

ЭЛЕКТРОХИМИЯ. ГЕНЕРАЦИЯ И АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ИЗ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

УДК 621.311.61+546.47+546.137–32+546.819–31

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИНКОВЫХ ПОКРЫТИЙ В КАЧЕСТВЕ АНОДНОГО МАТЕРИАЛА В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С ХЛОРНОЙ КИСЛОТОЙ И ДИОКСИДОМ СВИНЦА ДЛЯ БЫСТРОАКТИВИРУЮЩИХСЯ РЕЗЕРВНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

© 2024 г. П. А. Щеглов^а, Д. А. Самсонов^{а, *}, А. Б. Павленков^а, Ю. М. Сидоров^а,
Т. Л. Кулова^{б, **}, А. М. Скундин^б

^аАкционерное общество “Научно-производственное объединение “Прибор” имени С. С. Голембиовского”,
117587, Москва, Россия

^бИнститут физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, 119071, Москва, Россия

*e-mail: d@samsonov-work.ru

**e-mail: tkulova@mail.ru

Поступила в редакцию 22. 09. 2023 г.

После доработки 22. 09. 2023 г.

Принята к публикации 06. 10. 2023 г.

Изучены особенности разряда электрохимической системы цинк–хлорная кислота–диоксид свинца в температурном диапазоне от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$. Установлено, что цинковые покрытия, в том числе подвергнутые хроматной пассивации, могут быть использованы в качестве анодных материалов быстроактивируемых резервных химических источников тока. Испытаниями опытных партий подтверждено соответствие источников тока требованию по показателю времени активации (не более 50 мс). Источники тока исследованной системы характеризуются повышенным напряжением разряда (максимальное напряжение одного элемента 2.12–2.44 В) по сравнению с системой свинец–хлорная кислота–диоксид свинца (1.50–1.86 В). Выявлены недостатки системы цинк–хлорная кислота–диоксид свинца, заключающиеся в нестабильности разрядных характеристик и возможности возникновения явления переполюсовки элементов батареи вследствие протекания побочных реакций, что может оказать существенно негативное влияние на надежность резервных источников тока.

Ключевые слова: цинк, гальванические покрытия, хроматирование, хлорная кислота, диоксид свинца, разрядные характеристики, резервный источник тока, время активации.

DOI: 10.31857/S0044453724070172, **EDN:** PUCPOA

ВВЕДЕНИЕ

Для электропитания устройств аварийно-сигнальной, спасательной и военной техники требуется разработка надежных малогабаритных источников электропитания, в качестве которых часто применяются резервные первичные химические источники тока. Разработанная и показавшая свою функциональную эффективность конструктивная схема химических источников тока состоит из ампулы, высвобождающей электролит при ее разрушении, и блока пластинчатых электродов кольцевидной формы, образующих батарею последовательно соединенных гальванических элементов после заполнения электролитом межэлектродных промежутков [1]. Популярной электрохимической

системой подобных источников тока является система свинец–хлорная кислота–диоксид свинца.

Одной из важных характеристик резервных источников тока является быстрота их активации. В частности, для надежного функционирования устройств специальной техники и обеспечения их быстрого действия требуется, чтобы значение времени активации источников тока не превышало 50 мс. Кроме того, необходимым условием применимости специальной техники в холодном и умеренном макроклиматических районах Земли [2, 3] является сохранение функциональных характеристик источников тока при пониженных температурах (до -50°C). Проведенные АО “НПО “Прибор” имени С. С. Голембиовского” в 2019–2020 годах исследования показали, что функциональные

характеристики источников тока, основанных на электрохимической системе свинец—хлорная кислота—диоксид свинца, существенно снижаются в области низких температур (от -40 до -50°C) при недопустимом увеличении времени активации. Один из путей дальнейшего развития разработки источников тока заключается в исследовании физико-химических процессов при генерировании электроэнергии и совершенствовании электрохимической системы свинец—хлорная кислота—диоксид свинца; этому пути посвящены предыдущие работы авторов [4, 5]. Другой путь разработки состоит в применении альтернативных электрохимических систем, в качестве одной из которых выбрана родственная система цинк—хлорная кислота—диоксид свинца. Именно такая система и является объектом исследования настоящей работы.

Подробные исследования электрохимической системы цинк—хлорная кислота—диоксид свинца были выполнены недавно в Саратовском государственном техническом университете [6–9]. В этих работах были выявлены преимущества данной системы, заключающиеся, прежде всего, в повышении напряжения разряда (1.4 – 2.3 В на один элемент) по сравнению с системой свинец—хлорная кислота—диоксид свинца (1.2 – 1.8 В). В качестве недостатков системы с использованием цинка выявлено менее продолжительное время работы вследствие образования губчатого осадка свинца на цинковом электроде.

