

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ДЕСОРБЦИИ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ Ni–In КОМПОЗИТОВ

А. В. Звягинцева¹, А. Н. Морозов², И. М. Кирьян³

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Национальный научный центр «Харьковский физико-техн. институт», Украина

³Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев, Украина

zvygincevaav@mail.ru, morozov@kipt.kharkov.ua

Изучены спектры термодесорбции дейтерия из композитов системы Ni–In, предварительно имплантированных различными дозами ионов дейтерия при T~100 К. Показано, что структура спектра ТДС дейтерия является функцией имплантационной дозы. Увеличение концентрации индия в композитах Ni–In приводит к существенному изменению вида спектра термодесорбции дейтерия, проявляющееся в появлении дополнительных температурных областей десорбции (пиков), что свидетельствует об образовании дополнительных структурных образований. На основании этих спектров построены зависимости изменения интегрального количества десорбирующегося дейтерия в зависимости от дозы имплантированного дейтерия.

Рост концентрации дейтерия приводит к образованию в композитах Ni–In как твердого раствора дейтерия в композите, температура распада которого в вакууме 470–560 К, так и гидрида, температура распада которого 350–370 К в зависимости от соотношения компонент в композите. Увеличение концентрации индия приводит к росту количества удерживаемого дейтерия в композите. При насыщении композита состава 45.6 мас. % In дейтерием с помощью ионной имплантации предельно достижимая концентрация дейтерия 2 ат.Д/ат.Мет.

Никель–индиевые композиты в процессе изготовления электролитическим осаждением насыщаются водородом. Концентрация водорода в композитах с содержанием индия 45.6 мас.% In составляет 50 ат. %H, а для композитов с содержанием индия 38 мас. % In – 25 ат.%H.

1. Введение

Сплавы металлов с индием представляют большой интерес для различных областей современной промышленности. Легирование никеля индием увеличивает его пластичность, износостойкость, прочность на разрыв, облегчает обрабатываемость, повышает антикоррозионную стойкость, придает способность к пайке и к свариваемости с токопроводящими элементами [1]. Задача улучшения свойств никелевых покрытий за счет легирования их индием и создание на этой основе функционального покрытия Ni–In с заданными свойствами, несомненно, является актуальной.

Изучение закономерностей взаимодействия водорода с металлами и сплавами в широком диапазоне температур и давлений является важной проблемой в физическом материаловедении, как с научной, так и с прикладной точки зрения. Согласно литературным данным для ряда металлов наблюдается такое явление, как «водородный пробел», т. е. отсутствует способность к поглощению водорода и образованию металл-гидридной фазы, к которым относится исследуемая система Ni–In [2–4].

Материалы данной работы направлены на рассмотрение возможности применения электрохимических систем для аккумуляирования водорода. Электролитические металлы и сплавы, в отличие от металлургических систем, имеют другой механизм взаимодействия с водородом [5, 6].

Во-первых, водород на электроде (катоде) выделяется совместно с образующимися атомами металла согласно уравнениям:



Во-вторых, наличие атомного водорода (реакция 2) повышает вероятность взаимодействия металла с водородом. Если металл катода имеет большее сродство к водороду, то становится вероятным процесс:



где n и m стехиометрические коэффициенты.

В-третьих, образование дефектов структуры, обладающих более высоким энергетическим состоянием, в сравнении с атомами. По такими дефектами наиболее вероятно взаимодействие атома водорода. Поэтому процесс наводороживания электрохимических систем отличается от взаимодействия водорода с металлами металлургического производства.

Одним из наиболее информативных методов исследования поведения водорода в материалах является метод термодесорбционной спектроскопии. Наряду с определением температурных диапазонов захвата и выделения внедренного водорода, определения термоактивационных параметров, метод показал хорошую корреляцию спектров термоактивированного выделения водорода с фазовыми диаграммами состояния систем металл-водород, что и было успешно использовано в анализе кинетики образования и распада гидридных фаз систем Pd–D [7], Ti–D [8], Zr–D [9].

В данной работе методом электролитического осаждения изготовлены композиционные материалы системы Ni–In и изучены температурные диапазоны десорбции ионно-имплантированного дейтерия в зависимости от соотношения компонент и дозы имплантированного дейтерия.

2. Материалы и методы исследования

2.1. Изготовление композитов системы Ni–In с различным соотношением компонент

Никель – индиевые композиты получали электролитическим осаждением на подложки из меди (толщиной 0,05 мм), с составом электролита: $\text{NiSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O} = 140$ г/л; $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O} = 20$ г/л; и $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ концентрация которого изменялась от 1 до 12 г/л [10]. Вариация количеством $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ обеспечивала получение композитов Ni–In с различным соотношением компонент. Электролиз проводился с использованием платинового анода и медного катода. При увеличении концентрации $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ в электролите от 1 до 12 г/л содержание In в системе возрастает до 61,3 мас.%, а Ni, соответственно, уменьшается до 38,7 мас.%. Содержание компонентов в системе Ni–In определялось рентгено-флюоресцентным методом.

