

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА ДЛЯ БИПОЛЯРНЫХ ПЛАСТИН ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ¹

© 2023 г. В. Д. Ерошенко^{а, *}, В. Е. Андреева^б, Д. В. Токарев^б, О. А. Меденников^б,
В. А. Клушин^б, Л. Н. Фесенко^б, Н. В. Смирнова^{б, **}

^аООО “ГрафитЭл — Московский Электродный Завод”, ш. Энтузиастов, 31, стр. 2, Москва, 111123 Россия

^бЮжно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,
ул. Просвещения, 132, Новочеркасск, 346428 Россия

*e-mail: viktor.eroshenko.89@mail.ru

**e-mail: smirnova_nv@mail.ru

Поступила в редакцию 20.02.2023 г.

После доработки 07.04.2023 г.

Принята к публикации 20.04.2023 г.

Композиционные материалы на основе термореактивного связующего марки СФП и терморасширенного графита с содержанием наполнителя 50–70% получены методом горячего прессования. Исследовано влияние способа введения наполнителя в композит на его физико-механические и электрохимические характеристики. Материалы, полученные смешением воздушно-сухих компонентов, характеризуются высокими электропроводностью (до 195 См см^{-1}) и прочностными свойствами (более 25 МПа), низким межфазным контактным сопротивлением (менее 10 МОм см^2) и током коррозии, не превышающим 1 мкА/см^2 , что позволит обеспечить высокую эффективность преобразования энергии в ТПТЭ.

Ключевые слова: топливный элемент, биполярная пластина, электропроводящий композиционный материал, терморасширенный графит

DOI: 10.31857/S0424857023120058, **EDN:** QGKMDP

ВВЕДЕНИЕ

Создание экологически чистых, эффективных и энергоемких источников энергии является важнейшим условием развития автономных и необслуживаемых энергосистем распределенной энергетики, электроустановок для робототехники и транспортных применений [1]. Особенная роль в этом отводится водородным энергетическим технологиям, и в частности топливным элементам, использующим водород в качестве топлива и кислород в качестве окислителя и имеющим значительно более высокую эффективность и экологичность по сравнению с традиционными источниками энергии [2]. В транспортных и других мобильных приложениях наибольшее распространение получили низкотемпературные твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ), эффективность процесса преобразования химической энергии в электрическую в которых зависит от многих факторов. Помимо мембранно-элек-

тродных блоков (МЭБ), важнейшим элементом твердополимерных топливных элементов являются биполярные пластины (БП) [3, 4]. Они выполняют функции коллектора для газов-реагентов (водорода и воздуха) и должны распределять их с каждой стороны по всей активной площади МЭБ. Кроме того, биполярные пластины должны быть газонепроницаемыми, чтобы предотвратить смешивание газов-реагентов. Чтобы каждый единственный ТЭ находился в электрическом контакте с другими, биполярные пластины должны быть электропроводными, особенно в направлении, ортогональном к самой пластине. Кроме того, хорошая теплопроводность также является очень важным требованием к биполярным пластинам для обеспечения контроля температуры батареи ТЭ и достижения однородного распределения температуры в каждом ТЭ и по всей активной области. Еще одним требованием к материалу биполярных пластин является химическая и коррозионная стойкость. Материал должен выдерживать температуру до 100°C , высокую влажность, постоянный электрический потенциал, низкое зна-

¹ По материалам XX Всероссийского Соповещения “Электрoхимия органических соединений” ЭХОС-2022, Новочеркасск, 18.10–22.10. 2022.

чение pH и наличие сильных окислителей (активные формы кислорода, перекись водорода).

В зависимости от материала матрицы, БП можно разделить на три категории – металлические, графитовые и композитные, сильно различающиеся по электропроводности, газопроницаемости, прочности на изгиб и технологии обработки [5]. Металлические биполярные пластины в основном изготавливают из нержавеющей стали или сплавов титана [6]. Они обладают высокой электропроводностью, воздухонепроницаемостью и прочностью на изгиб. Благодаря хорошей пластичности металла, штамповкой могут быть изготовлены тонкие пластины с каналами для распределения топлива и окислителя [7]. Однако металлические биполярные пластины подвержены коррозии в среде ТПТЭ (pH 2–3, $T = 80–100^{\circ}\text{C}$), что приводит к пассивации поверхности и переосаждению ионов металлов и отрицательно сказывается на работе топливных элементов [8]. Графит характеризуется низкой плотностью, хорошей коррозионной стойкостью и низким контактным сопротивлением с газодиффузионным слоем. Однако высокая пористость графита обуславливает его высокую газопроницаемость, а вследствие низкой прочности и хрупкости графитовые БП должны иметь существенную толщину [9].

Композитные биполярные пластины изготавливаются из полимерной смолы и электропроводящего наполнителя на основе углерода [10]. Полимерная матрица обеспечивает газонепроницаемость, механические свойства и связывает частицы наполнителя в проводящую сеть. Электрическая и тепловая проводимости композитной графитовой биполярной пластины в основном достигаются именно за счет этой проводящей сети [11]. Регулируя состав и массовое соотношение связующего и проводящего наполнителя, можно регулировать и оптимизировать различные свойства композитных графитонаполненных биполярных пластин. Кроме того, сочетание технологий пред- и постобработки, оптимизация дисперсности, формы и ориентации частиц наполнителя, контроль и оптимизация свойств межфазной границы графит/смола и т. д. напрямую влияют на макроскопическую и микроскопическую структуру композита, что, в свою очередь, определяет характеристики композитной БП [12–14].

