



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 544.654.2

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9262>

Электрокристаллизация композиционных покрытий Cu–Sn–TiO₂ в сернокислых электролитах

А. А. Касач¹✉, Д. С. Харитонов², И. М. Жарский¹, И. И. Курило¹

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

²Jerzy Haber Institute of Catalysis and Surface Chemistry, Polish Academy of Sciences,
ул. Niezapominajek, 8, Краков 30-239, Польша

Аннотация

Цель статьи – установление особенностей электрохимического получения композиционных покрытий Cu–Sn–TiO₂ в сернокислом электролите при периодическом перемешивании в условиях стационарного и импульсного режимов электролиза.

Методами линейной вольтамперометрии, а также стационарной и импульсной хронопотенциометрии изучены кинетические особенности электрокристаллизации композиционных покрытий Cu–Sn–TiO₂ в сернокислом электролите при использовании периодического перемешивания. При перемешивании электролита происходит смещение катодного потенциала в область положительных значений. Показано, что после выключения перемешивания электролита значение катодного потенциала, при котором происходит сплавообразование меди и олова при катодной плотности тока -0.013 А/см^2 , устанавливается за 70 с, а при использовании импульсного электролиза – за 80 с. Методом сканирующей электронной микроскопии установлено, что наиболее однородные и равномерные покрытия Cu–Sn–TiO₂ формируются при использовании импульсного электролиза.

Использование периодического перемешивания сернокислого электролита приводит к формированию упорядоченных мультислойных структур, состоящих из микрослоев сплава Cu–Sn и меди, за счет периодического устранения диффузионных ограничений разряда ионов меди(II) в момент включения перемешивания, что влечет подавление процесса дофазового осаждения олова.

Ключевые слова: электрокристаллизация, сплавообразование, композиционное покрытие, импульсный электролиз, структура

Источник финансирования: работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» 2016–2020 гг., подпрограмма «Гальванотехника», задание 4.1.28: «Электрохимические композиционные покрытия с фотокаталитическими свойствами на основе сплавов олова» (2019–2020 гг., № госрегистрации 20192233).

Для цитирования: Касач А. А., Харитонов Д. С., Жарский И. М., Курило, И. И. Электрокристаллизация композиционных покрытий Cu–Sn–TiO₂ в сернокислых электролитах. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(2): 218–226. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9262>

For citation: Kasach A. A., Kharytonau D. S., Zharskii I. M., Kurilo I. I. Electrocrystallisation of Cu–Sn–TiO₂ composite coatings in sulphuric acid electrolytes. *Condensed Matter and Interphases*. 2022;24(2): 218–226. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9262>

✉ Касач Александр Александрович, e-mail: kasach2018@bk.ru

© Касач А. А., Харитонов Д. С., Жарский И. М., Курило И. И., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Электрохимические сплавы меди с оловом обладают высокой твердостью, износостойкостью и коррозионной устойчивостью [1, 2]. Сплавы, содержащие до 20 масс. % Sn (желтые бронзы) используются в качестве защитно-декоративных покрытий, а также в качестве подслоя перед хромированием [3, 4]. В последнее время данные сплавы привлекают к себе повышенное внимание благодаря их антибактериальной активности по отношению ко многим грамположительным и грамотрицательным бактериям [5–8]. В отличие от медных покрытий, которые характеризуются низкой износостойкостью, а на воздухе быстро тускнеют и теряют декоративный вид, сплавы меди с оловом менее подвержены износу и коррозии [9, 10].

