

УДК 620.193.46

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ИСТОЧНИКАХ ТОКА

С. А. Фатеев[✉], И. А. Пуцылов, С. Е. Смирнов

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет “МЭИ”»
111250, Россия, Москва, Красноказарменная, 14*

[✉] E-mail: serfat@list.ru

Поступила в редакцию: 09.04.2019 / Принята: 19.07.2019 / Опубликовано онлайн: 20.09.2019

Для создания надежного токосъема для фторуглеродных элементов с применением быстрозакаленных материалов изучено коррозионно-электрохимическое поведение микрокристаллического сплава АВ-86, а также аморфных сплавов $Ni_{81}P_{19}$ и $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$ в электролите на основе γ -бутиролактона (ГБЛ) с целью выяснения возможности использования их в качестве токосъемов фторуглеродного катода. Высокая коррозионная стойкость и электропроводность аморфных материалов делают их перспективными для использования в качестве токосъемов источников тока. Все исследованные аморфные и микрокристаллические материалы удовлетворяют предъявляемым требованиям и могут быть рекомендованы для использования в качестве токосъема фторуглеродного катода. Наиболее технологичным и перспективным в настоящее время представляется сплав АВ-86, который, обладая высокой коррозионной стойкостью в ГБЛ, сваривается с другими элементами конструкции источников тока без разрушения.

Ключевые слова: аморфные металлы, фторированный углерод, фторуглеродно-литиевый элемент, γ -бутиролактон.

The Prospects of Use of the Fast-Tempered Materials in Current Sources

Sergey A. Fateev, <http://orcid.org/0000-0003-2553-9910>, serfat@list.ru
Ivan A. Putylov, <http://orcid.org/0000-0002-4905-9914>, putylov@yandex.ru
Sergey E. Smirnov, <http://orcid.org/0000-0002-5493-4197>, smirnovsy@mail.ru

*National Research University “Moscow Power Engineering Institute”
14 Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia*

Received: 09 April 2019 / Accepted: 19 July 2019 / Published online: 20 September 2019

For the purpose of creation of a reliable current conductor for fluorocarbon-lithium cell with use of the fast-tempered materials the corrosion and electrochemical behavior of microcrystalline AV-86 alloy and also amorphous $Ni_{81}P_{19}$ and $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$ alloys in electrolytes on a basis γ -butyrolactone (GBL) is studied. The high corrosion resistance and conductivity of amorphous materials do perspective their use as current conductor of current sources. The corrosion and electrochemical behavior of AV-86 alloy is investigated, and also amorphous $Ni_{81}P_{19}$ and $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$ alloys in electrolytes on the basis of GBL for the purpose of clarification of a possibility of their use as current conductor of the fluorocarbon cathode. And now AV-86 alloy which, having high corrosion resistance in GBL, welding with other structural elements the power source without destruction is represented to the most technological perspective.

Keywords: amorphous metals, carbon monofluoride, fluorocarbon-lithium cell, γ -butyrolactone.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-3-157-165>

ВВЕДЕНИЕ

Среди существующих химических источников тока (ХИТ) наиболее совершенными и перспективными являются литиевые

системы, которые имеют высокие удельные энергетические характеристики и представляют интерес для электронной техники, медицины и военных нужд. Литиевые ХИТ с фторуглеродным катодом ($Li-CF_x$) отли-

чает стабильность по напряжению, наивысшие значения удельной ёмкости и энергии (861 А·ч/кг и 2000 Вт·ч/кг), отсутствие газовыделения, малый саморазряд (0.5%/год), высокая безопасность [1–4]. Одной из отличительных особенностей Li-CF_x элементов является высокая сохраняемость как при обычной температуре, так и при повышенной [5]. На этот параметр существенное влияние оказывает материал токосъемов электродов и состав используемого электролита [6, 7]. Создание таких источников потребовало поиска новых материалов и конструкторско-технологических решений при разработке коррозионно-стойких корпусов и токосъемов для электродов ХИТ. Для токосъема катодов рекомендовано использовать различные материалы: хромистые, молибденистые стали, графит, никель, алюминий, титан и др. [8, 9]. Однако вследствие ряда причин технологического и коррозионного поведения все упомянутые материалы требуют определенной защиты поверхности токосъема, находящегося в контакте с фтористым углеродом. А металлы группы железа при контакте с фтористым углеродом из-за смещения потенциала в анодную область подвергаются быстрому растворению [6]. И хотя при использовании титана с покрытием коллоидным графитом в качестве токосъема получены сравнительно высокие сроки хранения элементов, все же имеет место частичное отслоение графита и окисление титана с образованием запорного слоя [4, 5, 10, 11]. Это приводит к значительному провалу напряжения в первые часы разряда после длительного хранения.