Для изготовления композитных графитонаполненных биполярных пластин в настоящее время используются терморезистивные и термопластичные связующие. Поскольку термопласты (полипропилен, полиэтилен, поливинилиденфторид, поли(фениленсульфид)) как правило менее химически и термически стабильны, чем реактопласты, они реже используются для изготовления БП [4]. Наиболее широко используются терморезистивные

связующие, в молекулярной цепи которых находятся больше активных групп, способных сшиваться в процессе формования с образованием стабильной молекулярной структуры. Терморезистивные смолы обладают хорошей термостойкостью, могут образовывать более надежную поверхность раздела с графитом и, как правило, обладают более высокой прочностью на изгиб, что позволяет использовать меньшую толщину формованных пластин. Наиболее распространены эпоксидная и фенолформальдегидная смола (ФФС). Относительно высокие твердость, теплоустойчивость, модуль упругости, низкий коэффициент линейного расширения, а также технологичность и хорошая совместимость с различными наполнителями объясняют широкое применение ФФС в качестве матричного материала для различных композитов [15, 16].

В качестве наполнителя для проводящих композитов рассматриваются углеродные материалы (УМ), благодаря хорошим электро-, теплопроводности и коррозионной стойкости, низкой плотности и стоимости. С увеличением содержания УМ электропроводность композитного материала постепенно увеличивается и приближается к пределу [11]. Важным параметром также является морфология частиц наполнителя. Так, при одинаковом содержании наполнителя электропроводность композиционного материала, содержащего чешуйчатый графит или искусственный графит, значительно выше, чем у композиционного материала, содержащего углеродный волокнистый наполнитель [15–17]. Для построения проводящей сети в композитных биполярных пластинах наиболее подходящими УМ являются двумерные графитовые материалы – природный чешуйчатый графит, терморасширенный графит (ТРГ) и графеновые нанопластины и т. д. [18], благодаря тому, что листовая структура легче образует более высокую поверхность раздела, что способствует переносу электронов между частицами.

Терморасширенный графит представляет собой вид интеркалированных соединений графита, полученных методом химического окисления и последующего резкого нагревания до температуры $900–1500^{\circ}\text{C}$ со скоростью $400–600^{\circ}\text{C}/\text{с}$, вследствие чего межслойное расстояние в частях графита увеличивается до 300 раз и они приобретают чешуйчатую структуру [19]. Материал обладает высокой термостойкостью, теплопроводностью, смазывающей способностью, химически стабилен, может противодействовать тепловым ударам и т. д. В зависимости от температуры термообработки и соответственно от степени расширения ТРГ имеет различную насыпную плотность, от единиц до десятков $\text{кг}/\text{м}^3$.

Основной проблемой электропроводящих композитов является создание проводящего кла-

стера при минимальном содержании наполнителя с сохранением прочностных свойств и сплошности композита. Поэтому установление оптимальных технологических параметров: состава, условий смешения компонентов и условий прессования необходимо для разработки технологии их производства. Использование чрезвычайно легкого ТРГ, плотность которого почти в 1000 раз меньше плотности связующего, при изготовлении проводящих композитов, а именно способ введения ТРГ в состав композитов и обеспечение его равномерного распределения в объеме, представляет собой весьма сложную технологическую задачу. В настоящей работе термореактивное связующее фенольное порошкообразное (СФП) и терморасширенный графит были использованы для создания электропроводящего композиционного материала для биполярных пластин ТПТЭ. Рассмотрены различные варианты введения ТРГ в состав композита. Методом горячего прессования получена серия материалов и проведены исследования их физико-химических и механических характеристик.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения композитных материалов для БП использовали термореактивное связующее СФП-012А (ОСТ 6-05-441–78) и ТРГ в качестве наполнителя. ТРГ получали путем нагревания окисленного графита при температуре 240°C в течение 2 ч. Полученный ТРГ имел насыпную плотность 40 кг/м³.

Для смешения компонентов использовали 2 подхода:

(I) “Сухое” смешивание — наполнитель и связующее гомогенизировали в шаровой мельнице со скоростью вращения 60 об./мин в течение 30 мин, с последующим диспергированием в роторном смесителе в течение 5 мин.

(II) “Мокрое” смешивание — смолу СФП предварительно растворяли в изопропиловом спирте (60% от общей массы раствора) в герметично закрытой емкости. Связующее и наполнитель в соотношении раствор смолы : наполнитель = 5 : 2 (по массе) перемешивали в течение 15 мин до получения однородной массы в роторном смесителе. Смесь высушивали при температуре 65°C до полного испарения растворителя (от 6 до 12 ч). Сухую смесь измельчали в шаровой мельнице в течение 30 мин.

В дальнейшем композиты, полученные по технологии “сухого” смешения компонентов, обозначены I, “мокрого” — II.