Поскольку нижняя граница температурного интервала исследований в упомянутых работах [6–9] составила -30°C , применимость системы цинк—хлорная кислота—диоксид свинца для создания источников тока, функционирующих при пониженных температурах вплоть до -50°C , осталась неопределенной, что явилось предпосылкой к постановке задач исследования в настоящей работе.

Другая предпосылка основана на предположении о возможности сокращения времени активации источников тока за счет применения анодных материалов с более отрицательным потенциалом, чем потенциал свинца. Повышение напряжения разряда резервного источника тока за счет применения цинка может способствовать уменьшению времени, требующегося для достижения минимально допустимого напряжения разряда 9.5 В.

Цель выполненного исследования состояла в выявлении возможности применения цинковых покрытий в качестве анодного материала в составе электрохимической системы с хлорной кислотой и катодом на основе диоксида свинца для изготовления резервных ампульных химических источников тока, обладающих малым временем активации и функционирующих в широком интервале температур от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$. Была оценена применимость стандартной технологии нанесения

цинковых покрытий и их защиты от коррозии методом хромотного пассивирования для обеспечения сохранности при длительном хранении, исследованы разрядные характеристики системы цинк—хлорная кислота—диоксид свинца с применением полученных цинковых покрытий, а также определены функциональные характеристики резервных источников тока системы цинк—хлорная кислота—диоксид свинца, в том числе времени активации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Электроды для резервного химического источника тока изготавливали нанесением гальванических покрытий на стальную ленту марок 08, 08кп или 08пс ГОСТ 503–81. Покрытия наносили на производственной линии, состоящей из гальванических ванн с рабочим объемом 200 – 250 литров и выпрямительных агрегатов Пульсар Про 240/12 (ООО “Навиком, Россия). Цинк наносили катодным осаждением из щелочного цинкатного электролита с блескообразующими добавками, толщина покрытия составила 20 – 30 мкм. После нанесения цинкового покрытия выполняли операцию осветления в разбавленном кислотном растворе, после чего следовала операция радужного хромирования в растворе на основе хромовой кислоты. Изготовлены электроды со следующими вариантами цинковых покрытий: 1) без хромирования; 2) с хромированием при времени экспозиции в хроматной ванне 1 – 2 с; 3) с хромированием при времени экспозиции в хроматной ванне 5 – 8 с. Свинец наносили катодным осаждением из кислотного электролита по известной технологии, толщина покрытия составила 25 – 30 мкм. Диоксид свинца наносили анодным осаждением из раствора на основе нитрата свинца на подложку, которую предварительно подвергали анодному оксидированию, толщина покрытия составляла 40 – 60 мкм. Технология нанесения покрытий более подробно описана в [4, 10].

Толщину покрытий контролировали по разности между толщиной подложки с покрытиями и толщиной подложки с помощью индикатора 1 МИГ ГОСТ 9696–82 или ИЧ-02 кл. 0 ГОСТ 577–68 со стойкой С-11-28-125×125 или С-1У-8-160×100 ГОСТ 10197–70. Прочность сцепления цинкового покрытия с основой определяли методом нанесения сетки царапин по ГОСТ 9.302–88. Все полученные варианты покрытия обладали хорошей прочностью сцепления с основой.

Морфология поверхности покрытий определяли методом оптической микроскопии с применением фотомикроскопа отраженного света Neophot 21 (Carl Zeiss, Jena), оснащенного цифровым фотоаппаратом. Оптическое увеличение составляло $\times 1000$. К отдельным фрагментам применено увеличение $\times 4000$ (оптическое $\times 1000$ и цифровое $\times 4$).

Функционирование при разряде электродов с различными вариантами покрытий исследовано методом хронопотенциометрии в гальваностатическом режиме. Использовали двухэлектродную ячейку, в которой анодом являлся электрод с покрытием цинка или свинца, а катодом — электрод с покрытием диоксида свинца. Исследования выполнены при следующих условиях и параметрах: плотность тока 25 мА/см^2 ; рабочая площадь поверхности электродов 1 см^2 ; межэлектродное расстояние 0.5 мм ; электролит — водный раствор хлорной кислоты марки чда ТУ 6-09-2878-84 с концентрацией 40%. Разряд проводили на границах температурного диапазона эксплуатации — при температурах $+50$ и -50°C , а также при $+25^\circ\text{C}$ до конечного напряжения 1.2 В . Измерения выполнены с помощью потенциостата-гальваностата Р-40Х (Electrochemical Instruments, Россия). Для термостатирования ячейки применена камера тепла-холода КТХ 74-65/165 (ОАО «Смоленское СКТБ СПУ», Россия). Термостатированный электролит заливали в ячейку за несколько секунд до начала измерений.

