

Оптимизация намотки пленочного металлгидридного аккумулятора водорода с резистивным слоем и расчет его удельных энергетических характеристик

А. Г. Иванов^{1✉}, Д. А. Карпов¹, Е. С. Чебуков¹, М. И. Юрченков¹, В. О. Белько²

¹АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», ГК «Росатом», Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

✉ algivspb@mail.ru

Аннотация. Определялись энергетические характеристики разрабатываемого пленочного аккумулятора водорода на основе магния с никелем и проверялась работоспособность резистивного нагрева через тонкопленочный медный слой. Рассчитаны удельные энергетические характеристики пленочного аккумулятора водорода (на 40 нл запасаемого водорода) в зависимости от схемы намотки и толщины резистивного медного слоя. Удельная энергоемкость находится в диапазоне 450...479 Вт·ч/кг, объемная удельная энергоемкость – в диапазоне 626...651 Вт·ч/л для различных схем намотки (от 1 до 16 лент с гидридообразующим покрытием на одну ленту с резистивным слоем) и толщин резистивного слоя 0.5...2 мкм. Проведены тепловые расчеты носителя водорода и модели пленочного аккумулятора водорода. Магнетронным распылением нанесены длинномерные образцы с резистивным медным слоем. Проведены испытания смотанного образца с резистивным слоем, показавшие повышенное относительно массивного материала удельное электрическое сопротивление.

Ключевые слова: магнетронное распыление, пленочные металлгидриды, резистивный нагрев, тонкопленочный электрод, накопители водорода, водородная энергетика

Для цитирования: Оптимизация намотки пленочного металлгидридного аккумулятора водорода с резистивным слоем и расчет его удельных энергетических характеристик / А. Г. Иванов, Д. А. Карпов, Е. С. Чебуков, М. И. Юрченков, В. О. Белько // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 2. С. 5–18. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-5-18.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Study of Specific Energy Characteristics and Testing of a Film Hydrogen Storage Heated by a Resistive Copper Layer

A. G. Ivanov^{1✉}, D. A. Karpov¹, E. S. Chebukov¹, M. I. Yurchenkov¹, V. O. Belko²

¹JSC « D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», SC «Rosatom», Saint Petersburg, Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

✉ algivspb@mail.ru

Abstract. The purpose of the work was to determine the energy characteristics of the developed film hydrogen storage based on magnesium and nickel and test the functionality of resistive heating through a thin-film copper layer. The specific energy characteristics of film hydrogen storage (with 40 n. l of stored hydrogen) depend-

ing on the winding scheme and the thickness of the resistive copper layer were calculated. The specific energy of the storage is in the range of 450–479 W·h/kg, volumetric specific energy is in the range of 626–651 W·h/l for various winding schemes (from 1 to 16 tapes with a hydride-forming coating per tape with a resistive layer) and thicknesses of the resistive layer 0.5–2 microns. Thermal calculations of the hydrogen carrier and the model of the film hydrogen storage were carried out. Long samples with a resistive copper layer are deposited using magnetron sputtering. Tests were carried out on a wound sample with a resistive layer, which showed an increased electrical resistivity relative to the bulk material.

Keywords: magnetron sputtering, film metal hydrides, resistive heating, thin-film electrode, hydrogen storage devices, hydrogen energy

For citation: Study of Specific Energy Characteristics and Testing of a Film Hydrogen Storage Heated by a Resistive Copper Layer / A. G. Ivanov, D. A. Karpov, E. S. Chebukov, M. I. Yurchenkov, V. O. Belko // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 2. P. 5–18. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-5-18.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Одна из ключевых задач водородной энергетики – хранение и транспортировка водорода. Сложность хранения водорода связана с его низкой плотностью. Для хранения водорода в сжатом виде, при высоких удельных массогабаритных показателях, требуется сжимать его до давлений порядка 700 атм. Хранение водорода в металлгидридах перспективная альтернатива классическим методам, так как в кристаллической решетке магния может содержаться водорода больше (до 0.11 г/см^3), чем в жидком водороде (0.07 г/см^3) [1]–[4]. Промышленностью освоены порошковые металлгидридные системы хранения водорода. Наиболее распространенный материал – гидрид интерметаллида LaNi_5 , содержит массовую долю водорода до 1.8 % [5], [6]. Баллоны высокого давления обеспечивают массовую долю водорода $\approx 5\%$ (или удельную энергоемкость $>1970 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$ в пересчете на теплоту сгорания хранимого водорода) [7]. Для обеспечения конкурентоспособности в области мобильных приложений (транспорт, средства малой механизации) перспективный металлгидрид должен иметь сравнимую массовую долю водорода. Гидрид магния, содержащий водород в массовой доле до 7.6 %, в порошковом виде не используется для хранения водорода. Это связано со слишком высокой стабильностью гидрида и низким коэффициентом диффузии водорода через гидрид магния, обуславливающих высокую температуру сорбции/десорбции 300...350 °С, высокую энтальпию фазообразования 75 кДж/моль H_2 , медленную кинетику выхода водорода [8]–[10]. Еще один недостаток порошковых материалов заключается в низкой теплопроводности порошковых материалов и при значительном измельчении порошка она может падать до $\approx 1 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ [11]. Это

приводит к длительному нагреву накопителя, возможному спеканию порошка вблизи нагревателя при недостаточной температуре порошка вдали от нагревателя [12], [13]. Несмотря на низкую температуру десорбции из порошка LaNi_5 (происходящей и при комнатной температуре) для повышения кинетики десорбции, при проектировании накопителей требуется учитывать теплообмен [14]. Накопители водорода подогреваются или охлаждаются встроенными трубками с потоком воды. Для повышения теплопроводности используют добавки, например порошок углерода. В [15] численно моделировали процессы сорбции/десорбции порошкового аккумулятора. Конструкция накопителя водорода предполагает развитый медный теплообменник в виде кольцевых ребер. При массе порошка $\text{Mg}_{90}\text{Ti}_{10} + 5\%$ углерода 300 г общая масса накопителя составляла 3400 г. При ориентировочной массовой доле водорода в порошке от 5 до 7 % удельная энергоемкость накопителя составит от 174 до 244 Вт·ч/кг. Это сравнимо с лучшими характеристиками для литий-ионных аккумуляторов и невелико по сравнению с требованиями мобильных приложений водородной энергетики.

Для снижения стабильности гидрида магния, снижения температуры сорбции/десорбции, энтальпии фазообразования, повышения кинетики десорбции водорода используют техники добавления катализаторов к гидриду магния и размол порошков в шаровых мельницах [8], [16], [17]. Еще один способ снижения температуры сорбции/десорбции, повышения кинетики десорбции водорода – это использование вместо объемных материалов пленочных [18], [19]. В [20] исследовались пленки магния и железа с финишным слоем палладия, нанесенные послойно. Палладиевый

слой – это отличный катализатор диссоциации водорода, а также он служит для защиты от окисления кислородом воздуха магния и железа. Массовое содержание водорода достигало 5.58 %, температура десорбции – 155 °С.

При добавлении металлов (обычно из переходной группы) к магнию могут образовываться интерметаллиды. Некоторые из интерметаллидов имеют приемлемые термодинамические параметры для того, чтобы рассматриваться как хороший накопитель водорода, например Mg_2Ni образует гидрид Mg_2NiH_4 , содержащий массовую долю водорода до 3.6 %, и разлагающийся в интервале температур 220...250 °С с энтальпией фазообразования около 40 кДж/моль H_2 [21]–[23].

В [24] нами были рассмотрены удельные характеристики пленок на основе магния с защитным никелевым слоем. Была показана значительно возросшая кинетика десорбции водорода из пленок магния (и магния с добавлением до 50 ат. % алюминия) с защитным никелевым покрытием. Было показано значительное снижение температуры десорбции (на 50 °С), повышенная кинетика десорбции водорода при высоком массовом содержании водорода – до 5.5 %.

