

УДК 539.171.016

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДОРОДА В МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ СПЕКТРОМЕТРИИ ЯДЕРНОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

© 2020 г. В. Г. Востриков^{a, *}, А. И. Каменских^a, Н. В. Ткаченко^{a, **}

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Москва, 119991 Россия

*E-mail: vostrikov.vladimir@gmail.com

**E-mail: nicki_tkak@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2019 г.

После доработки 03.04.2019 г.

Принята к публикации 03.04.2019 г.

Гидриды металлов и их сплавов широко используются в ядерной энергетике, также рассматриваются как перспективные аккумуляторы водорода. Ввиду особенностей эксплуатации материалов в реакторах для определения концентрации водорода и его содержания в гидридах под воздействием агрессивной среды требуется применение неразрушающих методов. В настоящей работе предложена методика на основе спектрометрии ядерного обратного рассеяния, позволяющая определять содержание водорода в образце на глубине до 100 мкм. Измерены профили распределения водорода в Al, Mg, Ti и Zr и их гидридах. Проведена оценка радиационного урона образцу на примере полимерной пропитки защитного покрытия.

Ключевые слова: ядерное обратное рассеяние, водород, титан, цирконий, алюминий, магний, реакторостроение.

DOI: 10.31857/S1028096020010203

ВВЕДЕНИЕ

В реакторостроении гидрид титана используется в качестве замедлителя в компактных реакторах и реакторах на быстрых нейтронах, а также в качестве материала защиты [1]. Другой конструкционный материал для реакторов – цирконий, применяющийся для изготовления оболочек ТВЭЛов. Важность определения водорода в цирконии связана с тем, что гидрирование приводит к ухудшению механических свойств и сокращает срок службы изделий [2].

Перспективными материалами для долговременного хранения водорода являются алюминий, магний и титан [3–7]. Возможно, как применение порошков гидридов, так и твердых расплавов Al_xH_y , Mg_xH_y и Ti_xH_y с нанесенными на поверхность защитными покрытиями для предотвращения выхода водорода.

Для анализа гидридов, применяемых в ядерной энергетике, требуется метод анализа, позволяющий с большой точностью определять профиль концентрации водорода с высоким разрешением по глубине анализа в металле или сплаве и одновременно неразрушающий для последующих испытаний материалов и изучения изделий с

нанесенными защитными покрытиями. Поэтому широко распространенные методы, основанные на измерении количества водорода, вышедшего из образца при его нагреве (волюметрический метод, метод тигельного нагрева), несмотря на высокую точность, не подходят для решения круга задач ядерной энергетики.

К настоящему времени разработано множество неразрушающих ядерно-физических методов анализа, позволяющих регистрировать водород в материалах, однако применение каждого метода ограничено. Так, анализ с помощью ядерных реакций позволяет осуществлять прямое детектирование водорода и профилирование его распространения в материале, но не дает никакого представления об элементом составе мишени и требует привлечения других методов анализа [8]. Широко распространенный метод ядер отдачи сильно ограничен по глубине анализа, что позволяет проводить анализ только изделий без защитных покрытий [9]. Метод определения водорода с помощью резерфордовского обратного рассеяния электронов [10] обладает неоспоримыми достоинствами в виде прямого детектирования водорода и высокой чувствительности, но применим только к тонким (до 40 нм) пленкам

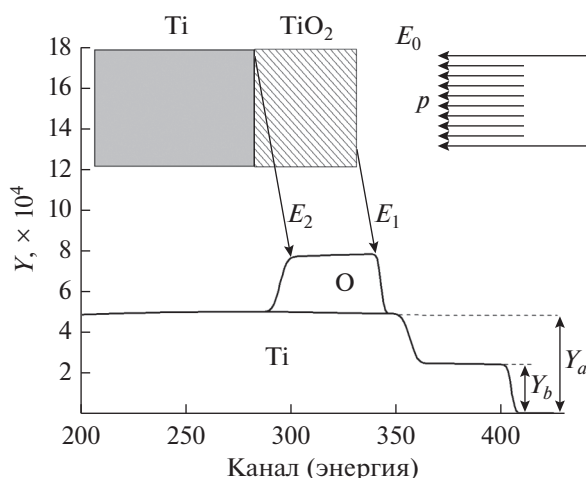


Рис. 1. Схема рассеяния протонов на титане с оксидным слоем на поверхности и формирования спектров ЯОР (Y – выход ЯОР).

МЕТОДИКА

Метод спектрометрии ядерного обратного рассеяния

Метод спектрометрии ядерного обратного рассеяния (ЯОР) основан на кинематических и статистических закономерностях реакции упругого рассеяния ускоренных заряженных протонов ядрами исследуемого материала.