Микрокристаллические и аморфные материалы (АМ), обладающие рядом уникальных свойств (высокая коррозионная стойкость, необычные электрические и механические свойства), находят возрастающее применение в различных областях техники. Технология изготовления АМ состоит в сверхбыстрой (> 10°С/с) закалке из жидкого состояния и позволяет получать необходимый материал в виде ленты, порошка или покрытия [12–14].

Возможность использования этих материалов в химических источниках тока определяется как их физико-химическими свойствами, так и особенностями технологии получения. Коррозионная стойкость кристаллических сплавов алюминия определяется наличием избыточных фаз, которые являются центрами локальной коррозии [15].

Высокая коррозионная стойкость и электропроводность АМ делают перспективными их использование в качестве токосъемов источников тока. Отмечается также увеличение площади контакта активной массы с токосъемом за счет аморфизации структуры последнего. В частности, при использовании в качестве токосъема алюминия или титана, как отмечалось выше, требуется дополнительная защита поверхности токосъема с целью увеличения срока службы ХИТ и удаления барьерных слоев. Надобность в такой операции отпадает при использовании микрокристаллических сплавов алюминия. В этом случае за счет присутствия в сплаве элементов, разрыхляющих барьерные слои, проводимость поверхностного слоя остается высокой, и в то же время при быстрой закалке достигается идеально однородное распределение этих элементов в матрице и по поверхности, что значительно повышает коррозионную стойкость сплава.

С целью создания надежного токосъема для фторуглеродных элементов с использованием быстрозакаленных материалов изучено коррозионно-электрохимическое поведение микрокристаллического алюминиевого сплава АВ-86 (состав, %: Si – 5.0, Al – 84, Cu – 4.0, Sn – 0.2, Mg – 3.0, Zn – 3.5, Pb – 0.3), а также аморфных сплавов Ni₈₁P₁₉ и Fe₇₀Cr₁₀P₁₃C₇ в электролите на основе γ -бутиролактона (ГБЛ).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящей работе были исследованы возможности использования в качестве коррозионностойкого материала для изготовления токосъема катода на основе фто-

рированного углерода быстрозакаленных микрокристаллических сплавов, полученных из отходов алюминиевого производства (вторичных силуминов), – АВ-86 и аморфных сплавов $Ni_{81}P_{19}$ и $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$. Для исследований использовали сплавы в виде ленточных образцов толщиной 15–50 мкм, которые готовили быстрой закалкой из жидкого состояния при частоте вращения закалочного барабана от 1000 до 4000 об./мин.

Электролит готовился из γ -бутиролактона после двойной вакуумной перегонки и очищенной и осушенной соли $LiBF_4$. Содержание воды в свежеприготовленном электролите, полученное методом кулонометрического титрования с применением реактива Фишера, не превышало 0.01 мас.%. Электрохимические измерения проводили в атмосфере азота потенциодинамическим методом со скоростью развертки потенциала 20 мВ/мин. В качестве вспомогательного электрода использовалась платиновая проволока. Потенциалы образцов измеряли относительно хлорсеребряного водного электрода сравнения. Скорость коррозии ($I_{кор}$) определяли экстраполяцией линейного участка поляризационных кривых на потенциал коррозии ($E_{кор}$).

Для аналитического определения скорости коррозии сплавов АВ-86 была опробована методика фотоколориметрического определения концентрации ионов Al^{3+} на фотоколориметре «Spocol» (ЗАО НПО «Технокон», Россия). Чувствительность метода составляет 0.2 мкг/мл, что выше чувствительности атомно-абсорбционной спектроскопии при сжигании пробы в пламени. Последнее обстоятельство играет принципиальную роль, поскольку скорости коррозии исследованных сплавов находятся на пределе чувствительности аналитических методов.

В связи с этим для прямого определения скорости коррозии использовали гравиметрический метод. Поскольку скорости коррозии исследованных материалов очень малы, взвешивание образцов проводили на чувствительных весах «Sartorius» («Minebea Intec», Германия) с точностью

± 3 мкг. Методика определения потери массы при коррозии состояла в следующем. Предварительно маркированный образец промывали бидистиллатом, подвергали ультразвуковой чистке в этиловом спирте, промокали фильтровальной бумагой и взвешивали. Затем на образцы наносили активную массу катода ($CF_x + C + \Phi 4D$), запаивали в полипропиленовый (100 мкм) сепаратор (марки 7Б) и помещали в рабочую среду электролита ГБЛ+1М $LiBF_4$. Предварительные испытания проводили в лабораторных условиях при комнатной температуре в бюксах, которые содержали следы кислорода (бюксы закрывали шлифом с применением вакуумной смазки). Окончательные результаты были получены после хранения образцов в запаянных стеклянных ампулах в атмосфере аргона и в присутствии металлического лития при температуре 80°C. Время выдержки образцов составляло 25 и 27 суток соответственно. После испытаний с образцов удаляли активную массу и сепаратор, тщательно промывали водой и спиртом и снова взвешивали.

