

Б серии возможно происходит из-за обогащения Zn химического состава по сравнению с прекурсорами **А** серии.

Заключение. Прекурсоры ZnS/Sn/Cu, полученные путем послойного магнетронного напыления, имеют слоистую структуру и напыляемые слои Cu, Sn и ZnS распределены равномерно. РФА показал, что прекурсоры ZnS/Sn/Cu содержат фазы $Cu_{6,26}Sn_5$, Sn, а также возможно существование фаз Cu и ZnS в зависимости от химического состава прекурсоров. Работа выполнена при поддержке БРФФИ (№ Т19М-022).

Список использованных источников

1. Paranthaman, M.P. Semiconductor Materials for Solar Photovoltaic Cells / M.P. Paranthaman, W. Wong-Ng, R.N. Bhattacharya. – Springer International Publishing, Switzerland, 2016. – V. 218. P. 25.
2. Liquidus projection and thermodynamic modeling of Sn–Zn–Cu ternary system / H. Yu-Chih [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – Vol. 477, N 1-2. – P. 283–290.

Ткаченко Т.М. к.ф.-м.н., доцент, Барайшук С.М. к.ф.-м.н., доцент,
Белорусский государственный аграрный технический университет,

П. Будзинский к.ф.-м.н.,

Люблинский Технический университет, Люблин, Польша

З. Суrowец к.ф.-м.н.

Институт физики Университета М. Кюри-Склодовской, Люблин,
Польша

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ НЕОДИМОВОГО МАГНИТА ПРИ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ В КОРРОЗИОННО АКТИВНЫХ СРЕДАХ

Аннотация. Исследованы механические характеристики цилиндрического неодимового магнита, полученного методом порошковой металлургии, обработанного водными растворами соли. Установлен рост коэффициента трения относительно карбида вольфрама и снижение износа обработанных образцов.

Введение. Постоянные магниты на основе фазы $Nd_2Fe_{14}B$ имеют широкое коммерческое применение в технике благодаря высоким значениям основных магнитных характеристик - температуры Кюри, намагниченности насыщения, константы магнитной анизотропии [1]. Свойства материалов на основе фазы $Nd_2Fe_{14}B$, полученных с применением различных технологий, достаточно подробно изучены [2, 3]. К серьезным недостаткам таких магнитов относятся хрупкость и низкая коррозионная стойкость, которая обычно устраняется нанесением разнообразных защитных покрытий [4, 5], повреждение которых вызывает коррозионные процессы

внутри тела магнита, сопровождающиеся снижением рабочих характеристик. В этой связи изучение коррозионных процессов и их влияния на структуру и свойства непокрытых магнитов $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ продолжает быть актуальным [6-7]. В нашей работе изучено изменение механических характеристик неодимового магнита под влиянием водных растворов соли.

Результаты и обсуждение. Образцы магнитов цилиндрической формы на основе $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ получены методом порошковой металлургии. Рентгенофазовый анализ и мессбауэровские исследования на ^{57}Fe [8] выявили в составе полученных образцов основную тетрагональную фазу $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, а также наличие NdO и Nd_2O_3 , представляющих собой межзеренный материал. 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. Намагниченность насыщения исходного образца ~ 165 кА/м. Под действием водного раствора соли количество немагнитной фазы, появившейся в образце, обработанном солью, составило $\sim 22\%$ [8].

Поверхность образцов была механически отполирована до состояния с шероховатостью $Ra=0,08$ мкм по площадке 100мм^2 . Исследование механических характеристик исходного и обработанных образцов $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ проведено с помощью трибометра, действующего по схеме «плоскость-шар». Измерения исходного образца проведены с шарами, выполненными из карбида вольфрама WC двух различных диаметров (0,5 мм и 1 мм), и шаром, выполненным из нитрида кремния Si_3N_4 , диаметром 1 мм. Измерения коэффициентов трения выполнялись по методике сухого трения. Температура воздуха 20°C при относительной влажности 25-30% и атмосферном давлении около 100 кПа.

Коэффициент трения имеет характерную зависимость от диаметра шара и материала, из которого изготовлен шар. В случае шаров диаметром 1 мм коэффициент трения является постоянным и низким для первых 5000 циклов. Затем медленно растёт до величины 0,85 с шаром WC и $\sim 1,05$ с шаром Si_3N_4 . Рост коэффициента трения связан с износом поверхностного отполированного слоя. В увеличение коэффициента трения, кроме деформационного, дает вклад адгезионная составляющая. Истёртые ферромагнитные частицы NdFeB остаются в зоне механического взаимодействия и прилипают к поверхности шара и пластине, увеличивая коэффициент трения. Медленное увеличение коэффициента трения исходного неодимового магнита относительно шара Si_3N_4 после ~ 1100 циклов связано с дополнительным прилипанием продуктов трения к шару из-за большего химического сродства азота с железом и бором. Только после износа износостойчивого слоя исходного магнита в размере $\sim 0,2$ мкм. коэффициент трения растёт. Для необработанного образца коэффициент трения магнита относительно шара из WC составляет $\sim 0,18$, для обработанных солью $\sim 0,41$.