Для понимания процессов, лежащих в основе спектрометрии обратного рассеяния, рассмотрим кинематику рассеяния пучка протонов двухкомпонентной мишенью и формирования спектра ЯОР от нее на примере одного из самых распространенных случаев модифицированной поверхности – толстой мишени из металла со слоем оксида на поверхности (рис. 1). Начальная энергия пучка E_0 и энергия рассеявшихся от поверхности частиц E_1 в нерелятивистском приближении связаны следующим соотношением [16]:

$$E_1 = kE_0, \quad (1)$$

где k – кинематический фактор, определяемый выражением:

$$k = \left(\frac{M_1}{M_1 + M_2} \right)^2 \times \left[\cos \theta + \left(\left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2 - \sin^2 \theta \right)^{1/2} \right]^2, \quad (2)$$

что позволяет путем измерения энергии рассеявшихся частиц M_1 при фиксированном угле рассеяния θ и известной энергии пучка определить M_2 , т.е. определить ядро, на котором произошло рассеяние.

При прохождении заряженной частицы через вещество уменьшается ее энергия из-за ионизационных потерь dE/dx , поэтому связь начальной энергии пучка и детектируемой энергии частицы выглядит следующим образом:

$$kE_0 - E_2 = [S]x, \quad (3)$$

где x – путь, пройденный частицей перед актом рассеяния, а $[S]$ определяется следующей формулой:

$$[S] = \left[k \frac{dE}{dx} \Big|_{\text{вх}} + \frac{k}{\cos \theta} \frac{dE}{dx} \Big|_{\text{вых}} \right]. \quad (4)$$

Следовательно, зная начальную и конечную энергии частиц и на каком ядре произошел акт рассеяния, из (3) можно определить, на какой глубине произошло рассеяние.

В случае рассеяния на двухкомпонентной мишени спектр ЯОР представляет собой суперпозицию спектров каждого элемента (рис. 1). Наличие двух элементов в одном слое влияет на спектр каждого из них.

гидридов. Метод позитронной аннигиляции [11] позволяет с высокой точностью детектировать дефекты, вызванные наличием водорода в металлах, но анализ ограничен глубиной до 1 мкм. Вихретоковый метод исследования наводороженных материалов [12] пригоден только для анализа чистых (без загрязнений) проводящих поверхностей. Поэтому требуется разработка неразрушающего метода элементного анализа, позволяющего работать с гидридами, подвергающимися воздействию агрессивных сред, и с изделиями с нанесенными защитными покрытиями.

Класс методов, основанных на рассеянии протонов на водороде, получил широкое распространение за счет минимального радиационного урона [13], связанного с высвобождением водорода и дальнейшей его миграцией вглубь материала. Сечение высвобождения в случае рассеяния протон–водород на порядки ниже, чем в иных ядерно-физических методах. Данный класс методов обладает высокой чувствительностью и глубиной проникновения, но наиболее часто используется метод прямой регистрации рассеянных на водороде протонов [14, 15], что приводит к сильному ограничению по толщине (до 100 мкм) и составу анализируемых изделий.

В настоящей работе описан метод, основанный на спектрометрии ядерного обратного рассеяния протонов, позволяющий исследовать концентрацию водорода при одновременном элементном анализе состава изделий на глубине до 100 мкм, что позволяет анализировать пригодность различных защитных покрытий для предотвращения гидрирования конструкционных материалов или выхода водорода из гидридов.

Выход Y в процессе обратного рассеяния на двухкомпонентной мишени $A_y B_{1-y}$ определяется по следующей формуле:

$$\tilde{Y}(E_0, E_2, \theta) = N_0 d\Omega \times \times \left\{ y \sigma_A(E_1, \theta) [\tilde{\epsilon}_{Ay}]^{-1} + (1-y) \sigma_B(E_1, \theta) [\tilde{\epsilon}_{By}]^{-1} \right\}, \quad (5)$$

где

$$[\tilde{\epsilon}_{Ay}] = \frac{\tilde{\epsilon}(E_2^A) [k_A \tilde{\epsilon}(E_1^A) + p \tilde{\epsilon}(k_A E_1^A)]}{\tilde{\epsilon}(k_A E_1^A)}, \quad (6)$$

$$[\tilde{\epsilon}_{By}] = \frac{\tilde{\epsilon}(E_2^B) [k_B \tilde{\epsilon}(E_1^B) + p \tilde{\epsilon}(k_B E_1^B)]}{\tilde{\epsilon}(k_B E_1^B)}, \quad (7)$$

где E_0 — энергия протонов пучка, E_1 — энергия протонов в точке рассеяния в мишени, E_2 — энергия частиц, вылетевших из мишени и зарегистрированных детектором, $d\Omega$ — телесный угол детектора, N_0 — число протонов, падающих на мишень, $\sigma_{A,B}(E, \theta)$ — энергетическая зависимость сечения рассеяния протонов ядрами атомов мишени, ϵ — сечение торможения, определяемое по формуле:

$$\epsilon(E) = \frac{1}{n} \frac{dE}{dx}, \quad (8)$$

где n — количество атомов в 1 см^3 .