Изготовлены образцы четырех концентраций: № 1 – 24 мас.% In (при концентрации $\text{In}_2(\text{SO}_4)$ 1 г/л); № 2 – 38 мас.% In (2 г/л $\text{In}_2(\text{SO}_4)$); № 3 – 45,6 мас.% In (4 г/л $\text{In}_2(\text{SO}_4)$); № 4 – 61,3 мас.% In (12 г/л $\text{In}_2(\text{SO}_4)$). На фазовой диаграмме, приведенной на рис. 1 стрелками отмечены образцы, которые были приготовлены и исследованы.

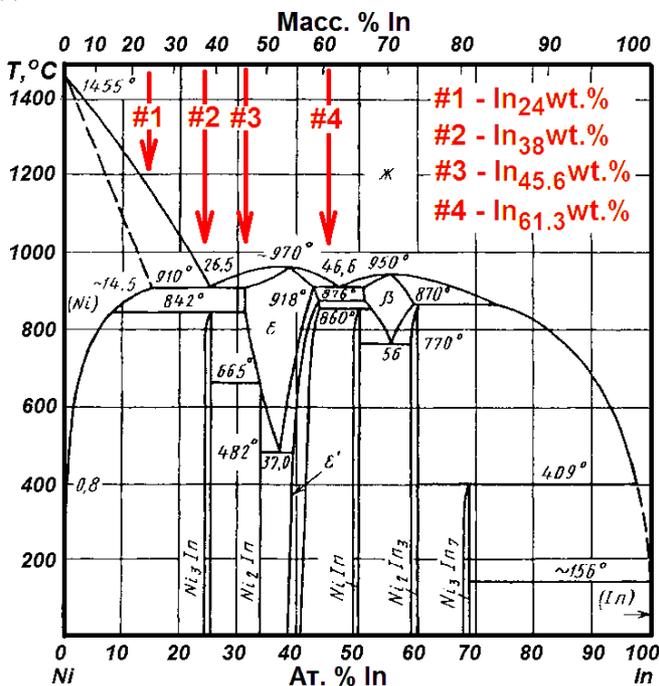


Рис. 1. Диаграмма фазового состояния системы Ni–In [11]. Стрелками отмечены образцы, которые были приготовлены и исследованы: № 1 – 24 мас.% In; № 2 – 38 мас.% In; № 3 – 45,6 мас.% In; № 4 – 61,3 мас.% In

2.2. Термодесорбционная спектроскопия

Методом термодесорбционной масс-спектрометрии (ТДС) исследовалась кинетика развития спектра десорбции дейтерия из образцов системы Ni–In в зависимости от соотношения компонент и дозы имплантированного дейтерия. С целью уменьшения влияния фонового водорода, имеющегося в образцах и в камере мишеней, в экспериментах использовался изотоп водорода – дейтерий. Внедрение дейтерия и измерения спектров термодесорбции были выполнены на экспериментальной установке «СКИФ», детально описанной в работе [12]. Образцы размером 10×5 мм² крепились на фольги-нагреватели из тантала размером $5 \times 45 \times 0,1$ мм³. Измерение температуры осуществлялось вольфрам-рениевой термопарой ВР5/20, прикрепленной к нагревателю. Образцы подвергались имплантации ионами дейтерия с энергией 12 кэВ (D_2^+ энергии 24 кэВ) дозами в пределах 3×10^{17} – 3×10^{18} D/см². После достижения необходимой дозы внедрения газовых ионов в металлическую мишень пучок выключается, после чего образец нагревался по примерно линейному закону с помощью омического нагрева в диапазоне температур 80 ... 800 К со скоростью $\sim 3,5$ К/с.

Парциальное давление газов в аналитической камере измерялось монопольным масс-спектрометром АПДМ-1 в динамическом режиме. Регистрация спектров термодесорбции осуществляется в абсолютных единицах в двух координатных системах: p - t и p - T (где t и T – время и температура нагрева, соответственно) Одновременно осуществлялась регистрация сигналов от масс-спектрометра, вакуумметра, термопары с помощью аналого-цифрового преобразователя WAD-AIK-BUS (4-х канальный модуль аналогового ввода с поканальной гальванической развязкой на шину USB. Погрешность измерений температуры составляла ± 5 К. Спектры скоростей газовой выделенности, как правило, хорошо проявлялись во всем температурном диапазоне. Последнее обстоятельство очень важно для корректной обработки профилей спектральных линий с целью получения термодинамических характеристик различных стадий газовой выделенности, а также при детальном изучении каждой стадии с целью выяснения его физической природы. Суммарное количество газа, выделившегося при нагревании из образца, облученного до заданной дозы, определялась по площади фигуры, лежащей под кривой зависимости скорости десорбции газа со временем.

