

## ВОДОРОДНЫЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ\*

**Ю.Н. Шалимов<sup>1</sup>, А.В. Астахов<sup>2</sup>, Н.В. Брысенкова<sup>3</sup>, А.В. Руссу<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

д. 14, Московский пр-т, Воронеж, 394026, Россия

e-mail: shalimov\_yn@mail.ru, arussu@mail.ru

<sup>2</sup>ГЛИЦ им. В.П.Чкалова, Министерство Обороны  
д. 14, Колымажный переулок, Москва, 119019, Россия

тел.: +7 (495) 696-12-32; e-mail: astah184@mail.ru

<sup>3</sup>АО «Созвездие»

д. 14, ул. Плехановская, Воронеж, 394018, Россия

тел.: +7 (473) 252-12-59; e-mail: ng\_v@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.19-21.062-071

Заключение совета рецензентов: 10.07.18 Заключение совета экспертов: 16.07.18 Принято к публикации: 20.07.18

Рассмотрены вопросы, связанные с перспективой использования топливных элементов в качестве источника энергии летательных аппаратов. Впервые для этих целей предложено использовать системы аккумулирования водорода на основе алюмогидридов как наиболее безопасных и эффективных по энергетической емкости, температуре экстракции. Технологии получения материалов на основе алюмогидридов могут быть перенесены из производства электролитических конденсаторов. Приведен краткий сравнительный анализ существующих видов топлива и известных форм хранения топлива. Дано обоснование по применению алюминия для аккумулирования водорода в форме металлогидрида. Наиболее подробно рассмотрен вопрос анодной обработки алюминия, поскольку для формирования гидрида алюминия должна быть использована фольга с высокой степенью развития поверхности. Такая степень развития поверхности материала позволяет осуществлять процессы быстрой зарядки материала ионами водорода, которые участвуют в образовании алюмогидридов. Наличие пор на поверхности фольги обеспечивает повышение степени адаптации функциональных свойств накопителя под режимы работы энергоустановки. Данное свойство обусловлено возможностью гибкого управления процессом формирования структуры пор заданной морфологии, обеспечивающих необходимый редуцирующий эффект. Представлены основные позиции, определяющие особенность анодной обработки алюминиевой фольги, в которых рассмотрены физико-химические свойства как чистого алюминия, так и его соединений: оксидов и гидридов, – а также их поведение в условиях электрохимических реакций. Указаны возможности протекания параллельных процессов на электродах: окисление и восстановление воды, – что является необходимым условием обеспечения самосогласованных процессов при обработке алюминия (экспериментальные данные получены с помощью установок внутреннего трения). Показаны перспективы применения алюмогидридов в авиации и приведено обоснование решения энергетических проблем в авиации на основе углубления и расширения масштаба исследований технологий водородной энергетики. Результаты работы могут быть использованы в технологиях объемного хранения и транспорта электрической энергии.

Ключевые слова: топливный элемент; водород; гидрид алюминия; дефекты структуры; накопитель энергии; летательные аппараты.

## HYDROGEN POWER PLANTS FOR AIRCRAFT

**Yu.N. Shalimov, A. V. Astakhov, A. V. Russu, N. V. Brysenkova**

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University

14 Moskovsky Av., Voronezh, 394026, Russia

e-mail: shalimov\_yn@mail.ru, arussu@mail.ru

<sup>2</sup>GLITS them. V.P. Chkalov, Ministry of Defense,

14 Kolymazhnyy Lane, Moscow, 119019, Russia

tel.: +7 (495) 696-12-32, e-mail: astah184@mail.ru

\*Шалимов Ю.Н., Астахов А.В., Брысенкова Н.В., Руссу А.В. Водородные энергоустановки для летательных аппаратов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;19-21:62-71.

<sup>3</sup>JSC "Constellation"14 Plekhanovskaya St., Voronezh, 394018, Russia  
tel: +7 (473) 252-12-59; e-mail: ng\_v@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.19-21.062-071

Referred 10 July 2018 Received in revised form 16 July 2018 Accepted 20 July 2018

The paper considers the prospects of using fuel cells as a source of energy for aircraft. For their supply, it is suggested to use hydrogen accumulation systems based on aluminum hydrides which are the most safe and efficient in terms of energy capacity, extraction temperature. The technologies for obtaining materials based on aluminum hydrides can be transferred from previously developed technologies of the production of electrolytic capacitors. The brief comparative analysis of existing fuels and forms of fuel storage is given. The paper substantiates the use of aluminum for the accumulation of hydrogen in the form of metal hydride. The most detailed consideration is given to the anodic treatment of aluminum, because the formation of aluminum hydride needs a foil with a high degree of surface development. A high degree of development of the material surface makes it possible to carry out processes of rapid charging of the material with hydrogen ions in the formation of aluminum hydrides. The presence of pores on the foil surface provides an increase in the degree of adaptation of the functional properties of the drive to the operating modes of the power plant. This property is due to the ability to flexibly control the process of the pore structure formation of a given morphology providing the necessary reduction effect. The paper presents the basic positions determining the peculiarity of the anodic processing of aluminum foil. These positions deal with the physicochemical properties of the pure aluminum and its compounds, oxides and hydrides, and their behavior under the conditions of the electrochemical reactions. Moreover, the paper indicates the possibility of parallel processes on electrodes: the oxidation and reduction of water, which are necessary condition for ensuring the self-consistent processes in the processing of aluminum. The experimental data have been obtained using the internal friction devices. We have shown the prospects of using of the aluminum hydrides in aviation and substantiated the solution to energy problems in aviation on the basis of deepening and expanding the scale of research into hydrogen energy technologies. The results of the work can be used for the technology of volumetric storage and transport of electric energy.

Key words: fuel cell; hydrogen; aluminum hydride; structural defect; energy storage; aircraft.