В дальнейшем исследовались пленки Mg/Ni , нанесенные послойно. В [25] было показано высокое содержание водорода в таких пленках толщиной до 7 мкм, при сниженной температуре сорбции/десорбции до 200/250 °С и пониженной энтальпии фазообразования. В этой же публикации предложена конструктивная схема пленочного аккумулятора водорода (ПАВ). Данная схема предполагает нанесение гидридообразующего материала на резистивный слой, осаждаемый на высокотемпературный полимерный материал. Затем необходимое количество такой пленки сворачивается, формируя «носитель» водорода. Для нагрева гидридообразующего материала служит электрический ток, пропускаемый через резистивный слой. При этом решается проблема низкой теплопроводности порошковых материалов и гидридов за счет равномерного нагрева по всей площади пленки и небольшой толщины гидридообразующего материала между соседними слоями резистивного слоя.

Однако для реализации такого аккумулятора нужно было проверить на практике работу резистивного нагрева тонким слоем, нанесенным на полимерный материал и свернутым в рулон. В качестве резистивного слоя была выбрана медь, обладающая наименьшим электросопротивлением

(соответственно, требуются относительно тонкие слои, не снижающие объемные энергетические характеристики) и не образующая гидридов. В качестве материала подложки выбран полиимид марки ПИ-1эу, как обладающий малой плотностью и высокой рабочей температурой (+250 °С, кратковременно +300 °С). При этом полиимид широко распространен на российском рынке с минимальной толщиной 12.5 мкм.

Авторам не известно о применении медного резистивного слоя для нагрева гидридообразующих пленок в аккумуляторах водорода. Известно, что в пленочных самовосстанавливающихся конденсаторах широко используются металлизированные полимерные пленки, в которых металлические покрытия служат электродами [26]. В качестве металла электродов используют алюминий, цинк или их комбинации [27]. Удельное сопротивление алюминиевых и цинковых пленок растет при снижении их толщин до десятков нанометров. В [28] исследовалось удельное электросопротивление пленок из меди, полученных термическим испарением. При толщине пленок 1 мкм оно составило 2.23 мкОм·см, коэффициент зависимости от температуры $\alpha = 0.0034 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. В [29] исследовалось сопротивление медных пленок, нанесенных при постоянном напряжении магнетронного разряда и при распылении импульсами высокой мощности. При толщине пленки ≈ 600 нм удельное сопротивление выходило на плато и составляло 3.157 и 2.342 мкОм·см при постоянном и импульсном питании магнетрона соответственно. Более плотные пленки с более крупным размером зерен, нанесенные импульсным методом, обладают меньшим сопротивлением. Однако для обоих методов удельное электросопротивление больше, чем у массивного тела.

Расчеты показывают, что для хранения трех грамм водорода (34 нл или 100 Вт·ч энергии) требуется порядка 40 м носителя с пленкой Mg/Ni толщиной 40 мкм. При этом необходимо знать удельную энергоемкость такой выбранной схемы намотки с учетом массы резистивного слоя и полиимидной подложки. Также при слишком большой толщине гидридообразующего слоя и прослойки из полиимида будет возникать неравномерность поля температуры между соседними витками резистивного слоя, что необходимо учесть. При этом резистивный слой должен обладать сопротивлением, допускающим использование невысоких напряжений (в целях безопасности).

Постановка задачи. Целью данной статьи было рассчитать удельные энергетические характеристики пленочного аккумулятора водорода с резистивным слоем из меди. Определить электросопротивление резистивного слоя на полиимидной пленке в зависимости от схемы намотки носителя, с целью подбора блока питания. Рассчитать неравномерность поля температуры между соседними резистивными слоями при намотке пленки и ее резистивном нагреве. Изготовить длинномерный образец с резистивным медным слоем на подложке из полиимида марки ПИ-1эу. Подготовить макет аккумулятора с резистивным слоем и испытать нагрев макета при пропускании электрического тока через этот слой. Подтвердить работоспособность предложенной схемы пленочного аккумулятора водорода и способа его нагрева тонким медным резистивным слоем.

Основная часть статьи. Для нанесения покрытий использовалась напылительная установка «ПЛАЗМАТЕХ-М» (АО «НИИЭФА») с размещенными на ней магнетронными распылительными системами. Полиимидная подложка длиной пять метров наматывалась на барабан, приводимый во вращение электродвигателем. Для нанесения резистивного слоя использовался катод из бескислородной меди диаметром 100 мм. Данная установка и метод нанесения покрытия подробно описаны в [24], [25].

Для численного расчета полей температуры использовалось ПО Comsol Multiphysics.

Расчет удельных энергетических характеристик лент с гидридообразующим покрытием (носителя). При разработке пленочного аккумулятора водорода важно знать его расчетные энергетические характеристики. Концепция намотки лент с гидридообразующим покрытием и резистивным слоем может предполагать различные варианты такой намотки, влияющие на ее удельные характеристики. Возможен вариант намотки одной ленты, состоящей из полиимида – резистивного слоя – гидридообразующего слоя. В таком случае неизбежно шунтирование его через металлическое покрытие, меняющее свое электросопротивление при изменении содержания в нем водорода. Это накладывает определенные сложности на резистивный нагрев из-за изменения сопротивления нагрузки в широких пределах. Для избежания этого можно наносить резистивный слой на отдельную полиимидную ленту. В таком случае полученные ленты с гидридообразующим покрытием разрезаются на N отрезков равной длины, такой

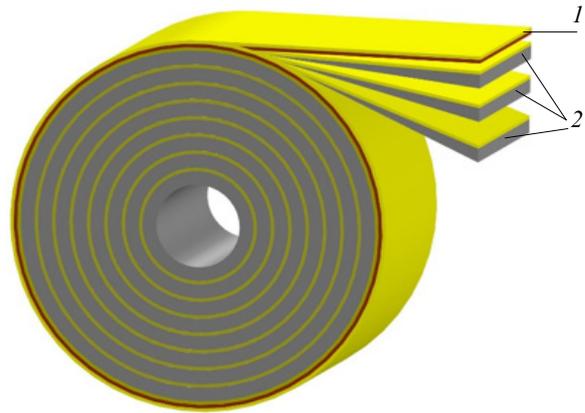


Рис. 1. Схема намотки носителя: 1 – полиимидная лента с резистивным слоем; 2 – полиимидная лента с гидридообразующим покрытием (N лент на одну ленту с резистивным слоем)
Fig. 1. Hydrogen carrier winding scheme: 1 – polyimide tape with resistive film; 2 – polyimide tape with hydride-forming film (N tape by one tape with resistive film)

же длины подготавливается лента с резистивным слоем. Эти ленты сматываются в катушку (рис. 1).

При этом возникает вопрос о выборе оптимальной схемы намотки, обладающей максимальной удельной энергоемкостью при относительно невысокой неравномерности поля температуры. Рассмотрено несколько схем намотки носителя при разном числе лент с гидридообразующим покрытием N и при толщинах резистивного медного слоя h_{Cu} , равных 0.5, 1 и 2 мкм.

Для расчета толщина Mg/Ni пленок выбрана равной 40 мкм.

Толщина полиимидной ленты равна 12.5 мкм. Ширина ленты с гидридообразующим слоем составляет 2.5 см. Ширина ленты с резистивным слоем меньше ширины ленты с гидридообразующим слоем (для более надежной изоляции) и составляет 2 см.

Массовое содержание водорода (в %) в носителе $w_{H_{2H}}$ выразится соотношением:

$$w_{H_{2H}} = \frac{m_{H_{21cm}}}{m_{H_{1cm}}},$$

где $m_{H_{21cm}}$ – масса водорода в 1 см носителя, г/см;

$m_{H_{1cm}}$ – масса 1 см носителя, г/см.