Разница между выходами Y_a и Y_b из подложки модифицированного слоя на рис. 1 обусловлена следующими особенностями двухкомпонентных мишеней: из-за наличия кислорода в поверхностном слое изменяется тормозная способность слоя, уменьшается фактор N_0 в (5). Как следствие, в модифицированном слое на поверхности материала подложки рассеивается меньше частиц, чем в глубине.

Спектры ЯОР наводороженных материалов

Рассмотрим подробней общий случай рассеяния частицы на неподвижной мишени (рис. 2). В нерелятивистском приближении в лабораторной системе отчета законы сохранения энергии и импульса запишутся следующим образом:

$$E_0 = E_1 + E_{II} - Q, \quad (9)$$

$$(2m_1 E_0)^{1/2} = (2m_1 E_1)^{1/2} \cos \theta_1 + (2m_{II} E_{II})^{1/2} \cos \theta_{II}, \quad (10)$$

$$0 = (2m_1 E_1)^{1/2} \sin \theta_1 + (2m_{II} E_{II})^{1/2} \sin \theta_{II}, \quad (11)$$

где E_0, E_1, E_{II} — начальное и конечные значения энергии частиц, Q — тепловой эффект реакции, m_1, m_2, m_I и m_{II} — начальные и конечные массы частиц, θ_1 и θ_{II} — углы вылета частиц. Из выражений (9)–(11) получаем:

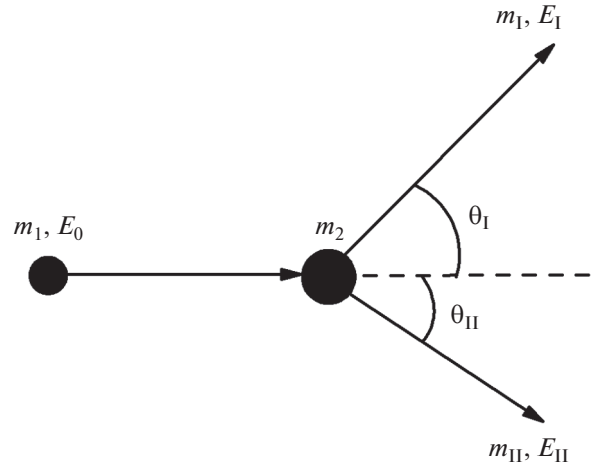


Рис. 2. Схема рассеяния налетающей частицы на ядре мишени.

$$Q = \frac{m_1 + m_{II}}{m_{II}} E_1 - \frac{m_{II} - m_I}{m_{II}} E_0 - \frac{2(m_1 m_I E_0 E_1)^{1/2}}{m_{II}} \cos \theta_1. \quad (12)$$

Из (12) находим ограничения на угол вылета первой частицы:

$$\sin^2 \theta_1 \leq \frac{m_{II}}{m_I} \left(\frac{m_1 + m_{II}}{m_{II}} \left[1 - \frac{|Q|}{E_0} \right] - 1 \right). \quad (13)$$

Рассматривая случай упругого рассеяния ($Q = 0, m_I = m_I$), получаем:

$$\sin \theta_1 \leq \frac{m_{II}}{m_I}. \quad (14)$$

В случае рассеяния протонов на водороде выражение принимает вид:

$$\sin \theta_1 \leq 1. \quad (15)$$

То есть случай анализа гидридов является особенным в спектрометрии ЯОР из-за кинематического запрета рассеяния на углы, превышающие 90° в лабораторной системе координат. Как следствие, в спектре ЯОР наличие водорода в мишени проявляется только в уменьшении выхода из основного материала мишени в выражении (5). Идея предлагаемого метода состоит в следующем. Если обозначить через K_1/K_2 отношение выхода ЯОР из образца ненаводороженного материала к аналогичному выходу из наводороженного материала при условии, что спектры ЯОР отнесены к одному и тому же числу N_0 протонов, падающих на образец, то по этим данным можно построить зависимости K_1/K_2 от атомной концентрации водорода в материале. Это позволит в дальнейшем с помощью анализа спектров обратного рассеяния и использования предварительно построенных

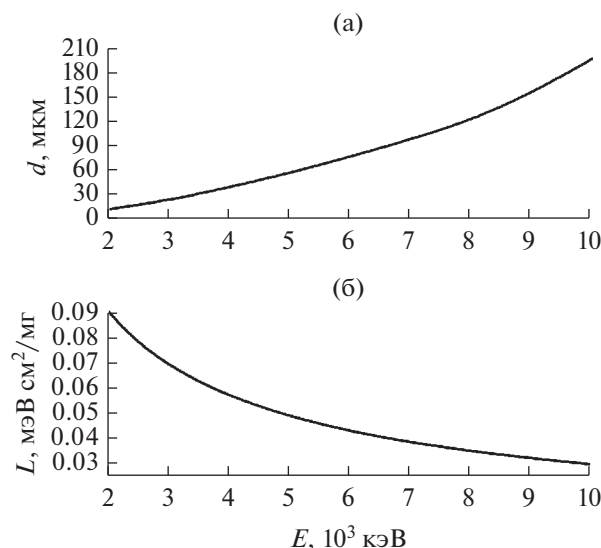


Рис. 3. Зависимость глубины анализа d (а) и тормозной способности L (б) от энергии E налетающих частиц в титане.