Пластины с исследованными покрытиями применены для изготовления опытных образцов миниатюрных резервных источников тока, состоящих из восьми последовательно соединенных электрохимических элементов и имеющих следующие габаритные размеры: диаметр 15 мм , высота 17.8 мм (рис. 1). Разрядные кривые источников тока регистрировали с помощью испытательного стенда в условиях вращения с частотой $(2-3) \times 10^4 \text{ мин}^{-1}$. Сопротивление цепи нагрузки составляло 1 кОм . Более подробно методика эксперимента описана в работе [4].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выбранная технология нанесения цинковых покрытий электродов обеспечивает изготовление качественных, однородных и сплошных покрытий без отслоений от основы. Оптическая микроскопия позволяет проследить трансформацию морфологии поверхности при хромировании цинкового покрытия (рис. 2).

На поверхности цинкового покрытия без хромирования заметно наличие продуктов так называемой белой коррозии цинка, в соответствии с литературными данными [11] состоящих из оксида, гидроксида, гидрокарбоната и карбоната цинка. Хромирование при относительно малом времени экспозиции приводит к образованию сплошной пленки. При относительно большом времени экспозиции поверхностная пленка приобретает более плотную регулярную микроструктуру, построенную из периодически повторяющихся схожих структурных фрагментов. В соответствии с литературными данными [12, 13] поверхностные

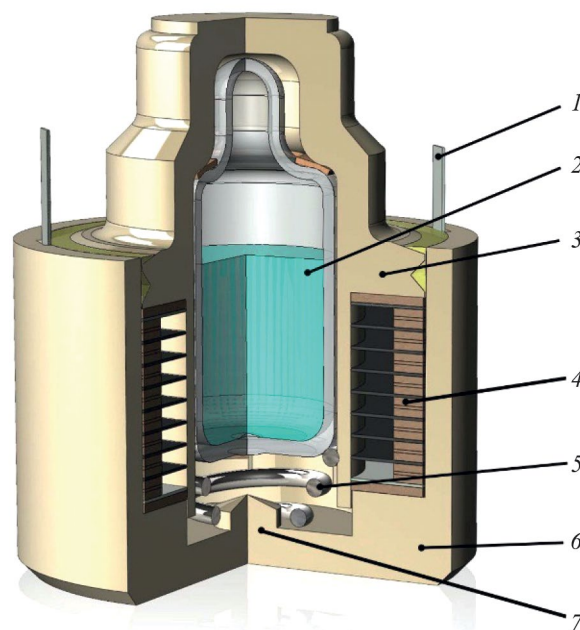


Рис. 1. Малогабаритный резервный источник тока (в аксонометрической проекции): 1 — токовыводы; 2 — ампула, заполненная электролитом; 3 — колпачок; 4 — блок электродов; 5 — пружина; 6 — кожух; 7 — боек.

пленки субмикронной или микронной толщины на хромированном цинке состоят из хромата цинка, гидроксохромата цинка, гидроксида цинка, гидроксида хрома (III).

Хромирование — известный промышленный метод, позволяющий существенно увеличить коррозионную стойкость цинковых покрытий при длительном хранении [12, 13]. Для выявления его применимости по отношению к технологии изготовления электродов источников тока исследованы разрядные характеристики системы цинк—хлорная кислота—диоксид свинца с различными вариантами покрытий (рис. 3). Для сравнения на данном рисунке представлены типичные разрядные кривые системы свинец—хлорная кислота—диоксид свинца.

Из представленных данных видно, что все три варианта цинковых покрытий работоспособны в интервале температур от -50 до $+50^\circ\text{C}$. Применение цинка в качестве анодного материала позволяет повысить напряжение разряда в начальный период на $\sim 0.4-0.6 \text{ В}$, при этом напряжение разряда превышает 2 В . В отличие от системы свинец—хлорная кислота—диоксид свинца, для которой характерны более плавные кривые разряда, разрядные характеристики системы цинк—хлорная кислота—диоксид свинца демонстрируют повышенную

