

НОВЫЕ ВЕЩЕСТВА,
МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ

УДК 544.6.018.42+14:621.357.74

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ Cu–Sn–TiO₂

© 2020 г. А. А. Касач^{1,*}, Д. С. Харитонов^{1,5}, А. Wrzeńska², I. Bobowska², А. А. Предко³,
В. И. Романовский^{1,4}, И. М. Жарский¹, И. И. Курило¹

¹Белорусский государственный технологический университет,
ул. Свердлова, 13а, Минск, 220006 Беларусь

²Lodz University of Technology, ul. Zeromskiego, 116, Lodz, 90-924 Poland

³Государственное научное учреждение “Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси”,
ул. Академика Купревича, 10, Минск, 220141 Беларусь

⁴Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Научно-исследовательский центр
“Конструкционные керамические наноматериалы”, Ленинский пр-т, 4, Москва, 119049 Россия

⁵Jerzy Haber Institute of Catalysis and Surface Chemistry of Polish Academy of Sciences,
30-239 Niezapominajek 8, Krakow, Poland

*e-mail: kasach2018@bk.ru

Поступила в редакцию 27.11.2018 г.

После доработки 16.08.2019 г.

Принята к публикации 23.08.2019 г.

Композиционные покрытия Cu–Sn–TiO₂ были получены из шавелевокислого электролита бронзирования, дополнительно содержащего 4 г/дм³ дисперсной фазы TiO₂. Методами энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и рентгеннофлуоресцентного анализа установлено влияние ультразвукового воздействия, а также токовой нагрузки на включение и распределение дисперсной фазы TiO₂ в металлической матрице Cu–Sn. При помощи сканирующей электронной микроскопии установлено, что наложение ультразвукового воздействия приводит к формированию более однородных покрытий Cu–Sn–TiO₂. Показано, что повышение катодной плотности тока от 0.5 до 1.5 А/дм² приводит к формированию покрытий с большим содержанием TiO₂. Исследовано влияние ультразвукового воздействия и токовой нагрузки на микротвердость, трибологические свойства и коррозионную стойкость формируемых композиционных покрытий Cu–Sn–TiO₂.

Ключевые слова: композиционное покрытие, ультразвук, анатаз, трибологические свойства, микротвердость

DOI: 10.31857/S0044185620020102

ВВЕДЕНИЕ

Сплавы меди с оловом, называемые оловянистые бронзы, вследствие их привлекательного внешнего вида и достаточно высокой коррозионной устойчивости широко используются в качестве защитных и декоративных покрытий [1]. Кроме того, покрытия сплавами Cu–Sn являются альтернативой никелевым покрытиям, продукты коррозии которых при контакте с кожей человека могут вызывать развитие дерматитов [2, 3].

Одним из направлений совершенствования функциональных свойств гальванопокрытий, среди которых повышение твердости и износостойкости, обеспечение самосмазывания и др., являются исследования по разработке многофазных композиционных покрытий. Композиционные электрохимические покрытия получают пу-

тем соосаждения из электролитов-суспензий, содержащих нерастворимые частицы инертной фазы [4]. В зависимости от назначения покрытий, в качестве инертной фазы предложено использовать TiO₂ [5, 6], Al₂O₃ [7, 9], SiC [4], ZrO₂ [11], MoS₂ [12], УДА [13, 14] и др. На основе оловянистых бронз разработаны гальванические композиционные покрытия Cu–Sn–SiC [15], Cu–Sn–графит [16], обладающие улучшенными трибологическими и физико-механическими свойствами.

В качестве инертной фазы при получении электрохимических композиционных покрытий перспективным материалом является оксид титана(IV), который нерастворим во многих жидких средах, что позволяет использовать электролиты самого различного состава. Однако склонность к агломерации и, как следствие, низкая дисперси-

Таблица 1. Состав электролита и параметры электролиза для получения покрытия Cu–Sn–TiO₂

Состав электролита, г/дм ³	
CuSO ₄ · 5H ₂ O	20
SnSO ₄	6
(NH ₄) ₂ C ₂ O ₄	55
C ₂ H ₃ O ₂ Na	20
TiO ₂	4
Параметры электролиза	
Катодная плотность тока, А/дм ²	0.5–1.5
pH	5 ± 0.1
Температура, °С	25 ± 1