Масса водорода в 1 см носителя определится из

$$m_{H_{21cm}} = N h_{Mg-a} \rho_{Mg-a} w_{H_{20}}, \text{ г/см,}$$

где N – число лент с гидридообразующим покрытием на одну ленту с резистивным слоем, шт.; $h_{Mg-a} = 0.004$ – толщина гидридообразующей плен-

ки, см; $a = 2.5$ – ширина ленты с гидридообразующей пленкой, см; $w_{H_2} = 4$ – расчетная массовая доля водорода в пленке, %; $\rho_{Mg} = 2.22$ – средняя плотность гидридообразующей пленки, г/см³.

Масса 1 см носителя определится из формулы

$$m_{H_{1cm}} = Na(h_{ПИ} \rho_{ПИ} + h_{Mg} \rho_{Mg}) + b(h_{ПИ} \rho_{ПИ} + h_{Cu} \rho_{Cu}), \text{ г/см},$$

где $h_{ПИ} = 0.00125$ – толщина полиимидной ленты, см; $\rho_{ПИ} = 1.1$ – плотность полиимидной ленты, г/см³; $b = 2$ – ширина ленты с резистивным слоем, см; $h_{Cu} = 0.00005$ – толщина резистивного слоя, см; $\rho_{Cu} = 8.93$ – плотность резистивного слоя, г/см³.

Удельная энергоёмкость носителя W_H составит

$$W_H = w_{H_2} E_{H_2},$$

где $E_{H_2} = 142$ МДж/кг – теплота сгорания водорода.

Объем 1 см носителя составит: в случае $N > 1$ –

$$V_{H_{1cm}} = (h_{ПИ} + h_{Mg})aN + (h_{ПИ} + h_{Cu})b.$$

Объем 1 см носителя составит (в случае $N = 1$) –

$$V_{H_{1cm}} = (h_{ПИ} + h_{Mg} + h_{Cu})a.$$

Объемная удельная энергоёмкость W_{HV} составит

$$W_{HV} = \frac{m_{H_{21cm}} E_{H_2}}{V_{H_{1cm}} \cdot 3600}, \text{ Вт} \cdot \text{ч/л}.$$

В табл. 1 представлены результаты для схем намотки с 1, 4, 8 и 16-ю лентами с гидридообразующим покрытием. Для расчета предполагалось, что гидридообразующее покрытие содержит обратимо-запасаемый водород в массовой доле 4 %.

Табл. 1. Удельные характеристики носителя при $h_{Cu} = 0.5$ мкм

Tab. 1. Specific properties of hydrogen carrier at $h_{Cu} = 0.5 \mu\text{m}$

Характеристика	$N = 1$	$N = 4$	$N = 8$	$N = 16$
$m_{H_{21cm}}$, мг/см	0.89	3.55	7.10	15.27
$m_{H_{1cm}}$, мг/см	26.80	106.2	208.7	413.80
w_{H_2} , %	3.32	3.35	3.403	3.43
$V_{H_{1cm}}$, см ³ /см	0.0133	0.055	0.108	0.210
V_{H_2} , Вт · ч/кг	1310	1320	1340	1350
W_{HV} , Вт · ч/л	2640	2540	2600	2640

На рис. 2 представлены зависимости удельной энергоёмкости и удельной объемной энергоёмкости от толщины резистивного слоя.

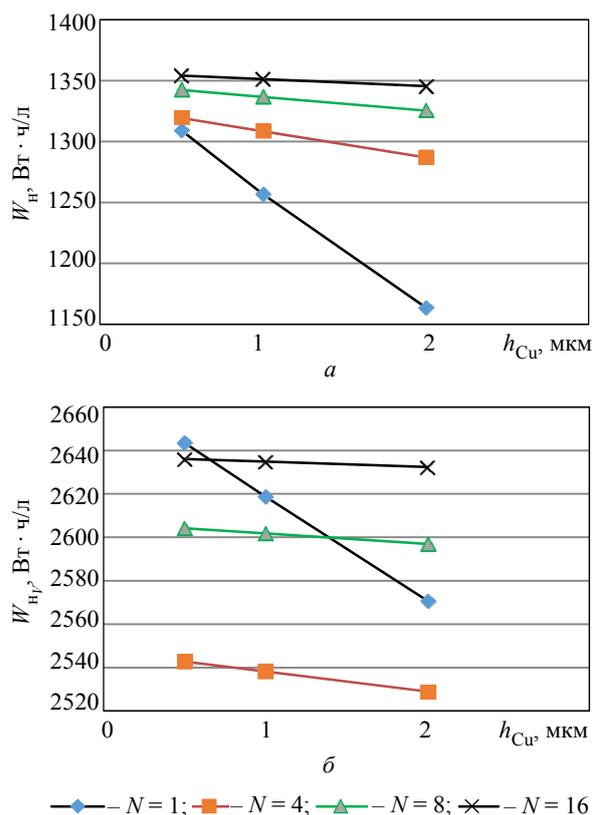


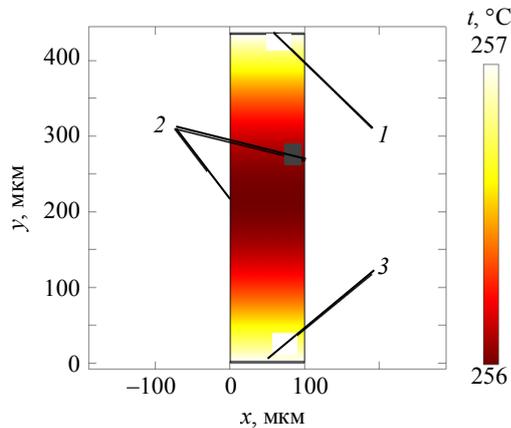
Рис. 2. Зависимости удельной энергоёмкости (а) и удельной объемной энергоёмкости (б) от толщины резистивного слоя

Fig. 2. Dependences of specific energy intensity (а) and specific volumetric energy intensity (б) on the thickness of the resistive layer

При увеличении толщины резистивного слоя энергоёмкость падает. Объемная энергоёмкость выше для значения параметра $N = 1$ при $h_{Cu} = 0.5$ мкм. Однако с ростом толщины резистивного слоя выгоднее становятся схемы намотки $N = 16$ ($h_{Cu} \approx 0.7$ мкм) и $N = 8$ ($h_{Cu} \approx 1.5$ мкм). Удельная энергоёмкость тем выше, чем выше параметр N .

Проведен нестационарный численный расчет температуры в ПО Comsol Multiphysics. Рассчитывалась двумерная область, включающая два резистивных слоя и ленту с гидридообразующим покрытием соответствующей толщины в зависимости от N (при $N = 1 \dots 52$ мкм, при $N = 8 \dots 416$ мкм, при $N = 16 \dots 832$ мкм). Коэффициент теплопроводности принят равным коэффициенту теплопроводности полиимида 0.22 Вт/(м · К). При этом теплопроводность пленочных металлгидридов выше эффективной теплопроводности порошковых металлгидридов из-за низкой насыпной плотности порошков. Такое условие обеспечит оценку максимально-возможного перепада температуры в

намотке. Верхний и нижний медные слои обла- дают толщиной 2 мкм (выбрано для лучшего со- гласования линейных размеров). Они же служат объемным источником тепла 300 МВт/м³ (60 Вт при длине резистивного слоя 5 м, ширине 20 мм, толщине 2 мкм). Расчетная область в ширину со- ставляет 100 мкм. На боковых гранях расчетной области выбрано условие симметричности. На рис. 3, а представлено распределение температу- ры в слое между соседними резистивными вит- ками при $N=8$, мощности нагрева 60 Вт и до- стижении максимальной температуры 257 °С. На рис. 3, б представлено распределение разницы температуры и максимальной температуры у ре- зистивного слоя в слоях при $N=1, 8, 16$, осью абсцисс служит нормированная координата вдоль роста пленки y_H .