теоретических зависимостей определять наличие водорода в исследуемых материалах.

В настоящей работе представлены экспериментальная проверка предлагаемого метода, примененного для анализа гидридов титана, алюминия, магния и циркония, и сравнение полученных данных с результатами моделирования, дана оценка области применения предложенного метода.

Чувствительность метода и рабочая энергия

Глубина анализа является одним из главных преимуществ предлагаемого метода, однако улучшение этого параметра достигается путем увеличения E_0 ионов, что может повлечь за собой ухудшение чувствительности метода к водороду, т.е. понизит точность количественного определения его концентрации. Так как сечение рассеяния не является однородной функцией энергии (при превышении энергии кулоновского барьера сечение рассеяния перестает быть пропорциональным $\sim Z^2$ и становится индивидуальным для каждого элемента и выбранной энергии), в качестве определяющего параметра, влияющего на выбор рабочей энергии, лучше всего подходит зависимость тормозной способности вещества от энергии налетающих частиц.

На рис. 3 представлены зависимости глубины анализа и тормозной способности от энергии протонов в титане. Как видно из графиков, при увеличении энергии протонов растет глубина проникновения и одновременно понижается тормозная способность в веществе и, как следствие, уменьшается чувствительность метода.

В настоящей работе в качестве ионов использовали протоны с $E_0 = 7.5 \text{ МэВ}$, что позволяет проводить элементный анализ до глубины $\sim 100 \text{ мкм}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальная установка и программное обеспечение

Измерения спектров ЯОР проводили на установке, построенной на базе 120 см циклотрона НИИЯФ МГУ. Коллимированный пучок протонов диаметром 3 мм с энергией 7.5 МэВ из циклотрона направляли по нормали к поверхности исследуемых мишеней. Обратно рассеянные на угол 160° частицы регистрировали поверхностно-барьерным полупроводниковым детектором, импульсы которого анализировали с помощью спектрометрического накопителя АНСИ, управляемого с помощью компьютера. Для мониторинга пучка (определения величины $N_0 d\Omega$), контроля энергии E_0 в процессе измерений и для последующей нормировки спектров на одинаковое число N_0 использовали полутолстую танталовую фольгу толщиной 8 $\mu\text{м}$, рассеяние на которой при $E_0 = 7.5 \text{ МэВ}$ является резерфордским. Фольгу устанавливали непосредственно перед исследуемой мишенью. Компьютерное моделирование полученных спектров и зависимостей величин K_1/K_2 от атомной концентрации водорода в материалах проводили с помощью программы NBS [17].

Образцы

Концентрацию водорода в наводороженных поверхностных слоях определяли на порошковых мишенях из Mg, Al, Ti, стехиометрических гидридов MgH_2 , AlH_3 , TiH_2 и мишенях, полученных путем смешивания в разных пропорциях металлических и стехиометрических порошков: Al с AlH_3 , Mg с MgH_2 , Ti с TiH_2 .

Также мишенями служили образцы технически чистых титана и циркония, насыщенных водородом. Образцы титана и циркония помещали в специальную печь, вакуумировали и насыщали чистым водородом, который получали путем разложения гидрида титана при температуре $700\text{--}800^\circ\text{C}$. Образцы гидрировали в засыпке порошка Ti или Zr (в зависимости от материала образца) с целью предотвращения окисления. Объем подачи водорода ограничивали во избежание растрескивания образцов. При охлаждении, чтобы избежать поглощения водорода засыпкой, печь заполняли Ag. Охлаждение системы проводили не сразу, а выдерживая для гомогенизации в течение 3 ч и контролируя скорость охлаждения. Исследовали три партии гидрированных образцов TiH_x и ZrH_x , для которых показатель стехиометрии x

определен волюмометрическим методом: для двух образцов из титана $x = 1.2 \pm 0.01$ (партия 1), для семи образцов из циркония $x = 1.86 \pm 0.02$ (партия 2) и для других семи образцов из циркония $x = 1.80 \pm 0.02$ (партия 3).