Композиты с различным содержанием наполнителя получали методом горячего прессования (нагрузка 200 кг/см², температура 200°C, время прессования 7–10 мин). Полученное изделие ча-

стично охлаждалось в пресс-форме под давлением, затем в пресс-форме (вне пресса), и выпрессованная заготовка окончательно охлаждалась на воздухе.

Гранулометрический анализ наполнителя ТРГ осуществлялся на приборе MICROTRAC S 3500. Исследование механических свойств композитных материалов проводилось на универсальной испытательной машине РЭМ 20 (Метротест, Россия) согласно методикам [20, 21]. Водопоглощение материалов исследовали согласно методике [22]. Электропроводность материалов определялась четырехзондовым методом на измерителе иммитанса АКТАКОМ АМ-3016. Межфазное контактное сопротивление определяли путем измерения падения напряжения на поверхностных контактах (метод Дэвиса) [23]. Исследуемый образец помещался между углеродной бумагой и двумя медными пластинами, на которые подавался ток (1.0 А), и фиксировалось общее падение напряжения через собранную систему при различном давлении. Термостойкость композитов определяли с помощью метода синхронного термического анализа (СТА) на приборе STA 449 F5 Jupiter. Измерения проводились в инертной (He) и окислительной (O₂) атмосферах при скорости нагрева 10°C/мин в температурном интервале до 800°C.

Коррозионные испытания композиционных материалов проводили с помощью потенциостата Р20 ХВ (Electrochemical Instruments) в растворе электролита (H₂SO₄ (pH 3) + 0.1 ppm HF). Потенциалы измеряли относительно насыщенного хлорид-серебряного электрода сравнения (нас. Ag/AgCl). Циклические вольтамперограммы (ЦВА) измеряли в диапазоне потенциалов от –0.4 до +0.6 В при скорости развертки потенциала 1; 5; 20; 100; 500 мВ/с. Стационарные потенциостатические поляризационные кривые измеряли от значения напряжения разомкнутой цепи с шагом 50 мВ и выдержкой 900 с в анодном и катодном направлении до потенциала 0.6 и –0.4 В соответственно. При моделировании катодной среды ТЭ на образец накладывали постоянный потенциал +0.6 В в течение 24 ч при температуре 80°C и постоянном барботировании воздухом и фиксировали изменение тока. При моделировании анодной среды ТЭ проводили аналогичные измерения, но на электрод накладывался потенциал –0.1 В и электролит продувался водородом [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученный ТРГ имел насыпную плотность 40 кг/м³, поскольку материал с более высокой степенью расширения практически невозможно равномерно смешать с порошкообразным связующим СФП. Распределение частиц ТРГ по раз-

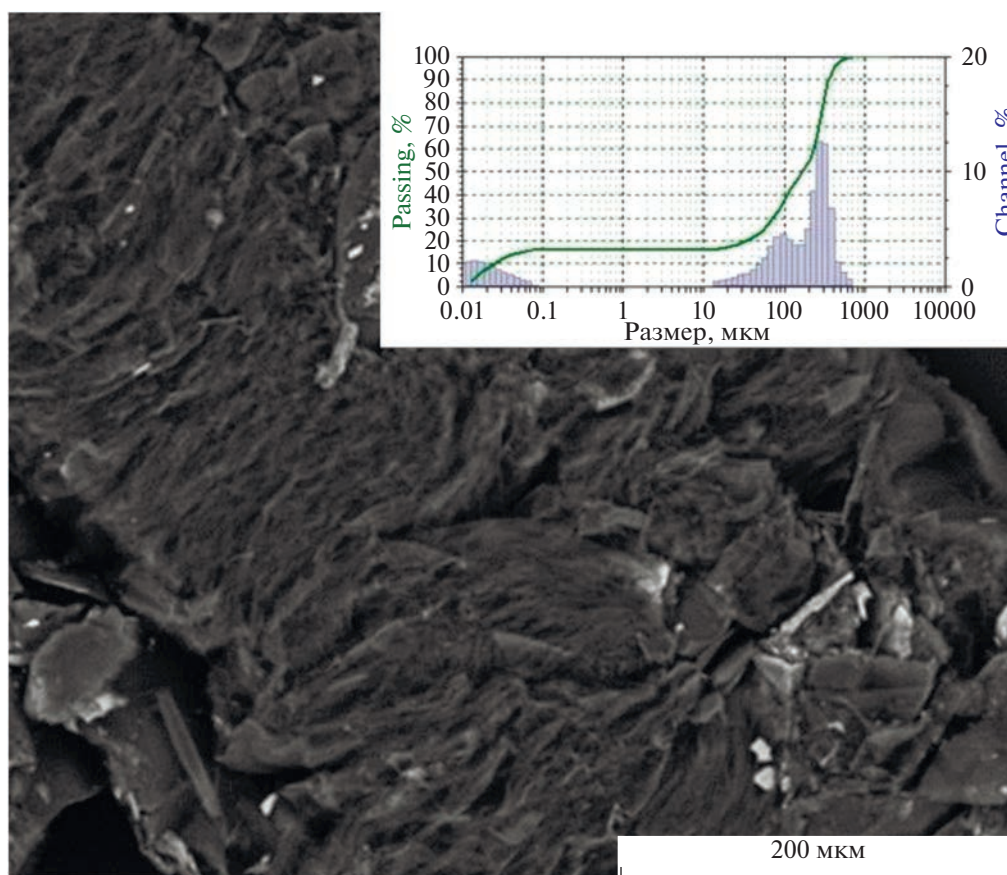


Рис. 1. СЭМ-изображение частицы ТРГ; вставка — распределение частиц ТРГ по размерам.