Юрий Николаевич  
Шалимов  
Yury Shalimov**Сведения об авторе:** д-р техн. наук, профессор, эксперт в области водородной энергетики.**Награды:** Медаль за освоение целинных и залежных земель (1956 г.); Медаль ветерана труда (1985 г.).**Образование:** Воронежский политехнический институт (1964 г.).**Область научных интересов:** теплофизика и теплофизические процессы; водородная и альтернативная энергетика; энергосберегающие технологии; завершённые циклы переработки отходов промышленных и сельскохозяйственных производств; инновационные технологии в научных исследованиях.**Публикации:** более 500, включая 2 монографии, 10 учебно-методических пособий, 25 патентов.

h-index 7

**Сведения об авторе:** соискатель ученой степени канд. техн. наук, старший инженер-испытатель, Войсковая часть 15650.**Награды:** медаль Министерства обороны Российской Федерации «За достижения в области развития инновационных технологий».**Образование:** Иркутский военный авиационный инженерный институт (ИВАИИ, 2003 г.); Российская академия народного хозяйства и госслужбы при Президенте РФ (РАНХиГС при Президенте РФ, 2016 г.).**Область научных интересов:** испытание агрегатов летательных аппаратов.**Information about the author:** D. Sc. in Engineering, Professor, Chief Researcher, the Laboratory for Innovative Design and High Technology at the Aircraft Engineering Department of Voronezh State Technical University.**Education:** Voronezh Polytechnic Institute, 1964.**Research interests:** thermophysics and thermophysical processes; hydrogen and alternative energy; energy saving technologies; completed recycling cycles of industrial and agricultural production; innovative technologies in researches.**Publications:** more than 500, including 2 monographs, 10 teaching aids, 25 patents.**Information about the author:** Postgraduate, Senior Test Engineer GLITS them. V.P. Chkalov.**Education:** Irkutsk Military Aviation Engineering Institute (IVAI, 2003); Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation (RANEPА under the President of the Russian Federation, 2016).**Research interests:** testing of aircraft units.



Наталья Викторовна  
Брысенкова  
Natalia Brysenkova

**Сведения об авторе:** начальник отдела экологической безопасности и охраны труда АО «Концерн “Созвездие”».

**Образование:** магистратура химического факультета, Воронежский государственный университет (2006 г.).

**Область научных интересов:** водородная энергетика; накопители водорода.

**Публикации:** 13.

**Information about the author:** Head of the Department of Environmental Safety and Labor Protection, JSC “Constellation”.

**Education:** Master's Degree in Chemistry, Voronezh State University.

**Research interests:** hydrogen energy; hydrogen storage.

**Publications:** 13.



Александр Викторович  
Руссу  
Alexander Russu

**Сведения об авторе:** инженер-исследователь научно-исследовательского сектора кафедры «Самолетостроение», Воронежский государственный технический университет.

**Образование:** Воронежский государственный университет, физический факультет (1998 г.).

**Область научных интересов:** водородная и возобновляемая энергетика.

**Публикации:** 18.

**Information about the author:** Research Engineer at the Research Sector of the Aircraft Department, Voronezh State Technical University.

**Education:** Voronezh State University, Faculty of Physics, 1998.

**Research interests:** hydrogen and renewable energy.

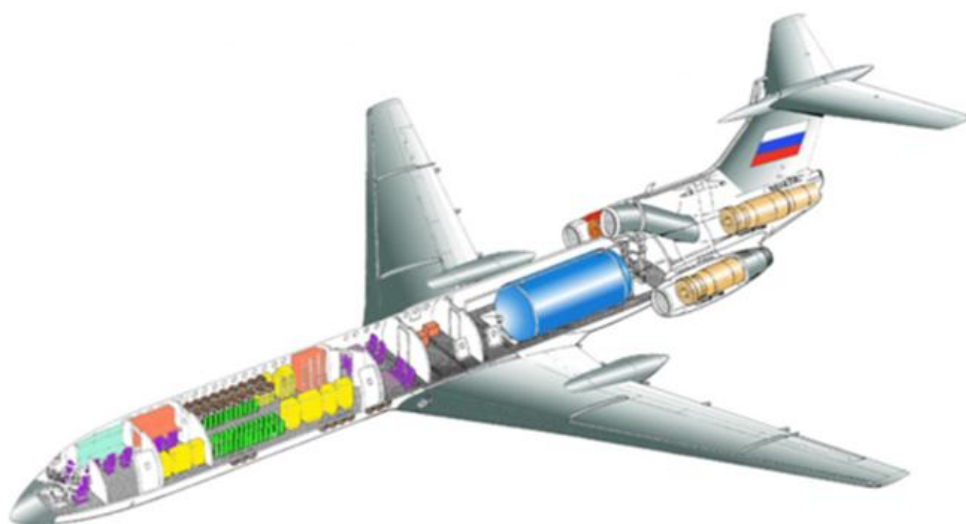
**Publications:** 18.

## 1. Введение

Водород является энергетически наиболее эффективным в сравнении с другими источниками энергии для питания энергоустановок летательных аппаратов. Традиционно в качестве систем преобразования энергии топлива применяют топливные элементы, обладающие невысоким коэффициентом преобразо-

вания, поэтому перспектива использования водорода предполагает более широкое применение других типов преобразования, например, прямого преобразования тепловой энергии в электрическую.

В ОКБ им. А.Н. Туполева был разработан лайнер Ту-155 с водородными двигателями на сжиженном криостатном водороде. На рис. 1 приведена схема расположения основных узлов и агрегатов лайнера Ту-155.