Для электрохимического получения желтых бронз могут использоваться сернокислые электролиты [11–13]. Данный тип электролитов характеризуется низкой токсичностью, а сточные воды, образующиеся при их эксплуатации, легко регенерируются и утилизируются. В сернокислых электролитах процесс образования сплава может происходить при потенциалах положительнее значений стандартного электродного потенциала системы Sn²⁺|Sn⁰ (–0.136 В) [13, 14]. С целью получения однородных и мелкозернистых покрытий в сернокислые электролиты дополнительно вводят специальные органические добавки: тиомочевину [14], четвертичные аммониевые соли [15], желатин [16], синтанол и др. [17]. Недостатками сернокислых электролитов для нанесения Cu–Sn являются низкая кроющая и рассеивающая способность, а также узкие интервалы катодных плотностей тока, обеспечивающих получение однородных и блестящих покрытий [15]. В работе [15] установлено, что использование импульсного электролиза при скважности импульсов тока 1.5 и частоте 66.7 Гц позволяет почти в четыре раза расширить рабочий диапазон катодных плотностей тока, при которых формируются полублестящие покрытия желтой бронзой. Сплавообразование меди с оловом в сернокислых электролитах происходит в том случае, если длительность катодного импульса тока будет превосходить значение переходного времени процесса разряда ионов меди(II). Модификация наночастицами TiO₂ матрицы Cu–Sn приводит к ее упрочнению и улучшению антибактериальных свойств покрытий [18]. В работе [19] показано, что введение в состав сернокислого электролита наночастиц

TiO₂ в количестве от 1 до 10 г/дм³ при потенциале осаждения –0.05 В приводит к получению композиционных электрохимических покрытий (КЭП), содержащих от 0.17 до 1.72 масс. % TiO₂. Использование потенциостатического режима электролиза обеспечивает формирование покрытий с однородным распределением компонентов сплава. В промышленности для электрохимического осаждения металлов и сплавов в основном применяются гальваностатические режимы электролиза, т. к. использование потенциостатических режимов в промышленном масштабе затруднительно. В гальваностатическом режиме электролиза существенное влияние на катодную поляризацию оказывает перемешивание электролита, что, в свою очередь, может влиять на количественный состав формируемого сплава Cu–Sn.

Цель работы – установление особенностей электрохимического получения композиционных покрытий Cu–Sn–TiO₂ в сернокислом электролите при периодическом перемешивании в условиях стационарного и импульсного режимов электролиза.

2. Экспериментальная часть

Для электрохимического осаждения покрытий Cu–Sn использовали электролит следующего состава, г/дм³: CuSO₄·5H₂O – 40; SnSO₄ – 40; CS(NH₂)₂ (тиомочевина) – 0.005; H₂SO₄ – 100. Электролиз проводили без перемешивания электролита при катодной плотности тока 0.013 А/см². При получении КЭП Cu–Sn–TiO₂ в базовый состав дополнительно вводили наночастицы TiO₂ (Degussa aeroxide P25) в количестве 5 г/дм³. С целью деагломерации частиц в электролите для нанесения КЭП проводили его обработку ультразвуком в течение 20 мин. при помощи гомогенизатора UP 200 Ht (Hielscher Ultrasonics GmbH, Teltow, Германия). Для поддержания частиц TiO₂ во взвешенном состоянии в процессе осаждения КЭП использовали периодическое перемешивание электролита магнитной мешалкой каждые 5 мин в течение 10 с (скорость перемешивания 400 об/мин). Электролиз проводили при использовании стационарного и импульсного режимов. При использовании стационарного электролиза катодная плотность тока составляла 0.013 А/см². Параметры импульсного электролиза: скважность – 1.5; частота импульсов – 66.7 Гц; катодная плотность тока импульса – 0.0225 А/см². Используемые в работе параметры стационарного и импульсного режимов

электролиза выбраны по результатам проведенных ранее исследований [15] и обеспечивают получение качественных и однородных покрытий желтой бронзой. Катодами служили заготовки из фольгированного медью диэлектрика. В качестве анодов использовали медь марки М0. Геометрический размер рабочей поверхности электродов составлял 6 см².

Снятие катодных поляризационных кривых и хронопотенциограмм медного электрода в электролитах для нанесения сплава Cu–Sn и КЭП на его основе проводили в стандартной трехэлектродной ячейке с использованием потенциостата-гальваностата Elins P40X (Electrochemical Instruments, Россия). Поляризационные кривые медного электрода снимали при линейной скорости развертки потенциала 1 мВ/с. Электродом сравнения служил насыщенный хлорид-серебряный электрод, вспомогательным электродом – медная пластина марки М0. Значения электродных потенциалов пересчитаны в шкалу стандартного водородного электрода. Для получения достоверных результатов все электрохимические исследования проводились не менее трех раз.