мерам, полученное с помощью лазерного анализатора размера частиц, представлено полимодальной моделью: 57% составляют частицы с эквивалентным диаметром 277 мкм, 27% частиц приходится на частицы около 72 мкм и 16% составляют мелкие частицы диаметром 20 нм (рис. 1).

Согласно данным синхронного термического анализа, деструкция связующего в композите СФП/ТРГ начинается при 120°C, тогда как деструкция чистой ФФС происходит при температуре выше 216°C [25]. По-видимому, кислая природа ТРГ катализирует этот процесс. Однако учитывая условия эксплуатации низкотемпературных ТЭ (60–80°C), это снижение термостабильности ФФС не будет оказывать серьезного влияния на эксплуатационные характеристики БП.

Особенностью композиционных графитонаполненных материалов является зависимость проводимости от объемной доли наполнителя. Согласно теории перколяции, для создания устойчивой проводящей сети необходимо более 60 об. % наполнителя [11]. Слоистая структура ТРГ с частицами анизотропной формы может обеспечить построение проводящего кластера

при более низких содержаниях последнего. Поэтому были получены композиты с содержанием ТРГ, начиная с 30 до 65 об. %. Однако при содержании ТРГ ниже 35 об. % проводящий кластер не формировался, о чем свидетельствовали очень высокие значения сопротивления материалов. Поэтому для исследований были отобраны композиты с содержанием ТРГ начиная с 36 об. %.

С ростом содержания ТРГ проводимость композитов закономерно возрастает и уже при содержании ТРГ выше 46% соответствует требованиям DOE [4], а при увеличении до 57% для композитов серии I превышает их практически вдвое и составляет 195.8 См см⁻¹ (табл. 1). Важным показателем является межфазное контактное сопротивление БП, которое, благодаря множественным контактам на границах раздела БП–ГДС, вносит большой вклад в общее сопротивление батареи ТЭ. В интервале концентраций ТРГ 46–56% для материалов серии I оно составляет 2.3 ± 0.2 мОм см², что также соответствует требованиям DOE (табл. 1). Композиты серии II характеризуются более низкой электропроводностью (менее 100 См см⁻¹) и

Таблица 1. Физико-механические и электрохимические характеристики композитов СФП/ТРГ

Композит	Содержание ТРГ		Прочность, МПа		Удельная проводимость, См см ⁻¹	Межфазное контактное сопротивление, мОм см ²	Ток коррозии, мкА/см ²
	мас. %	об. %	разрыв	изгиб			
I-1	50	36	30.1	36.5	7.3	24.2	0.44
I-2	60	46	29.4	34.7	94.2	2.5	0.63
I-3	70	57	27.3	33.8	195.8	2.1	0.89
II-1	50	36	31.2	37.8	7.6	30.5	0.40
II-2	60	46	30.4	37.0	67.1	11.6	0.59
II-3	70	57	28.1	35.5	93.4	6.7	0.81
DOE*	—	—	>25	—	>100	<10	<1

* Министерством энергетики США (DOE) был предложен ряд ключевых показателей эффективности, которым должны соответствовать биполярные пластины для ТЭ [24].

более высоким межфазным контактным сопротивлением.

Прочностные свойства материалов БП - прочность на сжатие и прочность на изгиб — были исследованы согласно гостированным методикам [20, 21]. С ростом содержания наполнителя прочность материалов снижается вне зависимости от способа смешивания компонентов, однако прочность материалов, полученных “мокрым” способом, выше. По-видимому, это обусловлено улучшением смачивания ТРГ раствором связующего в изопропанолу и, как следствие, более высокой адгезией связующего к поверхности ТРГ. Следует отметить, что даже при максимальном содержании ТРГ прочностные свойства полученных материалов вполне удовлетворяют требования [24] (табл. 1). Проводимость и межфазное контактное сопротивление материалов, полученных “мокрым” способом, незначительно уступают аналогичным характеристикам материалов, полученных “сухим” смешением компонентов, что отражается в более низком значении тока коррозии. И даже при максимальном содержании наполнителя удельная проводимость композитов серии II не достигает 100 мОм/см². По-видимому, агломерация ламелей ТРГ в суспензии ухудшает условия формирования проводящего кластера. Все материалы СФП/ТРГ имели низкое водопоглощение 1–1.5%, что косвенно характеризует низкую пористость материала.