**Рис. 1** – Компоновка основных узлов и агрегатов на лайнере Ту-155

**Fig. 1** – The layout of the main units and units on the Tu-155 liner

Специфика компоновки продиктована энергетическими характеристиками сжиженного водорода. При высоких значениях теплотворной способности (120 МДж/кг) газообразный водород имеет малый удельный вес (0,09 кг/м<sup>3</sup>), поэтому необходимое ко-

личество топлива потребует большого объема топливной гондолы, а значит, решение по использованию сжиженного криостатного водорода будет логичным. Таким образом, преимущество топлива по параметру теплотворной способности сводится к

минимуму ввиду значительного увеличения объема топлива на борту лайнера. Кроме того, подготовка лайнера к полету сопряжена с определенными сложностями оперативной подготовки (наличие необходимого объема сжиженного водорода, определенные сложности с заправкой), что может привести к снижению уровня безопасности полета.

В данной статье впервые рассмотрены технологии, позволяющие значительно повысить безопасность полета благодаря следующим решениям: отказ от баллонного и криостатного способов хранения водорода; повышение энергетической емкости системы хранения водородного топлива; снижение стоимости производства и утилизации основных компонентов водородных аккумуляторов.

По мнению авторов данной статьи, именно жидкофазный водород может быть использован как самое эффективное энергетическое топливо. В технологиях водородной энергетики известны и другие широко представленные в литературе варианты. Так, в различных исследованиях рассматриваются: основные положения по теории хранения и использования водорода в системах энергетики [1–4]; технологии производства и работы топливных элементов [5–8]; практические приложения по использованию

водорода в промышленных целях [9–10]; применение топливных элементов в авиации [11]; особенности зарубежных технологий для систем хранения водорода [12–16]; возможности нанотехнологий в решении задач водородного хранения [17–18]. Например, принятый в эксплуатацию на многих установках способ металлгидридного хранения водорода показал вполне приемлемые в промышленности результаты [1]. Однако подход, предложенный в настоящей статье, позволяет рассматривать по-новому задачу хранения и транспортировки водорода, в том числе в топливных элементах.

Основные задачи, поставленные в работе, состоят в получении экспериментальных данных для решения задач по обеспечению высокого ресурса систем аккумулирования в условиях их безопасной эксплуатации и повышению эффективности систем преобразования различных видов энергии в электрическую.

Новое направление исследований базируется на более ранних работах по изучению структуры электролитического хрома [19, 20]. Главным аспектом развития этого направления явились выводы, сделанные в работе Э.А. Гранкина [21], о том, что водород наиболее эффективно взаимодействует с атомами, имеющими дефекты структуры.

Список обозначений	
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
Al	Атом алюминия
<i>c</i>	Плотность
<i>E</i>	Потенциал
<i>e</i>	Электрон
H	Атом водорода
Me	Обобщенное название для всех типов металлов
<i>N</i>	Индекс Кларка (содержание компонента в килограммах на тонну породы в земной коре)
<i>n</i>	Число переходящих электронов
O	Атом кислорода
3D	Условное обозначение технологии объемного хранения

## 2. Теоретические предпосылки к созданию систем аккумулирования водорода

Наибольшую вероятность образования гидридов имеют щелочные и щелочноземельные металлы. Кроме того, высокую вероятность взаимодействия с водородом демонстрируют редкоземельные металлы, а также триады железа и их электронные аналоги (благородные металлы). Работы по использованию систем гидридного хранения водорода активно проводились в основном только для металлов платиновой группы. Однако все металлы, формируемые методом гальваностегии, аккумулируют на 2–3 порядка больше водорода, чем металлы, полученные металлургическим способом. Этот факт подтверждает высказанное в работах [21, 22] положение о том, что водород активно взаимодействует с атомами метал-

лов по дефектам структуры. На рис. 2 приведена периодическая система элементов Д.И. Менделеева, где вероятность взаимодействия атомов металла с водородом пропорциональна интенсивности фона элемента.

Повышение эффективности образования гидридов с электролитическими металлами и сплавами можно объяснить также совмещенными во времени процессами на катоде восстановления катиона металла и протона (иона водорода), что может быть представлено ниже приведенной схемой:



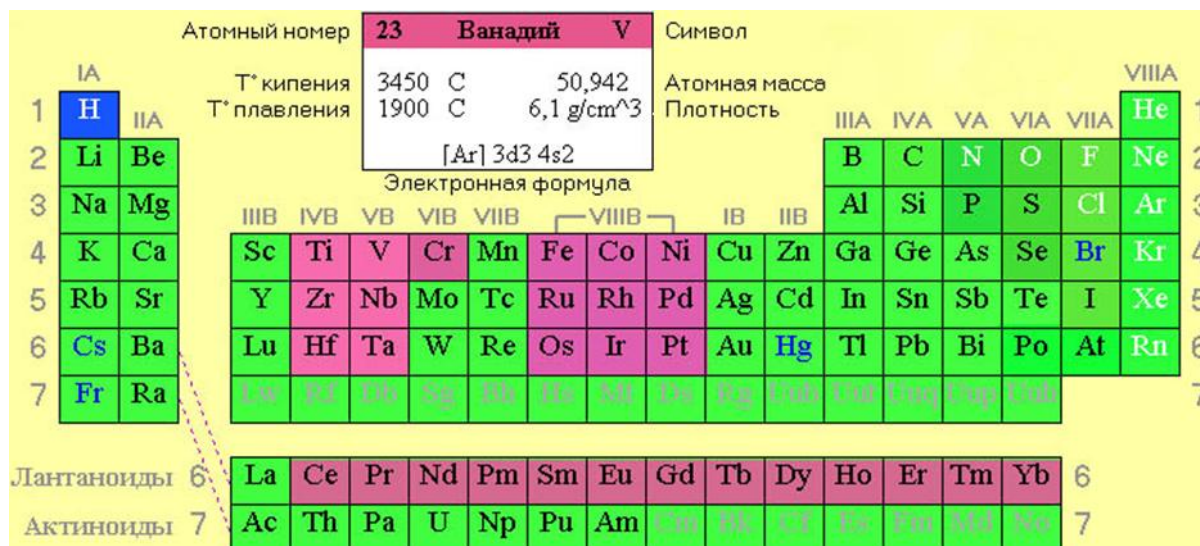


Рис. 2 – Вероятность взаимодействия водорода с атомами металлов  
Fig. 2 – Probability of hydrogen interaction with metal atoms