Для изучения морфологии, качественного и количественного состава формируемых покрытий использовали сканирующий электронный микроскоп JSM-5610 LV (Jeol Ltd.), оснащенный модулем химического рентгеноспектрального анализа (EDX) JED-2201. Ускоряющее напряжение при получении изображений поверхности и элементного анализа составляло 20 кВ.

3. Результаты и их обсуждение

Для оценки влияния перемешивания электролита на кинетические особенности электроосаждения покрытий были получены поляризационные кривые медного электрода в электролитах для нанесения Cu–Sn (рис. 1, кривая 1) и Cu–Sn–TiO₂ (рис. 1, кривые 2, 3). В используемых электролитах процесс соосаждения меди и олова может протекать в диапазоне катодных потенциалов от 0.0 до –0.136 В, т. е. при потенциалах, соответствующих процессу дофазового (англ. upd – underpotential deposition) осаждения Sn [14]. На катодных поляризационных кривых медного электрода при введении в исследуемый электролит 5 г/дм³ TiO₂ в области потенциалов –0.01–(–0.06) В наблюдается сдвиг кривой в область отрицательных значений и снижение катодной плотности тока, которое при потенциале –0.04 В достигает 4±1.5 мА/см², что указывает

на торможение процесса восстановления ионов меди(II). Перемешивание электролита для нанесения Cu–Sn–TiO₂ оказывает деполаризующий эффект (рис. 1, кривая 3), обусловленный снижением диффузионных ограничений разряда ионов меди(II). Совместное осаждение олова и меди возможно, когда разряд ионов меди(II) происходит на предельном диффузионном токе [14]. Механическое перемешивание электролита способствует снятию диффузионных ограничений разряда ионов меди(II), но не обеспечивает равномерного массопереноса по объему ячейки и по площади катода [19]. Это, в свою очередь, приводит к образованию либо медных покрытий, либо покрытий Cu–Sn с низким содержанием олова. Таким образом, использование постоянного перемешивания электролита препятствует получению покрытий Cu–Sn, соответствующих составу желтой бронзы. В связи с этим для получения КЭП Cu–Sn–TiO₂ необходимо использовать периодическое перемешивание электролита.

На рис. 2 представлены хронопотенциограммы медного электрода при осаждении сплава Cu–Sn (рис. 2 а, кривая 1) и КЭП Cu–Sn–TiO₂ (рис. 2 а, кривая 2). Введение в состав электролита частиц модифицирующей фазы TiO₂ приводит к незначительному смещению *E-t*-зависимости в электроотрицательную сторону. В работе [19] высказано предположение, что увеличение поляризации электрода при получении КЭП Cu–Sn–TiO₂ может быть обусловле-

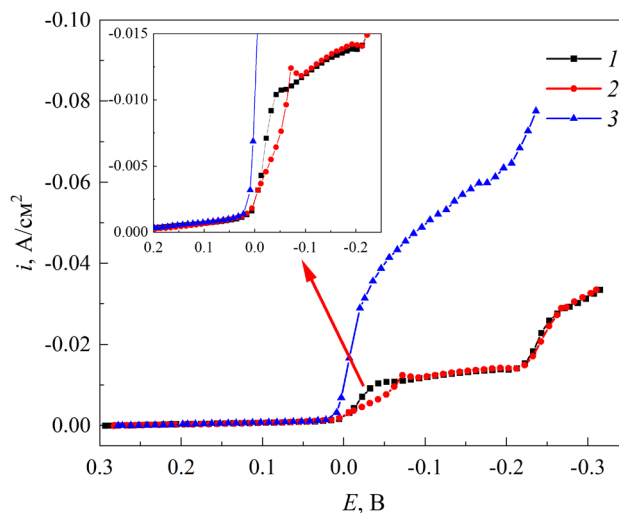


Рис. 1. Катодные поляризационные кривые медного электрода в электролитах для нанесения Cu–Sn (кривая 1) и Cu–Sn–TiO₂ (кривые 2, 3); 1, 2 – без перемешивания электролита; 3 – механическое перемешивание