2.3. Рентгеноструктурные исследования

Рентгеноструктурные исследования образцов проводили на дифрактометре HZG-4 в $CuK\alpha$ -излучении (β -фильтр). Исследовались образцы исходные и предварительно прошедшие отжиг при температуре 700 К в течении 30 мин.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Температурные интервалы десорбции дейтерия из Ni–In композитов

На начальном этапе исследования проведено тестирование структурного состояния композитов системы Ni–In водородом по методике, описанной в работе [13]. Для этого проведена имплантация ионов дейтерия заданной дозы (3×10^{17} D/cm²) и регистрация спектра термодесорбции ионно-имплантированного дейтерия для композитов разного состава (см. рис. 2). Видно, что в спектрах термодесорбции дейтерия присутствует несколько областей десорбции: протяженные низкоинтенсивные области и пики с дискретной энергией активации. Каждая из наблюдаемых областей десорбции отражает наличие того или иного структурного состояния в композите. Протяженные низкоинтенсивные области термодесорбции дейтерия свидетельствует о наличии в образцах аморфной составляющей, что вполне логично для композитов, изготовленных при низкой температуре и не подвергавшихся термообработке. Наличие одиночного пика в спектре термодесорбции при низких концентрациях внедренного дейтерия обусловлено образованием фазового состояния твердого раствора дейтерия в композитах, температура распада которого, судя по температуре максимальной скорости десорбции дейтерия (центр тяжести пика), различная, находится в интервале значений 450–530 К и зависит от состава композита.

Отметим некоторые особенности, которые следуют из анализа представленных спектров термодесорбции дейтерия. Наиболее простой спектр термодесорбции дейтерия наблюдается для композита Ni–In состава 45,6 мас.% In (№ 3, на рис. № 2 с) – в нем присутствует две температурные области десорбции: (1) пик с дискретной энергией активацией и температурой максимума 560 К и (2) протяженная низкоинтенсивная область десорбции в интервале температур 450–700 К. Это свидетельствует о наличии в композите двух составляющих: (1) кристаллической – с температурой распада 540 К и (2) аморфной – с переменной энергией активации (протяженная низкоинтенсивная область десорбции в интервале температур 450–700 К). Наиболее сложный спектр термодесорбции дейтерия наблюдается для композита Ni–In состава 61,3 мас.% In (№ 4, на рис. № 3 d) в нем присутствует как минимум пять температурных областей десорбции: дискретных с температурами максимумов 330 К, 420 К, 470 К и 570 К и протяженной низкоинтенсивной области десорбции дейтерия в интервале температур 300–700 К.

Далее были получены спектры термодесорбции дейтерия из композитов Ni–In имплантированных различными дозами ионов.

На рис. 3 приведены характерные спектры термодесорбции дейтерия, имплантированного в образцы композита № 3 состава 45,6 мас.% In. Видно, что структура спектра ТДС дейтерия является функцией имплантационной дозы. При низких дозах имплантированного дейтерия в спектре присутствует один пик с температурой максимума ~550 К. Такой вид спектра сохраняется вплоть до дозы 3×10^{17} ат. D/cm². Повышение дозы приводит к появлению нового низкотемпературного пика с температурой максимума ~430 К. При даль-

нейшем увеличении дозы температура максимума этого пика газовой выделения постепенно смещается в область более низких температур. При этом высокотемпературный участок низкотемпературного пика простирается в область высоких температур вплоть до температур 600–700 К.

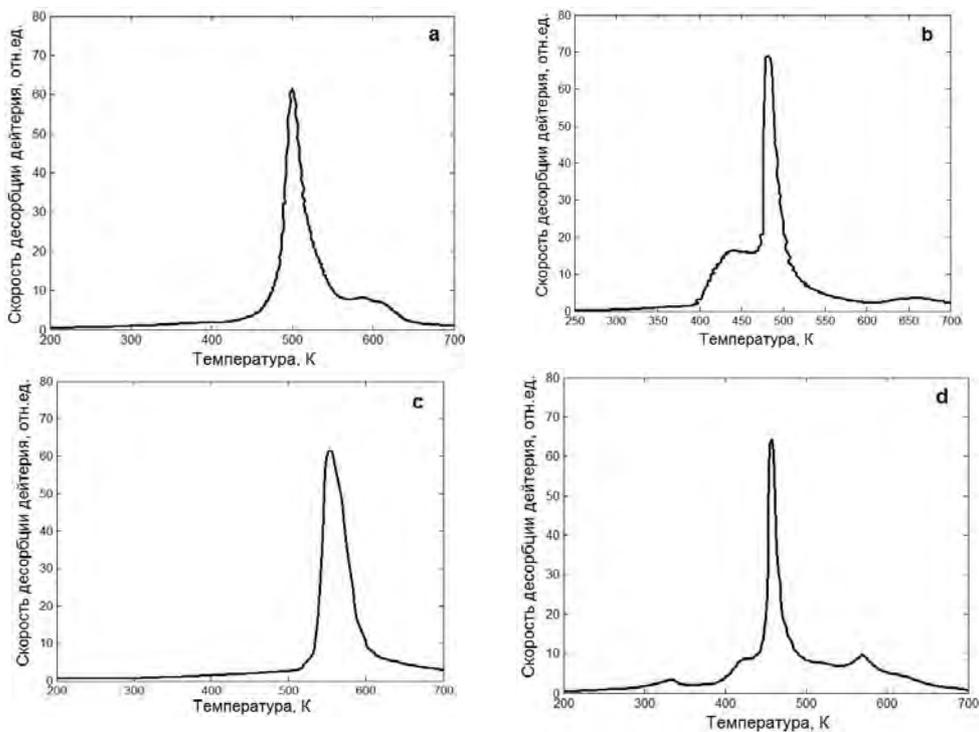


Рис. 2. Спектры термодесорбции дейтерия, имплантированного в образцы дозой $3 \times 10^{17} \text{ D/cm}^2$ в зависимости от состава композита системы Ni–In: а) – № 1 – 24 мас.% In; б) – № 2 – 38 мас.% In; в) – № 3 – 45,6 мас.% In; д) – № 4 – 61,3 мас.% In