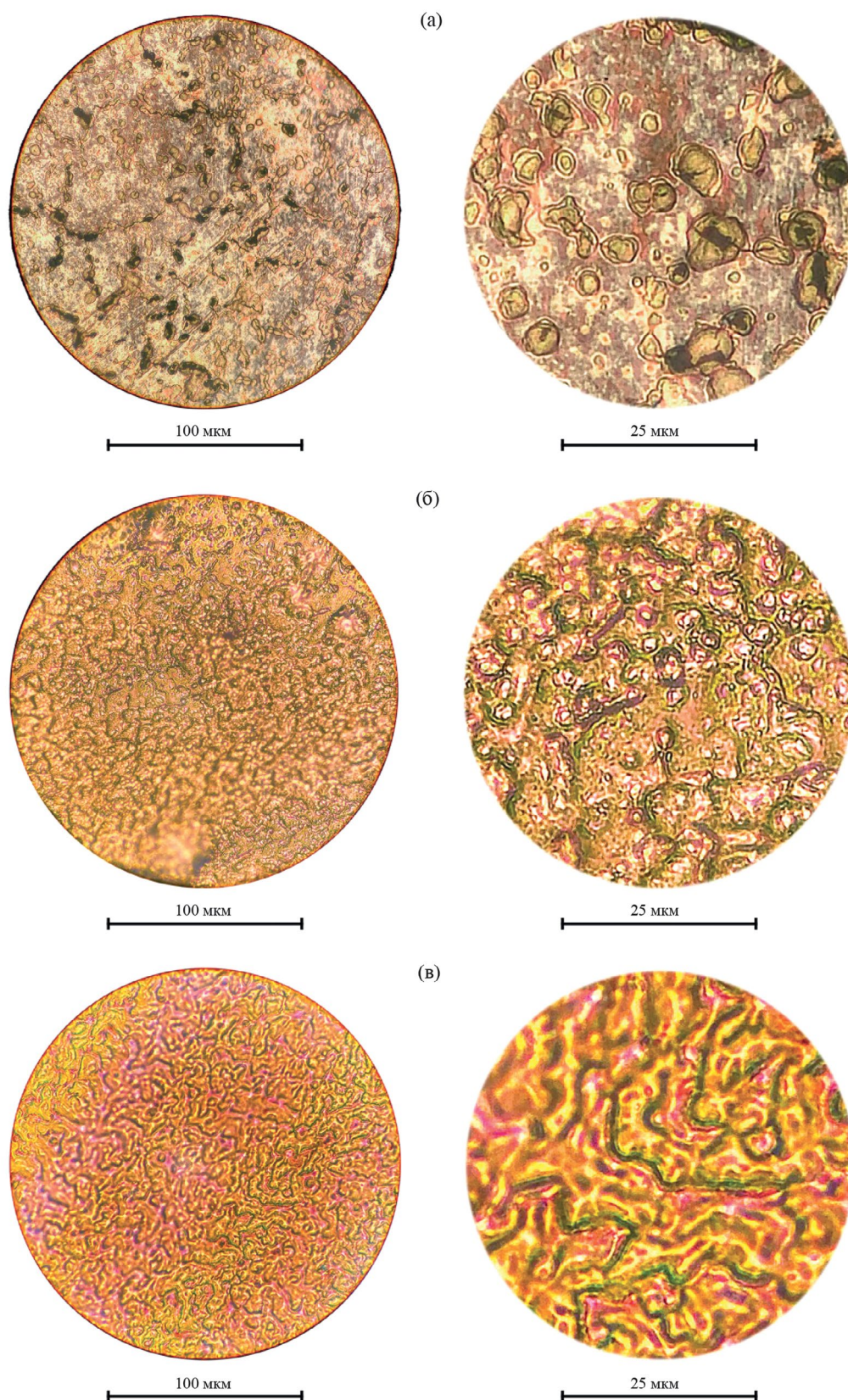
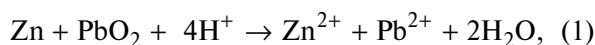


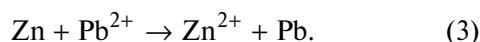
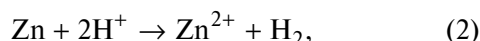
Рис. 2. Микрофотографии поверхности вариантов цинковых покрытий: а – без хромирования; б – с хромированием при времени экспозиции 1–2 с; в – с хромированием при времени экспозиции 5–8 с.

нестабильность, выражающуюся в резких колебаниях, повышенному шуму напряжения разряда и ступенчатой форме разрядных кривых.

Указанная нестабильность может быть объяснена протеканием при разряде рассматриваемой электрохимической системы наряду с токообразующей реакцией



побочных процессов:



В результате в процессе разряда потенциал анода определяется компромиссным потенциалом совокупности всех протекающих процессов, теряет стабильность и сдвигается в сторону меньших по абсолютной величине значений.