На катоде протекает процесс восстановления молекулярного водорода по схеме  $H^0 + H^0 \rightarrow H_2$ . Но даже при относительно малых временах дезинтеграции свободных атомов водорода вероятность образования гидридов на катоде велика, что подтверждено многочисленными экспериментальными исследованиями [см., например, 20]. Была установлена пропорциональная взаимосвязь между размером зерен гальванопокрытий и содержанием водорода, погло-

щаемого в процессе электролиза. В более поздних работах [22] было обнаружено влияние концентрации и природы лигандов в сплавах на энергию связи «металл – водород».

Особое внимание исследователей должны привлекать материалы с высокой степенью доступности, так как за ними будущее новой энергетики. На рис. 3 приведена номограмма содержания металлов в земной коре (критерий Кларка).

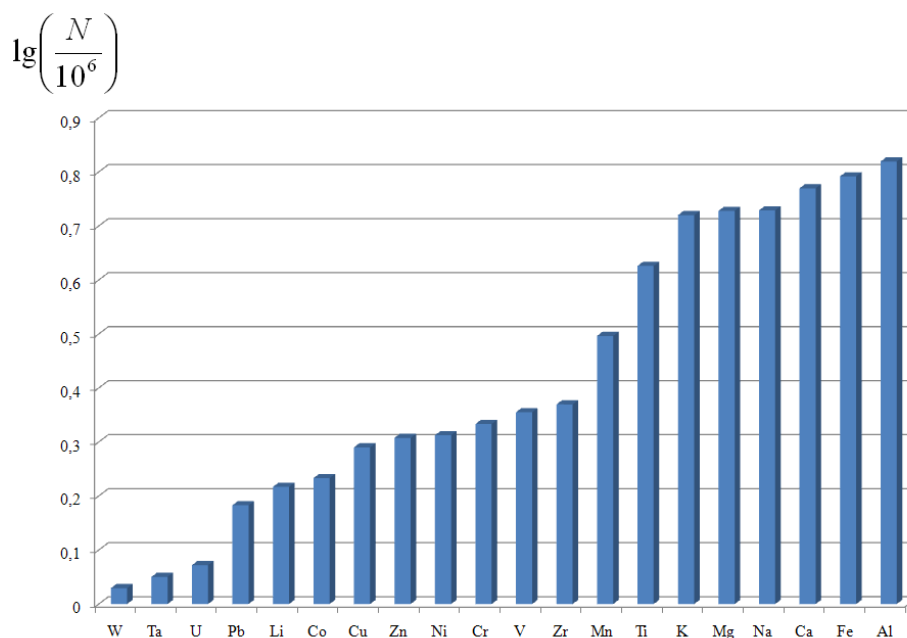


Рис. 3 – Номограмма содержания в земной коре металлов (критерий Кларка) [15]  
Fig. 3 – Nomogram of abundance of metals in the Earth's crust (Clarke criterion) [15]

Анализ номограммы показал, что самым распространенным металлом на земле является алюминий

(Al). Неудивительно, что именно к алюминию проявляют наибольший интерес многие исследователи.



Уникальность свойств этого металла состоит, прежде всего, в его высокой склонности к пассивации. Электронный потенциал алюминия относительно водородного электрода  $E_{Al^{3+}/Al^0} = -1,66$  В. Следует указать,

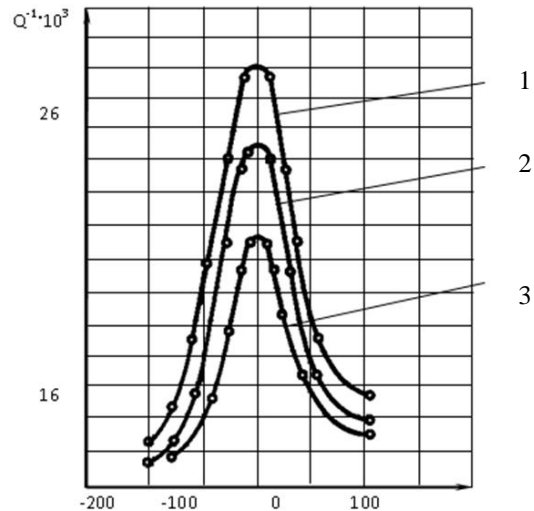
что потенциалы ионизации нейтрального атома сильно различаются по энергиям:  $E_1 = 5,98$  эВ;  $E_2 = 18,83$  эВ;  $E_3 = 28,44$  эВ. Такое отклонение в значениях потенциалов ионизации свидетельствует о сложности перехода атома алюминия в ион  $Al^{3+}$ , электронная структура которого соответствует инертному газу неону. Помимо этого, алюминий имеет аномально большое значение энергии гидратации, при этом образуется устойчивый комплексный ион  $[Al(H_2O)_6]^{3+}$ . Образующаяся координационная связь носит мультиплетный характер и обладает высокой устойчивостью. По вопросу механизма анодного окисления алюминия пока не существует единого консенсуса. Вероятно, это связано с недостаточными экспериментальными данными по исследованию механизма реакций в двойном электрическом слое [20].