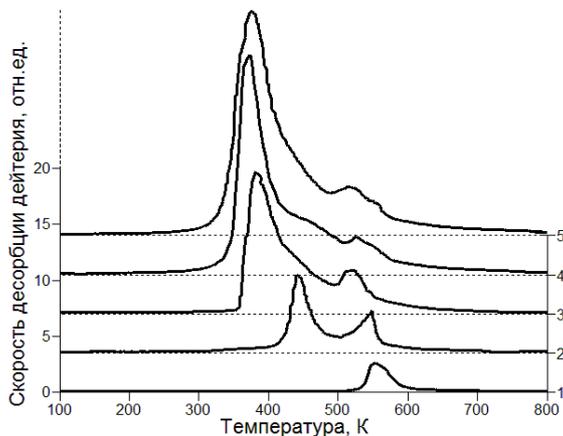


Рис. 3. Спектры термодесорбции дейтерия, имплантированного в образцы композита № 3 состава 45,6 мас.% In: 1) – $3 \times 10^{17} \text{ D/cm}^2$; 2) – $7,5 \times 10^{17} \text{ D/cm}^2$; 3) – $1,3 \times 10^{18} \text{ D/cm}^2$; 4) – $2 \times 10^{18} \text{ D/cm}^2$; 5) – $3 \times 10^{18} \text{ D/cm}^2$

Наличие единственного пика при низких имплантационных дозах обусловлено образованием фазового состояния твердого раствора дейтерия в композите № 3 состава 45,6 мас.% In, температура распада которого ~ 550 К. Этот вывод сделан на основе данных, полученных при изучении кинетики образования и распада гидридных фаз систем Pd-D, Ti-D, Zr-D [7–9]. Низкотемпературная область десорбции, по-видимому, свидетельствует об образовании гидрида, распад которого начинается при комнатной температуре (начало десорбции дейтерия). Отметим, что, что образование низкотемпературной области десорбции дейтерия сопровождается появлением протяженной по температурной шкале области десорбции дейтерия в диапазоне температур 300–600 К, которая расположена между пиками.

Характерные спектры термодесорбции дейтерия, имплантированного в образцы композитов № 1; 2 и 4, приведены на рис. 4.

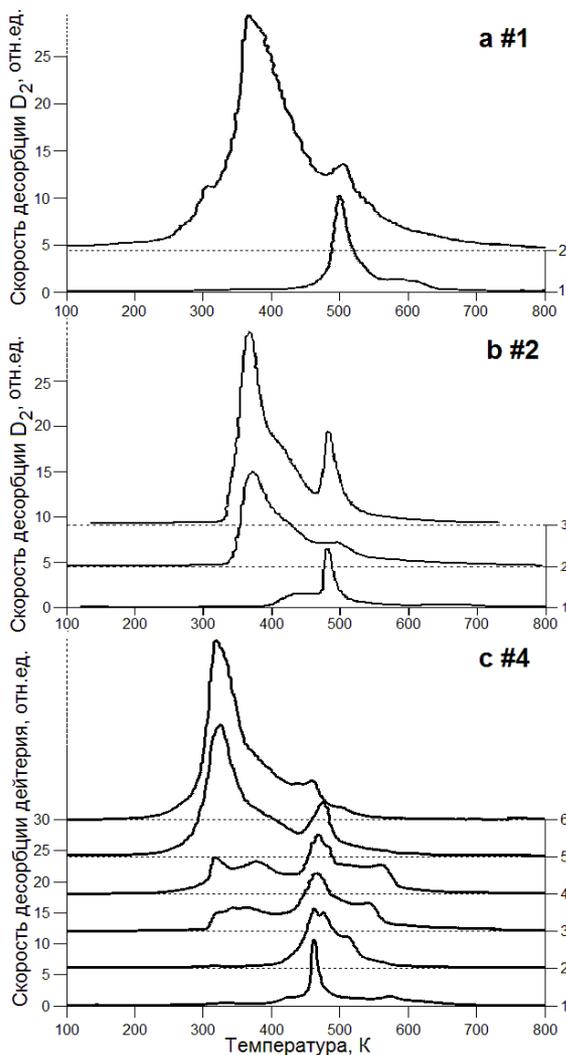


Рис. 4. Спектры термодесорбции дейтерия, имплантированного в образцы композита Ni-In: **а)** – композит № 1 состава – 24 мас.% In, дозы: 1) – 3×10^{17} D/cm², 2) – $1,5 \times 10^{18}$ D/cm²; **б)** – композит № 2 состава 38 мас.% In: 1) – 3×10^{17} D/cm², 2) – $6,5 \times 10^{17}$ D/cm²; **в)** – композит № 4 состава 61,3 мас.% In: 1) – 3×10^{17} D/cm², 2) – 5×10^{17} D/cm², 3) – $1,2 \times 10^{18}$ D/cm², 4) – $1,8 \times 10^{18}$ D/cm², 5) – $2,4 \times 10^{18}$ D/cm², 6) – $3,3 \times 10^{18}$ D/cm²

Из рассмотрения спектров (см. рис. 3 и 4) видно, что с увеличением дозы имплантированного дейтерия происходит трансформация структурного состояния композитов, которое проявляется при дозах выше 2×10^{18} D/cm² и проявляется на спектре термодесорбции дейтерия в образовании трех областей десорбции дейтерия: низкотемпературный пик (гидрид), высокотемпературный пик (твердый раствор дейтерия в композите) и протяженная по температурной шкале область десорбции дейтерия, которая расположена между пиками (аморфная составляющая).

