

слияние элементарных на поверхности и формирование микроструктурных игл.

Таким образом, важным результатом сравнения объемных и пленочных образцов стало обнаружение металлических игл на поверхности пленки состава $Mn_{0,85}Fe_{0,15}NiGe$. Предполагается продолжение исследования в данном направлении.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ и РФФИ в рамках научного проекта №Т20Р-204 и № 20-58-00059, соответственно.

Список использованных источников

1. Val'kov, V.I. Features of the formation of magnetocaloric phenomena in the systems $Mn_{1-x}Ti_xAs$ and $Mn_{1-x}Cr_xNiGe$ / V.I. Val'kov, I.F. Gribanov, B.M. Todris, A.V. Golovchan, V.I. Mitsiuk // Physics of the Solid State. – 2018. – № 6. – P. 1113–1121.

2. Патент ВУ 2901, 2006. Галяс А.И., Ткаченко Т.М. «Устройство порционной подачи порошка в установке вакуумного напыления пленок по методу вспышки».

**Будзинский П.¹, д.т.н., Будзинский М.², д.ф.-м.н.,
Барайшук С.М.³, к.ф.-м.н., доцент, Виертел М.², к.ф.-м.н.,
Митюк В.И.⁴, к.ф.-м.н., ст. научный сотрудник, Суворец З.²,
д.ф.-м.н., Ткаченко Т.М.³, к.ф.-м.н., доцент, Головчан А.В.⁵,
к.ф.-м.н., доцент.**

¹Люблинский Технический университет. 38D Люблин,
Польша

²Институт физики Университета М. Кюри-Склодовской.
1 пл. М. Кюри-Склодовской,
Люблин, Польша

³Белорусский государственный аграрный технический
университет, Минск, Беларусь

⁴НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск

⁵Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина,
Донецк

**ВОЗДЕЙСТВИЕ АГРЕССИВНЫХ СРЕД НА СВОЙСТВА
НЕОДИМОВЫХ МАГНИТОВ**

В настоящее время налажено коммерческое производство магнитов на основе фазы $Nd_2Fe_{14}B$ с максимальной на сегодняшний день

величиной энергетического произведения ~ 400 кДж/м³ и более [1-3]. С момента открытия, магнитные и структурные свойства фазы Nd₂Fe₁₄B достаточно хорошо изучены, одновременно развит ряд технологий получения магнитов на такой основе, но практическая эксплуатация затрудняется такими серьезными недостатками магнитов, как хрупкость и низкая коррозионная стойкость. Наиболее распространенным способом защиты поверхности неодимовых магнитов от коррозионных воздействий является нанесение разнообразных защитных покрытий или введением добавок, повышающих коррозионную стойкость, однако изучение коррозионных процессов и их влияния на структуру и свойства Nd₂Fe₁₄B непокрытых магнитов по-прежнему является актуальным. Потому нами была проведена работа, направленная на сравнительное изучение влияния водных растворов соли, кислоты и щелочи на магнитные и механические свойства цилиндрических магнитов Nd₂Fe₁₄B и нахождение возможных корреляций между изменением магнитных и механических свойств.

На основе Nd₂Fe₁₄B получены цилиндрические магниты ($\varnothing=22$ мм, $h=9$ мм и $\varnothing=15$ мм, $h=10$ мм). Проведенные рентгенофазовый анализ и мессбауэровские исследования на ⁵⁷Fe выявили в составе основную тетрагональную фазу Nd₂Fe₁₄B и – в небольшом количестве – наличие примесей NdO и Nd₂O₃. Такой состав характерен для магнитов, полученных технологиями порошковой металлургии. Структура магнита представляла собой хорошо ориентированные ферромагнитные зерна основной фазы размером $\sim 0,8$ – $1,2$ мкм. Материал примесных фаз равномерно распределен по объему магнита по границам зерен. Исходный образец имел намагниченность насыщения ~ 165 кА/м.

Затем образцы магнита подверглись различной обработке в агрессивных средах, характер и реагент обработок указан в таблице 1.

Образцы для испытаний механических свойств были изготовлены в форме дисков, срезанных с обработанных цилиндрических магнитов перпендикулярно оси. Поверхность образцов была механически отполирована до состояния с шероховатостью $R_a=0,08$ мкм по площадке 100 мкм² (R_a – параметр, определяющий среднеарифметическое значение отклонения профиля).