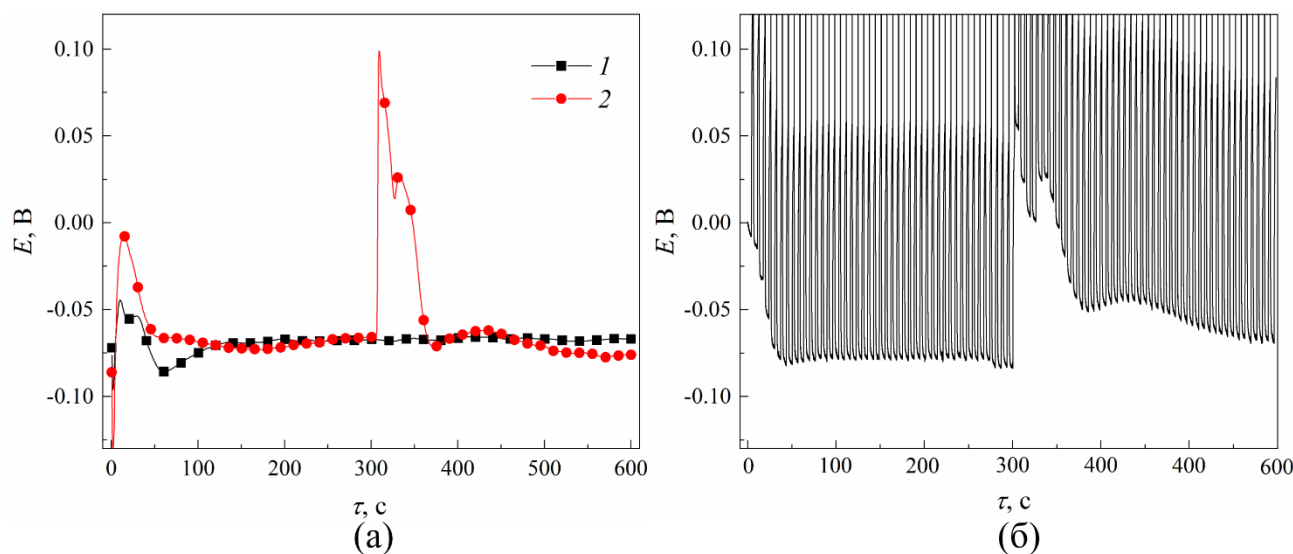


Рис. 2. Хронопотенциограммы медного электрода в электролитах для нанесения Cu–Sn (а, кривая 1) и Cu–Sn–TiO₂ (а, кривая 2; б). Режим электролиза: а – стационарный; б – импульсный

но адсорбцией частиц модифицирующей фазы на поверхности растущего осадка, что, в свою очередь, может уменьшать активную площадь электрода, участвующую в электрохимической реакции. В момент включения перемешивания электролита ($t = 300$ с) происходит смещение катодного потенциала в область положительных значений от -0.07 до 0.07 – 0.10 В. После выключения магнитной мешалки ($t = 310$ с) происходит плавное увеличение катодной поляризации электрода, что обусловлено вкладом диффузионного перенапряжения. По истечению 60 с после выключения магнитной мешалки устанавливается значение катодного потенциала, соответствующее образованию сплава Cu–Sn. При использовании импульсного электролиза (рис. 2 б) после выключения перемешивания постоянное значение катодного потенциала устанавливается за более долгий промежуток времени (70–80 с), что обусловлено релаксационным действием паузы.