Основные разрядные характеристики исследованной системы цинк—хлорная кислота—диоксид свинца приведены в таблице 1. Достиженные значения доли от теоретической емкости анода (39–61%) меньше, чем приведенные в работе [6] (81%), что можно объяснить различиями в условиях испытаний, в том числе значением межэлектродного расстояния. В нашей работе применено меньшее межэлектродное расстояние (0.5 мм по сравнению с 1 мм) из диапазона значений, часто применяемых в конструкциях миниатюрных резервных источников тока (0.2–0.8 мм). Исходя из наличия побочных реакций при функционировании системы цинк—хлорная кислота—диоксид свинца, можно утверждать, что уменьшение межэлектродного расстояния неблагоприятно сказывается как на удельной емкости, так и на других разрядных характеристиках. Так, протекание реакции выделения водорода на цинковом аноде в условиях малого межэлектродного расстояния, препятствующего эвакуации пузырьков газа, приводит к повышенному газонаполнению электролита в межэлектродном промежутке, что влечет за собой уменьшение и колебания значений напряжения разряда. Протекание реакции осаждения свинца в условиях малого межэлектродного расстояния повышает возможность образования короткого замыкания между электродами, что вызывает резкое уменьшение напряжения или прекращение выдачи электроэнергии в цепь нагрузки.

Нестабильность разрядных характеристик повышает опасность возникновения явления переплюсовки элемента (в соответствии с принятой терминологией [14]), при которой элемент, находящийся в батарее последовательно соединенных элементов, теряет устойчивость режима генерации электроэнергии и переходит в режим потребления,

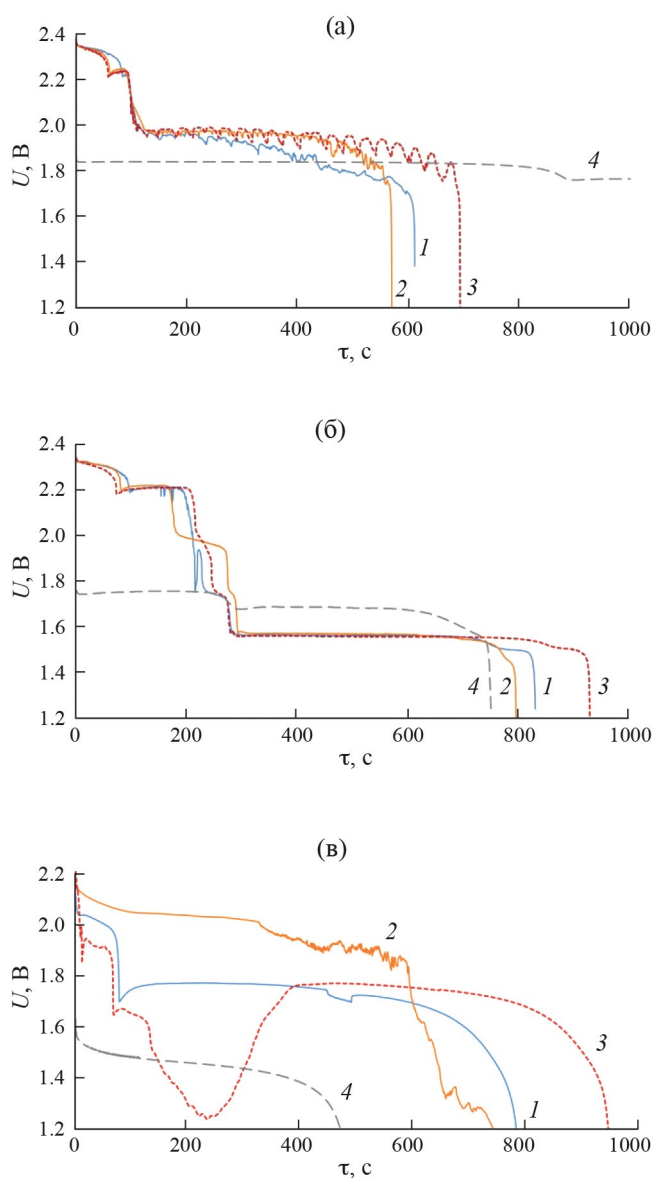


Рис. 3. Кривые разряда системы цинк—хлорная кислота—диоксид свинца с различными вариантами анодных покрытий (1, 2, 3) в сравнении с системой свинец—хлорная кислота—диоксид свинца (4). Варианты анодных покрытий: 1 — без хромирования, 2 — с хромированием при времени экспозиции 1–2 с, 3 — с хромированием при времени экспозиции 5–8 с. Температура испытаний: а — +50°С; б — +25°С; в — минус 50°С. Обозначения: U — напряжение, τ — время.

