УФ-светом снижено до 30 мин.

Для исследований использовали 2 идентичных образца, предварительно обработанных в растворе этанола под действием УФ-излучения в течение 2 ч. Образцы накрывали стерильными пленками и помещали на каждый образец клеточную суспензию с тест-бактериями объемом 0.2 мл.

Один из образцов, засеянных тест-бактериями, помещали под УФ-лампу и облучали при комнатной температуре в течение 30 мин, интенсивность ультрафиолетового излучения ~0.01 мВт/см<sup>2</sup>. Другой образец помещали в стерильную чашку Петри и выдерживали в темноте в закрытой чашке при тех же условиях. По истечении времени образцы переносили из чашек в стерильные полиэтиленовые пакетики, вносили по 10 см<sup>3</sup> физиологического раствора с добавлением Твин 40 (концентрация 0.01%) и выдерживали в течении ~10 мин для смыва тест-бактерий. Затем отбирали 0.1 см<sup>3</sup> полученной жидкости и высевали методом Коха на питательный агар. Все манипуляции проводили с соблюдением правил асептики.

Засеянные чашки помещали в термостат, для инкубирования в течение 24 ч при температуре 30°C. Производили подсчет количества образовавшихся колоний в чашках и определяли концентрацию живых бактерий в смойной жидкости.

Оценку бактерицидной активности композиционных покрытий (способность обуславливать гибель клеток) оценивали с помощью фактора редукции (FR), который определяли по формуле:

$$FR = \lg(K_1/K_2), \quad (1)$$

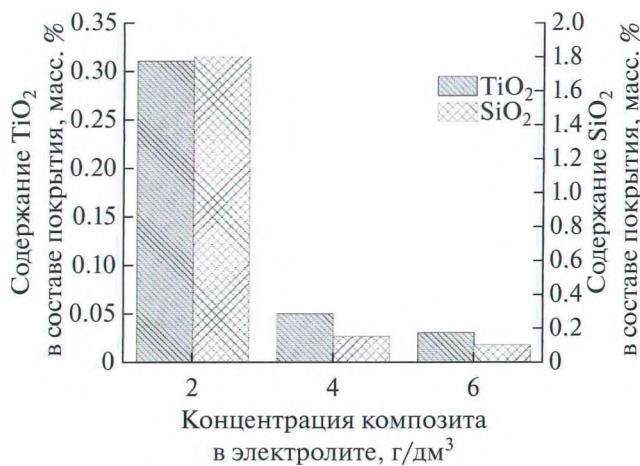


Рис. 1. Графическая зависимость содержания SiO<sub>2</sub> и TiO<sub>2</sub> в составе покрытий от концентрации композита “ядро SiO<sub>2</sub>/оболочка TiO<sub>2</sub>” в электролите, полученная по результатам энерго-дисперсионного анализа.

где  $K_1$  – концентрация жизнеспособных клеток в питательной среде с исследуемым покрытием без УФ-излучения, КОЕ/см<sup>3</sup>;  $K_2$  – концентрация жизнеспособных клеток в питательной среде с исследуемым покрытием с УФ-излучением, КОЕ/см<sup>3</sup>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены результаты энергодисперсионного анализа по содержанию SiO<sub>2</sub> и TiO<sub>2</sub> в зависимости от концентрации композита в электролите. Как для SiO<sub>2</sub>, так и для TiO<sub>2</sub> наблюдается экстремальная зависимость с максимумом при концентрации композита в электролите 2 г/дм<sup>3</sup>. При этом содержание SiO<sub>2</sub> и TiO<sub>2</sub> в покрытии составляло 1.8 и 0.31 мас. %, соответственно. Дальнейшее увеличение концентрации композита в электролите до 6 г/дм<sup>3</sup> приводит к уменьшению количества SiO<sub>2</sub> и TiO<sub>2</sub> в покрытии до 0.1 и 0.03 мас. % соответственно.