онная стабильность частиц TiO₂ в водных растворах, вызывают определенные сложности для их включения в гальванопокрытия. Для решения этой проблемы перспективным направлением является использование соноэлектрохимического осаждения композиционных покрытий, поскольку ультразвук (УЗ) способствует деагломерации частиц инертной фазы в электролите и, следовательно, обеспечивает более равномерное распределение TiO₂ в металлической матрице [5]. Кроме того, УЗ обработка приводит к существенному увеличению диапазона рабочих катодных плотностей тока [17, 18].

Ранее было исследовано влияние параметров ультразвукового поля на процесс электроосаждения сплава Cu–Sn из щавелевокислого электролита и установлено благоприятное влияние УЗ на скорость процесса и качество формируемых покрытий [18]. Целью данной работы является изучение влияния сонохимической обработки на количественный состав, морфологию, трибологические и коррозионные свойства композиционных гальванических покрытий Cu–Sn–TiO₂, полученных из щавелевокислого электролита.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Состав щавелевокислого электролита и технологические параметры электрохимического нанесения композиционного покрытия Cu–Sn–TiO₂ представлены в табл. 1. Для приготовления электролита использовали реактивы марки х. ч.

В качестве инертной фазы использовали TiO₂ (модификация – анатаз) с размером частиц 50–200 нм. Измерение pH проводили при помощи автотитратора TitroLine easy. Корректировку pH осуществляли 0.1 М H₂SO₄. Содержание ионов меди и олова в электролите корректировали по данным химического анализа. В качестве анодов использовали пластины из оловянистой бронзы

(15 мас. % Sn, 85 мас. % Cu). Катодами служили заготовки из стали марки 08кп, которые предварительно последовательно обрабатывали наждачной бумагой марок P500–P2000, подвергали обезжириванию, а затем – активации в 0.1 М H₂SO₄. Для обезжиривания использовали раствор следующего состава, г/дм³: Na₂CO₃ – 30, Na₃PO₄ · 12H₂O – 30, СИНТАНОЛ ДС10 – 3. Площадь рабочей поверхности электродов составляла 400 мм². В качестве источника УЗ колебаний использовали гомогенизатор ультразвуковой UP 200 Ht, оснащенный титановым генератором (рог) диаметром 12 мм. Электролиз проводили при частоте УЗ 26 кГц и выходной мощности 32 Вт/дм³. Расстояние между пьезоэлектрическим излучателем и катодом составляло 30 мм. Постоянную температуру электролита поддерживали при помощи термостата ВТЗ-1. Для нанесения покрытия Cu–Sn использовали электролит состава аналогичного приведенному в табл. 1, не содержащий инертную фазу TiO₂, при тех же условиях проведения процесса электроосаждения.

Состав и морфологию формируемых покрытий исследовали при помощи сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV, оснащенного системой химического анализа EDX JED-2201 JEOL. Для определения содержания TiO₂ в составе покрытия использовали волновой рентгенофлуоресцентный спектрометр PANalytical Axios.

Микротвердость полученных покрытий исследовали при помощи оптического микроскопа–твердомера AFRI-MVDM8. Трибологические свойства покрытий изучали при комнатной температуре с использованием трибологической испытательной машины по схеме “стержень–диск”, материал стержня – сталь ШХ 15. Нагрузка составляла 1 Н, скорость вращения контртела – 200 об./мин, радиус вращения – 10 мм.

Коррозионные исследования проводили в 3% растворе NaCl с использованием потенциостата/гальваностата Metrohm Autolab PGSTAT 302N в стандартной трехэлектродной ячейке с боковым креплением рабочего электрода, насыщенным хлоридсеребряным электродом сравнения и вспомогательным электродом в виде платиновой сетки. Потенциодинамические поляризационные кривые снимали при скорости развертки потенциала 2 мВ/с в интервале от –200 до +200 мВ относительно бестокового потенциала. Все потенциалы в работе пересчитаны в шкалу стандартного водородного электрода. Определение электрохимических параметров коррозии проводили с использованием алгоритма Левенберга–Марквардта в программном обеспечении CorrView 3.2с.