1 – верхний резистивный слой (входящий поток тепла); 2 – нижний резистивный слой (входящий поток тепла); 3 – условие симметрии

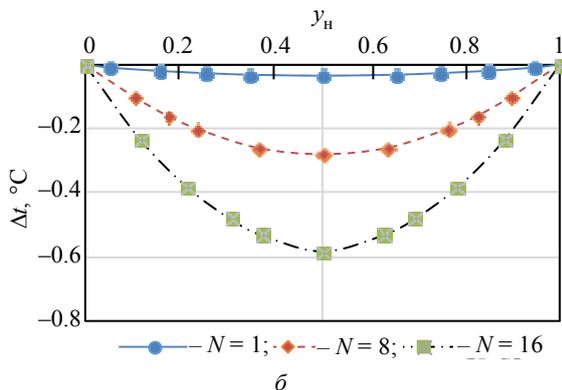


Рис. 3. Схема расчетной области (а) и распределение температуры между соседними резистивными слоями в намотке (б)
Fig. 3. Calculation domain diagram (a) and temperature distribution between adjacent resistive layers in the winding (b)

Несмотря на низкий коэффициент теплопро- водности полиимида из-за малой толщины поли- мерной пленки неравномерность температуры в промежутке между соседними витками с рези- стивным слоем весьма мала. При мощности нагрева 60 Вт неравномерность температуры не превышает 0.4 °С при достижении максимальной температуры 257 °С через 100 с нагрева (для $N=8$). Рассматриваемые толщины пленок (в за- висимости от параметра N) не создают значимой неравномерности поля температуры между со- седними витками резистивного слоя. Разница в 0.6 °С для $N=16$ пренебрежимо мала для работы аккумулятора водорода.

Расчет удельной энергоемкости аккумулятора водорода. Схема пленочного аккумулятора представлена на рис. 4. Необходимое количество носителя наматывается на полый вал (служащий одним из электродов цепи нагрева). Затем полый вал монтируется в корпус ПАВ и осуществляется монтаж второго электрода цепи нагрева и датчика температуры (термопара или термосопротивление).

В качестве материала корпуса выбран алюми- ниевый сплав. Корпус прототипа оптимизирован по массе и состоит из двух свариваемых (лазерной сваркой) изделий – крышки и полукорпуса. В крышку сварены три вакуумных электроввода и газовая трубка (1/8"). С внутренней стороны крышки име- ется монтажная поверхность с резьбой для фикса- ции полого вала с намотанным носителем. После разводки электродов крышка собирается с полукор- пусом, производится лазерная сварка.

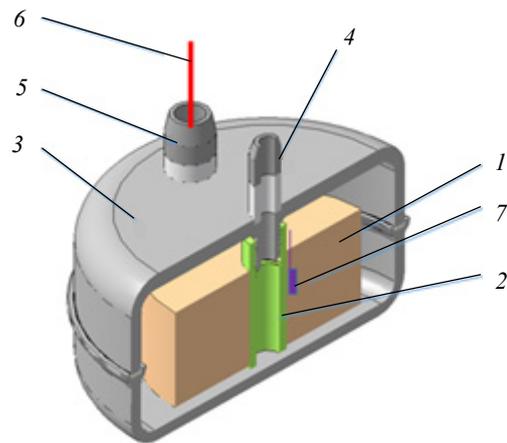


Рис. 4. Схема ПАВ: 1 – носитель; 2 – полый вал; 3 – корпус; 4 – втулка газоввода; 5 – втулка электроввода (показана одна из трех); 6 – электроввод (показан условно); 7 – термопара (показана условно)
Fig. 4. Film hydrogen battery scheme: 1 – hydrogen carrier; 2 – hollow shaft; 3 – case; 4 – gas inlet bushing; 5 – electrical input bushing (one of three is shown); 6 – Electrical input (shown conditionally); 7 – thermocouple (shown conditionally)

Для расчета удельной энергоемкости пленочного аккумулятора был выбран объем хранимого водорода 40 нл (~3.6 г), что соответствует необходимому объему этого энергоносителя для низкоэнергетических устройств (мобильный телефон, калькулятор и пр.). Внутренний диаметр d выбран равным 75 мм. Также зададим эмпирический коэффициент использования объема $k = 0.335$, равный отношению объема носителя к внутреннему объему корпуса (коэффициент, учитывающий необходимость свободного пространства для разводки электродов и увеличение объема носителя при гидрировании при обеспечении зазора между носителем и корпусом). Для упрощения примем корпус состоящим из цилиндрической обечайки толщиной $h = 2$ мм с глухими торцевыми крышками толщиной $h_k = 4$ мм.

Требуемый объем катушки составит

$$V_H = V_{H_{1cm}} \frac{m_{H_2}}{m_{H_2_{1cm}}},$$

необходимый внутренний объем корпуса –

$$V_{вн.к} = V_H / k.$$

Длина цилиндрической части корпуса составит

$$l = V_{вн.к} / \left(\pi \cdot \frac{d^2}{4} \right);$$

масса корпуса –

$$m_k = \rho_{Al} \left\{ \frac{\pi}{4} [(d+h)^2 - d^2] l + 2 \frac{\pi}{4} (d+h)^2 h_k \right\};$$

объем корпуса –

$$V_k = \frac{\pi}{4} (d+h)^2 (l + 2h_k).$$

Удельная энергоемкость аккумулятора составит (без учета массы полого вала, массы электродов), Вт · ч/кг,

$$W_{ПАВ} = m_{H_2} E_{H_2} / \left[3600 \left(m_k + m_{H_{1cm}} \frac{m_{H_2}}{m_{H_2_{1cm}}} \right) \right].$$

Объемная удельная энергоемкость аккумулятора $W_{ПАВ_V}$ составит (без учета массы полого вала, массы электродов), Вт · ч/л:

$$W_{ПАВ_V} = m_{H_2} E_{H_2} / (3600 V_k).$$

В табл. 2 приведены значения энергоемкости ПАВ при различных N и h_{Cu} .

Табл. 2. Удельная энергоемкость ПАВ
Tab. 2. Specific energy intensity of the film hydrogen battery

N	h_{Cu} , мкм	$W_{ПАВ}$, Вт·ч/кг	$W_{ПАВ_V}$, Вт·ч/кг
1	0.5	474	651
1	1	465	645
1	2	450	635
4	0.5	470	629
4	1	469	628
4	2	465	626
8	0.5	476	642
8	1	475	642
8	2	474	641
16	0.5	479	649
16	1	479	649
16	2	478	648

Значения сопротивления резистивного слоя R_H , рассчитанные на основе значения удельного сопротивления слоя меди ρ_{Cu} толщиной 600 нм из [29], приведены в табл. 3. В ней также приводятся длина ленты с резистивным слоем l_H , рабочие токи и напряжения при питании постоянным напряжением. Мощность была принята равной 100 Вт.

Табл. 3. Параметры резистивного слоя при температуре 20 °С

Tab. 3. Resistive film parameters at a temperature of 20 °C

Параметры катушки			Параметры резистивного нагрева при $\rho_{Cu} = 3.157$ мкОм·см		
N	h_{Cu} , мкм	l_H , м	R_H , Ом	I , А	U , В
1	0.5	40.1	127	0.89	113.0
1	1	40.1	62.8	1.26	79.3
1	2	40.1	30.8	1.80	55.5
4	0.5	10	30.5	1.81	55.2
4	1	10	15.2	2.56	39.0
4	2	10	7.59	3.63	27.5
8	0.5	5.01	15.6	2.53	39.5
8	1	5.01	7.80	3.58	27.9
8	2	5.01	3.90	5.07	19.7
16	0.5	2.51	7.91	3.56	28.1
16	1	2.51	3.95	5.03	19.9
16	2	2.51	1.95	7.12	14.1

Эксперимент по резистивному нагреву катушки. На полиимидную ленту длиной 5 м, шириной 20 мм и толщиной 12.5 мкм нанесено медное покрытие толщиной 2.2 мкм (образец P_1). Толщина покрытия определялась посредством пересчета общей его массы, его плотность предполагалась равной плотности меди. В качестве межвитковой изоляции была проложена полиимидная лента толщиной 12.5 мкм и шириной 25 мм.