Скорость коррозии (V) оценивали по формуле:

$$V = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau},$$

где Δm – изменение массы образца в процессе коррозии, г; S – площадь поверхности образца, m^2 , τ – время испытаний, ч.

Поверхность образцов до и после коррозионных испытаний исследовалась на рентгеновском микроанализаторе «Camebax» («Cameca», Франция) во вторичных электронах. Ускоряющее напряжение 30 кВ, ток $0.4 \cdot 10^{-7}$ А.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, 2 приведены поляризационные характеристики сплавов АВ-86, полученных с разной скоростью закалки в водных растворах $NaClO_4$ и $LiBF_4$. Из приведенных данных следует, что в тетрафторборате скорость анодного и катодного процессов на несколько порядков выше, чем

в перхлорате. Известно [16], что это связано с кислотностью среды и природой аниона, а pH водных растворов тетрафторбората вследствие гидролиза соли близко к 2, в то время как для перхлората pH ~ 6. Значение pH варьировалось использованием HClO_4 . Введение ацетата в раствор LiBF_4 сопровождается снижением скорости анодного растворения (см. рис. 2, кривая 3): его добавка в процессе гидролиза и электролиза при наложении поляризации влияет на уменьшение кислотности за счет образования OH^- . Из сопоставления рис. 1 и рис. 2 видно также, что анион BF_4^- при постоянном значении pH заметно активизирует растворение металла (см. рис. 1, кривая 1 и рис. 2, кривая 4).

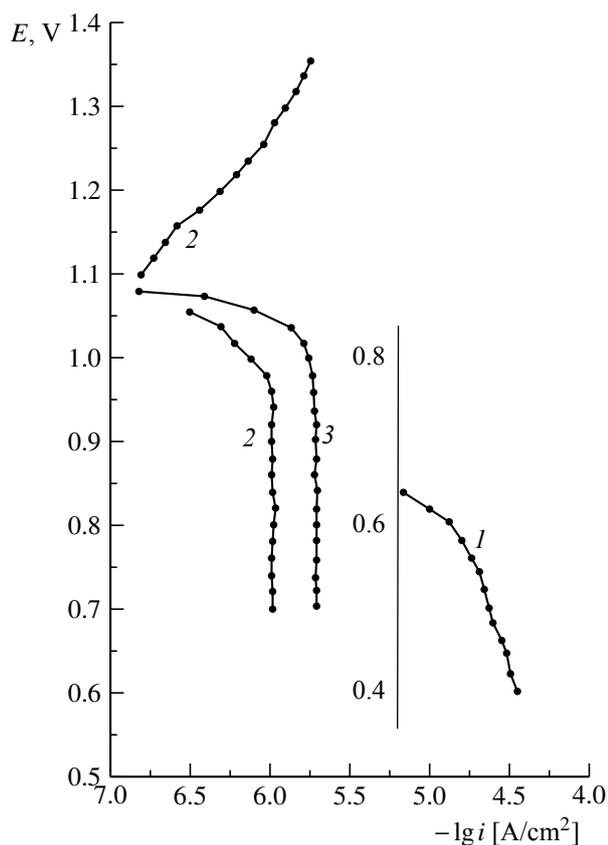


Рис. 1. Поляризационные кривые, измеренные на сплаве АВ-86 в 0,5М NaClO_4 при pH = 2.4 (1) и pH = 6 (2, 3). $n = 3000$ об./мин (1, 2), 4000 об./мин (3)

Fig. 1. The polarizing curves measured on AV-86 alloy in 0.5M of NaClO_4 at pH = 2.4 (1) and pH = 6 (2, 3). $n = 3000$ rpm (1, 2), 4000 rpm (3)