что вызывает резкое снижение показателей качества генерируемой батареей электроэнергии и сильный разогрев батареи в области переплюсованного элемента. При этом переплюсованный элемент может расходовать потребляемую электроэнергию на заряд, на электролиз воды или на разогрев как короткозамкнутый участок цепи. Явление

Таблица 1. Разрядные характеристики системы цинк–хлорная кислота–диоксид свинца

Вариант покрытия анода	T , °C	U_0 , В	τ_{2V} , с	τ_d , с	C , мА мин/см ²	α , %
Без хромирования	+50	2.39	110	611	255	39
	+25	2.34	210	831	346	54
	–50	2.12	57	785	327	51
С хромированием при времени экспозиции 1–2 с	+50	2.38	122	569	237	37
	+25	2.33	190	796	332	51
	–50	2.18	330	744	310	48
С хромированием при времени экспозиции 5–8 с	+50	2.38	108	693	289	45
	+25	2.34	222	930	388	60
	–50	2.21	8	949	395	61

Обозначения: T – температура, U_0 – начальное напряжение разряда, τ_{2V} – продолжительность разряда с напряжением не менее 2.00 В, τ_d – продолжительность разряда, C – удельная емкость, α – доля от теоретической емкости (по анодному материалу).

переплюсовки, как и повышенная нестабильность напряжения разряда, отрицательным образом сказываются на надежности функционирования источников тока, что вынуждает использовать конструкции с большими межэлектродными зазорами, чем для элементов системы свинец–хлорная кислота–диоксид свинца.

Результаты стендовых испытаний опытных партий источников тока (рис. 4) подтверждают применимость цинковых покрытий (в том числе подвергнутых хромотному пассивированию) в составе электрохимической системы цинк–хлорная кислота–диоксид свинца для быстроактивируемых миниатюрных резервных источников тока.

В условиях стендовых испытаний время активации источников тока в интервале температур от –50 до +50 °C составило 3–21 мс; максимальное напряжение в процессе разряда 18.0–19.5 В; продолжительность работы 8–20 с при разряде с напряжением не менее 9.5 В. Важно отметить, что даже при температуре –50 °C время активации (время до достижения напряжения 9.5 В) не превышает 15 мс, что удовлетворяет предъявляемым техническим требованиям. Положительные характеристики данной электрохимической системы состоят, прежде всего, в обеспечении малого времени активации во всем диапазоне температур функционирования. Недостатки системы цинк–хлорная кислота–диоксид свинца состоят в меньшей стабильности напряжения, а также значительно меньшей продолжительности работы источников тока по сравнению с системой свинец–хлорная кислота–диоксид свинца (продолжительность работы источников тока второй из названных систем по данным стендовых испытаний достигает более 90 с). Значительно меньшая продолжительность работы источников тока при стендовых испытаниях в условиях вращения с частотой $(2-3) \times 10^4$ об/мин по

сравнению с результатами хронопотенциометрических испытаний элементов может быть объяснена ускоренным возникновением короткого замыкания между электродами при вращении источника тока с высокой частотой за счет уплотнения дисперсного осадка металлического свинца под действием центробежных сил.

Указанные недостатки не препятствуют практическому использованию системы цинк–хлорная кислота–диоксид свинца, однако требуют введения в цепь нагрузки дополнительных устройств стабилизации, преобразования или накопления электроэнергии в случае, если источник тока используется для питания чувствительных микросхем. По максимальному напряжению и продолжительности разряда испытанные источники тока приближаются по характеристикам к пиротехническим источникам тока; отличие заключается в значительно меньших достигнутых значениях времени активации резервных источников тока исследованной нами системы [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прямыми экспериментами показано, что в качестве анодных материалов в системе с хлорной кислотой и диоксидом свинца в миниатюрных резервных химических источниках тока могут быть использованы электрохимически осажденные покрытия цинка. Наличие поверхностных пассивационных хромотных пленок на поверхности цинка не препятствует достижению малого времени активации источников тока (менее 50 мс) в диапазоне температур эксплуатации от –50 до +50 °C.

Установлено, что электрохимическая система цинк–хлорная кислота–диоксид свинца обеспечивает повышенное напряжение разряда источников тока (14.2–19.5 В) в батарее из восьми элементов.