3.2. Рентгеноструктурный анализ

На рис. 5 приведены дифрактограммы исходных образцов Ni–In композитов с различным соотношением компонент. На всех исходных дифрактограммах композитов видна интенсивная линия меди (220) и очень слабые достаточно узкие линии меди (111), (200) и (311), что свидетельствует о наличии очень сильной текстуры подложки. Для композита № 1 состава 24 мас.% In на дифрактограмме практически видны только линии медной подложки (рис. 5а). Рост концентрации индия в композитах (образцы № 2 и 3, состава 38 мас.% In и 45,6 мас.% In, соответственно) сопровождается появлением и ростом интенсивности дополнительных линий на дифрактограммах (рис. 5б и 5с), которые можно объяснить образованием интерметаллида In₃Ni₂ (PDF № 07-0298), что не противоречит фазовой диаграмме системы Ni–In (рис. 1).

Дальнейшее увеличение концентрации индия (образец № 4 состава 61,3 мас.% In) приводит к появлению дополнительных линий на дифрактограмме (рис. 5д), что свидетельствует о возникновении интерметаллида InNi₃ (PDF № 07-0250), в количестве сопоставимом с интерметаллидом In₃Ni₂. Согласно дифрактограммам, свободный In в образцах отсутствует. Также следует отметить увеличение толщины покрытий с ростом концентрации In в электролите, что следует из уменьшения относительной интенсивности линии меди (220) для образцов № 2–4. На образцах № 2–4 вероятно присутствие Ni в свободном состоянии, что видно из появления линии (220) в характерном для него положении справа от линии (220) меди.

Дифрактограммы образцов Ni–In композитов, прошедших предварительный отжиг при температуре 700 К в течение 30 мин, приведены на рис. 6. Для композитов № 1 состава 24 мас.% In и № 2 состава 38 мас.% In практически видны только линии медной подложки и сопоставимые по интенсивности, но находящиеся несколько правее, линии никеля: очень интенсивная линия (200) и слабые линии (111), (220) и (311) (рис. 6а и 6б), что свидетельствует, в первую очередь, об изменении оси текстуры подложки. Одновременное присутствие в отожженных образцах линий меди и никеля следует из дублетного характера линии (200), причем с инверсной интенсивностью в отношении дублета $K\alpha_1 / K\alpha_2$ и большей ее полушириной в сравнении с полушириной линии (220) для исходного состояния, где линии меди и никеля разделяются. Практически все дополнительные дифракционные пики исчезли для композита № 3 состава 45,6 мас.% In, а для композита № 4 состава 61,3 мас.% In отжиг существенно уменьшил их количество. Такое влияние отжига можно объяс-

нить как распадом ранее образовавшихся синтерметаллидных структур в композитах, так и их испарением в вакууме при нагреве, что приводит к уменьшению толщины покрытий и, возможно, образованию островковых покрытий. При этом система линий для композита № 4 соответствует интерметаллиду Cu_9In_4 (PDF № 42-1476), сформировавшемуся при отжиге.