Из общей длины нагревателя примерно 15 см было использовано для обеспечения подводов питания нагревателя в начале и в конце катушки, так что эффективная длина нагревателя составила 4.85 м. Катушка крепилась через длинный вал на кронштейне и находилась на воздухе. Температура при нагреве контролировалась при помощи термопары. В качестве источника использовался стабилизированный блок питания АКИП-80-40. В табл. 4 приведены значения подаваемого на нагреватель напряжения U_H , тока I_H в цепи нагревателя, мощности нагрева W_H , сопротивления нагревателя R_H , температуры аккумулятора t_H и значения рассчитанного эффективного удельного сопротивления ρ_H медного покрытия. Эффективное удельное сопротивление медного слоя рассчитано в предположении о незначительном влиянии контактного сопротивления на сопротивление цепи:

$$\rho_H = R_H (bh_{Cu}) / l_H.$$

Табл. 4. Параметры резистивного нагрева образца P_1
Tab. 4. Resistive heating parameters of the sample P_1

U_H , В	I_H , А	W_H , Вт	R_H , Ом	t_H , °С	ρ_H , мкОм·см
6	0.9	5.40	6.7	29	6.05
6	0.86	5.16	7.0	70	6.33
6	0.84	5.04	7.1	90	6.48
8	1.1	8.80	7.3	110	6.60
8	1.04	8.32	7.7	150	6.98
8	1.02	8.16	7.8	154	7.12
10	1.25	12.50	8	165	7.26
10	1.2	12.00	8.3	190	7.56
10	1.22	12.20	8.2	200	7.44
10	1.21	12.10	8.3	205	7.50
12	1.44	17.208	8.33	205	7.56
12	1.38	16.56	8.70	230	7.89
12	1.34	16.08	8.96	240	8.12
12	1.33	15.96	9.02	245	8.19
15	1.67	25.05	8.98	245	8.15
15	1.65	24.75	9.09	280	8.25
15	1.61	24.15	9.32	300	8.45

Из табл. 4 видно, что сопротивление нагревателя зависит от температуры нагрева. Удельное электрическое сопротивление покрытия, приведенное к температуре 20 °С, составит 5.970 мкОм·см. Данное значение сильно отличается от удельного сопротивления меди для массивного тела (1.72 мкОм·см) и удельного электрического сопротивления пленок, описанных в [29] (3.157 мкОм·см). Полученные результаты позво-

ляют также определить температурный коэффициент изменения удельного электрического сопротивления нашего покрытия. Для этого на рис. 5 приведен график зависимости удельного электрического сопротивления покрытия от температуры нагрева.

Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления определится формулой [28]

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt}.$$

В эксперименте температурный коэффициент удельного электрического сопротивления оказался равным $\alpha_{Cu} = 1.464 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, в [29] данный коэффициент равнялся $1.270 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Для сравнения, температурный коэффициент меди как массивного тела равен $3.8 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

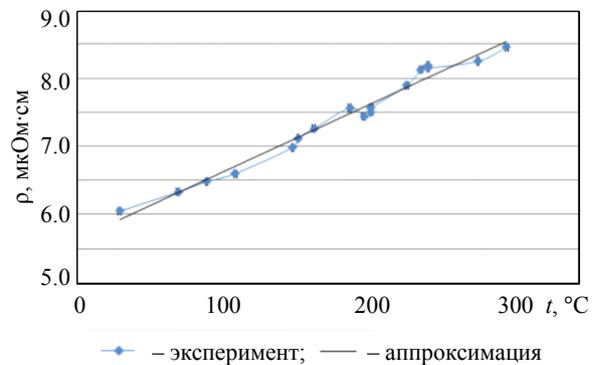


Рис. 5. Зависимость эффективного удельного электрического сопротивления от температуры нагрева
Fig. 5. Dependence of electrical resistivity on heating temperature

Столь значительное различие удельного электрического сопротивления, возможно, связано с наличием дефектов в кристаллической структуре резистивного медного слоя, что приводит к увеличению удельного электросопротивления. Также не исключено повреждение медного слоя из-за неудовлетворительной адгезии к полиимидной ленте в каком-то локальном месте при намотке. При этом температурный коэффициент удельного электрического сопротивления достаточно близок к значению из литературы применительно к тонким медным пленкам.

Обсуждение результатов. На основании проведенных расчетов удельных энергетических характеристик определена энергоемкость носителя в зависимости от схемы его намотки. Удельная энергоемкость носителя при росте параметра N от 1 до 16 повышается от 1310 до 1350 Вт·ч/кг.

При увеличении толщины резистивного слоя энергоемкость падает. Объемная энергоемкость выше для значения параметра $N=1$ при $h_{Cu}=0.5$ мкм (2640 Вт·ч/л). Однако с ростом толщины резистивного слоя выгоднее становятся схемы намотки $N=16$ ($h_{Cu} \approx 0.7$ мкм) и $N=8$ ($h_{Cu} \approx 1.5$ мкм). Удельная энергоемкость тем выше, чем выше параметр N (от 1310 до 1350 Вт·ч/кг при $h_{Cu}=0.5$ мкм). При этом толщина намотки между соседними витками резистивного слоя не вносит большой неоднородности поля температур (до 0.6 °С при $N=16$).

Энергоемкость аккумулятора, хранящего 40 нл с учетом корпуса, сохраняет тенденции присущие носителю. Удельная энергоемкость лежит в диапазоне 450...479 Вт·ч/кг, объемная удельная энергоемкость 626...651 Вт·ч/л для различных N и h_{Cu} .

Для организации более надежного нагрева резистивный слой лучше электроизолировать, а также использовать более толстый резистивный слой (2 мкм). При этом выгоднее становятся схемы намотки с высоким N .

Табл. 5. Параметры резистивного нагрева
Tab. 5. Resistive heating parameters

Параметры намотки			Параметры резистивного нагрева		
N	h_{Cu} , мкм	l_n , м	R_n , Ом	I , А	U , В
1	0.5	40.1	239.9	0.65	155
1	1	40.1	118.8	0.92	109
1	2	40.1	58.3	1.31	76.4
4	0.5	10	57.7	1.32	76.0
4	1	10	28.8	1.86	53.7
4	2	10	14.3	2.64	37.9
8	0.5	5.01	29.5	1.84	54.4
8	1	5.01	14.8	2.60	38.4
8	2	5.01	7.4	3.68	27.1
16	0.5	2.51	15.0	2.59	38.7
16	1	2.51	7.5	3.66	27.3
16	2	2.51	3.7	5.18	19.3

Нанесенный магнетронным распылением при постоянном токе резистивный слой показал повышенное электросопротивление. Оцененное эффективное удельное электрическое сопротивление пленки толщиной 2.2 мкм при температуре 29 °С составило 6.05 мкОм·см, при температурном коэффициенте удельного электрического сопротивления $\alpha_{Cu} = 1.464 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Таким обра-

зом, эффективное удельное электрическое сопротивление при 20 °С составит 5.970 мкОм·см.

При этом резистивный слой позволил нагреть намотку (с прокладками из полиимидной ленты) до 300 °С. Подводимая мощность при этом составила 24 Вт.

В табл. 5 приведены параметры резистивного нагрева модели ПАВ при мощности нагрева 100 Вт при удельном электросопротивлении слоя, определенного в эксперименте, $\rho_{Cu} = 5.970$ мкОм·см при температуре 20 °С.

Выводы и заключение. Проведены расчеты удельных энергетических характеристик носителя ПАВ в зависимости от схемы намотки от 1 до 16 лент с гидридообразующим покрытием на один резистивный слой и при толщинах резистивного слоя от 0.5 до 2 мкм. При увеличении толщины резистивного слоя энергоемкость падает.

Удельная энергоемкость модели ПАВ выше для больших N и лежит в диапазоне 450...479 Вт·ч/кг, объемная удельная энергоемкость выше для $N=1$ и лежит в диапазоне 626...651 Вт·ч/л для различных N и h_{Cu} .