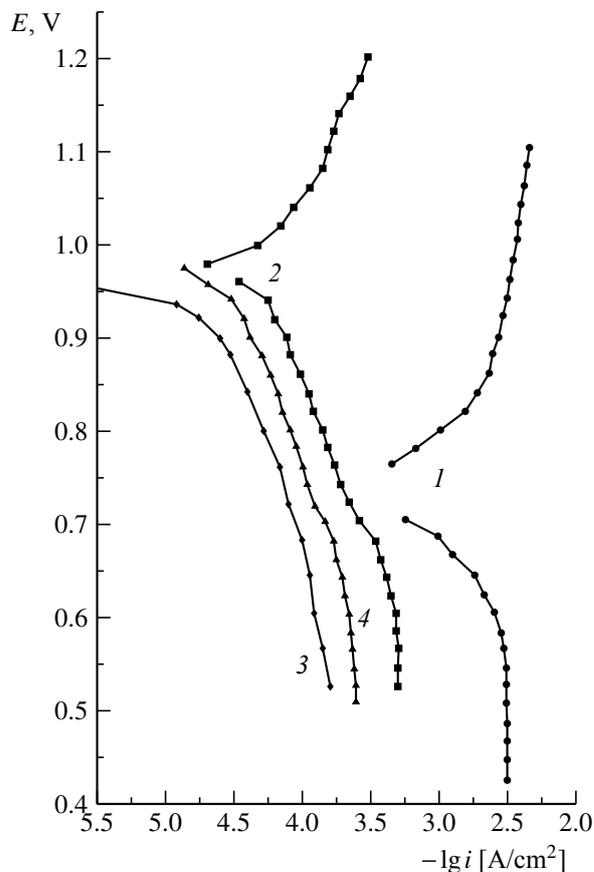


Рис. 2. Поляризационные кривые, измеренные на сплаве АВ-86 в 0,5М LiBF_4 при pH = 1.5 (1–3) и pH = 2.4 (4). Кривая 3 измерена в растворе с добавкой 0,1М CH_3COONa . $n = 3000$ об./мин (1, 4), 2500 об./мин (2, 3).

Fig. 2. The polarizing curves measured on AV-86 alloy in 0.5M of LiBF_4 at pH = 1.5 (1–3) and pH = 2.4 (4). The curve 3 is measured in solution with CH_3COONa additive 0.1M. $n = 3000$ rpm (1, 4), 2500 rpm (2, 3)

Следует также отметить, что в водных растворах LiBF_4 влияние скорости закалки сплава на ток анодного растворения (i_a) отличается от установленного для сплава АВ-86 в растворе с NaClO_4 , где наблюдалось снижение скорости коррозии при увеличении скорости закалки от 3000 до 4000 об./мин.

При переходе от водных растворов к средам на основе ГБЛ наблюдается сильное торможение катодной и анодной реакций, $i_a \leq 2 \cdot 10^{-6}$ А/см² (рис. 3). При этом имеет место разброс в потенциалах коррозии в пределах ~0.3 ÷ 0.4 В, и, так же, как и в водных тетрафторборатных электро-

литах, закономерная зависимость скорости анодного процесса от скорости закалки отсутствует.

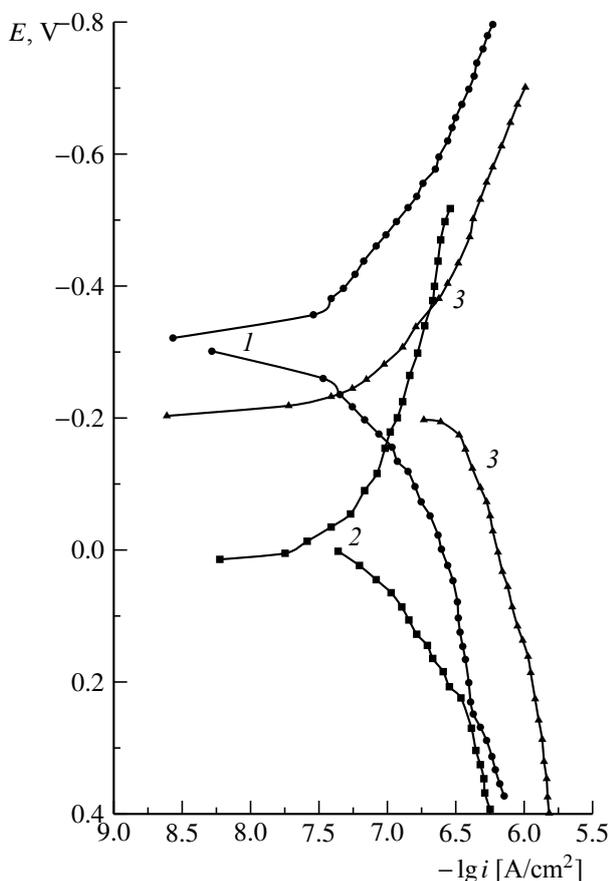


Рис. 3. Поляризационные кривые, измеренные в ГБЛ + 1М LiBF₄ на сплавах АВ-86. $n = 2500$ об./мин (1), 3000 об./мин (2), 3500 об./мин (3)

Fig. 3. The polarizing curves measured in GBL+ 1M LiBF₄ on AV-86 alloys. $n = 2500$ rpm (1), 3000 rpm (2), 3500 rpm (3)

На основе полученных данных можно предположить, что в таких электролитах величина i_a , которая определяется растворением металла из пассивного состояния, в большей степени зависит от структуры металла, чем при растворении в водных средах, в которых возможно неконтролируемое подтравливание окисной пленки на сплаве вследствие низких и достаточно нестабильных значений pH в присутствии LiBF₄.