### 3. Экспериментальная часть

Для проведения эксперимента была разработана специальная методика и измерительные датчики с необходимой аппаратурой. Реальная пора в структуре алюминия отличается от идеализированной проходными сечениями по глубине поры и толщиной стенок. Но основным фактом нестабильности процесса экстракции водорода является непостоянство температуры. Несмотря на высокое значение коэффициента теплопроводности для алюминия, газодинамическое сопротивление выводных каналов изменяется вследствие развития режимов турбулентности при большом потреблении водорода. Все перечисленные варианты истечения водорода усиливают редуцирующий эффект.

Известно, что наличие дефектов в структуре металла увеличивает вероятность взаимодействия атомов металла с водородом. Результаты эксперимента многократно подтвердили этот вывод. В работе применялся метод внутреннего трения. Особенность установок подробно описана в методиках эксперимента [21, 22], где по кривой температурной зависимости внутреннего трения  $Q-1(T)$  определяется положение пика внутреннего трения, у которого амплитуда пропорциональна количеству растворенного в металле водорода, а по полуширине пика – энергия связи «металл – водород» в этом гидридном соединении.

На рис. 4 показана зависимость внутреннего трения электролитического хрома, полученного из низковалентных сернокислых электролитов хромирования.



**Рис. 4** – Зависимость внутреннего трения от температуры для электролитического хрома, полученного из сернокислых электролитов: 1 – импульсный режим:  $i_k = 35$  А/дм<sup>2</sup>, время импульса 15 сек, время паузы 10 сек; 2 – импульсный режим:  $i_k = 35$  А/дм<sup>2</sup>, время импульса 15 сек, время паузы 5 сек; 3 – непрерывный режим:  $i_k = 35$  А/дм<sup>2</sup>

**Fig. 4** – Dependence of internal friction on temperature for electrolytic chromium obtained from sulphate electrolytes: 1 – pulse mode:  $i_k = 35$  А / дм<sup>2</sup>, pulse time is 15 sec., pause time is 10 sec.; 2 – pulse mode:  $i_k = 35$  А / дм<sup>2</sup>, pulse time is 15 sec., pause time is 5 sec.; 3 – continuous mode:  $i_k = 35$  А / дм<sup>2</sup>

Амплитуда пика внутреннего трения (пик Снука) пропорциональна количеству поглощаемого водорода, а полуширина этого пика характеризует энергию связи «металл – водород», то есть фактически определяет температуру экстракции водорода из структуры металлов. Такая полнота информации о состоянии вещества ставит метод внутреннего трения в разряд наиболее перспективных в области исследования тонкой структуры вещества.

### 4. Результаты и их обсуждение

Принципиально важным для всех представляемых к обсуждению механизмов необходимо принять следующее:

- для металлического алюминия невозможен непосредственный контакт с водным раствором электролита;
- число пор на единицу поверхности главным образом определяется плотностью тока (не может носить случайный характер);
- неравномерный характер распределения плотности тока по участкам электрода, несмотря на малое сопротивление электролита;
- возможность проявления ионом  $Al^{3+}$  свойств комплексообразователя;
- значение потенциала анода при рабочих плотностях тока электроотрицательно [21–23].

Эти выводы проверены на промышленных агрегатах анодного травления алюминиевой фольги при



производстве электролитических конденсаторов (Воронежский завод радиодеталей) [23]. Таким образом, анодное травление алюминиевой фольги может применяться для создания структур с большой степенью развития поверхности при реализации технологии электрохимического аккумулирования водорода.

Для того чтобы дать достоверное описание и обоснование механизма анодного растворения алюминия, необходимо подтвердить возможность осуществления на аноде двух сопряженных процессов: окисление алюминия и окисление воды. Предполагаемые схемы процессов приведены далее:



Вероятность процесса разложения воды на аноде можно обосновать с помощью рис. 5. Здесь представлено фото электрода (анода) из алюминиевой фольги, на котором четко видно выделение газа, который может быть только кислородом.

**Рис. 5** – Образование газообразного кислорода на аноде при окислении алюминия

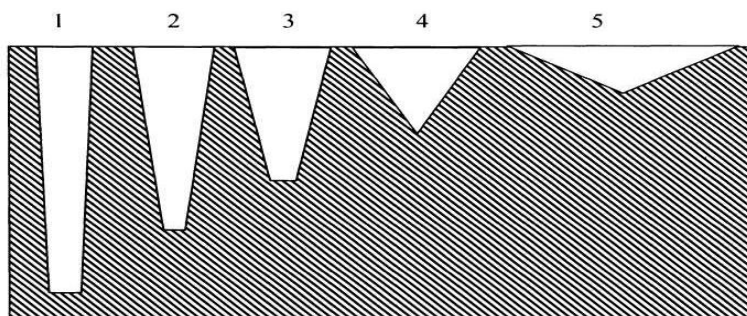
**Fig. 5** – Formation of gaseous oxygen at the anode during the oxidation of aluminum



Ряд исследователей считает, что определяющую роль в процессе анодной обработки играют ионы  $\text{Cl}^-$ , в конечном итоге предлагая в качестве основного процесса образования пор питтинговую коррозию [24]. При этом в эксперименте используются концентрации хлорида натрия, на порядок превосходящие значения, применяемые на производстве. В работах [19, 22] мы показали, что оптимальная концентрация  $\text{NaCl}$  лежит в пределах  $15 \div 18 \%$  по весу. Снижение,

как и повышение концентрации электролита уменьшает степень развития поверхности.

Поскольку вопрос образования пор в структуре металла является основным, этот процесс должен управляться главным параметром электрохимического процесса – плотностью анодного тока (наиболее подробно рассмотрен в работе [22]). На рис. 6 представлен фрагмент формирования поры в структуре алюминия.



