МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ВОДОРОДНЫХ КАРТРИДЖАХ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А. И. Низовский¹, С. В. Белькова², Л. О. Штриплинг²

 ¹Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН»,
 Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 5
 ²Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Разработаны материалы для водородных картриджей, использующих в качестве источника водорода реакцию активированных массивных коммерческих алюминиевых сплавов с водой. В качестве исходных алюминиевых материалов может быть использован широкий ряд промышленных алюминиевых сплавов, в том числе вторичный алюминий, а также компактированная стружка. Показано, что активированные продукты стабильны в течение продолжительного времени при хранении в сухих условиях. Длительное воздействие паров воды приводит к потере реакционной способности.

Ключевые слова: автономный источник питания, алюминий, реакция алюминиевых сплавов с водой, эффект выделения водорода, водородные картриджи, топливные элементы.

Введение

Развитие инфраструктуры добычи и транспортировки углеводородов требует оснащения строящихся и действующих объектов системами контроля технологических параметров, системами наблюдения и охраны. Учитывая удаленность таких объектов, автономность их эксплуатации, возникает необходимость оснащения их автономными источниками питания небольшой мощности. Важным аспектом развития индустрии туризма является оснащение туристических групп, а также подразделений поиска и спасения надежными и компактными устройствами связи. Генераторы на углеводородном топливе имеют большие габариты и вес, что сушественно усложняет их использование в условиях удаленности от баз. Аккумуляторы имеют принципиальный недостаток — необходимость периодической зарядки. Химические источники тока — батареи имеют ограниченный ресурс работы, а при их использовании в составе автономных охранных систем частая замена является демаскирующим фактором. Использование солнечных батарей также ограничено зависимостью от погодных условий и их большими габаритами. Таким образом, проблема создания компактных автономных источников энергообеспечения является весьма актуальной.

Теоретическая часть

Одним из решений описанной проблемы является использование источника энергии на базе топливных элементов мощностью ≤ 100 Вт. Такие источники могут быть весьма компактны и иметь размер ~1 дм³. Одним из типов топливных элементов является водородный топливный элемент, в котором происходит электрохимическое окисление водорода. Окислителем при этом является атмосферный кислород, продуктом окисления — чистая вода, без включений каких-либо тяжелых металлов или органических соединений.

Важнейшим аспектом создания такого электрического устройства является разработка источника водорода, соответствующего требуемым рабочим параметрам топливного элемента. В данной работе предлагается получение водорода на месте в момент использования в требуемом количестве с помощью реакции окисления алюминия водой. Известной хорошо отработанной технологией получения водорода для наполнения метеорологических шаров-зондов является использование компактных химических реакторов, в которых реагируют высококонцентрированный раствор щелочи и алюминиевый порошок [1].

Алюминиевые сплавы разнообразных марок широко используются в различных областях машиностроения, в том числе в авиакосмической технике, судостроении, ядерной энергетике, где к ним предъявляются повышенные требования по прочности, стойкости к коррозии. Тем не менее с помощью специальных активаторов можно добиться резкого повышения их реакционной способности по отношению к воде [2-17].

Ниже приведена реакция взаимодействия алюминия с водой при нейтральном pH при комнатной температуре и атмосферном давлении, в которой выделяется чистый водород, не требующий дополнительной очистки при его использовании в топливном элементе:

$$Al + 2H_2O = Al(OOH) + 1_5H_2$$
.

Выход реакции составляет в количестве 1,24 л/г. Чистота получаемого водорода в данной реакции принципиально важна для функционирования водородного топливного элемента. Водород, получаемый из углеводородного сырья, требует специальной очистки перед его использованием.



Необходимо отметить, что такой источник водорода не требует для запуска какой-либо дополнительной электрической энергии. В случае отсутствия воды в жидком виде в зимних условиях можно использовать растопленный снег или лед.

Целью данной работы было изучение возможности создания материалов на основе конструкционных алюминиевых сплавов, позволяющих получать чистый водород в реакции с водой для его последующего использования в системе питания водородных топливных элементов.

Экспериментальная часть

Активирование образцов производилось путем обработки их поверхности жидким эвтектическим сплавом Ga-In (76 % – 24 %, Тпл. = 15,9 °С). В качестве исходных материалов для активирования использовались промышленные конструкционные сплавы следующих марок (ГОСТ 4784 – 97): Д1Т, Д16Т, АМг6 и алюминий первичный А0 (ГОСТ 11069 – 2001). Для приготовления эвтектического сплава Ga-In использовался галлий Гл-0 (ГОСТ 12797 – 77*) и индий Ин00 (ГОСТ 10297 – 94).