Контакт сплава с активной массой катода (CF_x) сопровождается увеличением как катодной, так и анодной плотности тока

(рис. 4). Ускорение катодной реакции в присутствии CF_x согласно литературным данным [17] обусловлено реакцией восстановления с участием CF_x, а увеличение i_a , очевидно, связано с активирующим действием фторид-иона. Однако и в контакте с CF_x величина i_a в свежеприготовленном электролите не превышает $6 \cdot 10^{-6}$ А/см² даже при содержании воды в растворе 1 мас.%. В то же время «старение» (длительная выдержка готового электролита с металлическим литием) приводит к значительному возрастанию скоростей катодного и анодного процессов. Этот процесс можно

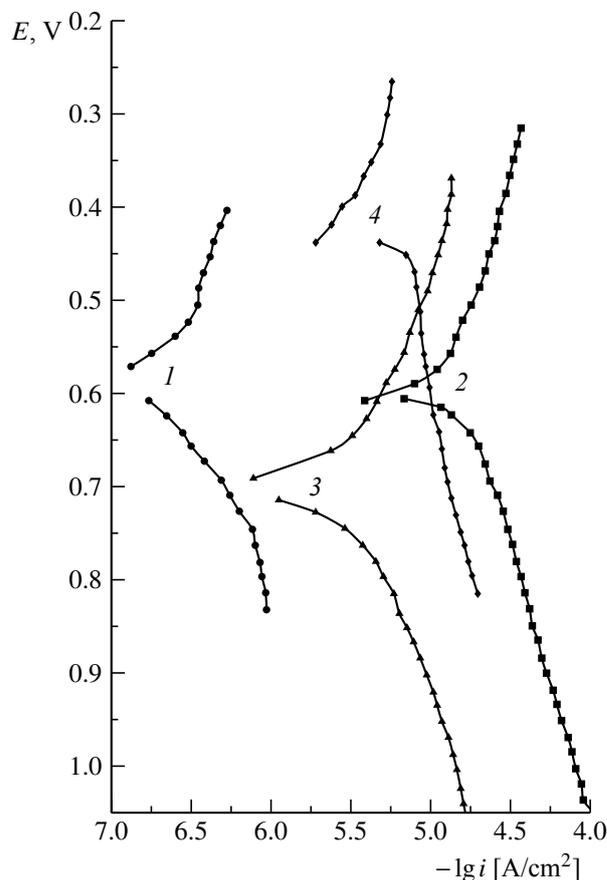


Рис. 4. Поляризационные кривые, измеренные на сплавах, находящихся в контакте с активной массой катода, в ГБЛ + 1М LiBF₄: 1 – АВ-86 (4000 об./мин), 2 – Ni₈₁P₁₉, 3 – Fe₇₀Cr₁₀P₁₃C₇, 4 – Ti + КГ

Fig. 4. The polarizing curves measured on the alloys which are in contact with the active mass of the cathode in GBL+ 1M LiBF₄: 1 – AV-86 (4000 rpm), 2 – Ni₈₁P₁₉, 3 – Fe₇₀Cr₁₀P₁₃C₇, 4 – Ti+KG

связать с деструкцией растворителя в процессе хранения. Ранее [18] установлено, что в присутствии LiBF_4 при хранении γ -бутиролактона в электролите генерируются протонодонорные соединения. С учетом данных, полученных в водных средах, можно предположить, что эти соединения ответственны за увеличение скоростей катодной и анодной реакций в «старом» электролите. Из поляризационных характеристик, приведенных на рис. 4, следует, что скорость коррозии сплавов АВ-86, находящихся с активной массой катода, не превышает 10^{-7} А/см^2 , а для сплавов $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{10}\text{P}_{13}\text{C}_7$ и $\text{Ni}_{81}\text{P}_{19}$ эта величина составляет $\sim 6.5 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2$ и $4 \cdot 10^{-6} \text{ А/см}^2$ соответственно. В пересчете на единицы потери массы средние значения из трех измерений приведены в таблице.

Для определения скоростей коррозии сплавов гравиметрическим методом было проведено два вида испытаний: лабораторные при комнатной температуре и при температуре 80°C в присутствии металлического лития. При этом второй вид испытаний проводился дважды с разным исходным электролитом. Для сравнения в таблице приведено также значение скорости коррозии титана, покрытого коллоидно-графитовым препаратом, полученное ранее аналитическим методом атомно-абсорбционной спектроскопии [19]. Вследствие частичного отслоения КГП в процессе хранения определить $i_{\text{кор}}$ для Ti гравиметрически не удается.

Видно, что согласно результатам лабораторных испытаний (80°C , контакт раствора с металлическим литием) все исследованные материалы являются коррозионноустойчивыми. Однако наблюдается расхождение между $i_{\text{кор}}$, найденным на основе электрохимических и гравиметрических измерений, причем для сплава $\text{Ni}_{81}\text{P}_{19}$ и Ti это различие значительно: электрохимические измерения дают величину $i_{\text{кор}}$ более чем на порядок выше, чем гравиметрические. Это может быть связано, с одной стороны, со сложностью выделения кинетических участков на поляризационных кривых, а с другой – с влиянием поверхностных эффектов. Очевидно, что при хранении возможно изменение поверхностного состава сплавов, приводящее к изменению $i_{\text{кор}}$. По-видимому, в случае $\text{Ni}_{81}\text{P}_{19}$ и Ti последнее обстоятельство играет доминирующую роль.