Шероховатость покрытий является одним из основных параметров, определяющих внешний вид, а также другие физико-химические и механические свойства. Как следует из рис. 2 увеличение содержания композита в электролите приводит к получению покрытий с повышенной шероховатостью: показатель  $R_a$  увеличивается с 0.254 до 2.469 мкм при концентрации композита “ядро SiO<sub>2</sub>–оболочка TiO<sub>2</sub>” в электролите 6 г/дм<sup>3</sup>, а показатели  $R_z$  и  $R_{max}$  до 6.45 и 16.70 мкм соответственно. Такой рост показателей шероховатости обусловлен включением в состав покрытия частиц композита большего размера.

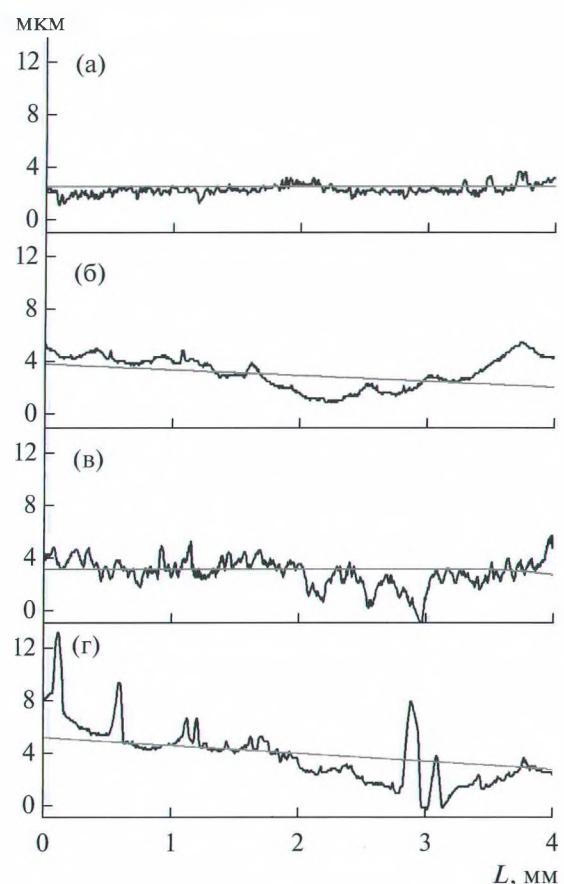
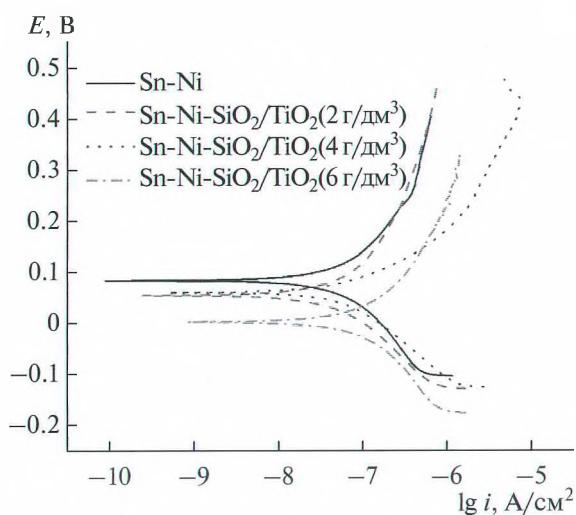


Рис. 2. Профилограммы поверхности покрытий Sn–Ni с различным содержанием композита “ядро SiO<sub>2</sub>/оболочка TiO<sub>2</sub>” в электролите (г/дм<sup>3</sup>): (а) 0; (б) 2; (в) 4; (г) 6.