Эксперименты по определению эффективности выделения водорода при взаимодействии активированных образцов с водой проводили с использованием специально разработанной установки [18].

Необходимо отметить, что реакция сильно эндотермична, измерение количества выделяемого водорода в единицу времени в данном случае является сложной задачей, поскольку меняется температура газа, его влажность, что существенно усложняет методику. В данной работе было найдено простое и эффективное решение, которое не требовало учета параметров выделяемого водорода. В эксперименте каждые 2 секунды на цифровых весах VIBRA CJ-8200 ER измерялась масса воды, вытесненной из специальной емкости выделяющимся в процессе реакции водородом. При этом влажность водорода и его температура во время всех экспериментов становилась одинаковой, т.к. водород вытеснял воду, имеющую комнатную температуру из емкости большого объема. Растворение водорода в воде незначительно. Температура газовой среды и жидкой фазы в реакторе с помощью хромель-алюмелевых термопар также измерялась в автоматическом режиме. Объем реактора из нержавеющей стали составлял ~ 100 см³, его внешняя поверхность была покрыта теплоизоляционным материалом. Конструкция реактора показана на рис. 1.

При тестировании образцов количество дистиллированной воды бралось с пятикратным избытком относительно стехиометрии реакции. Старт реакции обеспечивался переворотом реактора на 180 градусов вокруг его горизонтальной оси, начальная температура воды была 25 °C.

Результаты и обсуждение

Основная масса исследователей для получения водорода использует в качестве реагента порошкообразный алюминий. Существует мнение, что высокие скорости выделения водорода возможны только для реакции с высокодисперсным алюминием при высоких параметрах рН [19]. В настоящей работе показано, что можно получать достаточно высокие скорости выделения водорода и в случае взаимодействия массивного активированного материала с водой в нейтральной среде. Так, для некоторых образцов, как это будет показано ниже, скорость выделения водорода составила более 300 мл/(г·мин).

Реакция активированного продукта с водой сопровождается значительным тепловыделением. Первой стадией процесса при контакте образцов с водой является разрушение материала с резким увеличением реагирующей поверхности, образуются мелкие фрагменты, которые интенсивно взаимодействуют с водой. Выделение водорода происходит скачкообразно с быстрым затуханием. На рис. 2 приведены данные, характеризующие реакцию взаимодействия активированного материала А0. Литой алюминий марки А0 — материал с широким распределением размеров зерен. Как видно из кривых на рис. 2, реакцию следует разделить на 3 стадии: первая — взаимодействие с водой, сопровождающееся разрушением материала на мелкие фрагменты. Количество выделяемого водорода при этом растет относительно медленно (кривая 2), соответственно, температура газовой фазы в реакторе также меняется незначительно (кривая 3) по сравнению с температурой жидкой фазы (кривая 1). Затем происходит скачкообразный рост температуры с одновременным интенсивным выделением водорода в результате взаимодействия мелких частиц алюминия с водой. В данном случае сложно определить скорость процесса, т.к. реакция носит локальный характер, в межзеренных границах резко повышается температура, давление и рН, резко изменяется температура всего объема реакционной среды. Более корректно следует использовать для оценки количества выделяемого водорода в еди-



Рис. 2. Зависимости температуры в реакторе и количества выделенного водорода от времени: 1 — температура реакционной среды (активированный материал + вода); 2 — зависимость выделения водорода от времени
в реакции с водой активированного материала на основе первичного алюминия A0; 3 — температура газовой фазы Fig. 2. Dependences of the temperature in the reactor and the amount of hydrogen released on time: 1 — temperature of the reaction medium (activated material + water);
2 — dependence of hydrogen release on time in reaction with water of activated material based on primary aluminum A0; 3 — temperature of the gas phase



Рис. 3. Фотографии чайных ложек из алюминиевого сплава:
1 — исходной; 2 — после стандартной процедуры активирования Ga-In эвтектикой
Fig. 3. Photos of aluminum alloy teaspoons:
1 — the original; 2 — after the standard Ga-In activation procedure by eutectic

ницу времени термин «эффективность выделения водорода» для разных исходных материалов и при варьировании условий активирования.