**Рис. 6** – Фрагмент формирования поры в структуре алюминия.

Плотность тока: 1 – 1 А/дм<sup>2</sup>; 2 – 2 А/дм<sup>2</sup>; 3 – 3 А/дм<sup>2</sup>; 4 – 4 А/дм<sup>2</sup>; 5 – 5 А/дм<sup>2</sup>

**Fig. 6** – Fragment of pore formation in the structure of aluminum.  
Current density: 1 – 1 A / dm<sup>2</sup>; 2 – 2 A/dm<sup>2</sup>; 3 – 3 A/dm<sup>2</sup>; 4 – 4 A/dm<sup>2</sup>; 5 – 5 A/dm<sup>2</sup>

Номерами отмечено условное увеличение плотности тока по диаметру поры. Фактически в процессе формирования поры сопряженными оказываются не только электронные процессы на аноде, но и химическая реакция обмена. При этом процесс осуществляется в режиме самосогласования.

В общенаучной литературе не описаны методы, позволяющие оценить кинетику этих самосогласованных процессов, поскольку на их скорость оказы-

вают влияние поля различной природы и интенсивности. В частности, основополагающим процессом является тепловой эффект Соре, в результате которого ионы раствора с меньшей массой диффундируют в зону с более высокой температурой, а с большей массой – в зону с более низкой температурой. В работе [19] были подробно рассмотрены вопросы влияния полей различной природы на кинетику электрохимических реакций. Однако новые

задачи, сформулированные в рамках поиска более эффективных систем аккумуляции энергии, побуждают искать нетрадиционные пути для их решения.

Появление потребности в аккумуляторах энергии с высокой энергетической емкостью определяет расширение спектра исследований именно в этом направлении. Кардинальное решение проблемы просматривается в переходе от системы планарного хранения к технологии 3D-накопления. Фактически наблюдается очередной виток развития технологий. В связи с этим предстоит решить непростые задачи по формированию структур с высокой степенью доступности электролита к различным участкам поверхности, что является необходимым условием для осуществления электрохимической технологии получения алюмогидридов. Эта задача – полная аналогия технологического процесса анодной обработки алюминиевой фольги в производстве электролитических конденсаторов.

Вторая более сложная задача состоит в обеспечении возможности экстракции водорода в молекулярной форме из структуры металла. Исходя из предъявляемых к эффективным накопителям энергии требований, идеализированный вариант конструкции электрода накопителя может быть представлен соответствующими фрагментами (рис. 7).

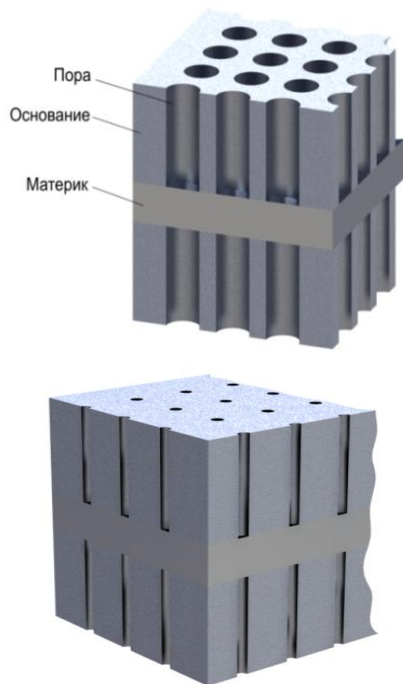


Рис. 7 – Элементы конструкции электрода идеализированной поры

Fig. 7 – Elements of the electrode design of the idealized pore

Энергетика алюмогидридов является перспективной для авиации. Сравнение стехиометрического состава различных гидридов свидетельствует о вы-

сокой степени аккумуляции водорода гидридом алюминия. Характерной особенностью строения молекулы  $\text{AlH}_3$  является формирование объемной структуры, о чем свидетельствует малая плотность гидрида ( $c = 1\,450\text{ кг/м}^3$ ), при этом плотность чистого алюминия почти в два раза больше ( $c = 2\,700\text{ кг/м}^3$ ). Перед электрохимической технологией формирования такой объемной структуры возникает задача: формирование и сохранение канала доставки электролита с последующей операцией экстракции и транспорта водорода. Отдельного внимания заслуживает проблема изучения деформационно-структурных изменений в металлах в процессе формирования металлгидридов.

## 5. Заключение

Теоретические и экспериментальные результаты исследования механизма анодного окисления алюминиевой фольги позволяют с помощью метода электрохимической технологии формировать структуру электродного материала для аккумуляции водорода в форме металлгидрида.

Предложена технология процесса безопасного аккумуляции водорода (аккумуляция без давления, малозатратное по энергии извлечение из структуры металла).

Данный способ аккумуляции водорода создает предпосылки для оснащения летательных аппаратов более эффективными источниками энергии (малый вес при более высокой энергетической емкости).

## Список литературы

- [1] Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: Справ. изд. / Д.Ю. Гамбург, В.П. Семенов, Н.Ф. Дубровкин, Л.Н. Смирнова; Под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубровкина. – М.: Химия, 1989. – 672 с.
- [2] Шпильрайн, Э.Э. Введение в водородную энергетику / Э.Э. Шпильрайн, С.П.Мальшенко, Г.Г. Кулешов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 264 с.
- [3] Марченко, О.В. Конкурентоспособность системы производства водорода и использования топливных элементов / О.В. Марченко, С.В. Соломин // Science Time. – 2016. – № 7 (31). – С. 135–140.
- [4] Дуников, Д.О. Водородные энергетические технологии. В сборнике: Водородные энергетические технологии / Материалы семинара лаборатории ВЭТ ОИВТ РАН: сборник научных трудов. Редакция: Д.О. Дуников (отв. ред.) [и др.]. – Москва, 2017. – С. 5–21.
- [5] Филиппов, С.П. Технично-экономические и маркетинговые исследования долгосрочных перспектив применения в России энергоустановок на базе топливных элементов. В книге: Стационарные энергетические установки с топливными элементами: материалы, технологии, рынки / Бредихин С.И., Голодницкий А.Э., Дрожжин О.А., Истомин С.Я.,



Ковалевский В.П., Филиппов С.П. – Москва, 2017. – С. 325–377.