Таблица 2. Влияние режимов электроосаждения на состав покрытий Cu–Sn–TiO₂

Плотность тока, А/дм ²	Мощность УЗ, Вт/дм ³	Содержание в покрытии, мас. %		
		TiO ₂	Cu	Sn
0.5	—	0.30	63.20	36.50
0.5	32	0.10	74.70	25.20
1	32	0.12	66.20	33.68
1.5	32	0.20	65.30	34.20

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В отсутствие сонохимической обработки щавелевокислого электролита (стационарные условия) качественные блестящие покрытия Cu–Sn формируются при катодной плотности тока 0.5 А/дм². Наложение УЗ поля мощностью 32 Вт/дм³ позволяет расширить диапазон рабочих катодных плотностей тока от 0.5 до 1.5 А/дм² и способствует формированию полублестящих покрытий. Повышение плотности тока более 1.5 А/дм² приводит к снижению катодного выхода по току сплава, а также к уменьшению адгезии покрытия к подложке вследствие интенсивного выделения водорода. В табл. 2 представлен качественный и количественный состав по данным метода рентгенофлуоресцентного анализа композиционных покрытий Cu–Sn–TiO₂, полученных при различных токовых нагрузках без и при УЗ воздействии.

В стационарных условиях при катодной плотности тока 0.5 А/дм² формируются покрытия, содержащие 63.2 мас. % меди и 36.5 мас. % олова. Наложение УЗ при данной плотности тока, как показано в работе [18], приводит к формированию сплава при более низких перенапряжениях и, вследствие этого, к снижению содержания олова до 25.2 мас. %. По мере повышения токовой нагрузки наблюдается увеличение содержания олова в формируемом покрытии, что обусловлено ростом катодной поляризации. В отсутствие УЗ обработки при катодной плотности тока 0.5 А/дм² количественное содержание наноразмерных частиц TiO₂ в металлической матрице составило 0.3 мас. %, а в условиях соноэлектрохимического осаждения наблюдается снижение количества TiO₂ в покрытии до 0.1 мас. %. Повышение катодной плотности тока приводит к увеличению содержания TiO₂ в покрытии. Так, при катодной плотности тока 1.5 А/дм² формируются покрытия, включающие до 0.2 мас. % TiO₂. Снижение количества TiO₂ в покрытиях Cu–Sn–TiO₂ полученных соноэлектрохимическим способом, по-видимому, обусловлено кавитационными явлениями, которые препятствуют включению крупных агломератов в матрицу сплава [19, 20].

На рис. 1 представлены микрофотографии покрытий Cu–Sn (рис. 1а) и Cu–Sn–TiO₂ (рис. 1б–1д), полученных из исследуемого щавелевокислого электролита без и при наложении УЗ поля. В стационарных условиях из электролита, не содержащего TiO₂, при катодной плотности тока 0.5 А/дм² формируются качественные, гладкие покрытия. Введение наночастиц TiO₂ в электролит способствует формированию осадков с более крупнокристаллической структурой. В условиях соноэлектрохимического осаждения наблюдается формирование более мелкокристаллических покрытий с меньшим количеством дефектов. Это объясняется тем, что УЗ воздействие за счет возникновения в электролите кавитационных явлений способствует десорбции крупных агломератов с поверхности электрода и, вследствие этого, формированию более равномерных покрытий. При сонохимической обработке наиболее качественные покрытия получают при катодной плотности тока 1 А/дм².

Для оценки влияния УЗ обработки на распределение TiO₂ по поверхности осажденного композиционного покрытия Cu–Sn–TiO₂ был проведен количественный EDX-анализ поверхности по линии, пересекающей характерные участки осажденных покрытий (рис. 3). Установлено, что TiO₂ включается в структуру покрытий в виде агломератов (рис. 2а, 2в), при этом УЗ обработка во время электроосаждения способствует уменьшению их размеров (рис. 2б, 2г).