Ранее было показано [20, 21], что физической основой наблюдаемого эффекта резкого роста реакционной способности в результате обработки алюминия Ga-In эвтектикой является эффект Ребиндера, связанный с зернограничной диффузией [22]. Как уже отмечалось выше, в работе использовались различные промышленные алюминиевые сплавы. Была проведена серия экспериментов по активирующей обработке готовых промышленных изделий из алюминиевых сплавов. В качестве примера приведем активирование обычной алюминиевой чайной ложки. На рис. З показаны фотографии ложек исходной и после стандартной процедуры активирования Ga-In эвтектикой. На рис. 4 приведена зависимость количества выделяемого водорода реакции с водой активированной ложки, реакция прошла полностью, в продуктах реакции частиц металлического алюминия не обнаружено. Обрыв кривой при достижении времени экс-



Рис. 4. Зависимость объема выделенного водорода от времени в реакции взаимодействия активированного образца (чайной ложки) с водой при стартовой температуре 20 °C Fig. 4. Dependence of the volume of hydrogen released on the reaction time of the activated sample (teaspoon) with water at a starting temperature of 20 °C



от времени: 1 — свежеприготовленный; 2 — после хранения в течение 6 месяцев Fig. 5. Time dependence of the volume of hydrogen released: 1 — freshly prepared; 2 — after storage for 6 months

перимента 270 сек. связан с особенностями экспериментальной установки. Как выше отмечалось, в эксперименте измерялся вес воды, вытесненной водородом. Обычно масса образцов составляла не более 20 граммов, емкость с водой вмещает 5 литров. В данном случае масса образца была существенно больше, и объема воды в емкости не хватило для контроля всего объема водорода. Необходимо отметить, что целью эксперимента не являлось детальное изучение особенностей взаимодействия данного активированного образца с водой. Важно было оценить активность образца. Как видно, ход кривой выделения водорода на рис. 4 подобен кривой на рис. 2. Таким образом, предлагаемая методика получения водорода для питания водородных топливных элементов в полевых условиях с использованием каких-либо изделий из промышленных алюминиевых сплавов вполне конкурентоспособна.

Естественно, что при исследовании любого продукта, предполагающего его дальнейшее коммерческое использование, возникает вопрос о стабильности его характеристик при хранении и выявлении



Рис. 6. Внешний вид активированного материала Д16Т, хранившегося в атмосферных условиях Fig. 6. Appearance of the activated material D16T, stored in atmospheric conditions



Рис. 7. Фотография чайной ложки из алюминиевого сплава, прошедшей активирующую обработку после хранения 6 месяцев в атмосферных условиях
Fig. 7. Photo of a teaspoon made of aluminum alloy that has undergone activating treatment after storage for 6 months in atmospheric conditions

факторов, дестабилизирующих его потребительские свойства. На рис. 5 приведены данные тестирования активированного материала на основе конструкционного сплава Д16Т. Из приведенных кривых видно, что начальные стадии реакции как свежеприготовленного образца, так и после его хранения, существенно не отличаются. Они оба активно взаимодействуют с водой при стартовой температуре 25 °C. У кривой, соответствующей образцу после длительного хранения, при выходе реакции в финальную стадию наблюдается относительное снижение выделения водорода, тем не менее при больших временах взаимодействия (~ 3000 сек.) количество выделенного водорода становится одинаковым для обоих образцов. Важно отметить, что образец в данном случае хранился в металлической емкости с силикагелем. Минимизирование количества влаги является очень важным условием сохранения высокой активности образцов, т.к. они реагируют не только с жидкой водой, но и с ее парами. При хранении в открытой емкости в атмосферных условиях за аналогичное время активированные образцы разрушались, теряли активность, но металлическое состояние алюминия сохранялось. На рис. 6 показан внешний вид образцов, хранившихся в открытой чашке Петри при комнатных условиях. Особенностью проявления деградации является наблюдение выделения эвтектики Ga-In при их механическом разрушении при хранении. Вначале наблюдалось набухание образцов и растрескивание, затем полное разрушение с выделением капель эвтектики, как это отчетливо видно на приведенной фотографии. Важно отметить, что выделившаяся эвтектика может быть многократно использована с помощью несложной методики очистки. Часть эвтектики в результате реакции теряется, т.к. галлий встраивается в решетку с образованием смешанных гидроксидов AlGaO_v. Индий не окисляется водой при данных параметрах реакции и возвращается в исходном металлическом состоянии.