Магнетронным распылением изготовлен длинномерный образец с резистивным слоем толщиной 2.2 мкм. Данный образец намотан в катушку с дополнительной изоляцией (имитирующей ленту с гидридообразующим покрытием) из полиимидной ленты. Проведены испытания на нагрев намотки электрическим током, пропускаемым через резистивный слой. При мощности нагрева 24 Вт достигнута температура 300 °С (без корпуса).

Экспериментально показана работоспособность предложенной концепции пленочного аккумулятора водорода при резистивном нагреве медной пленкой.

При удельном электросопротивлении, определенном из эксперимента при мощности нагрева 100 Вт, ток в цепи составит от 0.65 до 5.18 А при напряжении от 155.0 до 19.3 В в зависимости от N и h_{Cu} . Более высокие значения N приводят к лучшим показателям энергоемкости при меньшем напряжении питания. Толщина резистивного слоя 0.5 мкм приводит к слишком высоким напряжениям, и при малом ее влиянии при высоких $N=8$ или 16 может быть выбрана равной 2 мкм.

Список литературы

1. Magnesium based materials for hydrogen based energy storage: Past, present and future / V. A. Yartys, M. V. Lototskiy, E. Akiba, R. Albert, V. E. Antonove, J. R. Ares, M. Baricco, N. Bourgeois, C. E. Buckley, J. M. Bellosta von Colbe, J.-C. Crivello, F. Cuevas, R. V. Denys, M. Dornheim, M. Felderhoff, D. M. Grant, B. C. Hauback, T. D. Humphries, I. Jacob, T. R. Jensen, P. E. de Jongh, J.-M. Joubert, M. A. Kuzovnikov, M. Latroche, M. Paskevicius, L. Pasquini, L. Popilevsky, V. M. Skripnyuk, E. Rabkin, M. V. Sofianos, A. Stuart, G. Walker, Hui Wang, C. J. Webb, Min Zhu // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2019. Vol. 44, no. 15. P. 7809–7859. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.212.
2. Jain I. P., Lal C., Jain A. Hydrogen storage in Mg: A most promising material // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2010. Vol. 35, no. 10. P. 5133–5144. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.08.088.
3. Application of hydrides in hydrogen storage and compression: Achievements, outlook and perspectives / J. Bellosta von Colbe, J.-R. Ares, J. Barale, M. Baricco, C. Buckley, G. Capurso, N. Gallandat, D. M. Grant, M. N. Guzik, I. Jacob, E. H. Jensen, T. Jensen, J. Jepsen, T. Klassen, M. V. Lototskiy, K. Manickam, A. Montone, J. Puszkiell, S. Sartori, D. A. Sheppard, A. Stuart, G. Walker, C. J. Webb, H. Yang, V. Yartys, A. Züttel, M. Dornheim // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2019. Vol. 44, no. 15. P. 7780–7808. doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.104.
4. Mg-based composites as effective materials for storage and generation of hydrogen for FC applications / D. Korablov, O. Bezdorozhev, V. A. Yartys, Yu. Solonin // *Hydrogen Based Energy Storage: Status and Recent Developments*. Lviv: Publ. Prostim, 2021. P. 53–80. doi: 10.15407/materials2021.053.
5. Карпов Д. А., Литуновский В. Н. Водородная энергетика: хранение водорода в связанном состоянии. Обзор О-106. СПб.: ГК «РОСАТОМ» АО «НИИЭФА», 2016. 94 с.
6. Кудияров В. Н., Лидер А. М. Изучение процессов сорбции и десорбции водорода при помощи автоматизированного комплекса GAS REACTION CONTROLLER LP // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 10–15. С. 3466–3471.
7. Development of high-pressure hydrogen storage system for the Toyota «Mirai» / A. Yamashita, M. Kondo, S. Goto, N. Ogami // *SAE Technical Paper 2015-01-1169*, 2015. P. 1–8. doi: 10.4271/2015-01-1169.
8. Nanostructured hydrogen storage materials prepared by high-energy reactive ball milling of magnesium and ferrovanadium / M. Lototskiy, J. Goh, M. W. David, V. Linkov, L. Khotseng, B. Ntsewawana, R. Denys, V. A. Yartys // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2019. Vol. 44, no. 13. P. 6687–6701. doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.135.
9. Mg-based materials for hydrogen storage / Y. Shang, C. Pistidda, G. Gizer, T. Klassen, M. Dornheim // *J. Magnesium Alloys*. 2021. Vol. 9, no. 6. P. 1837–1860. doi: 10.1016/j.jma.2021.06.007.
10. Kinetics of dehydrogenation of MgH_2 and AlH_3 / I. Gabis, M. Dobrotvorskiy, E. Evard, A. Voyt // *J. Alloy. Compd.* 2011. Vol. 509, Supplement 2. P. 671–674. doi: 10.1016/j.jallcom.2010.12.080.
11. Study of heat transfer and kinetics parameters influencing the design of heat exchangers for hydrogen storage in high-pressure metal hydrides / M. Visaria, I. Mudawar, T. Pourpoint, S. Kumar // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2010. Vol. 53, no. 9–10. P. 2229–2239. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.12.010.
12. 200 NL H_2 hydrogen storage tank using MgH_2 - TiH_2 -C nanocomposite as H storage material / S. N. Nyamsi, M. V. Lototskiy, V. A. Yartys, G. Capurso, M. W. Davids, S. Pasupathi // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2021. Vol. 46, no. 36. P. 19046–19059. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.03.055.
13. Nyamsi S. N., Lototskiy M., Tolj I. Optimal design of combined two-tank latent and metal hydrides-based thermochemical heat storage systems for high-temperature waste heat recovery // *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 16. P. 4216–4233. doi: 10.3390/en13164216.
14. Experimental hydrogen sorption study on a La- Ni_5 -based 5 kg reactor with novel conical fins and water tubes and its numerical scale-up through a modular approach / S. Chandra, P. Sharma, P. Muthukumar, S. S. V. Tiparti // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2022. Vol. 48, no. 96. P. 37872–37885. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.098.
15. Dehydrogenation performance of metal hydride container utilizing MgH_2 -based composite / S. N. Nyamsi, Z. Wu, Z. Zhang, A. Kolesnikov, M. V. Lototskiy, S. Pasupathi // *Appl. Therm. Eng.* 2022. Vol. 209, no. 9. P. 118314. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118314.
16. Hydrogen cycling of niobium and vanadium catalyzed nanostructured magnesium / H. G. Schimmel, J. Huot, L. C. Chapon, F. D. Tichelaar, F. M. Mulder // *J. Am. Chem. Soc.* 2005. Vol. 127, no. 41. P. 14348–14354. doi: 10.1021/ja051508a.
17. Cuevas F., Korablov D., Latroche M. Synthesis, structural and hydrogenation properties of Mg-rich MgH_2 - TiH_2 nanocomposites prepared by reactive ball milling under hydrogen gas // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2012. Vol. 14, no. 3. P. 1200–1211. doi: 10.1039/c1cp23030a.
18. Study of the hydride forming process of in-situ grown MgH_2 thin films by activated reactive evaporation / R. J. Westerwaal, C. P. Broedersz, R. Gremaud, M. Slaman, A. Borgschulte, W. Lohstroh, K. G. Tschersich, H. P. Fleischhauer, B. Dam, R. Griessen // *Thin Solid Films*. 2008. Vol. 516, no. 12. P. 4351–4359. doi: 10.1016/j.tsf.2007.12.163.
19. Nanoscale composition modulations in $Mg_yTi_{1-y}H_x$ thin film alloys for hydrogen storage / A. Baldi, R. Gremaud, D. M. Borsa, C. P. Baldé, A. M. J. van der

Eerden, G. L. Kruijtzter, P. E. de Jongh, B. Dam, R. Griessen // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2009. Vol. 34, no. 3. P. 1450–1457. doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.11.090.

20. Abdul Majid N. A., Watanabe J., Notomi M. Improved desorption temperature of magnesium hydride via multi-layering Mg/Fe thin film // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2021. Vol. 46, no. 5. P. 4181–4187. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.178.