Электрохимические испытания композитных материалов включали измерение ЦВА в интервале потенциалов –0.1...0.6 В, измерение стацио-

нарных поляризационных кривых в соответствующих диапазонах и моделирование катодной и анодной среды в условиях потенциостатической поляризации. На рис. 2 представлены ЦВА композиционных материалов СФП/ТРГ серии I, измеренные при разной скорости циклирования от 1 до 500 мВ/с. Следует отметить, что электрохимическое поведение композитов с объемной долей ТРГ 46 и 57 об. % практически идентично (рис. 2б, 2в), тогда как при содержании ТРГ 36 об. % в композите перколяционный кластер не формируется и не обеспечивается достаточная проводимость, что выражается в существенно более низких значениях тока (рис. 2а).

Для определения тока коррозии композитных материалов поляризационные кривые были построены в полулогарифмических координатах (диаграмма Эванса) (рис. 3). Рассчитанные значения токов коррозии для различных материалов не превышают 1 мкА/см² (табл. 1). Однако наиболее низкое значение, полученное для I-1 и II-1, содержащих 36 об. % наполнителя, по-видимому, обусловлено низкой проводимостью материала.

Для установления возможности эксплуатации полученных композитных материалов в условиях работы ТЭ были проведены хроноамперометрические измерения при потенциостатической поляризации в течение 24 ч в условиях, моделирующих условия катодной и анодной среды ТЭ. Так, при моделировании катодной среды электрод поляризовался при $E = 0.6$ В при постоянном продувании воздухом. Величина плотности тока через 24 ч не превышала 0.05 мА/см² (рис. 4а). При мо-

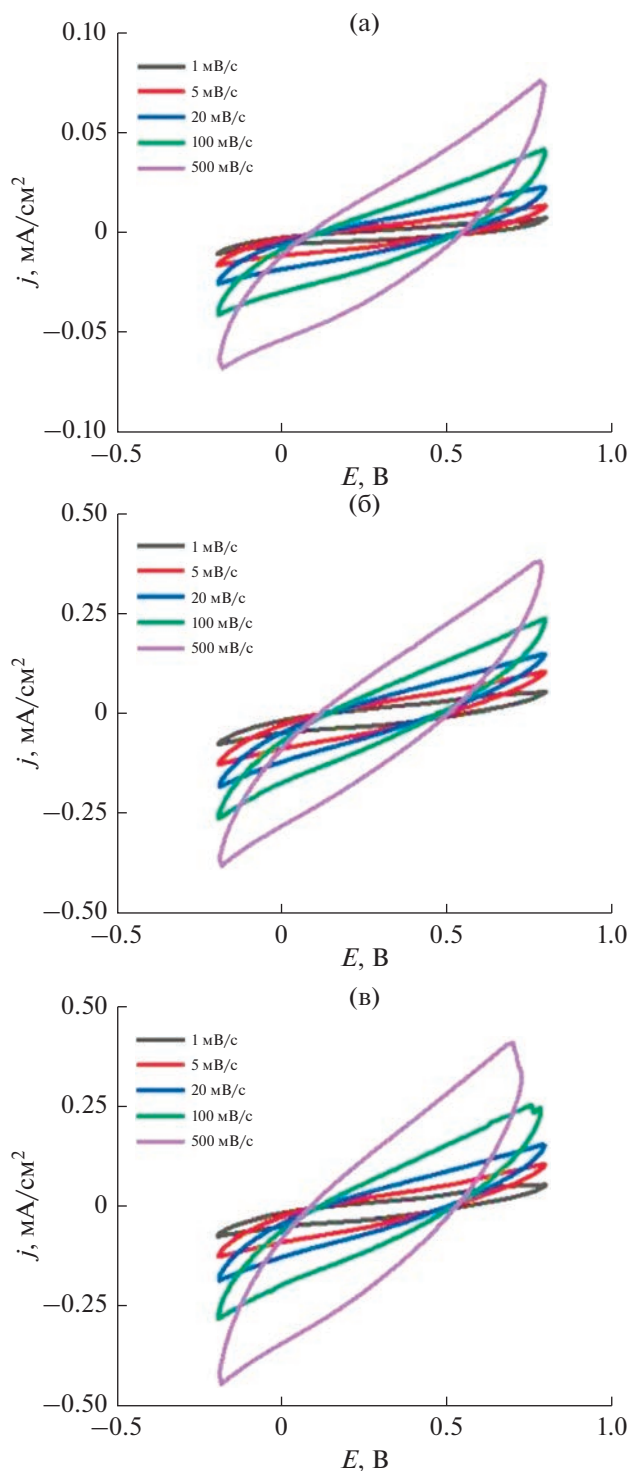


Рис. 2. ЦВА композитных материалов серии I с объемной долей наполнителя: а – 36; б – 46; в – 57%.