Микродуговое оксидирование проводили на установке МДО-100 НИУ “МАИ”. Покрытия формировали в щелочных электролитах на поверхности алюминия. Наполнение полимерным материалом на основе поли-параксилилена [18] покрытий на алюминии осуществляли на технологической установке газофазной депозитной полимеризации Института теоретической и прикладной электродинамики РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры ЯОР наводороженного Al

На рис. 4 приведены для сравнения спектры ЯОР порошков Al и AlH_3 и их смесей в различных пропорциях. Спектры ЯОР представляют собой суперпозицию хорошо разделенных по энергии спектров протонов, рассеянных на тантале и на исследуемой мишени. Спектр ЯОР в высокоэнергетической области (6200–7200 кэВ) соответствует протонам, рассеянным на танталовой фольге. Другая часть соответствует протонам, рассеянным на изучаемой мишени. Для приведения спектров различных мишеней к одному и тому же числу частиц, падающих на них, проводили их нормировку по правой части спектра, соответствующего танталовой фольге. Видно, что большее количество водорода во второй мишени привело к сильному изменению выхода ЯОР из алюминия по сравнению с чистым Al.

Для проверки модельных расчетов проводили измерения образцов смесей порошков с содержанием водорода 50, 60, 66 ат. % и чистого гидрида алюминия. Результаты модельных расчетов величин K_1/K_2 и экспериментальные данные для сравнения представлены на рис. 5. Результаты сходятся в пределах ошибки 1%. Данные расчетов для образцов с содержанием 66 и 75 ат. % полностью совпадают с модельной кривой, в то время как результаты для 50 и 60 ат. % лежат чуть выше модельной кривой, что может быть следствием нескольких факторов: погрешности при смешивании порошков, недостаточно высокого значения N_0 .

Результаты измерений наводороженных образцов Mg, Ti и Zr

Для проверки расчетов по магнию использовали смеси порошков с содержанием водорода 33, 50, 60 ат. % и порошок чистого гидрида. Спектры ЯОР представлены на рис. 6. Все данные лежат в пределах ошибок, причем для точек 33 и 66 ат. % наблюдается полное совпадение с расчетными

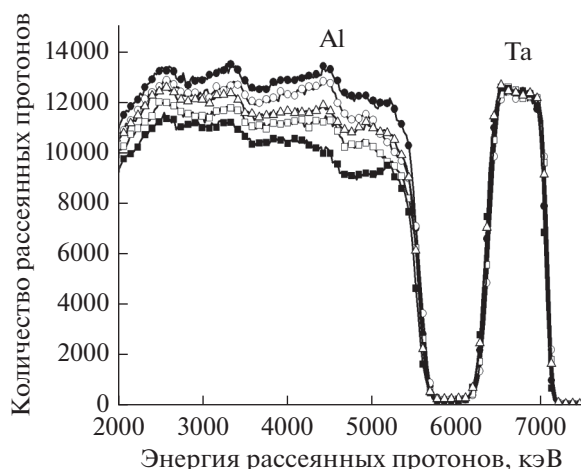


Рис. 4. Спектры ЯОР алюминия (закрашенные кружки) и его гидридов: AlH_1 (открытые кружки); $\text{AlH}_{1.5}$ (треугольники); AlH_2 (открытые квадраты); AlH_3 (закрашенные квадраты).

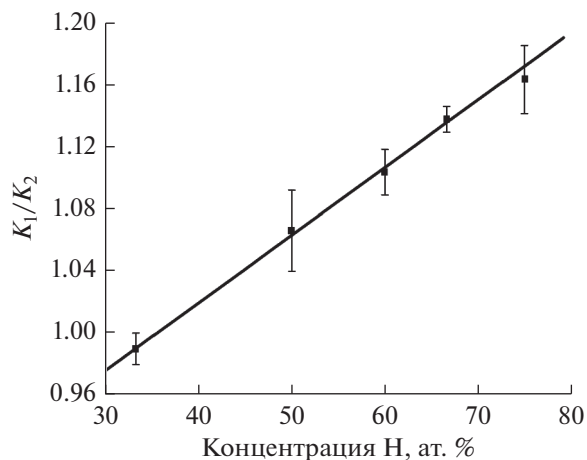


Рис. 5. Градуировочная прямая для Al с наложенными экспериментальными данными.

данными. Также были исследованы порошковые смеси титана с содержанием водорода 33, 50 и 60 ат. %. Спектры ЯОР представлены на рис. 7.