В табл. 3 представлены значения микротвердости покрытий Cu–Sn и Cu–Sn–TiO₂ полученных при различных токовых нагрузках и при воздействии УЗ поля. При катодной плотности тока 0.5–1.5 А/дм² из электролита, не содержащего дисперсную фазу TiO₂, вне зависимости от наличия УЗ обработки формируются покрытия Cu–Sn с микротвердостью 300–317 НВ. Из электролита, содержащего частицы TiO₂, при катодной плотности тока 0.5 А/дм² в стационарных условиях и в УЗ поле формируются покрытия Cu–Sn–TiO₂ с микротвердостью 352 и 367 НВ соответственно. Увеличение микротвердости покрытий при введении в электролит TiO₂, по-видимому, объясняется так называемым эффектом дисперсионного

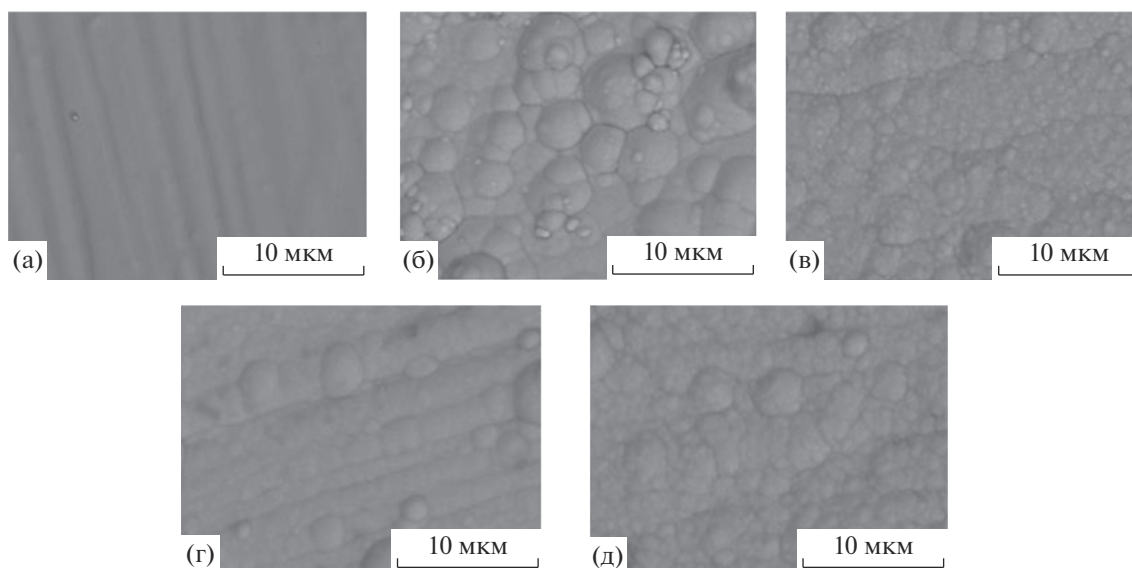


Рис. 1. Микрофотографии покрытий Cu–Sn (а) и Cu–Sn–TiO₂ (б–д), полученных без УЗ обработки (а, б) и при наложении УЗ колебаний мощностью 32 Вт/дм³ (в–д). Катодная плотность тока, А/дм²: (а–в) – 0.5; (г) – 1; (д) – 1.5.