Исследования поверхности образцов сплавов АВ-86 и $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{10}\text{P}_{13}\text{C}_7$ до и после коррозионных испытаний показало, что в процессе хранения морфология поверхности практически не изменяется. На сплаве АВ-86 она остается пористой и рыхлой, а на сплаве $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{10}\text{P}_{13}\text{C}_7$ – компактной с дефектами в виде наплывов, обусловленных особенностями технологии получения сплава. Видимых очагов локальной коррозии на поверхности сплавов не обнаружено.

При исследовании электрохимического поведения сплавов никель-фосфор и же-

Скорости коррозии сплавов в ГБЛ + 1М LiBF_4
Corrosion rate of alloys in γ -butyrolactone + 1M LiBF_4

Сплав	Скорость коррозии, $\text{г/м}^2 \cdot \text{ч}$		
	Электрохимические измерения	Аналитические измерения	Лабораторные испытания
АВ-86, 4000 об./мин	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$	$(7 \pm 3) \cdot 10^{-5*}$	$(8 \pm 4) \cdot 10^{-4}$
АВ-86, 3000 об./мин	$(3 \pm 1) \cdot 10^{-4}$	$(8 \pm 4) \cdot 10^{-5*}$	–
$\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{10}\text{P}_{13}\text{C}_7$	$(6 \pm 3) \cdot 10^{-3}$	–	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$
$\text{Ni}_{81}\text{P}_{19}$	$(4 \pm 2) \cdot 10^{-2}$	–	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$
Ti + КГП	$(7 \pm 2) \cdot 10^{-2}$	10^{-3**}	–

Примечание. * – гравиметрия, ** – атомно-абсорбционная спектроскопия.

лезо-хром-фосфор-углерод в электролитах на основе ГБЛ было установлено, что характер анодных и катодных поляризационных кривых на этих сплавах не отличается от полученных на сплавах АВ-86. Все исследованные материалы в этих средах растворяются из пассивного состояния. Абсолютные значения i_a для сплавов $Ni_{81}P_{19}$ несколько выше, чем для АВ-86 и $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$.

Полученные опытные закономерности можно связать с определяющим влиянием основного металла матрицы на электрохимическое поведение сплава. Высокая коррозионная стойкость $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$ обусловлена, как известно [20], присутствием склонного к пассивации хрома. В случае АВ-86 доминирующую роль, по-видимому, играют образующиеся поверхностные окислы, которых нет на $Ni_{81}P_{19}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано коррозионно-электрохимическое поведение сплава АВ-86, а также

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки Российской Федерации (№ 13.2052.2017/ПЧ).

аморфных сплавов $Ni_{81}P_{19}$ и $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$ в электролитах на основе ГБЛ с целью выяснения возможности использования их в качестве токоъемов фторуглеродного катода. Все исследованные аморфные и микрокристаллические материалы в контакте с активной массой катода по своей коррозионной стойкости в используемом электролите удовлетворяют предъявляемым требованиям и могут быть рекомендованы для использования в качестве токоъема фторуглеродного катода.

Наиболее технологичным и перспективным в настоящее время представляется сплав АВ-86, который, обладая высокой коррозионной стойкостью в ГБЛ, сваривается с другими элементами конструкции ХИТ без разрушения.

Замена титана на микрокристаллический сплав АВ-86 снимает проблему барьерных слоев, прокатки и охрупчивания, поскольку алюминий и его сплавы не склонны к этому виду коррозионного разрушения.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was performed according the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (No. 13.2052.2017/ПЧ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нижниковский Е. А. Использование химических источников тока для электропитания миниатюрной радиоэлектронной аппаратуры // Электрохимическая энергетика. 2002. Т. 2, № 1. С. 35–45.
2. Zhang S. S., Foster D., Wolfenstine J., Read J. Electrochemical characteristic and discharge mechanism of a primary Li/CF_x cell // J. Power Sources. 2009. Vol. 187, № 1. P. 233–237.
3. Фатеев С. А. Тенденции развития источников тока для имплантируемых медицинских приборов // Вестник Московского энергетического института. 2018. № 2. С. 102–113.
4. Пуцылов И. А., Егоров А. М., Смирнов С. Е., Полякова Н. В., Фатеев С. А. Исследование свойств катодных материалов на основе фторированных углеродных нанотрубок // Перспективные материалы. 2013. № 11. С. 29–34.
5. Фатеев С. А., Штолина Н. В. Исследование сохранимости L-CF_x источников тока для