21. Hydrogen desorption kinetics mechanism of Mg–Ni hydride under isothermal and non-isothermal conditions / C.-Y. Chen, H.-l. Chen, Y.-q. Ma, J. Liu // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2016. Vol. 26, no. 1. P. 160–166. doi: 10.1016/S1003-6326(16)64101-8.

22. The hydriding kinetics of Mg–Ni based hydrogen storage alloys: A comparative study on Chou model and Jander model / Q. Luo, X.-H. An, Y.-B. Pan, X. Zhang, J.-Y. Zhang, Q. Li // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2010. Vol. 35, no. 15. P. 7842–7849. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.05.073.

23. Nanosize effect on the hydrogen storage properties of Mg-based amorphous alloy / B. Han, S. Yu, H. Wang, Y. Lu, H.-J. Lin // *Scr. Mater.* 2022. Vol. 216. P. 114736. doi: 10.1016/j.scriptamat.2022.114736.

24. Research of hydrogen saturation of magnesium and magnesium-aluminum films and the influence of a protective nickel coating on it / A. G. Ivanov, D. A. Karpov, E. S. Chebukov, M. I. Yurchenkov // *J. Phys.: Conf. Ser.*

2021. Vol. 1954, no.1. P. 012014. doi: 10.1088/1742-6596/1954/1/012014.

25. Investigation of microscale periodic Ni–Mg–Ni–Mg film structures as metal-hydride hydrogen accumulators / A. G. Ivanov, D. A. Karpov, E. S. Chebukov, M. I. Yurchenkov // *Hydrogen*. 2023. Vol. 4, no. 2. P. 226–236. doi: 10.3390/hydrogen4020016.

26. Self-healing processes of metallized film capacitors in overload modes – Part 1: Experimental observations / V. O. Belko, O. A. Emelyanov, I. O. Ivanov, A. P. Plotnikov // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2021. Vol. 49, no. 5. P. 1580–1587. doi: 10.1109/TPS.2021.3071187.

27. Application of numerical simulation for metallized film capacitors electrodes design / V. O. Belko, O. A. Emelyanov, I. O. Ivanov, A. P. Plotnikov, E. G. Feklistov // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 80945–80952. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3085695.

28. Johnson B. C. Electrical resistivity of copper and nickel thin-film interconnections // *J. Appl. Phys.* 1990. Vol. 67, no. 6. P. 3018–3024. doi: 10.1063/1.345424.

29. Low electrical resistivity in thin and ultrathin copper layers grown by high power impulse magnetron sputtering / F. Cemin, D. Lundin, D. Cammilleri, T. Maroutian, P. Lecoeur, T. Minea // *J. Vac. Sci. Technol.* 2016. Vol. A34, no. 5. P. 051506. doi: 10.1116/1.4959555.

Информация об авторах

Иванов Александр Глебович – начальник лаборатории, АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», ГК «Росатом», дор. на Металлострой, д. 3, Санкт-Петербург, 196641, Россия.
E-mail: algivspb@mail.ru

Карпов Дмитрий Алексеевич – канд. техн. наук, начальник отделения, АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», ГК «Росатом», дор. на Металлострой, д. 3, Санкт-Петербург, 196641, Россия.
E-mail: karpovd@sintez.niiefa.spb.su

Чебуков Евгений Степанович – ведущий инженер, АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», ГК «Росатом», дор. на Металлострой, д. 3, Санкт-Петербург, 196641, Россия.
E-mail: chebukov@sintez.niiefa.spb.su

Юрченков Михаил Игоревич – инженер-исследователь 1-й категории, АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», ГК «Росатом», дор. на Металлострой, д. 3, Санкт-Петербург, 196641, Россия.
E-mail: yurchenkov@sintez.niiefa.spb.su

Белько Виктор Олегович – канд. техн. наук, директор Высшей школы высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
E-mail: vobelko@spbstu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8287-5561>

Вклад авторов:

Иванов А. Г. – введение, проведение расчетов удельных энергетических характеристик, проведение тепловых расчетов, обсуждение результатов.

Карпов Д. А. – редакция статьи, введение, обсуждение результатов, выводы и заключение.

Чебуков Е. С. – проведение экспериментов по резистивным испытаниям.

Юрченков М. И. – проведение экспериментов по нанесению пленок.

Белько В. О. – редакция статьи, обсуждение результатов, выводы и заключение.

References

1. Magnesium based materials for hydrogen based energy storage: Past, present and future / V. A. Yartys, M. V. Lototsky, E. Akiba, R. Albert, V. E. Antonove, J. R. Ares, M. Baricco, N. Bourgeois, C. E. Buckley, J. M. Bellosta von Colbe, J.-C. Crivello, F. Cuevas, R. V. Denys, M. Dornheim, M. Felderhoff, D. M. Grant, B. C. Hauback, T. D. Humphries, I. Jacob, T. R. Jensen, P. E. de Jongh, J.-M. Joubert, M. A. Kuzovnikov, M. Latroche, M. Paskevicius, L. Pasquini, L. Popilevsky, V. M. Skripnyuk, E. Rabkin, M. V. Sofianos, A. Stuart, G. Walker, Hui Wang, C. J. Webb, Min Zhu // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2019. Vol. 44, no. 15. P. 7809–7859. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.212.
2. Jain I. P., Lal C., Jain A. Hydrogen storage in Mg: A most promising material // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2010. Vol. 35, no. 10. P. 5133–5144. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.08.088.
3. Application of hydrides in hydrogen storage and compression: Achievements, outlook and perspectives / J. Bellosta von Colbe, J.-R. Ares, J. Barale, M. Baricco, C. Buckley, G. Capurso, N. Gallandat, D. M. Grant, M. N. Guzik, I. Jacob, E. H. Jensen, T. Jensen, J. Jepsen, T. Klassen, M. V. Lototsky, K. Manickam, A. Montone, J. Puzskiell, S. Sartori, D. A. Sheppard, A. Stuart, G. Walker, C. J. Webb, H. Yang, V. Yartys, A. Züttel, M. Dornheim // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2019. Vol. 44, no. 15. P. 7780–7808. doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.104.
4. Mg-based composites as effective materials for storage and generation of hydrogen for FC applications / D. Korablov, O. Bezdorozhev, V. A. Yartys, Yu. Solonin // *Hydrogen Based Energy Storage: Status and Recent Developments*. Lviv: Publ. Prostir-M, 2021. P. 53–80. doi: 10.15407/materials2021.053.
5. Karpov D. A., Litunovskij V. N. Vodorodnaja jenergetika: hranenie vodoroda v svjazannom sostojanii. Obzor O-106. SPb.: GK «ROSATOM» AO «NIIJeFA», 2016. 94 s. (In Russ.).
6. Kudijarov V. N., Lider A. M. Izuchenie processov sorbcii i desorbicii vodoroda pri pomoshhi avtomatizirovannogo kompleksa GAS REACTION CONTROLLER LP // *Fundamental'nye issledovanija*. 2013. № 10–15. S. 3466–3471. (In Russ.).
7. Development of high-pressure hydrogen storage system for the Toyota «Mirai» / A. Yamashita, M. Kondo, S. Goto, N. Ogami // *SAE Technical Paper 2015-01-1169*, 2015. P. 1–8. doi: 10.4271/2015-01-1169.
8. Nanostructured hydrogen storage materials prepared by high-energy reactive ball milling of magnesium and ferrovanadium / M. Lototsky, J. Goh, M. W. David, V. Linkov, L. Khotseng, B. Ntsendwana, R. Denys, V. A. Yartys // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2019. Vol. 44, no. 13. P. 6687–6701. doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.135.
9. Mg-based materials for hydrogen storage / Y. Shang, C. Pistidda, G. Gizer, T. Klassen, M. Dornheim // *J. Magnesium Alloys*. 2021. Vol. 9, no. 6. P. 1837–1860. doi: 10.1016/j.jma.2021.06.007.
10. Kinetics of dehydrogenation of MgH₂ and AlH₃ / I. Gabis, M. Dobrotvorskiy, E. Evard, A. Voyt // *J. Alloy. Compd.* 2011. Vol. 509, Supplement 2. P. 671–674. doi: 10.1016/j.jallcom.2010.12.080.
11. Study of heat transfer and kinetics parameters influencing the design of heat exchangers for hydrogen storage in high-pressure metal hydrides / M. Visaria, I. Mudawar, T. Pourpoint, S. Kumar // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2010. Vol. 53, no. 9–10. P. 2229–2239. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.12.010.
12. 200 NL H₂ hydrogen storage tank using MgH₂-TiH₂-C nanocomposite as H storage material / S. N. Nyamsi, M. V. Lototsky, V. A. Yartys, G. Capurso, M. W. Davids, S. Pasupathi // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2021. Vol. 46, no. 36. P. 19046–19059. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.03.055.
13. Nyamsi S. N., Lototsky M., Tolj I. Optimal design of combined two-tank latent and metal hydrides-based thermochemical heat storage systems for high-temperature waste heat recovery // *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 16. P. 4216–4233. doi: 10.3390/en13164216.
14. Experimental hydrogen sorption study on a La-Ni₅-based 5 kg reactor with novel conical fins and water tubes and its numerical scale-up through a modular approach / S. Chandra, P. Sharma, P. Muthukumar, S. S. V. Tiparti // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2022. Vol. 48, no. 96. P. 37872–37885. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.098.
15. Dehydrogenation performance of metal hydride container utilizing MgH₂-based composite / S. N. Nyamsi, Z. Wu, Z. Zhang, A. Kolesnikov, M. V. Lototsky, S. Pasupathi // *Appl. Therm. Eng.* 2022. Vol. 209, no. 9. P. 118314. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118314.
16. Hydrogen cycling of niobium and vanadium catalyzed nanostructured magnesium / H. G. Schimmel, J. Huot, L. C. Chapon, F. D. Tichelaar, F. M. Mulder // *J. Am. Chem. Soc.* 2005. Vol. 127, no. 41. P. 14348–14354. doi: 10.1021/ja051508a.
17. Cuevas F., Korablov D., Latroche M. Synthesis, structural and hydrogenation properties of Mg-rich MgH₂-TiH₂ nanocomposites prepared by reactive ball milling under hydrogen gas // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2012. Vol. 14, no. 3. P. 1200–1211. doi: 10.1039/c1cp23030a.
18. Study of the hydride forming process of in-situ grown MgH₂ thin films by activated reactive evaporation