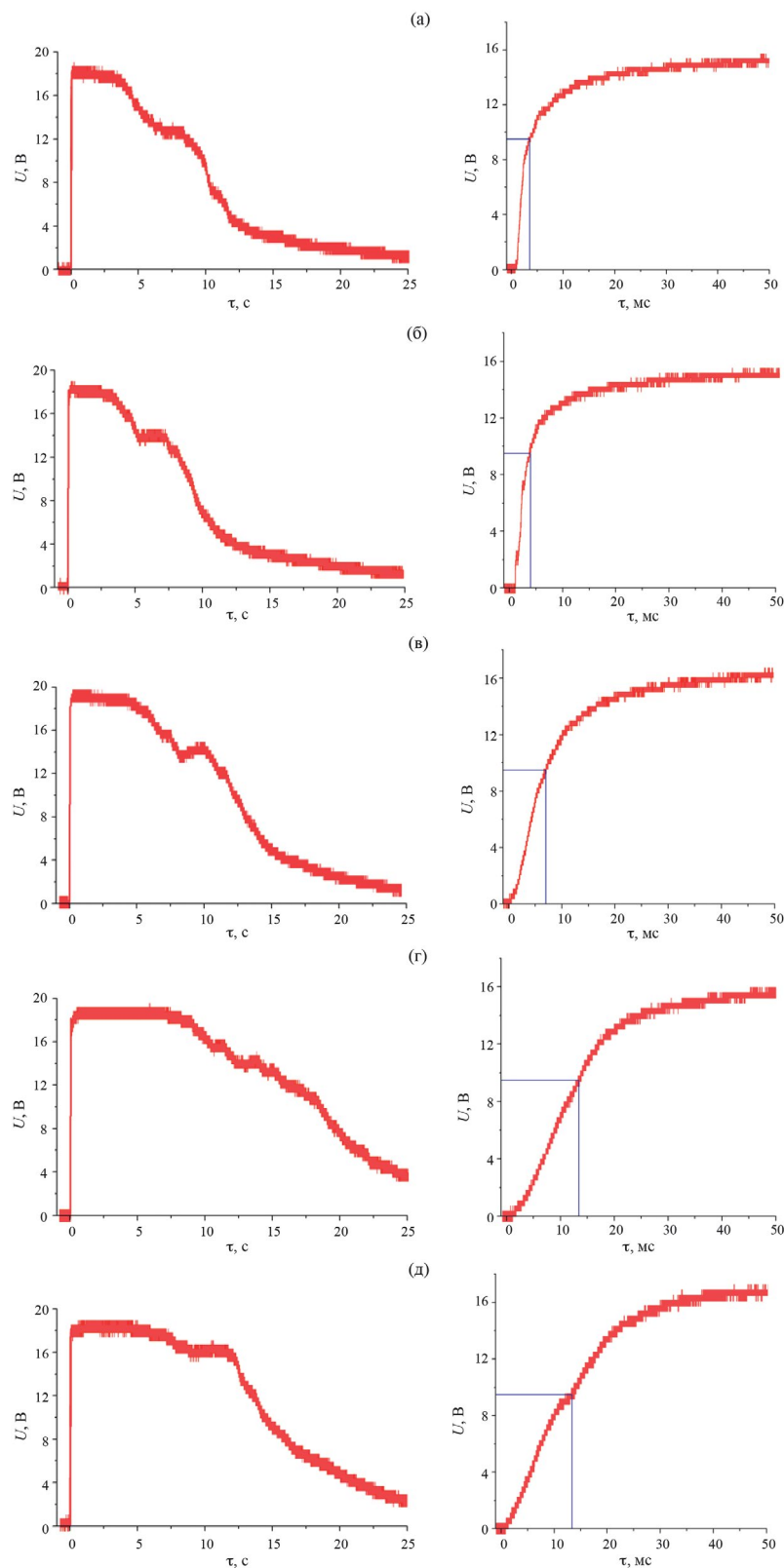


Рис. 4. Кривые разряда опытных образцов источников тока системы цинк—хлорная кислота—диоксид свинца с различными вариантами анодных покрытий (слева приведены полные кривые разряда; справа — начальные фрагменты кривых разряда): а, б, в — без хромирования; г — с хромированием при времени экспозиции 1–2 с; д — с хромированием при времени экспозиции 5–8 с. Температура испытаний: +50 (а), +20 (б), –50°C (в, г, д).

Недостатки электрохимической системы цинк—хлорная кислота—диоксид свинца состоят в нестабильности характеристик разряда и возникновения явления переплюсовки элементов в батарее, что может привести к снижению надежности функционирования химических источников тока. Для источников тока с повышенной надежностью не рекомендуется использовать исследованную электрохимическую систему.