Все полученные экспериментальные данные лежат в пределах ошибки 1%, но при увеличении атомного номера Z мишени уменьшается чувствительность метода, что проявляется в изменении максимального значения K_1/K_2 для различных материалов. Несмотря на понижение чувствительности метода с ростом Z , модельные и экспериментальные данные для Zr (рис. 8) с высокой точностью (до 0.25 ат. %) совпадают с результатами волюмометрического анализа. Следовательно, предложенный метод в дальнейшем может быть использован для анализа качества защитных покрытий на поверхности Zr толщи-

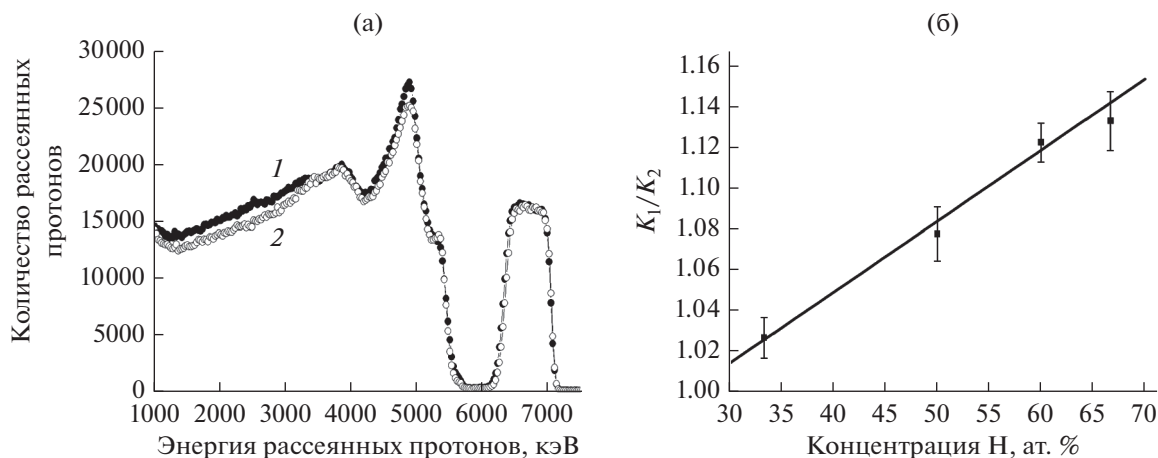


Рис. 6. Спектры ЯОР магния (1) и его гидроида (2) (а). Градуировочная прямая для Al с наложенными экспериментальными данными (б).

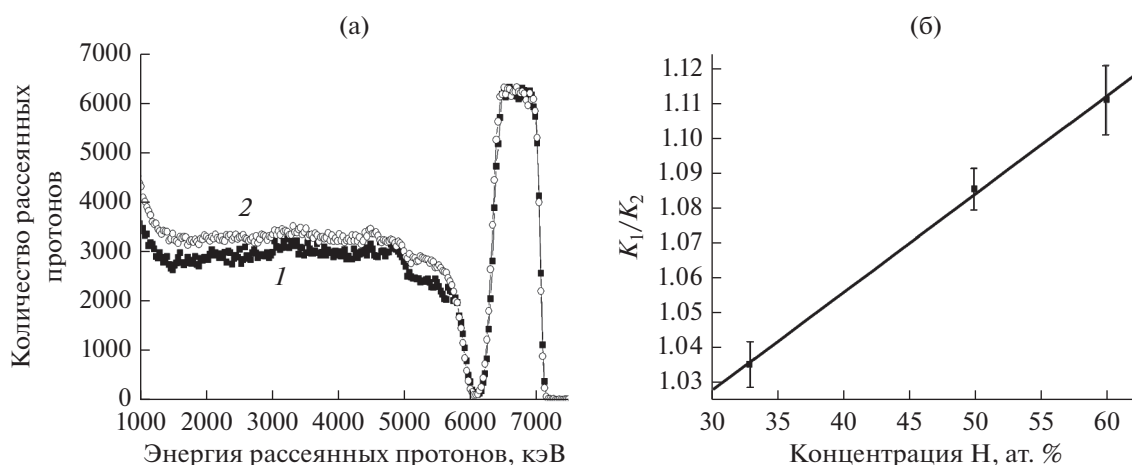


Рис. 7. Спектры ЯОР титана (1) и его гидроида (2) (а). Градуировочная прямая для Ti с наложенными экспериментальными данными (б).

ной до 50 мкм, так как при большей толщине защитных покрытий будет сильно ограничена выборка каналов и, как следствие, понизится точность метода.

Анализ защитных покрытий после полимерного наполнения

Анализ спектра образца Al с покрытием, полученным микродуговым оксидированием, после наполнения поли-параксиленом (рис. 9) показал, что на поверхности образовался слой с высоким содержанием углерода (40 ат. %) и водорода (40 ат. %). Выход ЯОР для каждого из элементов зависит от его относительного содержания. Высокое процентное содержание поли-параксиленового наполнения в тонком поверхностном слое привело к заметному уменьшению выхода для элементов основного покрытия (O и Al), что про-

является в виде сдвига начальной энергии для этих элементов в спектре ЯОР.