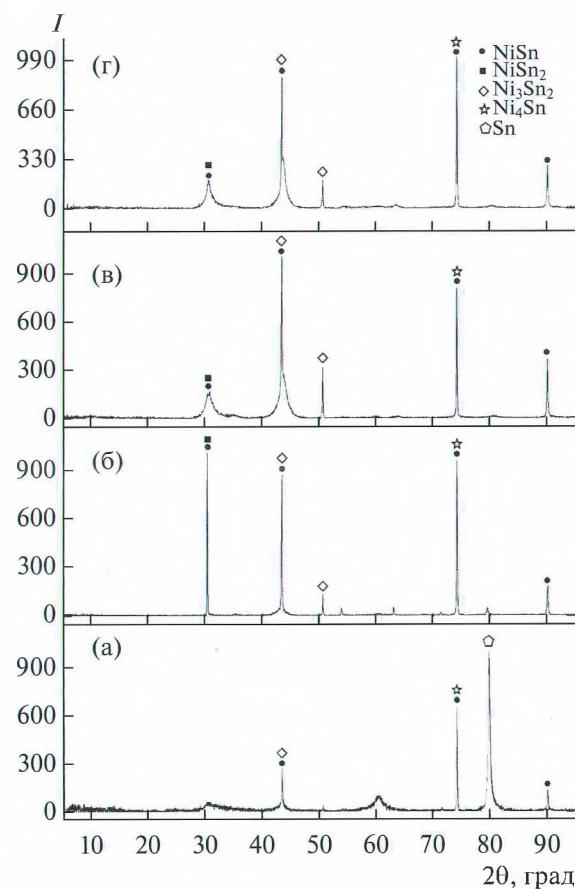
На рис. 3 представлены поляризационные кривые катодного и анодного процесса коррозии композиционного покрытия на основе сплава олово–никель в 3% растворе NaCl. Сводные данные коррозионных параметров представлены в табл. 2. Потенциал начала коррозии в 3%-ном растворе NaCl для сплава олово–никель составил 0.09 В. Увеличение содержания композита в электролите до 6 г/дм<sup>3</sup> приводит к сдвигу потенциала начала коррозии в электроотрицательную сторону до 0.02 В. Это указывает на депассивацию поверхности. Минимальный ток коррозии наблюдается для покрытия с содержанием композита в электролите “ядро SiO<sub>2</sub>–оболочка TiO<sub>2</sub>” в количестве 2 г/дм<sup>3</sup> и составляет  $6.94 \times 10^{-9}$  А/см<sup>2</sup>. Дальнейшие повышение концентрации композита в электролите до 6 г/дм<sup>3</sup> приводит к увеличению значений токов коррозии до  $1.93 \times 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>. Это, по всей видимости, связано с изменением фазового состава покрытий (рис. 4), повышенной напряженностью и растрескиванием покрытий [20].



**Рис. 3.** Потенциодинамические поляризационные кривые катодного и анодного процесса коррозии на поверхности композиционных покрытий в 3% растворе NaCl. Скорость развертки потенциала 1 мВ/с.

При отсутствии композита “ядро SiO<sub>2</sub>/оболочка TiO<sub>2</sub>” в электролите на рентгенограмме (рис. 4) присутствует интенсивный пик при  $2\theta = 80^\circ$ , который характерен для металлического олова. Для покрытий, содержащих в составе электролита осаждения композит, данный пик отсутствует. При увеличении содержания “ядро SiO<sub>2</sub>/оболочка TiO<sub>2</sub>” в электролите происходит изменение интенсивности основного метастабильного пика NiSn. Предположительно, это связано с небольшим изменением содержания олова, связанного с изменением растворимости [12].

Первичные данные в виде диаграмм Боде, полученных при бестоковом потенциале рабочего электрода (рис. 5а, 5б), показывают, что присутствие композита “ядро SiO<sub>2</sub>-оболочка TiO<sub>2</sub>” приводит к снижению модуля импеданса межфазной



**Рис. 4.** Рентгенограммы электрохимических покрытий олово-никель с различным содержанием композита “ядро SiO<sub>2</sub>/оболочка TiO<sub>2</sub>” в электролите (г/дм<sup>3</sup>): (а) 0; (б) 2; (в) 4; (г) 6.

границы во всем частотном диапазоне при увеличении концентрации композита в составе электролита. При этом наблюдается смещение в область низких частот участка импеданса, характеризующего электрохимическую реакцию на электроде.