На рис. 3 представлены микрофотографии полученных покрытий Cu–Sn и Cu–Sn–TiO₂. В стационарных условиях при катодной плотности тока 0.013 А/см² (рис. 3 а) формируются мелкозернистые и однородные покрытия Cu–Sn. Введение в состав электролита наночастиц TiO₂ приводит к формированию шероховатых и менее однородных покрытий (рис. 3 б, в). На поверхности КЭП Cu–Sn–TiO₂ присутствуют глобулы, размер которых варьируется от 5 до 20 мкм. Покрытия, полученные при использовании импульсного электролиза (рис. 3 в), характеризуются более однородной и гладкой структурой.

В таблице представлены данные об элементном составе полученных покрытий. При катодной плотности тока 0.013 А/см² в стационарных условиях формируются покрытия Cu–Sn, содержащие до 10.9 масс. % Sn. Введение в состав электролита наночастиц TiO₂ в количестве 5 г/дм³ приводит к увеличению содержания олова в покрытии до 12.6 масс. %, что

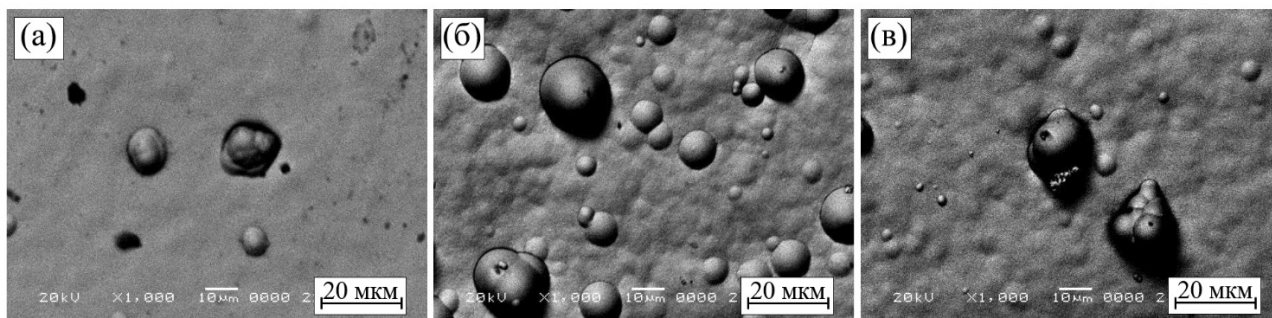


Рис. 3. Микрофотографии поверхности покрытий Cu–Sn (а) и Cu–Sn–TiO₂ (б, в). Режим электролиза: а, б – стационарный; в – импульсный

Таблица. Элементный состав поверхности покрытий Cu–Sn и Cu–Sn–TiO₂ (область сканирования 50×50 мкм)

Покрытие	Плотность тока, А/см ²	Частота импульсов, Гц	Содержание в сплаве, масс. %		
			Cu	Sn	Ti
Cu–Sn	0.013	–	89.1	10.9	–
Cu–Sn–TiO ₂	0.013	–	86.6	12.6	0.8
Cu–Sn–TiO ₂	0.0225	66.7	87.2	12.1	0.7

обусловлено ростом катодной поляризации в процессе формирования сплава (рис. 1, кривая 2). В составе полученного покрытия содержится 0.8 масс. % Ti, наличие которого обусловлено встраиванием наночастиц TiO₂ в металлическую матрицу Cu–Sn.

Использование импульсного режима электролиза позволяет получать покрытия следующего состава, масс. %: Cu – 87.2; Sn – 12.1; Ti – 0.7. Необходимо отметить, что изменение режима электролиза не оказывает существенного влияния на количественное содержание частиц TiO₂ в сплаве.

На рис. 4 представлены СЭМ изображения поперечных шлифов покрытий Cu–Sn (рис. 4 а) и Cu–Sn–TiO₂ (рис. 4 б, в). Полученные покрытия имеют четкую границу раздела с металлом подложки и характеризуются высокой адгезионной прочностью. На поперечном шлифе покрытия Cu–Sn–TiO₂, полученного при использовании стационарного электролиза, присутствуют дефекты в виде глобул и микротрещин. На поперечных шлифах КЭП Cu–Sn–TiO₂, осажденных в импульсном режиме электролиза, отсутствуют ярко выраженные дефекты, что, вероятно, обусловлено равномерным микрораспределением тока по поверхности растущего осадка.