Анализ спектров образца в области ниже 4000 кэВ, что соответствует рассеянию протонов на материале подложке, показал, что водород не распространяется вне сформированного покрытия (рис. 9). Стоит отметить, что переход в область анализа с меньшей энергией частиц, рассеивающихся в образце (за счет энергетических потерь в фольге тантала), привел к одновременному увеличению пространственного разрешения при определении концентрации водорода с уменьшением максимальной глубины анализа.

Для оценки радиационного урона, вызванного протонами с энергией $E_p = 7.5$ МэВ, осуществляли сканирование поверхности с шагом 4 мм, что обеспечивало анализ независимых областей покрытия. Перед измерениями спектра, использо-

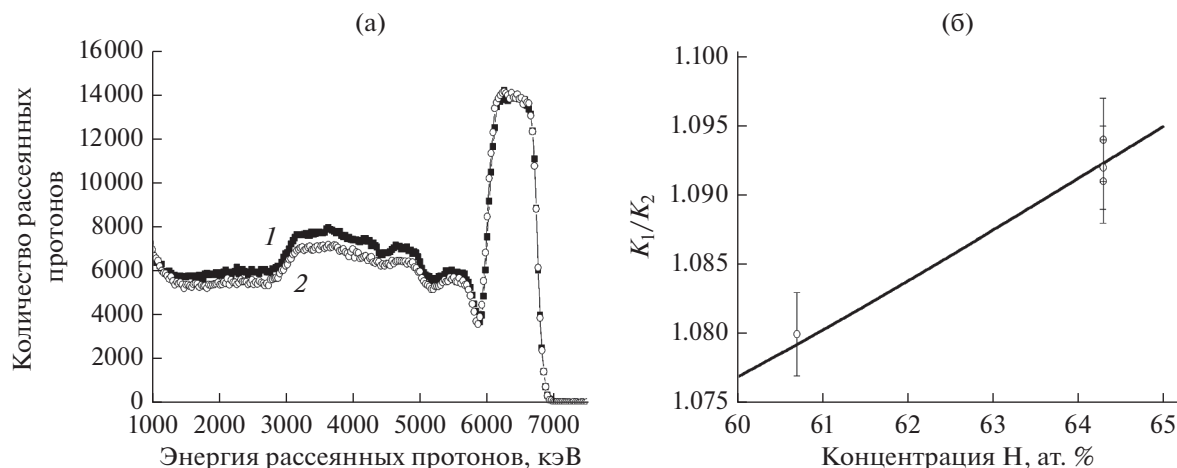


Рис. 8. Спектры ЯОР циркония (1) и его гидрида (2) (а). Градуировочная прямая для Zr с наложенными экспериментальными данными (б).

вавшегося для сравнения, центр мишени подвергался облучению пучками протонов с $E_p = 7.5$ МэВ в течение 4 ч. Время набора спектра по центру мишени после облучения составляло 1 ч. Для точки со смещением 4 мм проводилось только одно измерение продолжительностью 30 мин. На рис. 10 представлены для сравнения спектры областей покрытия, подвергнутых облучению, длительность которого отличалась в 10 раз. Полная идентичность полученных спектров говорит о том, что водород не высвобождается из поли-парахилена и не мигрирует вглубь покрытия. Проведенное исследование позволяет сделать вывод о неразрушающей природе предложенного метода по отношению к водороду, что делает его пригодным для контроля содержания водорода в гидридах в течение продолжительного времени.

ВЫВОДЫ

Показано, что предложенный метод анализа содержания водорода на основе спектрометрии ЯОР протонов позволяет определять водород на глубине до 100 мкм. Высокая точность определения концентрации достигается при относительном содержании водорода 20 ат. % и выше. Метод обладает повышенной чувствительностью по отношению к легким элементам в материалах на основе углерода, но его применение к тяжелым металлам также является правомерным.

На примере исследований полимерного наполнения защитных покрытий установлено, что предложенный метод наносит минимальный радиационный урон водородсодержащим мишеням. При использованной энергии пучков прото-

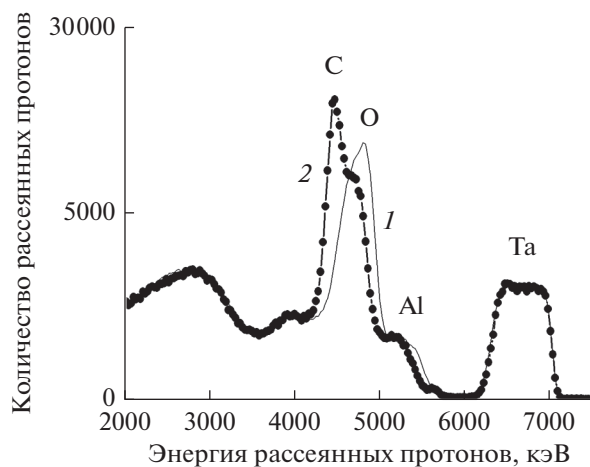


Рис. 9. Спектры ЯОР алюминия с защитным оксидным слоем до (1) и после полимерного наполнения (2).