**Таблица 2.** Характеристики коррозионного процесса композиционных покрытий на основе сплава Sn–Ni, полученные из анализа потенциодинамических поляризационных кривых

КЭП Sn–Ni. Концентрация композита “ядро SiO <sub>2</sub> /оболочка TiO <sub>2</sub> ” в электролите, г/дм <sup>3</sup>	$b_a, \text{В}$	$a_a, \text{В}$	$ b_k , \text{В}$	$a_k, \text{В}$	$i_{\text{кор}}, \text{А/см}^2$	$E_{\text{кор}}, \text{В}$	$E_{\text{стаци}}, \text{В}$
0	0.035	0.36	-0.028	-0.145	$8.67 \times 10^{-9}$	0.09	0.105
2	0.030	0.29	-0.028	-0.179	$6.94 \times 10^{-9}$	0.06	0.091
4	0.040	0.37	-0.027	-0.154	$1.45 \times 10^{-8}$	0.06	0.075
6	0.041	0.32	-0.032	-0.248	$1.93 \times 10^{-8}$	0.02	0.024

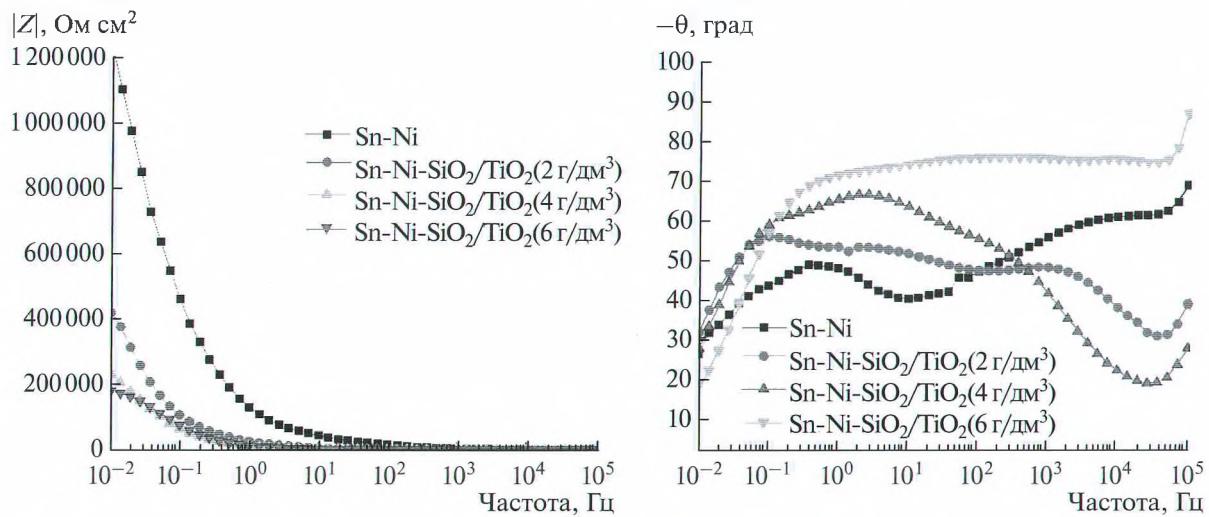


Рис. 5. Диаграммы Боде сплава Sn–Ni и КЭП Sn–Ni–“ядро SiO<sub>2</sub>–оболочка TiO<sub>2</sub>”, полученные в 3% растворе NaCl.

Анализ спектров импеданса (рис. 6) проведен при помощи эквивалентной схемы (рис. 7). Использование в эквивалентной схеме элемента постоянной фазы *CPE* позволяет моделировать различные типы процессов, протекающих в электрохимической системе, что является преимуществом при описании поведения межфазной границы в широком диапазоне параметров состояния.

Увеличение концентрации композита в электролите уменьшает показатели сопротивления переносу заряда на межфазной границе. Показатель степени *n* элемента *CPE*<sub>1</sub> лежит в диапазоне 0.62–0.82, что указывает на емкостной характер этого элемента. При введении в электролит ком-

позита до 6 г/дм<sup>3</sup> *n* изменяется с 0.62 до 0.82 (табл. 3).