По всей толщине КЭП Cu–Sn–TiO₂ присутствуют участки (слои) с различной контрастностью изображения, которые равномерно распределены по всей толщине покрытий. Толщина светлых

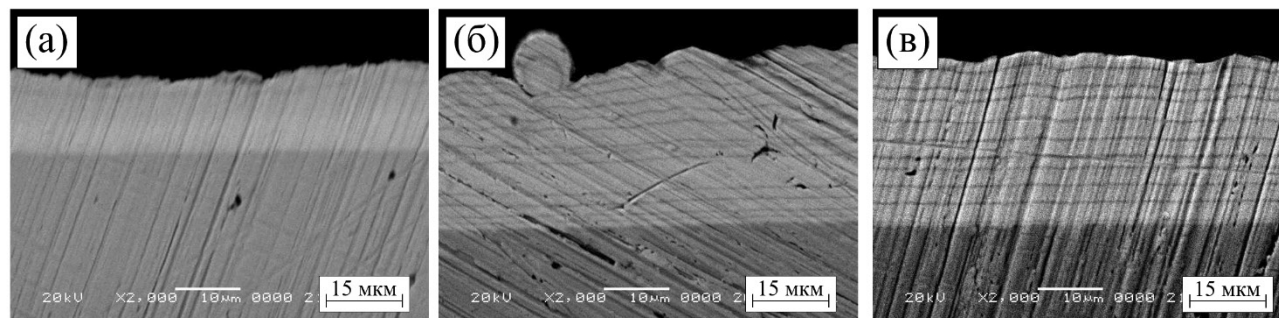
участков составляет от 3 до 5 мкм, а темных – менее 1 мкм. При использовании режима отраженных электронов такое распределение контрастности свидетельствует о различном элементном составе данных областей покрытия.

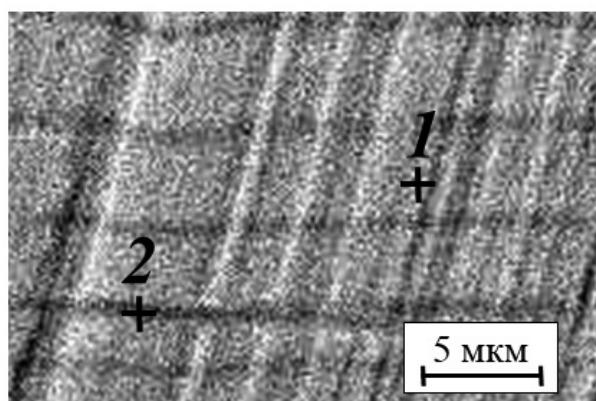
С целью установления элементного состава и природы участков различной контрастности был проведен их точечный EDX анализ (рис. 5).

Согласно полученным данным, темные участки покрытий характеризуются более низким содержанием олова. Соотношение массового содержания олова в сплаве между светлыми и темными участками составляет примерно 4:1. Перемешивание электролита приводит к деполяризации электрода и снятию диффузионных ограничений процесса разряда ионов меди(II), что делает невозможным протекание процесса дофазового осаждения олова. Таким образом, в момент включения перемешивания электролита с целью поддержания частиц TiO₂ во взвешенном состоянии происходит образование упорядоченных слоев сплава, обогащенных медью. Совместное осаждение меди и олова наблюдается после выключения перемешивания при достижении переходного времени разряда ионов меди(II).