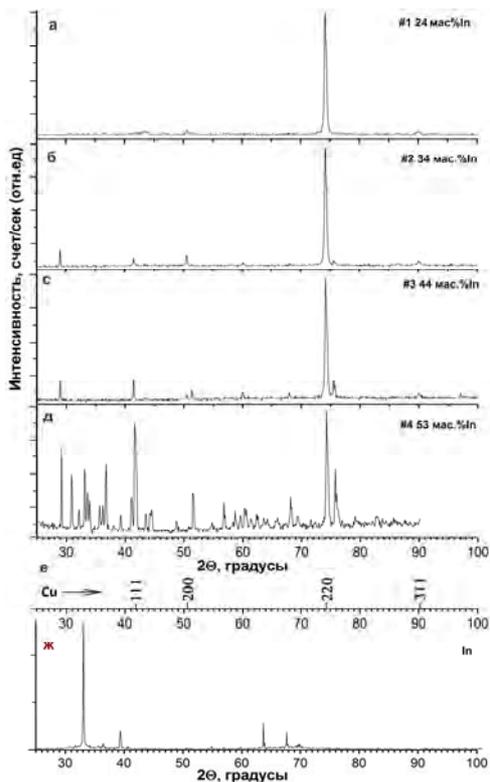


Рис. 5. Дифрактограммы исходных Ni–In композитов

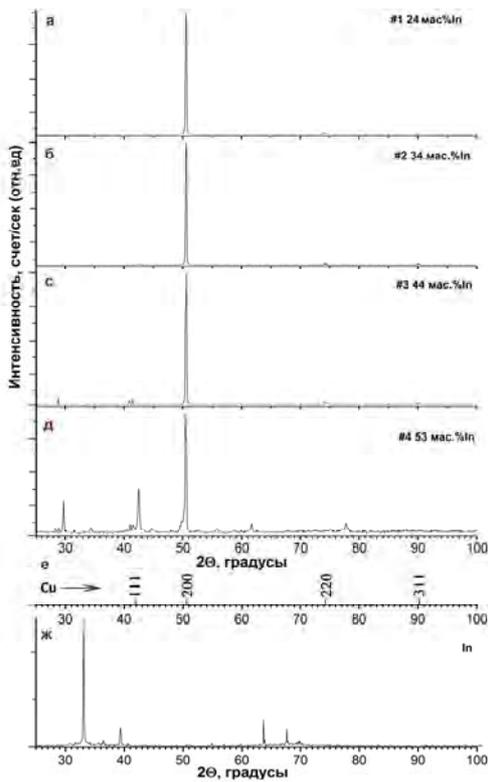


Рис. 6. Дифрактограммы композитов Ni–In, отожженных при 700 К в течение 30 мин

3.3. Зависимость количества внедренного дейтерия от дозы имплантированного дейтерия

Изменение интегрального количества десорбирующегося дейтерия в зависимости от дозы имплантированного дейтерия для композитов № 3 состава 45,6 мас.%In и № 4 состава 61,3 мас.%In приведены на рис. 7.

Анализ хода кривой для композита состава № 3 состава – 45,6 мас.%In (■) показывает, что вплоть до достижения дозы $2 \times 10^{18} \text{ D/cm}^2$ прослеживается линейная зависимость количества внедренного дейтерия от дозы имплантированного дейтерия. Затем наблюдается резкое отклонение от линейности и тенденция к выходу на насыщение при дозе $2,5 \times 10^{18} \text{ D/cm}^2$. Такой ход зависимости свидетельствует, что при температуре имплантации (100 К) внедренный дейтерий имеет низкую диффузионную подвижность и находится в пределах

имплантационного слоя. Принимая во внимание, что при температуре облучения имплантированный дейтерий при дозах $\leq 2 \times 10^{18}$ D/cm² практически неподвижен и остается в пределах имплантационного профиля, а также, учитывая величину среднего проективного пробега ионов D⁺ с энергией 12 кэВ в композите и форму профиля залегания дейтерия, нетрудно показать, что при вышеупомянутом значении дозы внедрения максимальная концентрация дейтерия в имплантационном профиле составляет ~ 2 ат. D/ат. Мет.

Увеличение концентрации индия приводит к росту предельного количества удерживаемого дейтерия в композите. Об этом свидетельствует график зависимости интегрального количества десорбированного дейтерия от дозы дейтерия для композита № 4 (●) состава 61,3 мас.% In, из которого следует, что даже до максимальной из использованных доз имплантированного дейтерия ($3,3 \times 10^{18}$ D/cm²), прослеживается линейная зависимость количества десорбированного дейтерия от дозы имплантированного дейтерия. Фактически, при отсутствии выхода на насыщение мы не можем говорить о максимальной концентрации дейтерия, которая может удерживаться в композитах состава с содержанием индия выше 45,6 мас.% In.

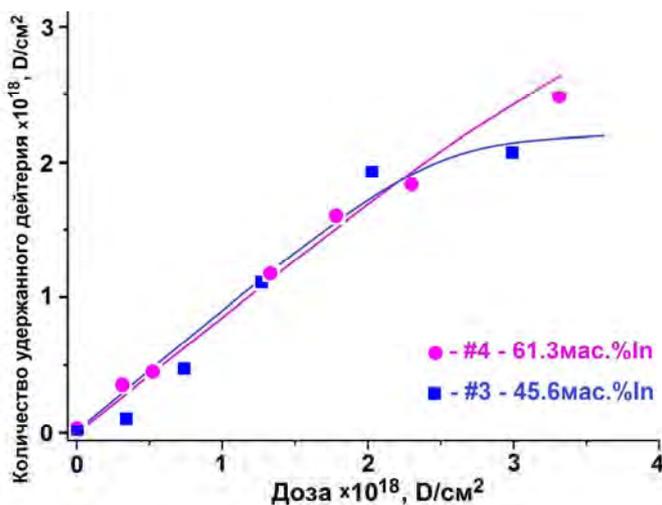


Рис. 7. График зависимости интегрального количества десорбированного дейтерия от дозы имплантированного дейтерия для композитов Ni-In:

№ 3 (■) состава 45,6 мас.% In и № 4 (●) состава 61,3 мас.% In

3.4. Десорбция водорода из электролитически приготовленных композитов Ni-In

Никель-индий композиты в процессе изготовления электролитическим осаждением насыщаются водородом. Фактически, одновременно происходит два процесса: формирование никель-индиевого композита на медной подложке и его насыщение водородом. Проведены исследования по определению количества водорода, накопившегося в композитах в процессе их изготовления. С этой целью образцы помещали в камеру установки СКИФ и методом ТДС

были получены спектры десорбции водорода (см. рис. 8). Затем, после охлаждения образца, в этот же образец была проведена имплантация водорода дозой 1×10^{17} H/cm² и регистрация этого спектра, как тестирующего для оценки количества водорода, накопившегося в композитах в процессе их изготовления. Суммарное количество водорода, выделившегося при нагревании из образца, определялась по площади фигуры, лежащей под кривой газовой выделения.