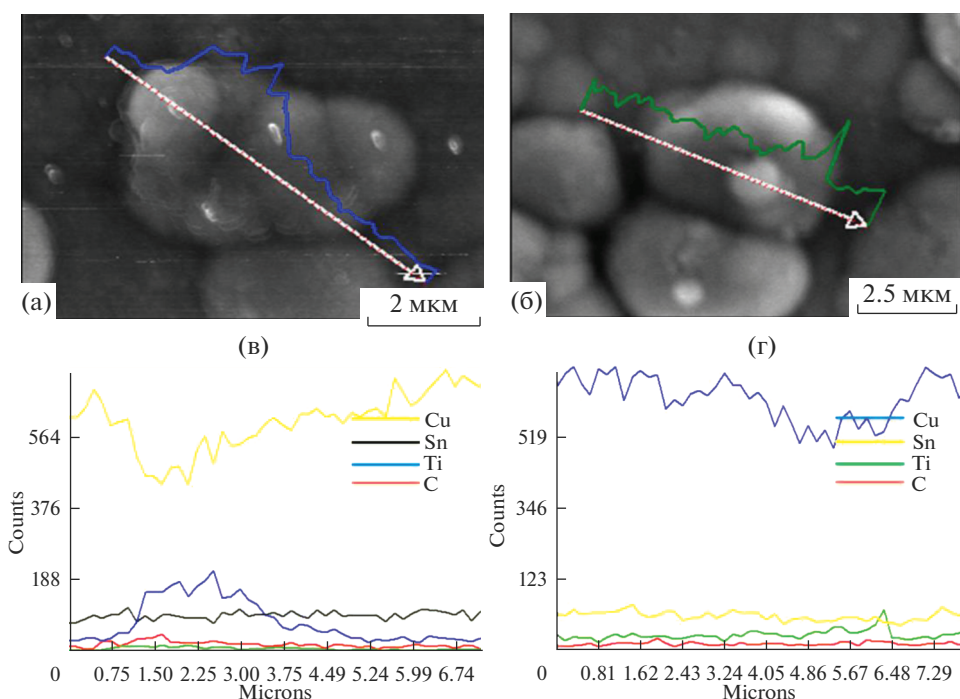


Рис. 2. СЭМ изображения поверхности покрытий Cu–Sn–TiO₂, полученных в стационарных условиях (а) и при УЗ воздействии (б) (катодная плотность тока 0.5 А/дм²), и результаты количественного EDX анализа (в, г) по линейным профилям, показанным на (а, б). Профили над линиями на (а, б) соответствуют распределению титана.

упрочнения [20–22]. Дисперсионное упрочнение обусловлено распределением в металлической матрице частиц TiO₂, которые препятствуют движению дислокаций в структуре сплава, что, в свою очередь, приводит к возрастанию микротвердости покрытия. Тот факт, что покрытия

Cu–Sn–TiO₂, полученные соноэлектрохимическим способом, несмотря на более низкое содержание TiO₂ и олова, обладают более высокими значениями микротвердости по сравнению с покрытиями, полученными в стационарных условиях, вероятно, можно объяснить более равно-

мерным распределением TiO_2 в матрице сплава при наложении УЗ поля (рис. 2).

Зависимости коэффициента трения ($K_{\text{тр}}$) полученных покрытий от времени испытаний без смазочного материала представлены на рис. 3. На начальном этапе испытаний коэффициент трения покрытий Cu–Sn, полученных в стационарных условиях при плотности тока 0.5 А/дм^2 (рис. 3а), составлял около 0.15. Дальнейшее увеличение времени испытаний покрытий Cu–Sn в диапазоне 50–175 с характеризуется монотонным возрастанием значений $K_{\text{тр}}$ от 0.17 до 0.20, а в диапазоне 175–300 с – от 0.20 до 0.28. Для покрытий Cu–Sn– TiO_2 (рис. 3б–3д) зависимость коэффициента трения от времени испытаний существенно отличается. Так для композиционного покрытия, полученного в стационарных условиях при катодной плотности тока 0.5 А/дм^2 , во время испытаний в диапазоне 50–125 с наблюдается резкое увеличение значений $K_{\text{тр}}$ от 0.15 до 0.23, что связано с более выраженной неоднородностью структуры композиционных покрытий (рис. 1б). Однако при дальнейшем увеличении времени испытаний значение коэффициента трения практически не изменяется и через 300 с составляет 0.25, что свидетельствует о более низком износе композиционных покрытий по сравнению со сплавом Cu–Sn.

При одинаковом времени испытаний покрытия Cu–Sn– TiO_2 , полученные соноэлектрохимическим способом, характеризуются более низкими значениями коэффициента трения по сравнению с образцами, полученными в стационарных условиях при той же токовой нагрузке. Увеличение плотности тока от 0.5 до 1.0 А/дм^2 также приводит к существенному снижению $K_{\text{тр}}$. Полученные закономерности можно объяснить, с одной стороны, относительно равномерным включением в металлическую матрицу частиц TiO_2 меньшего размера за счет их диспергирования при наложении УЗ; с другой стороны – формированием более гладких осадков с более высоким содержанием олова в сплаве (рис. 1в, 1г) [18].