Таблица 1. Характеристика образцов Nd₂Fe₁₄B

Образец	Реагент обработки	Концентрация водного раствора	Время выдержки образца в среде, час	Средняя шероховатость образцов по площадке 100 мкм ² , нм
1	необработанный	–	–	82
1сog	КОН	0.5 М/л	384	147
2сog	НСlO ₄	0.5 М/л	384	53
3сog	NaCl	3 вес.%	384	67

На рисунке 1 приведены сравнительные результаты измерений коэффициента трения исходного образца (1) и образцов, обработанных в различных средах (1сog, 2сog, 3сog). Измерения проводились в одинаковых условиях с использованием шара из карбида вольфрама (WC) диаметром 1 мм. Измерения показали, что, после обработки агрессивными средами, у всех образцов изначально коэффициент трения относительно карбида вольфрама выше, чем у исходного образца. Для необработанного образца коэффициент трения магнита относительно шара из WC составляет ~0,18, для обработанных солью и кислотой (2сog, 3сog) коэффициенты имеют примерно одинаковое значение ~0,41; для обработанного щелочью образца 1сog коэффициент составляет ~0,9.

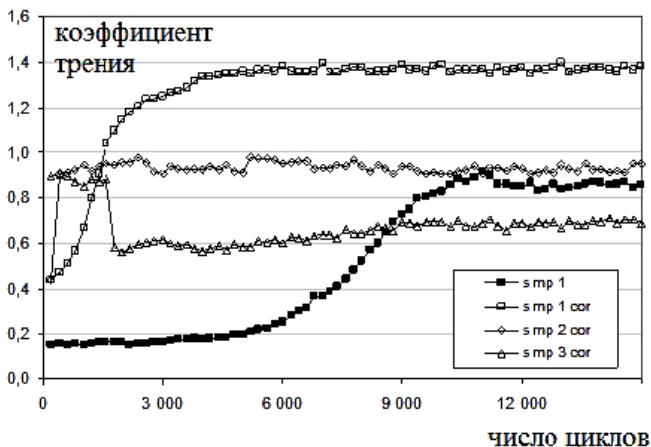


Рисунок 1. Коэффициенты трения образцов NdFeB относительно шара WC до (sm1) и после обработки водными растворами щелочи (sm1cog), кислоты (sm2cog) и соли (sm3cog).

Для наблюдения изменений поверхности образцов были проведены AFS-исследования (бесконтактный режим), характерные 3D изображения представлены на рис. 2. Для оценки шероховатости поверхности было выбрано не менее 5 площадок размером $\sim 10 \times 10$ мкм², просканированных с разных участков поверхности, что позволило проводить усреднение параметров рельефа.

На поверхности исходного материала видны характерные следы полировки (2a), при этом средняя шероховатость исследуемых площадок размером составляла $Ra=82$ нм. После обработки картина поверхности меняется (рисунок 2b,c,d) в частности, меняется шероховатость образцов до значений, указанных в таблице 1. На поверхности, помимо характерных следов полировки материала, появляются также неоднородности в 2,3–3,2 раза превышающие по высоте основной рельеф. Для образцов, обработанных щелочью (рис. 2b), видны одиночные элементы округлой формы диаметром 0,2–0,3 мкм высотой до 18 нм, концентрация которых в среднем $3,2$ мкм⁻².

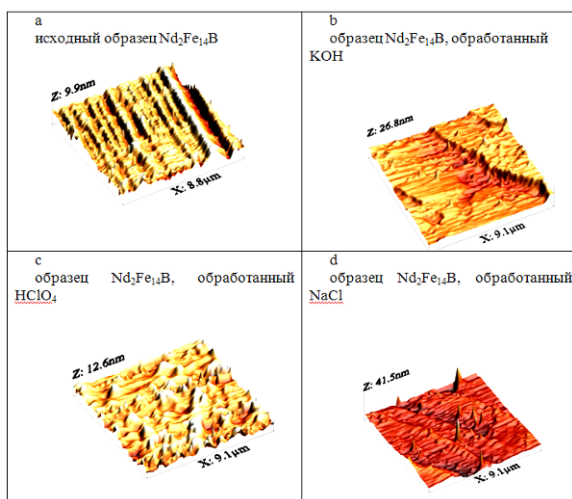


Рисунок 2. Топография поверхности образцов.