Результаты антибактериальной активности исследуемых покрытий по отношению к тест-культуре *E. coli* ATCC 8739 представлены в табл. 4. При повышении концентрации вводимого в электролит композита “ядро–оболочка” антибактериальная активность по отношению к тест-культуре *E. coli* ATCC 8739 возрастает в 15 раз при УФ-облучением и в 1.3 без УФ-облучения.

Факторы редукции образцов рассчитаны согласно формуле (1) и составляют: 1.81, 2.0, 3.0, 3.1 для образцов 1, 2, 3, 4 соответственно. Увеличение бактерицидной активности контрольного образца под действием УФ обусловлено воздействием излучения на суспензию микроорганизмов.

Антибактериальные свойства индуцированных и не индуцированных УФ-излучением композиционных покрытий по отношению к тест-культуре *St. aureus* ATCC 6538 представлены в табл. 5 и на рис. 8.

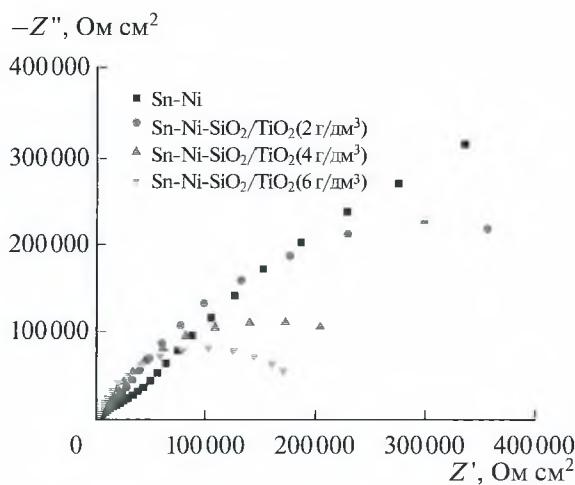


Рис. 6. Диаграммы Найквиста сплава Sn–Ni–“ядро SiO<sub>2</sub>–оболочка TiO<sub>2</sub>”, полученные в 3% растворе NaCl.

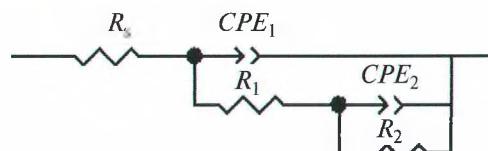


Рис. 7. Эквивалентная схема электрохимической ячейки для моделирования спектров импеданса. R<sub>s</sub> – сопротивление раствора, CPE<sub>1</sub> – элемент постоянной фазы емкостного типа, R<sub>1</sub> – сопротивления переносу заряда на межфазной границе, CPE<sub>2</sub> – элемент постоянной фазы диффузионного типа, R<sub>2</sub> – сопротивление диффузии.

**Таблица 3.** Параметры эквивалентных схем спектров импеданса для композиционных покрытий покрытий Sn–Ni–“ядро  $\text{SiO}_2$ /оболочка  $\text{TiO}_2$ ”, полученных в 3% NaCl

КЭП Sn–Ni. Концентрация композита “ядро $\text{SiO}_2$ /оболочка $\text{TiO}_2$ ” в электролите, г/дм <sup>3</sup>	$R_s$ , Ом см <sup>2</sup>	$R_1$ , Ом см <sup>2</sup>	$Y_1$ , Ом <sup>-1</sup> см <sup>-2</sup> с <sup>n</sup>	$n_1$	$R_2$ , Ом см <sup>2</sup>	$Y_2$ , Ом <sup>-1</sup> см <sup>-2</sup> с <sup>n</sup>	$n_2$
0	32.78	$2.04 \times 10^6$	$2.48 \times 10^{-6}$	0.62	$1.57 \times 10^4$	$6.69 \times 10^{-7}$	0.73
2	32.83	$3.23 \times 10^6$	$1.13 \times 10^{-5}$	0.59	$2.37 \times 10^4$	$5.28 \times 10^{-5}$	0.68
4	61.77	$3.27 \times 10^5$	$1.78 \times 10^{-5}$	0.77	$1.85 \times 10^4$	$1.15 \times 10^{-4}$	0.89
6	10.07	$2.08 \times 10^5$	$1.66 \times 10^{-5}$	0.82	$1.41 \times 10^4$	$1.1 \times 10^{-6}$	0.81