Авторы выражают благодарность ведущим инженерам-химикам С. Г. Кокоревой и С. Н. Кричевцовой за выполнение контроля технологического процесса нанесения гальванических покрытий.

Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голембиовский В.С., Есеев Р.У., Колпашников Ю.В., и др. Энергосодержащий источник тока. Патент 2487313 (Россия), приоритет 03.02.2012. [Golembiovskii V.S., Esiev R.U., Kolpashnikov Yu.V., et al. Energy-containing source of current. Patent 2487313 (Russia), priority 03.02.2012]
2. ГОСТ 25870—83. Макроклиматические районы земного шара с холодным и умеренным климатом. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей: государственный стандарт СССР: издание официальное. — М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1983. [GOST 25870—83. Macroclimatic regions of the world with cold and temperate climate. Regionalizing and statistical parameters of climatic factors for technical purposes: state standard of the USSR: official publication (in Russian). Moscow, 1983]
3. ГОСТ 16350—80. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей: государственный стандарт СССР: издание официальное. — М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1981. [GOST 16350—80. Climate of the USSR. Regionalizing and statistical parameters of climatic factors for technical purposes: state standard of the USSR: official publication (in Russian). Moscow, 1981].
4. Щеглов П.А., Самсонов Д.А., Павленков А.Б., и др. // Электрохимия. 2023. Т. 59, № 12. Принято в печать. <https://doi.org/10.31857/S0424857023120125>
5. Щеглов П.А., Самсонов Д.А., Павленков А.Б., и др. // Журн. физ. химии. 2023. Т. 97. № 12. Принято в печать. <https://doi.org/10.31857/S0044453723120269>
6. Горбачев Н.В., Горбачева Е.Ю., Соловьева Н.Д., Краснов В.В. // Электрохимическая энергетика. 2011. 11. № 3. С. 154. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2011-11-3-154-157> [Gorbachev N.V., Gorbacheva E. Yu., Solov'eva N.D., Krasnov V.V. // Elektrokhimicheskaya Energetika (in Russian). 2011. V. 11. P. 154.].
7. Горбачев Н.В., Соловьева Н.Д. // Вестн. Саратовского государственного технического университета. 2011. № 2(53). Вып. 1. С. 76.
8. Горбачев Н.В. Технология формирования анодных слоев электродов резервных источников тока с хлорной кислотой. Дис. ... канд. техн. наук. Саратов: ФГБОУ ВО “Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.”. 2011. 127 с.
9. Шпекина В.И. Разработка технологии электроосаждения диоксида свинца на различные подложки в ультразвуковом поле. Дис. канд. техн. наук. Саратов: ФГБОУ ВО “Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.”, 2016. 136 с. [Shpekina, V.I., Development of technology of electrodeposition of lead dioxide onto various substrates in ultrasonic field. Dissertation. Saratov: The Saratov State Technical University (in Russian). 2016, 136 p.]
10. ГОСТ 9.305—84. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Операции технологических процессов получения покрытий: межгосударственный стандарт: издание официальное. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2003 [GOST 9.305—84. Unified system of corrosion and ageing protection. Metal and non-metal inorganic coatings. Technological process operations for coating production: interstate standard: official publication (in Russian). Moscow, 2003]
11. Коррозия: Справочник. /Под ред. Л.Л. Шрайера М.: Металлургия, 1981. 632 с. [Corrosion. Edited by Shreir L.L. Moscow: Metallurgiya Publ., 1981. 632 p. (In Russian, transl. from Engl.).]
12. Ильин В.А. Цинкование, кадмирование, оловянирование и свинцевание. Л.: Машиностроение, 1983. 87 с. [Il'in V.A. Electroplating of zinc, cadmium, tin and lead coatings. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1983. 87 p. (in Russian)].
13. Лобанов М.Л., Кардонина Н.И., Россина Н.Г., Юровских А.С. Защитные покрытия: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2014. 200 с. [Lobanov M.L., Kardonina N.I., Rossina N.G., Yurovskikh A.S. Protective coatings. Ekaterinburg: Ural University Publ., 2014. 200 p. (In Russian)].
14. ГОСТ Р 58593—2019. Источники тока химические. Термины и определения: Национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное. Москва: Стандартинформ, 2019. [GOST R58593—2019. Primary and secondary cells and batteries. Vocabulary: national standard of the Russian Federation: official publication (in Russian). Moscow, 2019.]
15. Просянюк В.В., Суворов И.С., Гильберт С.В. // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. 2022. № 1. С. 10.