



**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗОТОПОВ
ВОДОРОДА С КОНСТРУКЦИОННЫМИ
МАТЕРИАЛАМИ. IHISM-07**

**INTERACTION OF HYDROGEN
ISOTOPES WITH STRUCTURAL
MATERIALS. IHISM-07**

**Третья международная конференция и
Третья международная Школа молодых ученых и
специалистов**

г. Санкт-Петербург, 02-07 июля 2007 г.

**Third International Conference and
Third International School for young scientists
Saint-Petersburg, July 02-07, 2007**



Тезисы докладов / Abstracts

Саров, 2007

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА
С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ.
IHISM-07**

**INTERACTION OF HYDROGEN ISOTOPES WITH
STRUCTURAL MATERIALS.
IHISM-07**

Тезисы докладов Третьей международной конференции
и
Третьей международной Школы молодых ученых и специалистов
(г. Санкт-Петербург, 02-07 июля 2007 г.)

Abstracts of presentations at the Third International Conference
and
Third International School for young scientists
(Saint-Petersburg, July 02-07, 2007)

Саров, 2007

02.07 Понед.	Завед. рабочие	03.07 Вторник	Заседание 4 Работоспособность инструментов 114: B1, B7 B4: B-05	04.07 Среда	Заседание 5 Ударная ударная волна C7: C1 D7: C3-C5	05.07 Четверг	Заседание 6 Взаимодействие структурных элементов в сварных соединениях D1: D4, D2 D1: D3, D6	06.07 Пятница	Заседание 7 Измерения в реальном времени D13: B16, B17 D13: B18, B19	07.07 Суббота	Заседание 8 Школа молодых ученых и специалистов D11: A9, A10
-----------------	-------------------	------------------	---	----------------	--	------------------	---	------------------	---	------------------	--

Тезисы докладов Третьей международной конференции и Третьей международной Школы молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-07».
г. Санкт-Петербург, 02-07 июля 2007 г.

Сборник содержит тезисы докладов, представленных на Третью международную конференцию и Третью международную Школу молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-07». Рассматривается деятельность российских и зарубежных научных центров, связанных с использованием изотопов водорода в энергетике, народном хозяйстве и фундаментальных исследованиях. Доклады представлены по следующим темам: кинетика и термодинамика взаимодействия изотопов водорода с твердыми телами, включая эффекты накопления радиогенного гелия, гидриды и гидридные превращения, структурные превращения и механические свойства, аппаратура и методы исследования.

Book of abstracts of the 3rd International Conference and the 3rd International School for Young Scientists «Interaction of Hydrogen Isotopes with Structural Materials, IHISM-07». Saint-Petersburg, July 02-07, 2007

The book involves abstracts of presentations at the 3rd International Conference and the 3rd International School for young scientists «Interaction of Hydrogen Isotopes with Structural Materials, IHISM-07». The activities of Russian and foreign scientific centers associated with the use of hydrogen isotopes in power engineering, national economy and basic research are considered.

The presentations cover the following areas: kinetics and interaction between hydrogen isotopes and solids including effects of radiogenic helium accumulation, hydrides and hydride transformations; structural transformations and mechanical properties; equipment and research techniques.