Похожие результаты для активированного материала, полученного из алюминиевой ложки. Как уже отмечалось, эффект Ребиндера связан с зернограничной диффузией. На рис. 7. показана деградация ложки, подвергшейся активирующей обработке, в результате хранения в течение 6 месяцев в обычных атмосферных условиях. На фотографии отчетливо видно расслоение материала по межзеренным границам в результате воздействия паров воды из-за образования гидроксидов алюминия, имеющих существенно больший мольный объем, чем у металлического алюминия. Данная фотография хорошо иллюстрирует механизм взаимодействия активированного алюминия с водой. Точно так же, как и в случае паров воды, вода проникает по границам зерен с образованием водорода, который под большим давлением разрывает металл по границам зерен.

Как видно из кривой на рис. 4, в начале реакции наблюдается небольшой индукционный период, связанный с проникновением воды по границам зерен, затем небольшое увеличение скорости, связанное с разрушением материала, сопровождающееся увеличением площади реагирующей поверхности, наконец резкое увеличение скорости выделяемого водорода с выходом за небольшое время на плато.

Вывод

На основании полученных данных можно сделать вывод о пригодности продукта на основе активированного алюминия в качестве материала для автономных источников питания на базе водородных топливных элементов, использующих в качестве источника водорода реакцию металлов водой.

В качестве исходных алюминиевых материалов для получения водорода может быть использован широкий ряд промышленных алюминиевых сплавов, в том числе вторичный алюминий.

Показано, что активированные продукты стабильны в течение продолжительного времени при хранении в условиях, ограничивающих контакт с парами воды. Длительное воздействие паров воды приводит к потере реакционной способности.

Список источников

1. Belitskus D. Reaction of aluminum with sodium hydroxide solution as a source of hydrogen // Journal of the Electrochemical Society. 1970. Vol. 117, no. 8. P. 1097-1099. DOI: 10.1149/1.2407730.

 Шейндлин А. Е., Жук А. З. Концепция алюмоводородной энергетики // Российский химический журнал. 2006. Т. L, № 6. С. 105-108. EDN: HZYYVX. 3. Шейндлин А. Е., Жук А. З. Алюмоводородная энергетика: принципы и технологии // Вестник Российской академии наук. 2010. Т. 80, № 2. С. 143–148. EDN: LOKEXR.

4. Srivastava A., Meshram A. On trending technologies of aluminium dross recycling: A review // Process Safety and Environmental Protection. 2023. Vol. 171. P. 38-54 DOI: 10.1016/j.psep.2023.01.010.

5. Deng Z-Y., Ferreira J. M. F., Sakka Y. Hydrogen-generation materials for portable applications // Journal of the American Ceramic Society. 2008. Vol. 91, no. 12. P. 3825-3834. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2008.02800.

6. Razavi-Tousi S. S., Szpunar J. A. Effect of addition of watersoluble salts on the hydrogen generation of aluminum in reaction with hot water // Journal of Alloys and Compounds. 2016. Vol. 679. P. 364–374. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.04.038.

7. Ching-Yuan Ho. Hydrolytic reaction of waste aluminum foils for high efficiency of hydrogen generation // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42, no. 31. P. 19622–19628. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.104.

8. Kaur P., Verma. G. A critical assessment of aluminumwater reaction for on-site hydrogen-powered applications // Materials Today Energy. 2024. Vol. 40. 2024101508 DOI: 10.1016/j. mtener.2024.101508.

9. Deng-Hui X., Yu-Ping Q., Ping W. Rapid hydrogen generation from the reaction of aluminum/activated charcoal composite with alkaline solution // Journal of Alloys and Compounds. 2023. Vol. 947. 169611. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.169611.

10. Trowell K. A., Goroshin S., Frost D. L., Bergthorson J. M. The use of supercritical water for the catalyst-free oxidation of coarse aluminum for hydrogen production // Sust. Energy Fuels. 2020. Vol. 4, no. 11. P. 5628 – 5635. DOI: 10.1039/d0se00996b.

11. Kravchenko O. V., Semenenko K. N., Bulychev B. M., Kalmykov K. B. Activation of aluminum metal and its reaction with water // Journal of Alloys and Compounds. 2005. Vol. 397. P. 58-62. DOI: 10.1016/j.jallcom.2004.11.065.