- кардиостимуляторов // Материалы XII Международной конференции «Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах». Краснодар: Кубанский университет, 2012. С. 99–102.
6. Фатеев С. А., Фиалков А. С. Влияние материала токоъема катода на характеристики Li-CF_x элементов // Электрохимия. 1988. Т. 24, № 1, С. 123.
7. Игнатова А. А., Тулибаева Г. З., Ярмоленко О. В., Фатеев С. А. Электролитные системы для первичных литий-фторуглеродных источников тока и их работоспособность в широком интервале температур // Электрохимия. 2017. Т. 53, № 3. С. 330–339.
8. Сербиновский М. Ю. Литиевые источники тока: конструкции, электроды, материалы, способы изготовления и устройства для изготовления электродов. Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 2001. 155 с.

9. Fleischer Niles A., Ekern Ronald J. Galvanicheskyy interaction in couple MnO₂-metall and its influence on the discharge of elements // *J. Electrochem. Soc.* 1985. Vol. 132, № 1. P. 125–128.
10. Фялков А. С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. М.: Аспект-пресс, 1997. 720 с.
11. Бекетаева Л. А., Рыбалка К. В., Фатеев С. А. Операционный импеданс литиевого источника тока типа Li-CF_x // *Электрохимия*. 2001. Т. 37, № 9. С. 1150–1152.
12. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы / под ред. Ц. Масумото. М.: Металлургия, 1987. 328 с.
13. Gleiter H. Nanostructured Materials: Basic Concepts and Microstructure H. Gleiter // *ActaMaterialia*. 2000. Vol. 48, № 1. P. 1–29.
14. Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И., Пирайнен В. Ю. Специальные материалы в машиностроении. СПб.: Химиздат, 2004. 640 с.
15. Itzak D., Barona J., Gefen J. Corrosion resistance of crystal alloys of aluminum // *J. Mater. Sci. Lett.* 1985. Vol. 4, № 4. P. 445.
16. Плахотник В. Н., Тульчинский В. Б., Варех В. В. Производство тетрафторбората лития для источников тока // *Журнал физической химии*. 1973. Т. 47, № 4. С. 1053.
17. Фатеев С. А., Денисова О. О., Монахова И. П., Лубнин Е. Н., Агладзе Т. Р. Коррозия токо-съемов в Li/CF_x элементах // *Защита металлов*. 1988. Т. 24, № 2. С. 284–287.
18. Фатеев С. А., Рудаков В. М. Электрохимическая и химическая стабильность электролитов на основе гамма-бутиролактона // *Электрохимическая энергетика*. 2005. Т. 5, № 4. С. 256–260.
19. Денисова О. О., Шувалова К. М., Черных Т. Е., Фатеев С. А., Никонов В. Л. Электрохимическая стабильность апротонных электролитов ХИТ // Тезисы докладов VII Всесоюзной конференции по электрохимии. Череповец, 1988. Т. 1. С. 62.
20. Княжева В. М., Ульянин Е. А., Янов Л. А. Коррозионная стойкость и электрохимические свойства аморфных сплавов // *Итоги науки техники. Сер. Коррозия и защита от коррозии*. М.: ВИНТИ, 1982. Т. 9. С. 225–251.