делировании анодной среды плотность тока при $E = -0.1$ В (24 ч в среде водорода) не превышал -0.015 mA/cm^2 (рис. 4б). С ростом содержания наполнителя как в условиях анодной, так и катод-

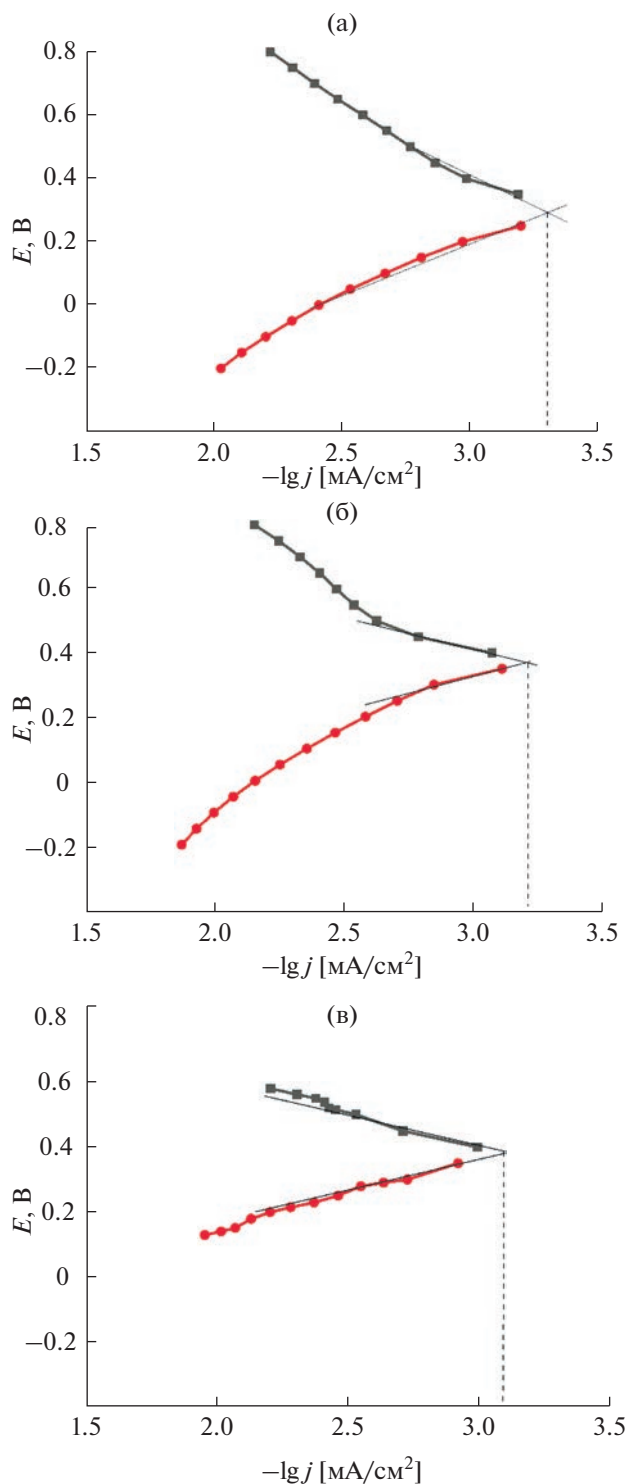


Рис. 3. Диаграмма Эванса для композитных материалов серии I с объемной долей наполнителя: а – 36; б – 46; в – 57%.

ной поляризации стационарные токи линейно возрастают (врезки в рис. 4). Такое поведение композиционных материалов объясняется частичной коррозией частиц углеродного наполни-