12. Parmuzina A. V., Kravchenko O. V. Activation of aluminium metal to evolve hydrogen from water // Int. J. Hydrogen Energy. 2008. Vol. 33. P. 3073 – 3076. DOI: 10.1016/j. ijhydene.2008.02.025.

13. Huang X., Gao T., Pan X. [et al.]. A review: Feasibility of hydrogen generation from the reaction between aluminum and water for fuel cell applications // Journal of Power Sources. 2013. Vol. 229. P. 133–140. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.12.016.

14. Dawood F., Anda M., Shafiullah G. M. Hydrogen production for energy: An overview // Int. J. Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45. P. 3847 – 3869. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.059.

15. Liang G.-qiang, Liu Y., Cheni P.-fei [et al.]. Hydrogen production via hydrolysis of Aleutectic GaInSn composites // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2023. Vol. 33. P. 2751–2760. DOI: 10.1016/S1003-6326(23)66295-8.

16. Zhu L., Zou M., Zhang X. [et al.]. Enhanced hydrogen generation performance of Al-Rich alloys by a melting-mechanical crushing-ball milling method // Materials. 2021. Vol. 14. 7889. DOI: 10.3390/ma14247889.

17. Wang H., Chang Y., Dong Sh. [et al.]. Investigation on hydrogen production using multicomponent aluminum alloys at mild conditions and its mechanism // Int. J. Hydrogen Energy. 2013. Vol. 38, no. 3. P. 1236-1243. DOI: 10.1016/j. ijhydene.2012.11.034.

18. Nizovskii A. I., Kulikov A. V., Trenikhin M. V., Bukhtiyarov V. I. Material for compact hydrogen cartridges based on commercial aluminium alloys activated by Ga-In eutectics // Catalysis for Sustainable Energy. 2017. Vol. 4. P. 62-66. DOI: 10.1515/cse-2017-0010.

19. Zhuk A. Z., Shkolnikov E. I., Borodina T. I. [et al.]. Aluminium — water hydrogen generator for domestic and mobile application // Applied Energy. 2023. Vol. 334. 120693. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120693.

20. Тренихин М. В., Бубнов А. В., Козлов А. Г., Низовский А. И., Дуплякин В. К. Проникновение компонентов индий-галлиевого сплава в алюминий // Журнал физической химии. 2006. Т. 80, № 7. С. 1262—1267. EDN: HUZPYN.

21. Тренихин М. В., Бубнов А. В., Низовский А. И., Дуплякин В. К. Взаимодействие эвтектики системы In – Ga с алюминием и его сплавами // Неорганические материалы. 2006. Т. 42, № 3. С. 298 – 303. EDN: HSWENP.

22. Rehbinder P. A., Shchukin E. D. Surface phenomena in solids during deformation and fracture processes // Progress in Surface Science. 1972. Vol. 3, no. 2. P. 97 – 104. DOI: 10.1016/0079-6816(72)90011-1.

НИЗОВСКИЙ Александр Иванович, кандидат химических наук, доцент (Россия), старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН», г. Новосибирск.

SPIN-код: 9234-3580

AuthorID (РИНЦ): 142637

AuthorID (SCOPUS): 9337056300

Адрес для переписки: alexniz@inbox.ru

БЕЛЬКОВА Софья Валентиновна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 3650-6466

AuthorID (РИНЦ): 762141

AuthorID (SCOPUS): 57190973082

AuthorID (SCOPUS): 57203587299

Адрес для переписки: sofya_belkova@mail.ru

ШТРИПЛИНГ Лев Оттович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Промышленная экология и безопасность» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 9285-8565

AuthorID (РИНЦ): 157285

ORCID: 0000-0002-2622-9108

AuthorID (SCOPUS): 56504001800

Адрес для переписки: losht59@mail.ru

Для цитирования

Низовский А. И., Белькова С. В., Штриплинг Л. О. Материал на основе алюминия для использования в водородных картриджах системы питания водородных топливных элементов // Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 4. С. 39-45. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-39-45.