Проведены оценочные расчеты количества десорбированного водорода из композитов № 2 состава 38 мас.%In и № 3 состава 45,6 мас.%In. Из этого расчета следует, что в композите № 3 после его изготовления находилось $1,14 \times 10^{18}$ атомов водорода, что соответствует формуле ат.Мет/ат.Н = 2, а в композите № 2 концентрация атомов водорода соответствует формуле ат.Мет/ат.Н = 4.

Отметим, что температурный интервал десорбции водорода существенно отличается от температурных интервалов десорбции ионно имплантированного дейтерия. Вполне возможно, что десорбция водорода при температурах выше 650 К может быть обусловлена как десорбцией водорода и водородсодержащих газов из конструкций камеры измерений в процессе нагрева образцов так и отжигом ловушек, удерживающих водород при температурах выше 650 К.

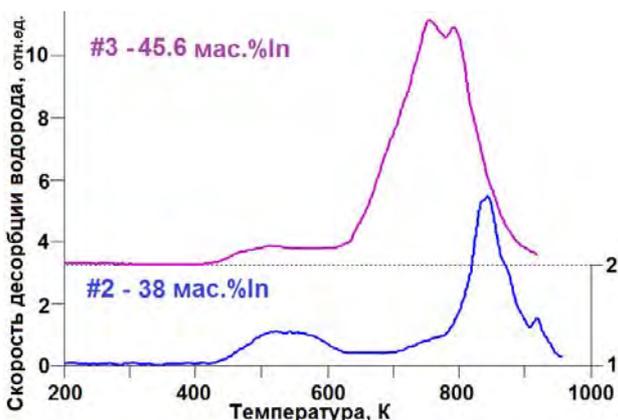


Рис. 8. Спектры термодесорбции водорода, выделившегося из композитов системы Ni-In: 1 – № 2 состава 38 мас.%In и 2 – № 3 состава 45,6 мас.%In

3.5. Энергии активации термодесорбции

На примере образца № 1 состава 24 мас.%In и 76 мас.%Ni, имплантированного ионами дейтерия дозой 3×10^{17} D/cm² проведен расчет энергии активации термодесорбции для пика с температурой максимума 500 К (см. рис. 2а и 4а кривая 1) с использованием известного уравнения кинетики десорбции [14, 15]:

$$dn_i/dt = -K_i n_i^\gamma(t) e^{-E_i/kT}, \quad (5)$$

где dn_i/dt – скорость десорбции, которая в каждый момент времени соответствует ординате огибающей i -го пика термодесорбции; $n_i(t)$ – число частиц,

остающихся в образце к данному моменту десорбции; K_i – константа скорости десорбции для i -го пика; γ – порядок реакции; E_i – энергия активации десорбции; k – постоянная Больцмана; T – текущее значение температуры.

Преобразование уравнения (1) с учетом $T = T_0 + \alpha t$ (где α – скорость нагрева образца) и последующего логарифмирования приводит к соотношению:

$$-\ln \left[-\frac{dn_i}{dT} / n_i^\gamma \right] = -\frac{E_i}{k} \frac{1}{T} + \ln K_i / \alpha. \quad (6)$$

Подставив значения dn_i/dt и $n_i(t)$ из экспериментально измеренного спектра термодесорбции представленного на рис. 2,а были получены поли-термы Аррениуса для двух значений показателя порядка реакции $\gamma = 1$ и $\gamma = 2$. Как видно из рис. 9 экспериментальные точки хорошо укладываются на прямую в случае $\gamma = 2$, что свидетельствует о втором порядке реакции, т.е. о квадратичной зависимости скорости десорбции от n . Значение энергии активации для пика с температурой максимума 500 К равно 2,9 эВ. На этом же рисунке также приведено сравнение экспериментальных и рассчитанных по предложенной модели спектров термодесорбции дейтерия из композита Ni–In: сплошными линиями представлены экспериментальные спектры, пунктиром – расчетные спектры.