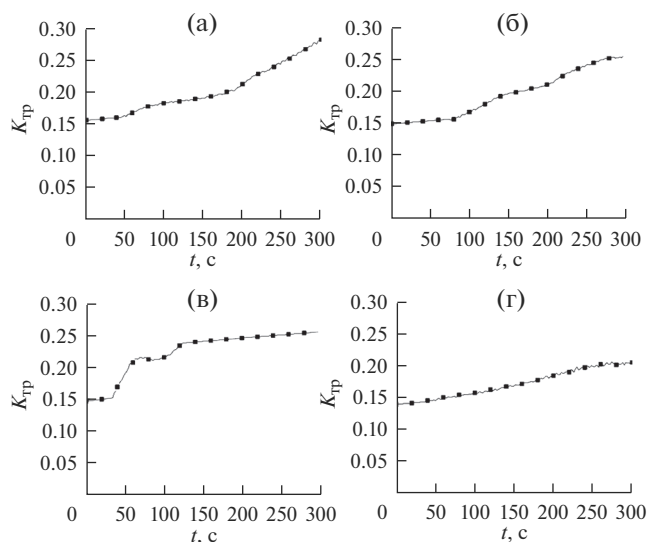


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения $K_{\text{тр}}$ от времени износа покрытий Cu–Sn (а) и Cu–Sn– TiO_2 (б–г), полученных в стационарных условиях (а, б) и при наложении УЗ мощностью 32 Вт/дм^3 (в, г). Катодная плотность тока, А/дм^2 : (а–в) – 0.5; (г) – 1.

Результаты коррозионных исследований, полученных покрытий Cu–Sn и Cu–Sn– TiO_2 в 3%-ном растворе NaCl представлены на рис. 4. Рассчитанные по данным потенциодинамической поляризации параметры процесса коррозии исследуемых покрытий представлены в табл. 4.

Из анализа коррозионных кривых на рис. 4 и данных табл. 4 видно, что потенциал коррозии для всех исследованных композиционных покрытий Cu–Sn– TiO_2 смещается в электроположительную сторону по сравнению с покрытием Cu–Sn. Это, наиболее вероятно, обусловлено химической инертностью дисперсной фазы и формированием покрытий с более высоким содержанием электроположительного компонента сплава (Cu).

Для покрытия Cu–Sn, полученного в стационарных условиях (рис. 4, кривая 1), рассчитан-

Таблица 3. Микротвердость покрытий Cu–Sn и Cu–Sn– TiO_2

Покрытие	Мощность УЗ, Вт/дм^3	Плотность тока, А/дм^2	Микротвердость, HV
Cu–Sn	–	0.5	315
	32	0.5	300
	32	1.0	317
	32	1.5	316
Cu–Sn– TiO_2	–	0.5	352
	32	0.5	362
	32	1	372
	32	1.5	380

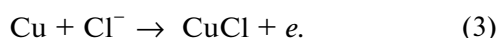
Таблица 4. Параметры электрохимического процесса, полученные из анализа потенциодинамических поляризационных кривых

Покрытие	Мощность УЗ, Вт/дм ³	Плотность тока электроосаждения, А/дм ²	$i_{кор}$, мкА/см ²
Cu–Sn	–	0.5	2.10
	–	0.5	0.90
Cu–Sn–TiO ₂	32	0.5	0.03
	32	1.0	0.12
	32	1.5	1.80

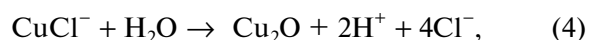
ное значение плотности тока коррозии составило 2.10 мкА/см². На анодных участках поляризационных кривых присутствует активно-пассивная область, отвечающая формированию на поверхности исследуемых образцов адсорбированного слоя малорастворимых продуктов коррозии. Растворение основного компонента сплава (меди) в хлоридсодержащей среде может протекать через стадию образования иона Cu⁺ по реакциям [21–24]:



либо прямой ионизацией по схеме:



При высоких концентрациях хлорид-ионов в приэлектродном слое возможно образование ионов CuCl⁻, которые взаимодействуя с молекулами воды образуют на поверхности образца слой малорастворимого Cu₂O [21]:



в структуру которого благодаря наличию вакансий способны внедряться образующиеся в процессе коррозии ионы олова [21, 24].