Статья поступила в редакцию 25.07.2024 г. © А. И. Низовский, С. В. Белькова, Л. О. Штриплинг

ALUMINUM-BASED MATERIAL FOR USE IN HYDROGEN CARTRIDGES OF THE HYDROGEN FUEL CELL SUPPLY SYSTEM

A. I. Nizovskii¹, S. V. Belkova², L. O. Shtripling²

¹Federal Research Center «Boreskov Institute of Catalysis SB RAS», Russia, Novosibirsk, Ac. Lavrentieva Ave., 5, 630090 ²Omsk State Technical University, Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

Materials have been developed for hydrogen cartridges using the reaction of activated massive commercial aluminum alloys with water as a hydrogen source. A wide range of industrial aluminum alloys, including secondary aluminum, as well as compacted chips, can be used as starting aluminum materials. It has been shown that activated products are stable for a long time when stored in dry conditions. Prolonged exposure to water vapor leads to loss of reactivity.

Keywords: stand-alone power supply, aluminum, reaction of aluminum alloys with water, the effect of hydrogen release, hydrogen cartridges, fuel cells.

References

1. Belitskus D. Reaction of aluminum with sodium hydroxide solution as a source of hydrogen // Journal of the Electrochemical Society. 1970. Vol. 117, no. 8. P. 1097-1099. DOI: 10.1149/1.2407730. (In Engl.).

2. Sheyndlin A. E., Zhuk A. Z. Kontseptsiya alyumovodorodnoy energetiki [The concept of Alum-hydrogenated energy] // Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. 2006. Vol. L, no. 6. P. 105–108. EDN: HZYYVX. (In Russ.).

3. Sheyndlin A. E., Zhuk A. Z. Alyumovodorodnaya energetika: printsipy i tekhnologii [Aluminohydrogen energy: principles and technologies] // Vestnik Rossiyskoy akademii nauk. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk.* 2010. Vol. 80, no. 2. P. 143–148. EDN: LOKEXR. (In Russ.).

4. Srivastava A., Meshram A. On trending technologies of aluminium dross recycling: A review // Process Safety and Environmental Protection. 2023. Vol. 171. P. 38-54. DOI: 10.1016/j.psep.2023.01.010. (In Engl.).

5. Deng Z-Y., Ferreira J. M. F., Sakka Y. Hydrogengeneration materials for portable applications // Journal of the American Ceramic Society. 2008. Vol. 91, no. 12. P. 3825-3834. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2008.02800. (In Engl.).

6. Razavi-Tousi S. S., Szpunar J. A. Effect of addition of watersoluble salts on the hydrogen generation of aluminum in reaction with hot water // Journal of Alloys and Compounds. 2016. Vol. 679. P. 364-374. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.04.038. (In Engl.).

7. Ching-Yuan Ho. Hydrolytic reaction of waste aluminum foils for high efficiency of hydrogen generation // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42, no. 31. P. 19622–19628. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.104. (In Engl.).

8. Kaur P., Verma. G. A critical assessment of aluminum-water reaction for on-site hydrogen-powered applications // Materials Today Energy. 2024. Vol. 40. 2024101508. DOI: 10.1016/j. mtener.2024.101508. (In Engl.).

9. Deng-Hui X., Yu-Ping Q., Ping W. Rapid hydrogen generation from the reaction of aluminum/activated charcoal composite with alkaline solution // Journal of Alloys and Compounds. 2023. Vol. 947. 169611. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.169611. (In Engl.).

10. Trowell K. A., Goroshin S., Frost D. L., Bergthorson J. M. The use of supercritical water for the catalyst-free oxidation of

coarse aluminum for hydrogen production // Sust. Energy Fuels. 2020. Vol. 4, no. 11. P. 5628-5635. DOI: 10.1039/d0se00996b. (In Engl.).

11. Kravchenko O. V., Semenenko K. N., Bulychev B. M., Kalmykov K. B. Activation of aluminum metal and its reaction with water // Journal of Alloys and Compounds. 2005. Vol. 397. P. 58-62. DOI: 10.1016/j.jallcom.2004.11.065. (In Engl.).

12. Parmuzina A. V., Kravchenko O. V. Activation of aluminium metal to evolve hydrogen from water // Int. J. Hydrogen Energy. 2008. Vol. 33. P. 3073 – 3076. DOI: 10.1016/j. ijhydene.2008.02.025. (In Engl.).

13. Huang X., Gao T., Pan X. [et al.]. A review: Feasibility of hydrogen generation from the reaction between aluminum and water for fuel cell applications // Journal of Power Sources. 2013. Vol. 229. P. 133-140. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.12.016. (In Engl.).