- C10-08 PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL OF THE COLD ACCUMULATOR WITH A WORKING BODY HYDRIDE** 227
Е.А.Лесюк
- C11-Д9 СТРУКТУРА ДЕЙТЕРИДОВ И ГИДРИДОВ ТИТАНА, ОБРАЗУЕМЫХ В ТИТАНОВЫХ ФОЛЬГАХ ГИДРИДНОГО ИНЖЕКТОРА ЭИГИ-Т11М И НА ПОВЕРХНОСТИ КАТОДОВ МАГНИТОРАЗРЯДНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ** 230
В.А.Сарин, Э.А.Азизов, И.С.Глушков, Ю.Ж.Калинин, Ю.А.Кареев, В.П.Новиков, М.Х.Рабданов, Д.А.Скопинцев
- C11-09 THE STRUCTURE OF THE TITANIUM DEUTERIDES AND HYDRIDES FORMED IN TITANIUM FOILS OF HYDRIDE INJECTOR EPHI-T11M AND ON THE SURFACES OF CATHODES OF DIODE SPUTTER-ION VACUUM PUMPS** 232
V.A.Sarin, E.A.Azizov, I.S.Glushkov, J.Z.Kalimin, J.A.Kareev, V.P.Novikov, M.H.Rabadanov, D.A.Skopintsev
- C12-Д9 ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ГИДРИРОВАНИЯ НА ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВЕ Pd-8.3 at.%Y** 235
В.М.Авдюхина, Г.П.Ревкевич, А.З.Назмутдинов
- C12-09 THE INFLUENCE OF ELECTROLYTIC HYDROGENATION ON PHASE TRANSFORMATION IN Pd-8.3 at.%Y ALLOY** 237
V.M.Avdiukhina, G.P.Revkevich A.Z.Nazmutdinov
- C13-Д9 КИНЕТИКА ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ВОДОРОДОМ В СПЛАВЕ Nd₂Fe₁₄B** 240
А.Ф.Волков, С.Б.Рыбалка, А.А.Волкова
- C13-09 KINETICS OF THE HYDROGEN-INDUCED PHASE TRANSFORMATIONS IN Nd₂Fe₁₄B ALLOY** 243
A.F.Volkov, S.B.Rybalka, A.A.Volkova
- C14-Д9 УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИДА ТИТАНА** 245
Ю.А.Кареев, Ю.Г.Гендель, И.С.Глушков, В.П.Новиков
- C14-09 SPECIFIC RESISTANCE OF TITANIUM DEUTERID** 246
Y.A.Kareev, Y.G.Gendel, I.S.Glushkov, V.P.Novikov

КИНЕТИКА ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ВОДОРОДОМ В СПЛАВЕ Nd₂Fe₁₄B

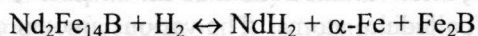
Александр Ф. Волков, Сергей Б. Рыбалка, Анастасия А. Волкова

Государственное высшее учебное заведение
«Донецкий национальный технический университет»
afv@fizmet.dgtu.donetsk.ru

В современной технике широко используются магнитные материалы. Во многих случаях гораздо выгоднее использовать не электромагниты постоянного тока, а постоянные магниты из магнитотвердых материалов с коэрцитивной силой $H_c = 5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^6$ А/м и максимальным магнитным произведением $BH_{\max} = 1.0 \div 400$ кДж/м³.

В 1984 году были синтезированы постоянные магниты типа Nd₂Fe₁₄B, которые значительно превосходили по своим магнитным характеристикам Sm-Co магниты. Максимальное энергетическое произведение на постоянных магнитах из сплавов типа Nd₂Fe₁₄B достигает 400 кДж/м³, что приблизительно в два раза больше, чем было получено ранее на Sm-Co магнитах.

В последнее время широкое распространение получил специальный метод водородно-вакуумной обработки материалов, так называемый HDDR-процесс. Суть метода состоит в следующем. Введение водорода в сплав Nd₂Fe₁₄B при температурах 600÷900°C индуцирует протекание прямого фазового превращения, т.е. распад исходного сплава по реакции:



Последующее удаление водорода индуцирует протекание обратного фазового превращения, т.е. рекомбинацию распавшихся фаз в исходную фазу. Такого рода обработка позволяет получить сплав с субмикронными зернами основной магнитотвердой фазы. Размеры зерен близки к размерам элементарного магнитного домена в этих материалах (~0.3 мкм) [1]. Постоянные магниты, изготовленные из порошков сплавов, прошедших HDDR-обработку, обладают повышенными значениями коэрцитивной силы. Однако, как правило, HDDR-обработка проводится эмпирически, без учета кинетических особенностей фазовых превращений такого рода. Зачастую это приводит к процессам укрупнения зерен магнитотвердой фазы, что ведет к снижению коэрцитивной силы порошковых постоянных магнитов.

В данной работе была поставлена задача: исследовать кинетические закономерности индуцированных водородом фазовых превращений в магнитотвер-

дом сплаве $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Исследования проводили в диапазоне температур 600–900°C при давлении водорода 0,1 МПа и в вакууме до 1 Па.

Кинетику развития фазовых превращений изучали магнитометрическим методом. В исследуемом температурном интервале (610–760°C) исходный сплав $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ парамагнитен ($T_c=312^\circ\text{C}$), а фазы $\alpha\text{-Fe}$ и Fe_2B (железо-бор) являются ферромагнитными. Именно это дает возможность регистрировать развитие фазовых превращений такого типа магнитным методом [2].