REFERENCES

1. Nizhnikovskii E. A. The use of chemical current sources for powering miniature electronic equipment. *Electrochemical Energetics*, 2002, vol. 2, no. 1, pp. 35–45 (in Russian).
2. Zhang S. S., Foster D., Wolfenstine J., Read J. Electrochemical characteristic and discharge mechanism of a primary Li/CF_x cell. *J. Power Sources*. 2009, vol. 187, no. 1, pp. 233–237.
3. Fateev S. A. Current Sources Trends for Implantable Medical Devices. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo institute* [Bulletin of the Moscow Power Energy Institute], 2018, no. 2, pp. 102–113 (in Russian).
4. Putsylov I. A., Egorov A. M., Smirnov S. E., Poliakova N. V., Fateev S. A. Investigation of the properties of cathode materials based on fluorinated carbon nanotubes. *Perspektivnye materialy* [Perspective materials], 2013, no. 11, pp. 29–34 (in Russian).
5. Fateev S. A., Shtolina N. V. Investigation of the persistence of Li-CF_x current sources for cardiac pacemakers. *Materialy XII Mezhdunarodnoi konferentsii "Fundamental'nye problemy preobrazovaniia energii v litievykh elektrokhimicheskikh sistemakh"* [Proceedings of the XII International Conference "Fundamental problems of energy conversion in lithium electrochemical systems"]. Krasnodar, Kubanskii universitet, 2012, pp. 99–102 (in Russian).
6. Fateev S. A., Fialkov A. S. Effect of cathode current collection material on the characteristics of Li-CF_x elements. *Elektrokhiimiia* [Electrochemistry], 1988, vol. 24, no. 1, pp. 123 (in Russian).
7. Ignatova A. A., Tulibaeva G. Z., Iarmolenko O. V., Fateev S. A. Electrolyte systems for primary lithium-fluorocarbon current sources and their performance over a wide temperature range. *Elektrokhiimiia* [Electrochemistry], 2017, vol. 53, no. 3, pp. 330–339 (in Russian).
8. Serbinovskij M. Ju. *Litievye istochniki toka: konstrukcii, elektrody, materialy, sposoby izgotovlenija i ustrojstva dlja izgotovlenija elektrodov* [Lithium power sources: designs, electrodes, materials, ways of production and the device for production of electrodes]. Rostov on Don, Izd-vo Rost. un-ta, 2001. 155 p. (in Russian).
9. Fleischer Niles A., Ekern Ronald J. Galvanicheskyy interaction in couple MnO₂-metall and its influence on the discharge of elements. *J. Electrochem. Soc.*, 1985, vol. 132, no. 1, pp. 125–128.
10. Fialkov A. S. *Uglerod, mezhsloevye soedineniia i kompozity na ego osnove* [Carbon, interlayer compounds and composites based on it]. Moscow, Aspekt-press Publ., 1997. 720 p. (in Russian).
11. Beketaeva L. A., Rybalka K. V., Fateev S. A. Operational Impedance of a Li-CF_x Type Lithium Current Source. *Elektrokhiimiia* [Electrochemistry], 2001, vol. 37, no. 9, pp. 1150–1152 (in Russian).
12. Suzuki K., Fudzimori Kh., Khasimoto K. *Amorfnye metally*. Ed. Ts. Masumoto. Moscow, Metallurgii Publ., 1987. 328 p. (in Russian).

13. Gleiter H. Nanostructured Materials: Basic Concepts and Microstructure H. Gleiter. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, no. 1, pp. 1–29.

14. Solntsev Iu. P., Priakhin E. I., Pirainen V. Iu. *Spetsial'nye materialy v mashinostroenii* [Special materials in mechanical engineering]. Saint Petersburg, Khimizdat Publ., 2004. 640 p. (in Russian).

15. Itzak D., Barona J., Gefen J. Corrosion resistance of crystal alloys of aluminum. *J. Mater. Sci. Lett.*, 1985, vol. 4, no. 4, pp. 445.

16. Plaxotnik V. N., Tul'chinskij V. B., Varex V. V. Product of lithium tetrafluoroborate for power sources. *Zhurnal fizicheskoi khimii* [Russian Journal of Physical Chemistry], 1973, vol. 47, no. 4, pp. 1053.

17. Fateev S. A., Denisova O. O., Monakhova I. P., Lubnin E. N., Agladze T. R. Corrosion of current collectors in Li/CFx elements. *Zashchita metallov* [Metal protection], 1988, vol. 24, no. 2, pp. 284–287 (in Russian).

18. Fateev S. A., Rudakov V. M. Electrochemical and chemical stability of electrolytes based on gamma-butyrolactone. *Electrochemical Energetics*, 2005, vol. 5, no. 4, pp. 256–260 (in Russian).

19. Denisova O. O., Shuvalova K. M., Cherny'x T. E., Fateev S. A., Nikonov V. L. Electrochemical stability of aprotic electrolytes power sources. *Tezisy' dokladov VII Vsesoyuznoj konferencii po e'lektrokhimii* [Abstracts of the VII all-union conference on electrochemistry], Cherepovecz, 1988, vol. 1, pp. 62 (in Russian).

20. Kniazheva V. M., Ul'ianin E. A., Ianov L. A. Corrosion resistance and electrochemical properties of amorphous alloys. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Korrozii i zashchita ot korrozii* [The results of the science of technology. Ser. Corrosion and corrosion protection]. Moscow, VINITI, vol. 9, 1982, pp. 225–251 (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Фатеев Сергей Анатольевич – доктор технических наук, академик РАЕН, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва. Служебный тел.: (495) 362-75-19, e-mail: serfat@list.ru

Пуцылов Иван Александрович – кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва. Служебный тел.: (495) 362-75-19, e-mail: putsylov@yandex.ru

Смирнов Сергей Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва. Служебный тел.: (495) 362-75-19, e-mail: sesmirnov53@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Фатеев С. А., Пуцылов И. А., Смирнов С. Е. Перспективы применения быстрозакаленных материалов в источниках тока // *Электрохимическая энергетика*. 2019. Т. 19. № 3. С. 157–165. DOI: <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-3-157-165>

For citation

Fateev S. A., Putsylov I. A., Smirnov S. E. The Prospects of use of the Fast-Tempered Materials in Current Sources. *Electrochemical Energetics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 157–165 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-3-157-165>