Для покрытий Cu–Sn–TiO₂ поляризационные зависимости носили аналогичный характер. Введение в электролит дисперсной фазы анатаза приводит к формированию композиционных покрытий Cu–Sn–TiO₂ (рис. 4, кривая 2) с большей коррозионной стойкостью, чем у полученных при аналогичных условиях покрытий Cu–Sn. Уменьшение значений плотности тока коррозии композиционных покрытий обусловлено тем, что TiO₂, как указано выше, способствует дисперсионному упрочнению металлической матрицы уменьшая ее коррозионное разрушение и ускоряя формирование на поверхности пассивирующей оксидной пленки. Для покрытий Cu–Sn–TiO₂, осажденных в стационарных условиях, значение плотности тока коррозии составило 0.90 мкА/см².

Для образцов композиционных покрытий, полученных в условиях сонохимической обработки при той же токовой нагрузке наблюдались наименьшие значения плотности тока коррозии (0.03 мкА/см²). Увеличение плотности тока осаждения сплава Cu–Sn–TiO₂ приводит к ускорению осаждения электроотрицательного компонента сплава (олова), чем объясняется обнаруженное возрастание плотности тока коррозии данных образцов (табл. 4).

ВЫВОДЫ

1. Введение в шавелевокислый электролит дисперсной фазы анатаза к количеству 4 г/дм³ в отсутствии УЗ воздействия приводит к формированию композиционных покрытий Cu–Sn–TiO₂, содержащих 63.2 мас. % меди, 36.5 мас. % олова и 0.3 мас. % оксида титана(IV). В условиях соноэлектрохимического осаждения кавитационные явления препятствуют включению в состав покрытия крупных агломератов TiO₂ и способствуют деполаризации катода, что, приводит к уменьшению содержания олова (до 25.2–34.2 мас. %) и ок-

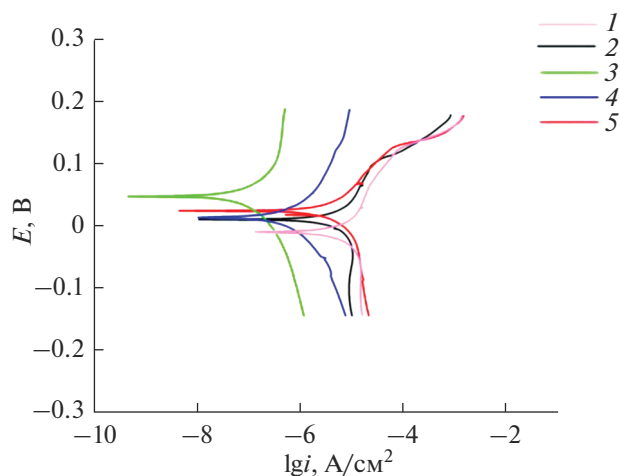


Рис. 4. Потенциодинамические поляризационные кривые в 3% растворе NaCl покрытий Cu–Sn (1) и Cu–Sn–TiO₂ (2–5), полученных в стационарных условиях (1, 2) и при наложении УЗ мощностью 32 Вт/дм³ (3–5). Катодная плотность тока, А/дм²: 1, 2, 3 – 0.5; 4 – 1; 5 – 1.5.

сида титана(IV) (до 0.1–0.2 мас. %) в составе композиционного покрытия.

2. Сонохимическое воздействие в процессе электролиза способствует увеличению диапазона рабочих плотностей тока до 0.5–1.5 А/дм² и формированию более равномерных мелкокристаллических композиционных покрытий Cu–Sn–TiO₂ с меньшим количеством дефектов по сравнению с образцами, полученными без наложения УЗ.