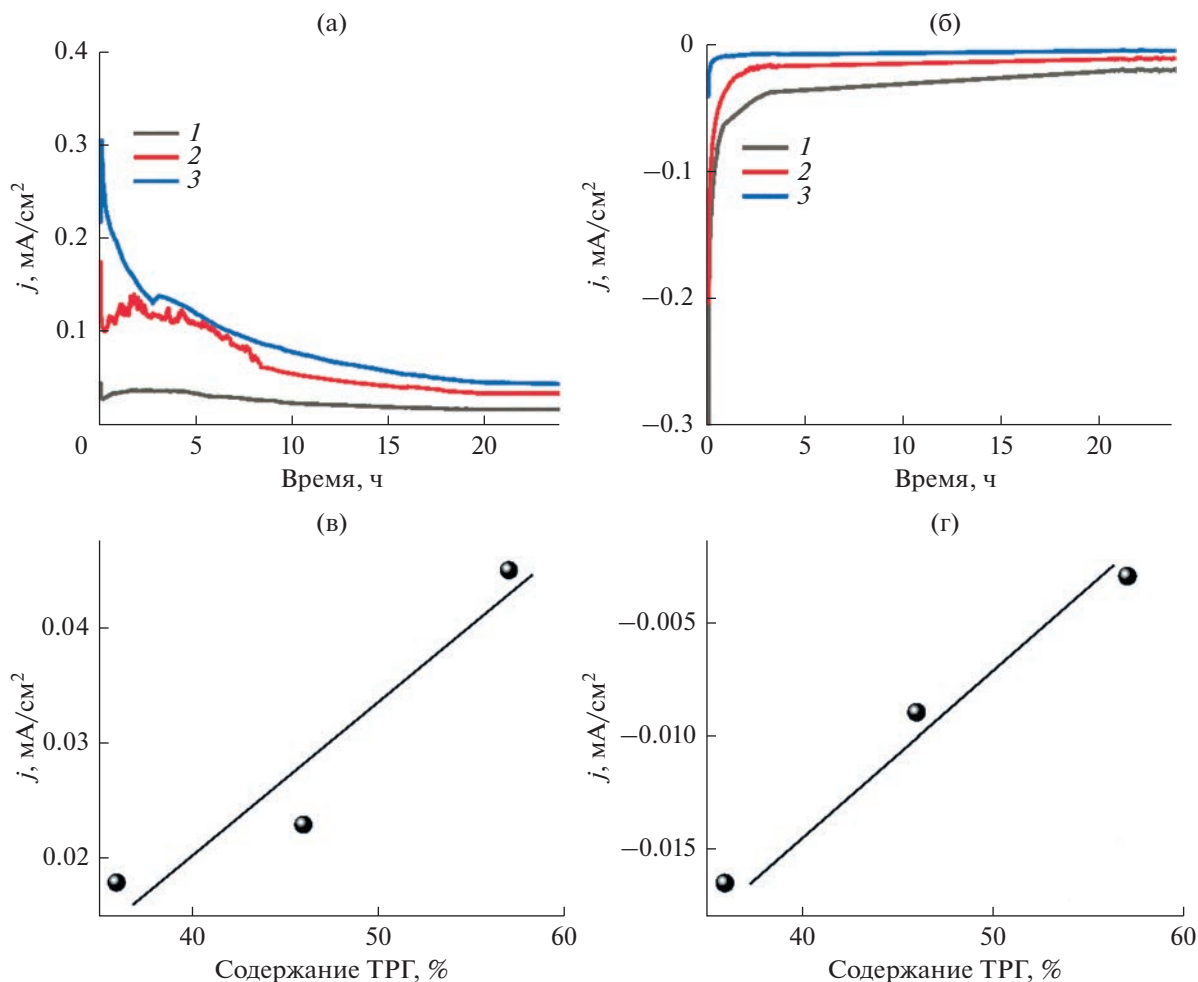


Рис. 4. Хроноамперометрия (а, б) и зависимости плотности тока от объемной доли графита при поляризации в течение 24 ч (в, г) композитных материалов серии I при моделировании (а, в) катодной ($E = 0.6$ В) и (б, г) анодной ($E = -0.1$ В) среды ТЭ.

теля и набуханием/растворением полимерной матрицы [25, 26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены композиционные материалы на основе термореактивного связующего фенольного порошкообразного СФП и терморасширенного графита. Показано, что электрохимические и физико-механические свойства композитов зависят от способа введения наполнителя ТРГ в состав композита. Предварительное растворение связующего в органическом растворителе с последующим суспензированием ТРГ в смеси хотя несколько упрощает процесс смешения и повышает механическую прочность материалов, однако не позволяет достичь их хорошей электропроводности. Материалы, полученные смешением сухих ТРГ и связующего, характеризуются высокими