[6] Фатеев, В.Н. Коррозионно-стойкие электроды/коллекторы тока для анодов электролизных ячеек с твердым полимерным электролитом / В.Н. Фатеев [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 25–27. – С. 88–99.

[7] Тарасевич, М.Р. Сравнительные характеристики катодов с различными каталитическими системами в водород-кислородных и водород-воздушных топливных элементах с протонпроводящим полимерным электролитом / М.Р. Тарасевич [и др.] // Электрохимия. – 2017. – № 7. – С. 804–812.

[8] Шмелев, В.М. О методах генерации водорода для питания высокотемпературных топливных элементов / В.М. Шмелев [и др.] // Химическая физика. – 2017. – Т. 36. – № 5. – С. 38–46.

[9] Дмитриев, А.Л. Водородная заправочная станция на основе установки получения водорода гидротермальным методом окисления промышленных порошков алюминия / А.Л. Дмитриев, В.К. Иконников // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 10–12. – С. 75–85.

[10] Огорокова, Н.С. Оценка энергетических характеристик комбинированной энергетической установки гидронный химический источник тока – кислородно-водородный электрохимический генератор / Н.С. Огорокова [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2017. – № 1. – С. 65–73.

[11] Яновский, Л.С. Твердоокисидные топливные элементы как основа для создания авиационных двигателей нового поколения / Л.С. Яновский [и др.] // Тепловые процессы в технике. – 2017. – № 1. – С. 2–6.

[12] Ouyang, L. Hydrogen storage and electrochemical properties of pr, nd and co-free  $\text{La}_{13.9}\text{Sm}_{24.7}\text{Mg}_{1.5}\text{Ni}_{58\text{at}\%}\text{Zr}_{0.14}\text{Ag}_{0.07}$  alloy as a nickel-metal hydride battery electrode / L. Ouyang [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 735. – P. 98–103.

[13] Nakagawa, Y. Doping effect of nb species on hydrogen desorption properties of  $\text{AlH}_3$  / Y. Nakagawa [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 734. – P. 55–59.

[14] Handbook of Hydrogen Energy / S.A. Sherif, D.Y. Goswami, E.K. Stefanakos, A. Steinfeld (Eds.). – CRC Press, Boca Raton, 2014. – 1042 p.

[15] Alavi, S. Simulations of hydrogen gas in clathrate hydrates / S. Alavi, J.A. Ripmeester // Molecular Simulation. – 2017. – Vol. 43. – No. 10–11. – P. 808–820.

[16] Xiao, J. Lumped parameter simulation of hydrogen storage and purification systems using metal hydrides / Xiao J. [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42. – No. 6. – P. 3698–3707.

[17] Afzal, M. Heat transfer techniques in metal hydride hydrogen storage: a review / M. Afzal, R. Mane, P. Sharma // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42. – No. 52. – P. 30661–30682.

[18] Shervani, S. Multi-mode hydrogen storage in nanocontainers / S. Shervani [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42. – No. 38. – P. 24256–24262.

[19] Шалимов, Ю.Н. Оптимизация электрохимического процесса обработки алюминиевой фольги в производстве конденсаторов / Ю.Н. Шалимов, И.М. Мандрыкина, Ю.В. Литвинов. – Воронеж: ВГТУ, 2000. – 343 с.

[20] Чертко, Н.К. Геохимия и экология химических элементов: Справочное пособие / Н.К. Чертко, Э.Н. Чертко. – Мн.: Издательский центр БГУ, 2008. – 140 с.

[21] Гранкин, Э.А. Влияние условий электролиза и термической обработки на внутреннее трение и коррозионную стойкость электролитического хрома. Дис. канд. технических наук. Воронеж: ВПИ, 1973. – 116 с.

[22] Шалимов, Ю.Н. Влияние Тепловых и электрических полей на электрохимические процессы при импульсном электролизе: Дис. на соискание ученой степени доктора технических наук / Ю.Н. Шалимов. – Воронеж, 2006. – 354 с.

[23] Алтухов, В.К. Интенсификация процесса травления алюминиевой фольги с помощью ультразвуковых колебаний / В.К. Алтухов, Ю.Н. Шалимов // Ультразвуковая техника. – 1966. – № 1. – С. 27–32.

[24] Невский О.И., Гришина Е.П. Барьерные пленки на алюминии: монография / . – Иваново, 2003. – 84 с.

## References

[1] Gamburg D.Yu., Semenov V.P., Dubrovkin N.F., Smirnova L.N. Vodorod. Svoistva, poluchenie, hranenie, transportirovanie, primeneniye: Sprav.izd.: D.Yu. Gamburga, N.F. Dubrovkina (Eds.). Moscow: Himiya Publ., 1989; 672 p. (in Russ.).

[2] Shpil'rajn E.E., Malyshenko S.P., Kuleshov G.G. Vvedeniye v vodorodnyuyu energetiku. Moscow: Ergoatomizdat Publ., 1984; 264 p. (in Russ.).

[3] Marchenko O.V., Solomin S.V. Konkurentosposobnost' sistemy proizvodstva vodoroda i ispol'zovaniya toplivnykh elementov. *Science Time*, 2016;7(31):135–140 (in Russ.).

[4] Dunikov D.O. Vodorodnye energeticheskie tehnologii. V sbornike: Vodorodnye energeticheskie tehnologii / Materialy seminarov laboratorii VEHT OIVT RAN: sbornik nauchnykh trudov. D.O. Dunikov (Ed) [et al.]. Moscow, 2017; pp. 5–21 (in Russ.).