**Таблица 4.** Антибактериальная активность образцов по отношению к тест-культуре *E. coli* ATCC 8739

№ образца	КЭП Sn–Ni. Концентрация композита “ядро $\text{SiO}_2$ /оболочка $\text{TiO}_2$ ” в электролите, г/дм <sup>3</sup>	Концентрация бактериальных клеток С, КОЕ/мл	
		под УФ облучением	без УФ облучения
1	0	$4.6 \times 10^2 \pm 2.3 \times 10^1$	$5.3 \times 10^4 \pm 2.7 \times 10^3$
2	2	$3.5 \times 10^2 \pm 1.4 \times 10^1$	$4.1 \times 10^4 \pm 3.7 \times 10^3$
3	4	$7.6 \times 10^1 \pm 2.3$	$8.2 \times 10^4 \pm 3.3 \times 10^3$
4	6	$3.0 \times 10^1 \pm 1.5$	$3.9 \times 10^4 \pm 2.6 \times 10^3$

**Таблица 5.** Антибактериальная активность образцов по отношению к тест-бактериям *St. aureus* ATCC 6538

№ образца	КЭП Sn–Ni. Концентрация композита “ядро $\text{SiO}_2$ /оболочка $\text{TiO}_2$ ” в электролите, г/дм <sup>3</sup>	Концентрация бактериальных клеток С, КОЕ/мл	
		под УФ облучением	без УФ облучения
1	0	$8.0 \times 10^3 \pm 4.0 \times 10^2$	$5.3 \times 10^5 \pm 2.7 \times 10^4$
2	2	$5.0 \times 10^1 \pm 3.0 \times 10^1$	$4.1 \times 10^5 \pm 1.7 \times 10^4$
3	4	$1.0 \times 10^3 \pm 3.0 \times 10^1$	$8.2 \times 10^5 \pm 4.5 \times 10^4$
4	6	$4.0 \times 10^1 \pm 2.4$	$5.9 \times 10^5 \pm 2.8 \times 10^4$

**Таблица 6.** Сравнение факторов редукции образцов с нанесенным композиционным покрытием по отношению к тест-бактериям *E. coli* ATCC 8739 и *St. aureus* ATCC 6538

№ образца	КЭП Sn–Ni. Концентрация композита “ядро $\text{SiO}_2$ /оболочка $\text{TiO}_2$ ” в электролите, г/дм <sup>3</sup>	Фактор редукции FR	
		<i>E. coli</i> ATCC 8739	<i>St. aureus</i> ATCC 6538
1	0	1.8	1.8
2	2	2.0	2.7
3	4	3.0	3.1
4	6	3.1	4.2



Рис. 8. Высевы с композиционных электрохимических покрытий по отношению к тест-бактериям *St. aureus* ATCC 6538.

В ходе исследования установлено, что все образцы композиционных электрохимических покрытий Sn–Ni–“ядро  $\text{SiO}_2$ /оболочка  $\text{TiO}_2$ ” оказывают сильное воздействие на тест–бактерии и проявляют бактерицидные свойства. Применение УФ-излучения для таких покрытий позволяет на 4 порядка снизить концентрацию микроорганизмов. Фактор редукции образцов Sn–Ni составляет 1.8, что обусловлено действием ультрафиолетового облучения. Факторы редукции для образцов Sn–Ni–“ $\text{SiO}_2$ – $\text{TiO}_2$ ” при концентрации композита в электролите 2, 4, 6 г/дм<sup>3</sup> составляют: 2.7, 3.1, 4.2 соответственно (табл. 6).