14. Dawood F., Anda M., Shafiullah G. M. Hydrogen production for energy: An overview // Int. J. Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45. P. 3847-3869. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.059. (In Engl.).

15. Liang G.-qiang, Liu Y., Cheni P.-fei [et al.]. Hydrogen production via hydrolysis of Al-eutectic GaInSn composites // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2023. Vol. 33. P. 2751-2760. DOI: 10.1016/S1003-6326(23)66295-8. (In Engl.).

16. Zhu L., Zou M., Zhang X. [et al.]. Enhanced hydrogen generation performance of Al-Rich alloys by a melting-mechanical crushing-ball milling method // Materials. 2021. Vol. 14. 7889. DOI: 10.3390/ma14247889. (In Engl.).

17. Wang H., Chang Y., Dong Sh. [et al.]. Investigation on hydrogen production using multicomponent aluminum alloys at mild conditions and its mechanism // Int. J. Hydrogen Energy. 2013. Vol. 38, no. 3. P. 1236-1243. DOI: 10.1016/j. ijhydene.2012.11.034. (In Engl.).

18. Nizovskii A. I., Kulikov A. V., Trenikhin M. V., Bukhtiyarov V. I. Material for compact hydrogen cartridges based on commercial aluminium alloys activated by Ga-In eutectics // Catalysis for Sustainable Energy. 2017. Vol. 4. P. 62-66. DOI: 10.1515/cse-2017-0010. (In Engl.).

19. Zhuk A. Z., Shkolnikov E. I., Borodina T. I. [et al.]. Aluminium — water hydrogen generator for domestic and mobile application // Applied Energy. 2023. Vol. 334. 120693. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120693. (In Engl.).

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК. СЕРИЯ АВИАЦИОННО-РАКЕТНОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ ТОМ 8 Nº 4 2024 OMSK SCIENTIFIC BULLETIN. SERIES AVIATION-ROCKET AND POWERENGINEERING VOL. 8 NO. 4 2024

20. Trenikhin M. V., Bubnov A. V., Kozlov A. G., Nizovskiy A. I., Duplyakin V. K. Proniknoveniye komponentov indiygalliyevogo splava v alyuminiy [The penetration of indiumgallium melt components into aluminum] // Zhurnal fizicheskoy khimii. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2006. Vol. 80, no. 7. P. 1262–1267. EDN: HUZPYN. (In Russ.).

21. Trenikhin M. V., Bubnov A. V., Nizovskiy A. I., Duplyakin V. K. Vzaimodeystviye evtektiki sistemy In – Ga c alyuminiyem i yego splavami [Chemical interaction of the In-Ga eutectic with al and al-base alloys] // Neorganicheskiye materialy. *Inorganic Materials*. 2006. Vol. 42, no. 3. P. 298–303. EDN: HSWENP. (In Russ.).

22. Rehbinder P. A., Shchukin E. D. Surface phenomena in solids during deformation and fracture processes // Progress in Surface Science. 1972. Vol. 3, no. 2. P. 97 – 104. DOI: 10.1016/0079-6816(72)90011-1. (In Engl.).

NIZOVSKII Alexander Ivanovich, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Federal Research Center «Boreskov Institute of Catalysis SB RAS», Novosibirsk. SPIN-code: 9234-3580 AuthorID (RSCI): 142637 AuthorID (SCOPUS): 9337056300 Correspondence address: alexniz@inbox.ru

BELKOVA Sofya Valentinovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of

Industrial Ecology and Safety Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk. SPIN-code: 3650-6466 AuthorID (RSCI): 762141 AuthorID (SCOPUS): 57190973082 AuthorID (SCOPUS): 57203587299 Correspondence address: sofya_belkova@mail.ru SHTRIPLING Lev Ottovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Industrial Ecology and Safety Department, OmSTU, Omsk. SPIN-code: 9285-8565 AuthorID (RSCI): 157285 ORCID: 0000-0002-2622-9108 AuthorID (SCOPUS): 56504001800 Correspondence address: losht59@mail.ru

For citations

Nizovskii A. I., Belkova S. V., Shtripling L. O. Aluminumbased material for use in hydrogen cartridges of the hydrogen fuel cell supply system // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2024. Vol. 8, no. 4. P. 39-45. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-39-45.

Received July 25, 2024.

© A. I. Nizovskii, S. V. Belkova, L. O. Shtripling