Появление этих образований приводит к увеличению шероховатости поверхности до 147 нм. Обработка раствором кислоты (рис. 2c) приводит к деградации структуры поверхности в целом и образованию пологих структур размером 0,5–0,8 мкм

высотой порядка 13 нм, что может быть обусловлено «растворением» близлежащих областей и приводит к уменьшению средней шероховатости до 53 нм. Обработка раствором соли (рис. 2d) приводит к аналогичным результатам, однако на поверхности становятся заметны одиночные каплеобразные образования размером 0,2–0,4 мкм в поперечнике и средней высотой 36 нм в количестве $0,15 \text{ мкм}^{-2}$ и изменением шероховатости до 67 нм для площадок 100 мкм^2 . Из-за высокой шероховатости поверхности образцов сложно точно определить величину износа, однако предварительные данные указывают на уменьшение износа всех обработанных образцов. В случае обработки водным раствором щелочи образование гидроксида наиболее вероятно, что отражается в наибольшей, из трех образцов, шероховатости поверхности образца, обработанного водным раствором щелочи и наибольшем для него росте коэффициента трения.

По результатам рентгенографических, мессбауэровских, ASM-исследований, а также изучения механических свойств неодимовых магнитов цилиндрической формы проведено сравнение экспериментальных характеристик до и после обработки магнитов водными растворами щелочи КОН, кислоты HClO_4 и соли NaCl. Обнаружено, что наиболее заметный эффект на механические свойства неодимового магнита (наибольший рост коэффициента трения и шероховатости поверхности) оказывает водный раствор щелочи. В то же время, наиболее ощутимое ухудшение магнитных свойств неодимового магнита вызывается воздействием водного раствора соли.

Авторы выражают благодарность А.К. Богушу (ОПРУП "Феррит") за предоставленные образцы, а также V. Constantin, E.I. Neacsu, C. Donath и A.M. Popescu (Romanian Academy, "Ilie Murgulescu" Institute of Physical Chemistry, Department of Molten Salts) за проведение коррозионной обработки.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ и РФФИ в рамках научного проекта №Т20Р-204 и № 20-58-00059, соответственно.

Список использованных источников.

1. J.F. Herbst, J.J. Croat, F.E. Pinkerton, W.B. Yelon. Relationships between crystal structure and magnetic properties in $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ // Phys. Rev. B. 1984. V. 29. P. 4176–4178.

2. M. Sagawa, S. Fujimura, N. Togawa, H. Yamamoto and Y. Matsuura. New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe // J. Appl. Phys. 1984. V.66(6). P. 2083–2087. DOI: 10.1063/1.333572.

3. D. Givord, H.S. Li, J.M. Moreau. Magnetic properties and crystal structure of Nd₂Fe₁₄B // Solid State Communications. 1984. V. 50, Issue 6. P. 497–499.

Бускис К.П.

ГО «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Минск,

Республика Беларусь

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСОВ (МОК) В ЭНЕРГЕТИКЕ

В 90-х годах прошлого века был получен новый тип соединений состоящих из ионов металлов, координированных между собой с помощью мостиковых органических лигандов (атомы, ионы или молекулы, связанные с неким центром – акцептором). Эти соединения получили название «металл-органические каркасы», или же МОК (от англ. metal-organic frameworks – MOF).

По сути, МОК можно назвать органическим цеолитом. Однако, они имеют намного больше вариаций своего строения, чем цеолиты. Также МОК имеют более привлекательные параметры структуры. Например, их удельная поверхность может достигать 5000-10000 м²/г, а объём пор – 2–3 см³/г, для цеолитов эти же величины составляют 500–600 м²/г, 0.3–0.4 см³/г. Эти характеристики открывают множество вариантов их применения в будущем.

МОК представляют собой новый класс пористых материалов. Благодаря огромной вариативности в выборе исходных компонентов они характеризуются огромным разнообразием возможных структур, что позволяет исследователям создавать материалы с необходимыми свойствами. Для синтеза этих структур применяются как традиционные методы (с применением растворителя), так и нетрадиционные. В результате синтеза можно получать одно-, двух- и трёхмерные структуры с различными размерами пор, величину которых можно варьировать путём подбора органических лигандов, или же линкеров [1].