3. Покрытия Cu–Sn–TiO₂ за счет дисперсионного упрочнения, а также изменения состава матричного сплава обладают более высокими значениями микротвердости, износостойкости и коррозионной устойчивости по сравнению с покрытиями Cu–Sn, полученными в аналогичных условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (грант “Электрохимическое осаждение медьсодержащих покрытий с улучшенными адгезионными и эксплуатационными свойствами в нестационарных условиях”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bengoa L.N., Tuckar W.R.T., Zabala N., Egli W.A.* // Surf. Coat. Tech. 2014. V. 253. P. 241–248.
2. *Hovestad A., Tacken R.A., Mannetje H.H.* // Physica Status Solidi. 2008. V. 5. P. 3506–3509.
3. *Jung M., Lee G., Choi J.* // Electrochim. Acta. 2017. V. 241. P. 229–236.
4. *Walsh F.C., de Leon C.P.* // Transactions of the IMF. 2014. V. 92. P. 83–98.
5. *Baghery P., Farzam M., Mousavi A.B., Hosseini M.* // Surf. Coat. Tech. 2010. V. 204. P. 3804–3810.
6. *Васильева Е.А., Цуркан А.В., Проценко В.С., Данилов Ф.И.* // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2016. Т. 52. С. 331–336. (*Vasil'eva E.A., Tsurkan A.V., Protsenko V.S., Danilov F.I.* Prot. Met. Phys. Chem. Surf. 2016. V. 52. P. 532–537.)
7. *Rezaeiolum A., Aliofkhaezaei Karimzadeh M. et al.* // Surf. Eng. 2017. V. 34. P. 423–432.
8. *Aruna S., Srinivas G.* // Surf. Eng. 2015. V. 31. P. 708–713.
9. *Lajevardi S., Shahrabi T., Szpunar J.* // Appl. Surf. Sci. 2013. V. 279. P. 180–188.
10. *Velichenko A.B., Knysh V.A., LukYanenko T.V. et al.* // Russ. J. Electrochem. 2008. V. 44. P. 1251–1256.
11. *Bogomazova N.V., Antikhovich I.V., Chernik A.A., Zharskii I.M.* // Russ. J. App. Chem. 2014. V. 87. P. 1235–1239 (*Богомазова Н.В., Антихович И.В., Черник А.А., Жарский И.М.* // ЖПХ. 2014. Т. 87. № 9. С. 1239–1243).
12. *Zhou N., Wang S., Walsh F.C.* // Electrochim. Acta. 2008. V. 283. P. 568–577.
13. *Yaskel'chik V.V., Anan'ev M.V., Ostanina T.N. et al.* // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Powder Metall. Funct. Coatings, 2017. № 4. P. 53–61.
14. *Chayeuski V.V., Zhylinski V.V., Rudak P.V. et al.* // Appl. Surf. Sci. 2018. P. 18–26.
15. *Cui G., Bi Q., Niu M. et al.* // Tribol. Int. 2013. V. 60. P. 25–35.
16. *Nickchi T., Ghorbani M.* // Surf. Coat. Tech. 2009. V. 203. P. 3037–3043.
17. *Kasach A.A., Kurilo I.I., Kharitonov D.S. et al.* // Russ. J. Appl. Chem. 2018. V. 91. P. 207–213 (*Касац А.А., Курило И.И., Харитонов Д.С. и др.* // ЖПХ. 2018. Т. 91. № 2. С. 192–198).
18. *Kasach A.A., Kurilo I.I., Kharitonov D.S. et al.* // Russ. J. Appl. Chem. 2018. V. 91. P. 591–596 (*Касац А.А., Курило И.И., Харитонов Д.С. и др.* // ЖПХ. 2018. Т. 91. № 4. С. 522–527).
19. *Lampke T., Dietrich D., Leopold A. et al.* // Surf. Coat. Tech. 2008. V. 202 P. 3967–3934.
20. *Wielage B., Lampke T., Zacher M., Dietrich D.* // Key Eng. Mat. 2008. V. 384 P. 283–309.
21. *Metikoš-Huković M., Babić R., Škugor I., Grubač Z.* // Corr. Sci. 2011. V. 53. P. 347–352.
22. *Ma A.L., Jiang S.L., Zheng Y.G., Ke W.* // Corr. Sci. 2015. V. 91. P. 245–261.
23. *Thurber C.R., Ahmad Y.H., Sanders S.F. et al.* // Current Appl. Physics. 2016. V. 16. P. 387–396.
24. *Metikoš-Huković M., Škugor I., Grubač Z., Babić R.* // Electrochim. Acta. 2010. V. 55. P. 3123–3129.