Результаты показывают, что для формирования композиционных электрохимических покрытий на основе сплава олово–никель–“ядро  $\text{SiO}_2$ –оболочка  $\text{TiO}_2$ ” с высоким биоцидным эффектом ( $FR > 2$ ) необходимо применять электролит с концентрацией композита 4 г/дм<sup>3</sup> и выше.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что введение композита “ядро  $\text{SiO}_2$ –оболочка  $\text{TiO}_2$ ” в электролит до 6 г/дм<sup>3</sup> позволяет получать композиционные электрохимические покрытия с показателем шероховатости 2.47 мкм. Токи коррозии данного покрытия увеличиваются по сравнению с покрытием сплавом олово–никель, что обусловлено напряженностью и растрескиванием покры-

тия. Для композиционных электрохимических покрытий, осажденных из электролита с содержанием 2 г/дм<sup>3</sup> композита “ядро  $\text{SiO}_2$ –оболочка  $\text{TiO}_2$ ”, наблюдается наименьшее значение тока коррозии, равное  $6.94 \times 10^{-9} \text{ A}/\text{cm}^2$ .

Установлено, что все композиционные электрохимические покрытия обладают бактерицидными свойствами по отношению к *E. coli* ATCC 8739 и *St. aureus* ATCC 6538. С увеличением концентрации композита в электролите факторы редукции повышаются. Показано, что при воздействии УФ-излучения на композиционные электрохимические покрытия Sn–Ni–“ $\text{SiO}_2$ / $\text{TiO}_2$ ” их антибактериальные свойства повышаются на три–четыре порядка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fujishima A., Rao T.N., Tryk D.A. // J. Photochem. Photobiol., C. 2000. V. 1. № 1. P. 1.
2. Moma J., Baloyi J. Photocatalysts – applications and attributes modified titanium dioxide for photocatalytic applications // London: IntechOpen, 2019. P. 156.
3. Kharitonov D.S., Kasach A.A., Sergievich D.S. et al. // Ultrason. Sonochem. 2021. V. 75. P. 105593.
4. Kasach A.A., Kharitonov D.S., Wrzesińska A. et al. // Prot. Met. Phys. Chem. Surf. 2020. V. 56. P. 385.
5. Ilasa A., Varvara S., Pop A. et al. // J. Appl. Electrochem. 2010. V. 40. № 8. P. 1519.
6. Camargo M.K., Tudelab I., Schmidta U. et al. // Electrochim. Acta. 2016. V. 198. P. 287.

7. *Katamipour A., Farzam M., Danaee I. et al.* // Surf. Coat. Technol. 2014. V. 254. P. 358.
8. *Mozghan S., Mahdi M., Seyed M.E.* // Colloids Surf. A. 2019. V. 573. P. 196.
9. *Abdel Hamid Z., Refai M., El-kilani R.M. et al.* // J. Mater. Sci. 2021. V. 56. № 25. P. 14096.
10. *Thiemig D., Bund A.* // Surf. Coat. Technol. 2008. V. 202. P. 2976.
11. *Huang S., Hu Y., Pan W.* // Surf. Coat. Technol. 2011. V. 205. P. 3872.
12. *Rosolymou E., Spanou S., Zanella C. et al.* // Coatings. 2020. V. 10. P. 775.
13. *Pyanko A.V., Sergievich D.S., Chernik A.A. et al.* // Prot. Met. Phys. Chem. Surf. 2021. V. 57. № 1. P. 88.
14. *Kuznetsov B.V., Vorobyova T.N., Glibin V.P.* // Met. Finish. 2013. V. 111. P. 38.
15. *Vorobyova T.N., Kudaka A.A.* // Trans. Inst. Met. Finish. 2022. V. 100. № 1. P. 36.
16. *Шеханов Р.Ф.* // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2017. Т. 60. № 10. С. 75.
17. *Subramanian B., Mohan S., Jayakrishnan S.* // J. Appl. Electrochem. 2007. V. 37. P. 219.
18. *Jiménez H., Gil L., Staia M.H. et al.* // Surf. Coat. Technol. 2008. V. 202. P. 2072.
19. *Murashkevich A.N., Lavitskaya A.S., Alisienok O.A. et al.* // Inorg. Chem. 2009. V. 45. № 10. P. 1146.
20. *Пянко А.В., Алисиенок О.А., Кубрак П.Б. и др.* // Электрохимия. 2022. Т. 58. № 5. С. 234.