4. Заключение

В сернокислых электролитах для нанесения сплава Cu–Sn и композиционных покрытий Cu–Sn–TiO₂ в отсутствие перемешивания осаждение меди и олова протекает при потен-


Рис. 4. Микрофотографии шлифов покрытий Cu–Sn (а) и Cu–Sn–TiO₂ (б, в). Режим электролиза: а, б – стационарный; в – импульсный



Точка	Элементный состав, масс. %		
	Cu	Sn	Ti
1	85.9	13.4	0.7
2	96.1	3.5	0.4

Рис. 5. Микрофотографии шлифа и данные точечного EDX анализа шлифа покрытия Cu–Sn–TiO₂, полученного при использовании импульсного электролиза

циалах, соответствующих процессу дофазового (upd) осаждения Sn. Введение в состав электролита наночастиц TiO₂ в количестве 5 г/дм³ способствует торможению процесса восстановления ионов меди(II) и снижению ее содержания в покрытии на ≈3 масс. %. Применение импульсного электролиза при скважности 1.5, частоте импульсов 66.7 Гц и катодной плотности тока 0.0225 А/см² позволяет получать КЭП Cu–Sn–TiO₂ аналогичного состава (≈0.7–0.8 масс. % титана, 12.1–12.6 масс. % олова), но более однородные и равномерные, чем при использовании стационарного режима при катодной плотности тока 0.013 А/см².

Использование периодического перемешивания сернокислого электролита приводит к формированию упорядоченных мультислойных структур, состоящих из микрослоев сплава Cu–Sn и меди, за счет периодического устранения диффузионных ограничений разряда ионов меди(II) в момент включения перемешивания, что влечет подавление процесса upd олова. После выключения перемешивания электролита значение катодного потенциала, при котором происходит сплавообразование меди и олова, в стационарном режиме при катодной плотности тока –0.013 А/см² устанавливается за 70 с, а при использовании импульсного электролиза – за 80 с.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Karthik M., Abhinav J., Shankar K. V. Morphological and mechanical behaviour of Cu–Sn alloys – A review. *Metals and Materials International*. 2021: 1915–1946. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00899-z>
2. Souissi N., Sidot E., Bousselmi L., Triki E., Robbiola L. Corrosion behaviour of Cu-10Sn bronze in aerated NaCl aqueous media - Electrochemical investigation. *Corrosion Science*. 2007;49(8): 3333–3347. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.01.013>
3. Lehmann L., Höhlich D., Mehner T., Lampke T. Irregular electrodeposition of Cu–Sn alloy coatings in [emim]Cl outside the glove box with large layer thickness. *Coatings*. 2021;11(3): <https://doi.org/10.3390/coatings11030310>
4. Jung M., Lee G., Choi J. Electrochemical plating of Cu–Sn alloy in non-cyanide solution to substitute for Ni undercoating layer. *Electrochimica Acta*. 2017;241: 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.04.170>
5. Wilks S. A., Michels H., Keevil C. W. The survival of escherichia coli O157 on a range of metal surfaces. *International Journal of Food Microbiology*. 2005;105(3): 445–454. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2005.04.021>
6. Grass G., Rensing C., Solioz M. Metallic copper as an antimicrobial surface. *Applied and Environmental Microbiology*. 2011;77(5): 1541–1547. <https://doi.org/10.1128/AEM.02766-10>
7. Chang T., Sepati M., Herting G., Leygraf C., Rajarao G. K., Butina K., Odnevall Wallinder I. A novel methodology to study antimicrobial properties of high-touch surfaces used for indoor hygiene applications-A study on Cu metal. *PLoS One*. 2021;16(2): e0247081. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247081>
8. Chang T., Babu, R. P., Zhao W., Johnson C. M., Hedström P., Odnevall I., Leygraf C. High-resolution microscopical studies of contact killing mechanisms on copper-based surfaces. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021;13(41): 49402–49413. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c11236>
9. Walsh F. C., Low C. T. J. A review of developments in the electrodeposition of tin-copper alloys. *Surface*

and Coatings Technology. 2016;304: 246–262. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.06.065>

10. Hutchison M. J., Scully J. R. Patina enrichment with SnO₂ and its effect on soluble Cu cation release and passivity of high-purity Cu–Sn bronze in artificial perspiration. *Electrochimica Acta*. 2018;283: 806–817. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.06.125>