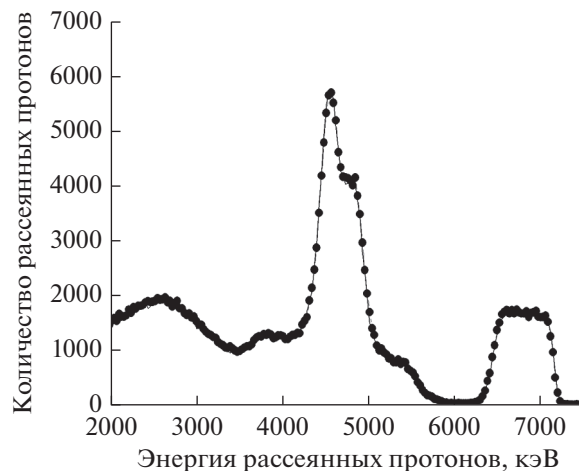


Рис. 10. Спектры ЯОР участков покрытия при длительности облучения: 30 мин (точки); 300 мин (сплошная кривая).

нов метод позволяет определять качество защитных покрытий толщиной до 50 мкм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-32-00522/18).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушков С.С., Кожеевников О.А. // Вопросы материаловедения. 2009. № 3(59). С. 172.
2. Казаченок М.С., Панин А.В., Осомов К.В. и др. // Физическая мезомеханика. 2006. Вып. 9. С. 115.
3. Дресвянников А.Ф., Ситников С.Ю. // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2006. № 3–4. С. 72.
4. Basile A., Iulianelli A. Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution. Woodhead Publishing, 2014. 574 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16359-3>
5. Ильин Ф.П., Коршунов А.В., Толбанова Л.О. // Изв. Томского политех. ун-та. 2007. Т. 311. № 4. С. 10.
6. Li B., Li J., Zhao H. et al. // Int. J. Hydrogen En. 2019. V. 44. Iss. 12. P. 6007. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.127>
7. Fritzsche H., Ellis B., Patel J., Lang J. // Int. J. Hydrogen En. 2019. V. 44. Iss. 12. P. 6031. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.053>
8. Kaida T., Kamioka K., Ida T. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2014. V. 332. P. 15. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.02.020>
9. Vendamani V.S., Khan S.A., Dhanunjaya M. et al. // Micropor. Mesopor. Mater. 2017. V. 246. P. 81. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.03.015>
10. Vos M. // Ultramicroscopy. 2002. V. 92. P. 143. [https://doi.org/10.1016/S0304-3991\(02\)00127-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3991(02)00127-4)
11. Чернов И.П., Лидер А.М., Никитенков Н.Н. и др. // Физическая мезомеханика. 2000. Т. 3. № 6. С. 97.
12. Ларионов В.В., Румбешта Д.В. // Вестн. ТГПУ. 2012. № 7 (122). С. 76.
13. Reichart P., Dollinger G., Bergmaier A. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2002. V. 197. P. 134. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(02\)01479-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)01479-9)
14. Wegdern M., Kristiansson P., Skogby H. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2005. V. 231. P. 524. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.01.111>
15. Moser M., Reichart P., Greubel C., Dollinger G. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2011. V. 269. P. 2217. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.02.017>
16. Бюклинг Е., Каянти К. // Кинематика элементарных частиц. М.: Мир, 1975. 343 с.
17. Беспалов О.В., Борисов А.М., Романовский Е.А. и др. // Ядерная физика. 2009. Т. 72. № 10. С. 1721.
18. Аникин В.А., Борисов А.М., Гусев А.В. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 3. С. 11. <https://doi.org/10.7868/S020735281503004X>

Development of a Method Based on Nuclear Backscattering Spectrometry to Determine the Concentration of Hydrogen in Materials

V. G. Vostrikov^{1,*}, A. I. Kamenskih¹, N. V. Tkachenko^{1,**}

¹Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: vostrikov.vladimir@gmail.com

**e-mail: nicki_tkak@mail.ru

Metal hydrides and their alloys are widely used in nuclear power engineering and are also considered as promising hydrogen accumulators. Due to the nature of materials used in reactors, non-destructive methods are required to determine the concentration of hydrogen and its content in hydrides under the influence of an aggressive environment. In this paper, a technique based on nuclear backscattering spectrometry is proposed, which allows determining the hydrogen content in the sample at a depth of up to 100 μm. The profiles of hydrogen distribution in Al, Mg, Ti, Zr, and their hydrides have been measured. Radiation damage of the sample has been made using the example of a polymer impregnation of a protective coating.

Keywords: nuclear backscattering, hydrogen, titanium, zirconium, aluminum, magnesium, nuclear reactor industry.