Образцы сплава массой 0,99÷1,2 г помещали в рабочую камеру установки и нагревали со средней скоростью 50°C/мин до необходимой температуры изотермической выдержки при непрерывном вакуумировании до давления 1,3 Па. После установления в рабочей камере изотермических условий напускали водород. С этого момента непрерывно отслеживали развитие прямого фазового превращения по увеличению содержания количества ферромагнитных фаз в образце ($\alpha\text{-Fe}$ и Fe_2B). После завершения прямого фазового превращения из камеры начинали эвакуировать водород и отслеживали развитие обратного фазового превращения по уменьшению содержания ферромагнитных фаз в образце.

Представлены результаты исследования влияния температуры на кинетику индуцированного водородом прямого фазового превращения в сплаве $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ [3]. При температурах 610°C, 640°C и 670°C прямое фазовое превращение не завершается полностью за время эксперимента, и достигает лишь 28%, 46% и 62% завершенности соответственно. При температурах 690°C и 710°C превращение завершается за 345 и 175 минут соответственно. Дальнейшее увеличение температуры до 730°C и 750°C приводит к ускорению развития превращения, которое завершается за 115 и 85 минут соответственно. Таким образом, в интервале температур 610°C < T < 750°C, повышение температуры приводит к ускорению развития прямого фазового превращения.

Дальнейшее увеличение температуры вызывает замедление развития прямого фазового превращения. Так при температуре 760°C превращение завершается за 67,5 минуты. Но уже при 800°C превращение завершается за 80 минут. Увеличение температуры до 830°C и 860°C вызывает замедление фазового превращения, которое завершается за 110 и 170 минут, соответственно.

После завершения прямого фазового превращения в исследуемом сплаве из камеры начинали эвакуировать водород. При этом отслеживали развитие обратного фазового превращения по уменьшению содержания ферромагнитных фаз в образце.

При температурах изотермической выдержки 610°C и 640°C обратное фазовое превращение за время эксперимента не развивается. Увеличение температуры до 670°C приводит к некоторому развитию фазового превращения, завершившемуся за время эксперимента только на 62 %.

При температуре 690°C фазовое превращение уже завершается за время эксперимента, т.е. за 220 минут. Дальнейшее увеличение температуры

изотермической выдержки до 710°C и 730°C инициирует ускорение развития фазового превращения, которое завершается за 140 и 95 минут, соответственно. И, наконец, при 750°C и 760°C обратное фазовое превращение завершается за 65 и 50 минут, соответственно.

Следует обратить внимание на тот факт, что обратное превращение протекает при любых температурах выше 640°C. Это является прямым следствием того, что фазовая смесь, получаемая при прямом превращении, после десорбции водорода становится термодинамически нестабильной во всем интервале существования сплава вплоть до температуры плавления. Поэтому следует ожидать, что при дальнейшем повышении температуры развитие обратного фазового превращения будет ускоряться.

Таким образом, экспериментально установлено, что температурный интервал максимально быстрого развития превращений составляет 700-800°C, а при повышении температуры изотермической выдержки до 860°C и понижении до 610-620°C происходит значительное замедление развития прямого фазового превращения.

ЛИТЕРАТУРА

1. S.B. Rybalka, V.A. Goltsov, V.A. Didus, D. Fruchart. Fundamentals of the treatment of Nd₂Fe₁₄B type alloys / J. Alloys Comp. 356-357 (2003), p.390-394.
2. S.B. Rybalka, E.V. Dodonova, V.A. Didus. Some kinetic and microstructural aspects during hydrogen-induced phase transformations in Nd₂Fe₁₄B alloys / J. Alloys Comp. 404-406 (2005), p.588-594.
3. V.A. Didus, S.B. Rybalka, E.V. Dodonova, V.A. Goltsov. The effect of hydrogen pressure and temperature on kinetics of hydrogen-induced direct phase transformation in hard magnetic alloys/ J. Alloys Comp. 404-406 (2005), p.351-354.