/ R. J. Westerwaal, C. P. Broedersz, R. Gremaud, M. Slaman, A. Borgschulze, W. Lohstroh, K. G. Tschersich, H. P. Fleischhauer, B. Dam, R. Griessen // *Thin Solid Films*. 2008. Vol. 516, no. 12. P. 4351–4359. doi: 10.1016/j.tsf.2007.12.163.

19. Nanoscale composition modulations in $Mg_yTi_{1-y}H_x$ thin film alloys for hydrogen storage / A. Baldi, R. Gremaud, D. M. Borsa, C. P. Baldé, A. M. J. van der Eerden, G. L. Kruijtzter, P. E. de Jongh, B. Dam, R. Griessen // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2009. Vol. 34, no. 3. P. 1450–1457. doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.11.090.

20. Abdul Majid N. A., Watanabe J., Notomi M. Improved desorption temperature of magnesium hydride via multi-layering Mg/Fe thin film // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2021. Vol. 46, no. 5. P. 4181–4187. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.178.

21. Hydrogen desorption kinetics mechanism of Mg–Ni hydride under isothermal and non-isothermal conditions / C.-Y. Chen, H.-I. Chen, Y.-q. Ma, J. Liu // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2016. Vol. 26, no. 1. P. 160–166. doi: 10.1016/S1003-6326(16)64101-8.

22. The hydriding kinetics of Mg–Ni based hydrogen storage alloys: A comparative study on Chou model and Jander model / Q. Luo, X.-H. An, Y.-B. Pan, X. Zhang, J.-Y. Zhang, Q. Li // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2010. Vol. 35, no. 15. P. 7842–7849. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.05.073.

23. Nanosize effect on the hydrogen storage properties of Mg-based amorphous alloy / B. Han, S. Yu, H. Wang, Y. Lu, H.-J. Lin // *Scr. Mater.* 2022. Vol. 216. P. 114736. doi: 10.1016/j.scriptamat.2022.114736.

24. Research of hydrogen saturation of magnesium and magnesium-aluminum films and the influence of a protective nickel coating on it / A. G. Ivanov, D. A. Karpov, E. S. Chebukov, M. I. Yurchenkov // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 1954, no.1. P. 012014. doi: 10.1088/1742-6596/1954/1/012014.

25. Investigation of microscale periodic Ni–Mg–Ni–Mg film structures as metal-hydride hydrogen accumulators / A. G. Ivanov, D. A. Karpov, E. S. Chebukov, M. I. Yurchenkov // *Hydrogen*. 2023. Vol. 4, no. 2. P. 226–236. doi: 10.3390/hydrogen4020016.

26. Self-healing processes of metallized film capacitors in overload modes – Part 1: Experimental Observations / V. O. Belko, O. A. Emelyanov, I. O. Ivanov, A. P. Plotnikov // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2021. Vol. 49, no. 5. P. 1580–1587. doi: 10.1109/TPS.2021.3071187.

27. Application of numerical simulation for metallized film capacitors electrodes design / V. O. Belko, O. A. Emelyanov, I. O. Ivanov, A. P. Plotnikov, E. G. Feklistov // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 80945–80952. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3085695.

28. Johnson B. C. Electrical resistivity of copper and nickel thin-film interconnections // *J. Appl. Phys.* 1990. Vol. 67, no. 6. P. 3018–3024. doi: 10.1063/1.345424.

29. Low electrical resistivity in thin and ultrathin copper layers grown by high power impulse magnetron sputtering / F. Cemin, D. Lundin, D. Cammilleri, T. Maroutian, P. Lecoœur, T. Minea // *J. Vac. Sci. Technol.* 2016. Vol. A34, no. 5. P. 051506. doi: 10.1116/1.4959555.

Information about the authors

Aleksandr G. Ivanov – Head of the laboratory, JSC «D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», SC «Rosatom», Rd. to Metallostroy, 3, Saint Petersburg, 196641, Russia.

E-mail: algivspb@mail.ru

Dmitry A. Karpov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department, JSC «D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», SC «Rosatom», Rd. to Metallostroy, 3, Saint Petersburg, 196641, Russia.

E-mail: karpovd@sintez.niiefa.spb.su

Evgeniy S. Chebukov – Lead engineer, JSC «D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», SC «Rosatom», Rd. to Metallostroy, 3, Saint Petersburg, 196641, Russia.

E-mail: chebukov@sintez.niiefa.spb.su

Michael I. Yurchenkov – Research engineer of the 1st category, JSC «D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», SC «Rosatom», Rd. to Metallostroy, 3, Saint Petersburg, 196641, Russia.

E-mail: yurchenkov@sintez.niiefa.spb.su

Victor O. Belko – Cand. Sci. (Eng.), Director of the Higher School of High Voltage Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politechnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: vobelko@spbstu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8287-5561>

Author contribution statement:

Ivanov A. G. – introduction, calculation of specific energy characteristics, thermal calculations, results and discussion.

Физика

Physics

Karpov D. A. – editing of the article, introduction, results and discussion, conclusion.

Chebukov E. S. – conducting resistive testing experiments.

Yurchenkov M. I. – conducting experiments on film deposition.

Belko V. O. – editing of the article, results and discussion, conclusion.

Статья поступила в редакцию 16.10.2024; принята к публикации после рецензирования 10.12.2024; опубликована онлайн 28.02.2025.

Submitted 16.10.2024; accepted 10.12.2024; published online 28.02.2025.