[5] Bredihin S.I., Golodnickij A.EH., Drozhzhin O.A., Istomin S.YA., Kovalevskij V.P., Filippov S.P. Tehniko-ekonomicheskie i marketingovye issledovaniya dolgosrochnykh perspektiv primeneniya v Rossii energoustanovok na baze toplivnykh elementov. Book: Statsionarnye energeticheskie ustanovki s toplivnymi elementami: materialy, tehnologii, rynki. Moscow, 2017; pp. 325–377. (in Russ.)

[6] Fateev V.N., Alekseeva O.K., Porembskii V.I., Mihalev A.I., Nikitin S.M. Korrozionno-stoikie elektrody/kollektory toka dlya anodov elektroliznykh

yacheek s tverdym polimernym elektrolitom. *International Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017;25–27(237–239):88–99 (in Russ.).

[7] Tarasevich M.R., Bogdanovskaya V.A., Kuzov A.V., Radina M.V. Sravnitel'nye karakteristiki katodov s razlichnymi kataliticheskimi sistemami v vodorod-kislorodnyh i vodorod-vozdushnyh toplivnyh elementah s proton-provodyashchim polimernym elektrolitom. *Elektrokhimiya*, 2017;7:804–812 (in Russ.).

[8] Shmelev V.M., Arutyunov V.S., Yang H., Im Ch. O metodah generatsii vodoroda dlya pitaniya vysokotemperaturnykh toplivnykh elementov. *Himicheskaya fizika*, 2017;36(5):38–46 (in Russ.).

[9] Dmitriev A.L., Ikonnikov V.K. Vodorodnaya zapravochnaya stantsiya na osnove ustanovki polucheniya vodoroda gidrotermal'nym metodom okisleniya promyshlennykh poroshkov alyuminiya. *International Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017;10–12:75–85. (in Russ.).

[10] Okorokova N.S., Pushkin K.V., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. Otsenka energeticheskikh karakteristik kombinirovannoi energeticheskoi ustanovki gidronnyi himicheskii istochnik toka – kislorodno-vodorodnyi elektrohimicheskii generator. *Izvestiya Rossijskoi akademii nauk. Energetika*, 2017;1:65–73 (in Russ.).

[11] Yanovskij L.S., Baikov A.V., Aver'kov I.S., Lipilin A.S., Nikonov A.V. Tverdotsidnye toplivnye ehlementy kak osnova dlya sozdaniya aviatsionnykh dvigatelei novogo pokoleniya. *Teplovye processy v tehnikе*, 2017;1:2–6 (in Russ.).

[12] Ouyang L., Yang T., Zhu M., Wang H., Min D., Luo T., Xiao F., Tang R. Hydrogen storage and electrochemical properties of pr<sub>2</sub>nd and co-free La<sub>13.9</sub>Sm<sub>24.7</sub>Mg<sub>1.5</sub>Ni<sub>58a1.7</sub>Zr<sub>0.14</sub>Ag<sub>0.07</sub> alloy as a nickel-metal hydride battery electrode. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018;735:98–103.

[13] Nakagawa Y., Lee C.-H., Matsui K., Kousaka K., Isobe S., Hashimoto N., Yamaguchi S., Miyaoka H., Kojima Y., Ichikawa T. Doping effect of nb species on hydrogen de-sorption properties of AlH<sub>3</sub>. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018;734:55–59.

[14] Sherif S.A., Goswami D.Y., Stefanakos E.K., Steinfeld A. (Eds.) Handbook of Hydrogen Energy. CRC Press, Boca Raton, 2014; 1042 p.

[15] Alavi S., Ripmeester J.A. Simulations of hydrogen gas in clathrate hydrates. *Molecular Simulation*, 2017;43(10–11):808–820.

[16] Xiao J., Tong L., Yang T., Bjnard P., Chahine R. Lumped parameter simulation of hydrogen storage and purification systems using metal hydrides. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017; 42(6):3698–3707.

[17] Afzal M., Mane R., Sharma P. Heat transfer techniques in metal hydride hydrogen storage: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017;42(52):30661–30682.

[18] Shervani S., Gupta A., Balani K., Subramaniam A., Mukherjee P., Sen P., Mishra G., Sivakumar S., Illath K., Ajithkumar T.G. Multi-mode hydrogen storage in nanocontainers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017;42(38):24256–24262.

[19] Shalimov Yu.N., Mandrykina I.M., Litvinov Yu.V. Optimizatsiya elektro-himicheskogo protsessa obrabotki alyuminievoi fol'gi v proizvodstve kondensatorov. Voronezh: VGTU Publ., 2000; 343 p. (in Russ.).

[20] Chertko N.K., Chertko E.N. Geohimiya i ekologiya himicheskikh elementov: Spravochnoe posobie. Mn.: Izdatel'skij centr BGU Publ., 2008; 140 p. (in Russ.).

[21] Grankin E.A. Vliyanie uslovii elektroliza i termicheskoi obrabotki na vnutrennee trenie i korrozionnyu stoikost' elektroliticheskogo hroma: Thesis of Ph.D. in Engineering. Voronezh: VPI Publ., 1973; 116 p. (in Russ.).

[22] Shalimov Yu.N. Vliyanie Teplovykh i elektricheskikh polei na elektrohimicheskie protsessy pri impul'snom elektrolize: Thesis of D.Sc. in Engineering. Voronezh, 2006; 354 p. (in Russ.).

[23] Altuhov V.K., Shalimov Yu.N. Intensifikatsiya protsessa travleniya alyuminievoi fol'gi s pomoshch'yu ul'trazvukovykh kolebaniy. *Ul'trazvukovaya tehnika*, 1966;1:27–32 (in Russ.).

[24] Nevskii O.I., Grishina E.P. Bar'ernye plenki na alyuminii: monografiya. Ivanovo, 2003; 84 p. (in Russ.).

Транслитерация по BSI