КИНЕТИКА ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ВОДОРОДОМ В СПЛАВЕ Nd₂Fe₁₄B

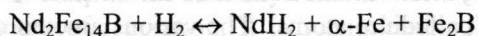
Александр Ф. Волков, Сергей Б. Рыбалка, Анастасия А. Волкова

Государственное высшее учебное заведение
«Донецкий национальный технический университет»
afv@fizmet.dgtu.donetsk.ru

В современной технике широко используются магнитные материалы. Во многих случаях гораздо выгоднее использовать не электромагниты постоянного тока, а постоянные магниты из магнитотвердых материалов с коэрцитивной силой $H_c = 5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^6$ А/м и максимальным магнитным произведением $BH_{\max} = 1.0 \div 400$ кДж/м³.

В 1984 году были синтезированы постоянные магниты типа Nd₂Fe₁₄B, которые значительно превосходили по своим магнитным характеристикам Sm-Co магниты. Максимальное энергетическое произведение на постоянных магнитах из сплавов типа Nd₂Fe₁₄B достигает 400 кДж/м³, что приблизительно в два раза больше, чем было получено ранее на Sm-Co магнитах.

В последнее время широкое распространение получил специальный метод водородно-вакуумной обработки материалов, так называемый HDDR-процесс. Суть метода состоит в следующем. Введение водорода в сплав Nd₂Fe₁₄B при температурах 600÷900°C индуцирует протекание прямого фазового превращения, т.е. распад исходного сплава по реакции:



Последующее удаление водорода индуцирует протекание обратного фазового превращения, т.е. рекомбинацию распавшихся фаз в исходную фазу. Такого рода обработка позволяет получить сплав с субмикронными зёрнами основной магнитотвердой фазы. Размеры зёрен близки к размерам элементарного магнитного домена в этих материалах (~0.3 мкм) [1]. Постоянные магниты, изготовленные из порошков сплавов, прошедших HDDR-обработку, обладают повышенными значениями коэрцитивной силы. Однако, как правило, HDDR-обработка проводится эмпирически, без учета кинетических особенностей фазовых превращений такого рода. Зачастую это приводит к процессам укрупнения зёрен магнитотвердой фазы, что ведет к снижению коэрцитивной силы порошковых постоянных магнитов.

В данной работе была поставлена задача: исследовать кинетические закономерности индуцированных водородом фазовых превращений в магнитотвер-

experiment and runs up to 28%, 46% and 62% accordingly. At the temperatures of 730°C and 750°C the transformation completes for 115 and 85 minutes accordingly. Thus, in the temperature range $610^{\circ}\text{C} < T < 750^{\circ}\text{C}$ the increasing of the temperature leads to the acceleration of the direct phase transformation.

The following increasing of the temperature leads to the slowing down of the direct phase transformation evolution. At the temperature of 760°C the transformation completes for 67.5 minutes, at 800°C it completes for 80 minutes. Increasing the temperature to 830°C and 860°C leads to the slowing down of the direct phase transformation which completes for 110 and 170 minutes accordingly.

After the direct phase transformation the hydrogen was evacuated from the chamber and the reverse phase transformation was monitored by the decrease of ferromagnetic phases in the sample.

At the temperatures of 610°C and 640°C the reverse phase transformation does not progress during the experiment. At the temperature of 690°C the reverse phase transformation completes for 220 minutes. The following increasing of the temperature leads to the acceleration of the reverse phase transformation. Thus, at the temperatures of 710°C and 730°C the reverse transformation completes for 140 and 95 minutes accordingly, at 750°C and 760°C it completes for 65 and 50 minutes accordingly.

The important fact is that the reverse phase transformation progresses only in the temperature field above 640°C because NdH_2 hydride becomes thermodynamically unstable below these temperatures.

Thus, the most convenient conditions for the direct hydrogen-induced transformations are 700-800°C. It is shown that transformations of this type are diffusive-controlled by the mechanism of nucleation and growth.

References:

1. S.B. Rybalka, V.A. Goltsov, V.A. Didus, D. Fruchart. Fundamentals of the treatment of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ type alloys / *J. Alloys Comp.* 356-357 (2003), p.390-394.
2. S.B. Rybalka, E.V. Dodonova, V.A. Didus. Some kinetic and microstructural aspects during hydrogen-induced phase transformations in $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ alloys / *J. Alloys Comp.* 404-406 (2005), p.588-594.
3. V.A. Didus, S.B. Rybalka, E.V. Dodonova, V.A. Goltsov. The effect of hydrogen pressure and temperature on kinetics of hydrogen-induced direct phase transformation in hard magnetic alloys/ *J. Alloys Comp.* 404-406 (2005), p.351-354.