11. Survila A., Mockus Z., Kanapeckaitė S., Bražinskienė D., Juškėnas R. Surfactant effects in Cu–Sn alloy deposition. *Journal of The Electrochemical Society*. 2012;159(5): 296–302. <https://doi.org/10.1149/2.084205jes>

12. Juškėnas R., Mockus Z., Kanapeckaitė S., Stalnionis G., Survila A. XRD studies of the phase composition of the electrodeposited copper-rich Cu–Sn alloys. *Electrochimica Acta*. 2006;52(3): 928–935. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.06.029>

13. Survila A., Mockus Z., Kanapeckaitė S., Jasulaitienė V., Juškėnas R. Codeposition of copper and tin from acid sulphate solutions containing polyether sintanol DS-10 and benzaldehyde. *Journal of applied electrochemistry*. 2009;39(10): 2021–2026. <https://doi.org/10.1007/s10800-009-9914-2>

14. Kasach A. A., Kharitonov D. S., Makarova I. V., Wrzesińska A., Zharskii I. M., Kurilo I. I. Effect of thiourea on electrocrystallization of Cu–Sn alloys from sulphate electrolytes. *Surface and Coatings Technology*. 2020;399: 126137. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126137>

15. Касач А. А., Харитонов Д. С., Радченко С. Л., Жарский И. М., Курило И. И. Исследование влияния параметров импульсного электролиза на процесс электроосаждения сплава медь–олово из сульфатного электролита. *Электрохимия*. 2020;56(9): 820–830. <https://doi.org/10.31857/s0424857020090042>

16. Meudre C., Ricq L., Hihn J. Y., Moutarlier V., Monnin A., Heintz O. Adsorption of gelatin during electrodeposition of copper and tin-copper alloys from acid sulfate electrolyte. *Surface and Coatings Technology*. 2014;252: 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.04.050>

17. Nakanishi S., Sakai S. I., Nagai T., Nakato Y. Macroscopically uniform nanoperiod alloy multilayers formed by coupling of electrodeposition with current

oscillations. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2005;109(5): 1750–1755. <https://doi.org/10.1021/jp045876x>

18. Kharitonov D. S., Kasach A. A., Sergievich D. S., Wrzesińska A., Bobowska I., Darowicki K., Zielinski A., Ryl J., Kurilo I. I. Ultrasonic-assisted electrodeposition of Cu–Sn–TiO₂ nanocomposite coatings with enhanced antibacterial activity. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;75: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ultrsonch.2021.105593>

19. Kasach A. A., Kharytonau D. S., Paspelau A. V., Ryl J., Sergievich D. S., Zharskii I. M., Kurilo I. I. Effect of TiO₂ concentration on microstructure and properties of composite Cu–Sn–TiO₂ coatings obtained by electrodeposition. *Materials*. 2021;14(20): 6179. <https://doi.org/10.3390/ma14206179>

Информация об авторах

Касач Александр Александрович, ассистент кафедры химии, технологии электрохимических производств и материалов электронной техники, Белорусский государственный технологический университет (Минск, Республика Беларусь).

<https://orcid.org/0000-0001-5522-2928>
kasach2018@bk.ru

Харитонов Дмитрий Сергеевич, к. х. н., н. с. института катализа и физикохимии поверхности им. Ежи Хабера польской академии наук (Краков, Польша).

<https://orcid.org/0000-0003-2071-3975>
dmitry.kharitonov@ikifp.edu.pl

Жарский Иван Михайлович, к. х. н., профессор кафедры химии, технологии электрохимических производств и материалов электронной техники, Белорусский государственный технологический университет (Минск, Республика Беларусь).

<https://orcid.org/0000-0002-3942-5175>

Курило Ирина Иосифовна, к. х. н. доцент, заведующий кафедрой физической, коллоидной и аналитической химии, Белорусский государственный технологический университет (Минск, Республика Беларусь).

<https://orcid.org/0000-0002-0016-6719>
september@tut.by

Поступила в редакцию 09.12.2021; одобрена после рецензирования 15.02.2022; принята к публикации 15.04.2022; опубликована онлайн 25.06.2022.