Для наблюдения изменений поверхности образцов были проведены AFS-исследования (бесконтактный режим). Средняя шероховатость исследуемых площадок размером составляла $Ra=82$ нм. После обработки на поверхности, помимо характерных следов полировки материала, появляются также неоднородности, в 2,3-3,2 раза превышающие по высоте основной рельеф. Обработка раствором соли приводит к формированию на поверхности одиночные каплеобразные образования размером 0,2-0,4 мкм в поперечнике и средней высотой 36нм, концентрация составляет 0,15 мкм⁻², изменение шероховатости в этом случае составляет до 67нм для площадок 100мкм². Предварительные данные указывают на уменьшение износа всех обработанных образцов.

Во всех случаях для обработки магнита использованы водные растворы, по-видимому в приповерхностном слое магнита образовывается гидроксид неодима с выделением водорода $Nd+3H_2O \rightarrow Nd(OH)_3+3H$. Восстановленное водородом железо встраивается в решетку гидроксида неодима, так как расположение железа в структуре $Nd_2Fe_{14}B$ иногда рассматривают как искаженную гексагональную плотноупакованную σ -фазу, слои которой разделены плоскостями неодим-бор [1], при этом структура слоев железа в магните и структура гидроксида неодима подобны. Чистого железа и его окислов в составе поверхностного материала обработанных магнитов нами обнаружено не было [8].

Заключение. Сравнение исследованных механических характеристик неодимового магнита до и после обработки водными растворами соли NaCl обнаруживает повышение коэффициента трения относительно карбида вольфрама в обработанных образцах и снижение их износа. Изменение механических свойств образца, обработанного водным раствором соли сопровождается ощутимым ухудшением магнитных свойств.

Список использованных источников

1. J. F. Herbst, J. J. Croat, F.E. Pinkerton, W. B. Yelon. Relationships between crystal structure and magnetic properties in $Nd_2Fe_{14}B$ // Phys. Rev. B. 1984. V.29. P. 4176–4178.
2. M. Sagawa, S.Hirosawa, et all. $Nd-Fe-B$ Permanent Magnet Materials // Japanese Journal of App. Physics. 1987. V.26. P. 785-800.
3. T.G.Woodcock, Y.Zhang, et all. Understanding the microstructure and coercivity of high performance $NdFeB$ -based magnets // Scripta Materialia. 2012. V.67, Issue 6. P. 536-541.
4. E.Isotahdon, E.Huttunen-Saarivirta, et all. Corrosion protection provided by electrolytic nickel and tin coatings for $Nd-Fe-B$ magnets // Journal of Alloys and Compounds. 2014. V. 585. P. 203-213.
5. Беляев И.В., Степнов А.А., и др. Антикоррозионные покрытия для постоянных магнитов типа $Nd-Fe-B$ // Физика и химия обработки материалов. 2011. №3. С.12-15.

6. J.Ni, T.Y.Ma, X.G.Cui, Y.R.Wu, M.Yan. Improvement of corrosion resistance and magnetic properties of Nd–Fe–B sintered magnets by Al85Cu15 intergranular addition // Journal of Alloys and Compounds. 2010. V. 502, Issue 2. P. 346-350.
7. H. Yang, S. Mao and Z. Song. The effect of absorbed hydrogen on the corrosion behavior of sintered NdFeB magnet// Materials and Corrosion. 2012, V.63, No. 4. P.292-296.
8. M.Budzynski, V.Constantin, et all. Mössbauer Effect study of treated Nd2Fe14B // Nukleonika. 2015. V.60 (1), P.7-10. DOI: 10.1515/nuka-2015-0003.
9. T.Zak, N.Talijan, et all. NdFeB Permanent Magnets with various Nd Content // Acta Phys. Polonica A. 2008.V.113. P. 279-282.

Ткаченко Т.М., к.ф.-м.н., доцент;

Белорусский государственный аграрный технический университет,

Минск Митюк В.И., к.ф.-м.н., ст.н.с.

НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск

МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ

ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ С ЭЛЕМЕНТАМИ IV-VI ГРУПП

Как известно, магнитные материалы широко применяются в энергетике и электротехнике – постоянные магниты, сердечники трансформаторов, магнитные системы электрических машин. Для применений в качестве постоянных магнитов используют, например, углеродистые и вольфрамовые стали, магниты состава неодим-железо-бор, для изготовления сердечников трансформаторов – магнитомягкие пермаллои, альсиферы, низкоуглеродистые кремнистые стали. Однако развитие техники требует соответствующих изменений в ее материальной базе, что стимулирует постоянный поиск и исследование новых магнитных материалов. С этой целью были получен и исследован ряд новых магнитных материалов на основе антимонидов, станнидов, фосфидов и арсенидов марганца, кобальта, железа, никеля [1-6].

Наиболее интересным из перечисленного списка представляется антимонид марганца состава $Mn_{1+x}Sb$ ($0 \leq x \leq 0.22$) со структурой типа B8. Этот сплав и другие сплавы на его основе наиболее интересны из всех полученных нами с практической точки зрения, так как они находят широкое применение в качестве материалов для магнитооптической записи информации, материалов электродов литиевых аккумуляторных батарей, материалов термодатчиков [7]. На основе антимонида марганца созданы новые композиционные материалы [8], которые могут найти применение для создания магниточувствительных диодных структур, магнитных переключателей и сенсоров магнит-