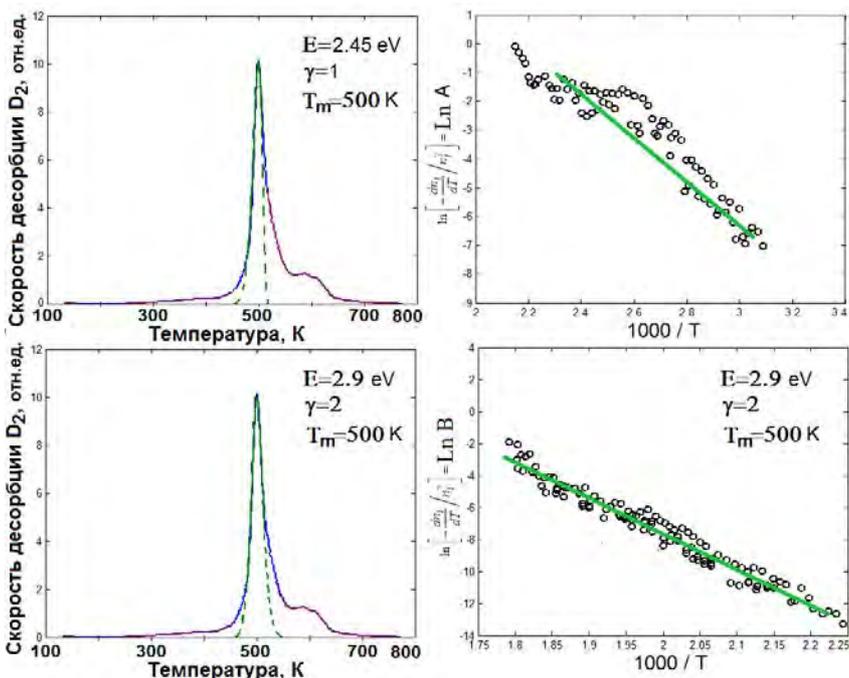


Рис. 9. Политермы Аррениуса для пика спектра термодесорбции дейтерия из образца № 1 состава 24 мас.%In и, соответственно, 76 мас.%Ni, имплантированного ионами дейтерия дозой $3 \times 10^{17} \text{ D/cm}^2$, рассчитанные для двух значений показателя порядка реакции $\gamma = 1$ и $\gamma = 2$

4. Выводы

Структура спектра термодесорбции дейтерия является функцией имплантационной дозы.

Увеличение концентрации индия в композитах Ni–In приводит к существенному изменению вида спектра термодесорбции дейтерия, проявляющееся в появлении дополнительных температурных областей десорбции (пиков), что свидетельствует об образовании дополнительных структурных образований. На основании этих спектров построены зависимости изменения интегрального количества десорбирующегося дейтерия в зависимости от дозы имплантированного дейтерия.

Рост концентрации дейтерия приводит к образованию в композитах Ni–In как твердого раствора дейтерия в композите, температура распада которого в вакууме 470–560 К, так и гидрида температура распада которого 350–370 К в зависимости от соотношения компонент в композите.

Увеличение концентрации индия приводит к росту количества удерживаемого дейтерия в композите. При насыщении композита состава 45,6 мас.%In дейтерием с помощью ионной имплантации предельно достижимая концентрация дейтерия 2 ат.Д/ат.Мет.

Никель–индий композиты в процессе изготовления электролитическим осаждением насыщаются водородом. Концентрация водорода в композитах с содержанием индия 45,6 мас.%In составляет 50 ат.%H, а для композитов с содержанием индия 38 мас.%In – 25 ат.%H.

Список литературы

1. Звягинцева А. В., Фаличева А. И. Электроосаждение покрытий никель – индий из сульфатно-хлоридного электролита. Гальванотехника и обработка поверхности. 1994. Т. 3, № 5–6. С. 47.
2. Маккей К. Водородные соединения металлов. М.: Мир. 1968, 244 с.
3. Галактионова Н. А. Водород в металлах. М.: Metallurgia. 1967, 303 с.
4. Гельд П. В., Рябов Р. А. Мохрачева Л. П. Водород и физические свойства металлов и сплавов. Гидриды переходных металлов. М.: Наука. 1985, 232 с.
5. Гамбург Ю. Д. Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов. М.: Янус-К. 1997, 384 с.
6. Власов Н. М., Звягинцева А. В. Математическое моделирование водородной проницаемости металлов. Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГТУ». 2012, 248 с.
7. Rybalko V. F., Morozov A. N., Neklyudov I. M., Kulish V. G. Observation of new phases in Pd-D systems. Phys. Lett. 2001. Vol. 287 A. P. 175.
8. Неклюдов И. М., Морозов А. Н., Кулиш В. Г. Температурные диапазоны стабильности гидридных фаз системы TiD. Материаловедение. 2005. № 11. С. 45.
9. Неклюдов И. М., Рыбалко В. Ф., Морозов А. Н., Кулиш В. Г., Черняева Т. П., Борц Б. В. Накопление и выделение ионно-имплантированного дейтерия из циркония. Материаловедение. 2002. № 10. С. 51.

10. Zvyginceva A. V., Morozov O. M., Zhurba V. I., Progolaieva V. O. Effects of Deuterium Concentration on Deuterium Desorption Temperature Range from Ni–In Composites. *Scientific Journal. Proceedings of the international conference. nanomaterials: applications and properties.* 2013. Vol. 2, N 1. 01NTF37(3pp).

11. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник, ред. Н. П. Лякишев, том 3, кн. 1. М.: Машиностроение. 2001, 872 с.

12. Ружицкий В. В., Грибанов Ю. А., Рыбалко В. Ф., Хазан С. М., Морозов А. Н., Мартынов И. С. Многоцелевая экспериментальная установка «СКИФ». *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиац. повр. и радиац. материаловед.* 1989. Вып. 4/51/. С. 84.

13. Neklyudov I. M., Morozov O. M., Kulish V. G., Zhurba V. I., Khaimovich P. A., Galitskiy A. G. Hydrogen diagnostics of structural states in 18Cr10NiTi steel. *Journal of Hydrogen Energy.* 2011. Vol. 36. P. 1192.

14. Redhead P. A. Thermal desorption of gases. *Vacuum.* 1962. Vol. 12. P. 203.

15. Штиллер В. Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика. М.: Мир, 2000, 176 с.