электропроводностью и прочностными свойствами, низким межфазным контактным сопротивлением и током коррозии, не превышающим 1 мкА/см². По всем исследованным показателям полученные материалы с содержанием проводящего наполнителя ТРГ 45–55 об. % соответствуют требованиям, предъявляемым к материалам БП, которые позволят обеспечить высокую эффективность преобразования энергии в ТПТЭ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования “Нанотехнологии” Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова в рамках реализации Стратегического проекта “Системы водородной энергетики” программы ПРИОРИТЕТ-2030.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Sharma, P. and Pandey, O.P., Proton exchange membrane fuel cells: fundamentals, advanced technologies, and practical applications. In *PEM Fuel Cells, Elsevier*, 2022, p. 1–24.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823708-3.00006-7>
- Bazhenov, S., Dobrovolsky, Y., Maximov, A., and Zh-daneev, O.V., Key challenges for the development of the hydrogen industry in the Russian Federation, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, vol. 54, p. 102867.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102867>
- Younas, T., Bipolar plates for the permeable exchange membrane: carbon nanotubes as an alternative, In *PEM Fuel Cells, Elsevier*, 2022, p. 71–89.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823708-3.00006-7>
- Tang, A., Crisci, L., Bonville, L., and Jankovic, J., An overview of bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells, *J. Renewable and Sustainable Energy*, 2021, vol. 13(2), p. 022701.
<https://doi.org/10.1063/5.0031447>
- Porstmann, S., Tannemacher, T., and Drossel, W.-G., A comprehensive comparison of state-of-the-art manufacturing methods for fuel cell bipolar plates including anticipated future industry trends, *J. Manufacturing Proc.*, 2020, vol. 60, p. 366.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.041>
- Stein, T. and Ein-Eli, Y., Challenges and Perspectives of Metal-Based Proton Exchange Membrane's Bipolar Plates: Exploring Durability and Longevity, *Energy Technol.*, 2020, vol. 8, p. 2000007.
<https://doi.org/10.1002/ente.202000007>
- Wang, H. and Turner, J.A., Reviewing Metallic PEMFC Bipolar Plates, *Fuel Cells*, 2010, vol. 10, p. 510.
<https://doi.org/10.1002/fuce.200900187>
- Li, Y., Jia, X., Zhang, W., Fang, C., Wang, X., Qin, F., Yamaura, S., and Yokoyama, Y., Effects of Alloying Elements on the Thermal Stability and Corrosion Resistance of an Fe-based Metallic Glass with Low Glass Transition Temperature, *Metall. Mater. Trans. A.*, 2013, vol. 45, p. 2393.
<https://doi.org/10.1007/s11661-013-2071-6>
- Ji, S., Hwang, Y.S., Park, T., Lee, Y.H., Paek, J.Y., Chang, I., Lee, M.H., and Cha, S.W., Graphite foil based assembled bipolar plates for polymer electrolyte fuel cells: material, structure, and performance, *Int. J. Precis. Eng. Man.*, 2012, vol. 13, p. 2183.
<https://doi.org/10.1007/s12541-012-0289-7>
- Fan, R., Peng, Y., Tian, H., Zheng, J., Ming, P., and Zhang, C., Graphite-filled composite bipolar plates for fuel cells: material, structure, and performance, *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2021, vol. 37(9), p. 2009095.
<https://doi.org/10.3866/PKU.WHXB202009095>
- Badrul, F., Halim, K.A., Salleh, M.M., Omar, M.F., Osman, A.F., and Zakaria, M.S., Modeling electrical conductivity and tensile properties of conductive polymer composites (CPCs) based on percolation threshold theory—A short review, *In AIP Conf. Proc.*, 2021, July, vol. 2347, no. 1, p. 020240. AIP Publishing LLC.
<https://doi.org/10.1063/5.0052346>
- Chen, H., Liu, H.B., Xia, X.H., Yang, L., and He, Y.D., Preparation and properties of graphite/phenolic resin composite bipolar plate, *Acta Mater. Compos. Sin.*, 2015, vol. 32, p. 744.
<https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.201503.008>
- Suherman, H., Sulong, A. B., and Sahari, J., Effect of the compression molding parameters on the in-plane and through-plane conductivity of carbon nanotubes/graphite/epoxy nanocomposites as bipolar plate material for a polymer electrolyte membrane fuel cell, *Ceram. Intern.*, 2013, vol. 39, p. 1277.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.07.059>
- Kim, M., Lim, J.W., and Lee, D.G., Electrical contact resistance between anode and cathode bipolar plates with respect to surface conditions, *Compos. Struct.*, 2018, vol. 189, p. 79.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.067>
- Yao, K., Adams, D. L., Hao, A., Zheng, J.P., and Liang, R., Highly Conductive, Strong, Thin and Lightweight Graphite-Phenolic Resin Composite for Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *ECS Trans.*, 2017, vol. 77, p. 1303.
<https://doi.org/10.1149/07711.1303ecst>
- Stübler, N., Meiners, D., Ziegmann, G., and Hickmann, T., Investigation of the properties of polymer composite bipolar plates in fuel cells, *J. Plastics Technology*, 2014, vol. 10(3), p. 68.
- Diaz, J., Rigail-Cedeño, A., Barzola-Monteses, J., and Espinoza-Andaluz, M., A pre-feasibility experimental study of using surface-enhanced flake graphite to build up PEFC bipolar plates, *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, p. 1502.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.358>
- Antunes, R.A., Oliveira, M.C.L.D., Ett, G., and Ett, V., Carbon materials in composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells: A review of the main challenges to improve electrical performance, *J. Power Sources*, 2011, vol. 196, p. 2945.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.12.041>
- Фиалков, А.С. Углерод, межслойные соединения и композиты на его основе, М.: Аспект Пресс, 1997. 718 с. [Fialkov, A.S. Carbon, interlayer compounds and composites based on it (in Russian), Moscow: Aspect Press, 1997. 718 p.]
- ГОСТ Р 56810—2015. Композиты полимерные. Метод испытания на изгиб плоских образцов, М.: Стандартинформ, 2016, 20 с. [GOST R 56810—2015. Polymer composites. Bending test method for flat specimens (in Russian), Moscow: Standartinform, 2016, 20 p.]
- ГОСТ Р 56785—2015 Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов, М.: Стандартинформ, 2016, 16 с. [GOST R 56785—2015 Polymer composites. Tensile testing method for flat specimens (in Russian), Moscow: Standartinform, 2016, 16 p.]

22. ГОСТ Р 56652–2015. Композиты полимерные. Методы определения водопоглощения материалов внутреннего слоя “сэндвич”-конструкций, М.: Стандартиформ, 2016, 15 с. [GOST R 56652-2015. *Polymer composites. Methods for determining the water absorption of the materials of the inner layer of “sandwich” structures* (in Russian), Moscow: Standartinform, 2016, 15 p.]
23. Davies, D. P., et al., Bipolar plate materials for solid polymer fuel cells, *J. Appl. Electrochem.*, 2000, vol. 30, no. 1, p. 101.
<https://doi.org/10.1023/A:1003831406406>
24. Fuel Cell Technical Team Roadmap, https://www.energy.gov/sites/default/files/2017/11/f46/FCTT_Roadmap_Nov_2017_FINAL.pdf.
25. Chen, Z., Chen, Y., and Liu, H., Pyrolysis of phenolic resin by TG-MS and FTIR analysis, *Adv. Mater. Res.*, 2013, vol. 631–632, p. 104.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.631-632.104>
26. Wlodarczyk, R., Carbon-based materials for bipolar plates for low-temperatures PEM fuel cells – A review, *Functional Mater. Lett.*, 2019, vol. 12, no. 02, p. 1930001.
<https://doi.org/10.1142/S1793604719300019>