

*XIV Российская ежегодная конференция  
молодых научных сотрудников и аспирантов  
"Физико-химия и технология  
неорганических материалов"  
(с международным участием)*

**СБОРНИК ТРУДОВ  
конференции**

17-20 октября 2017 г.

ИМЕТ РАН  
Москва 2017

УДК 539.3/.6+ 544+ 546.03

ББК 24,1+ 24.5

P76

Ф50 XIII Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». Москва. 17-20 октября 2017 г. / Сборник трудов. – М:ИМЕТ РАН, 2017, 530.

ISBN 978-5- 9500763-3-6

В сборнике материалов опубликованы доклады XIV Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов», содержащие результаты фундаментальных исследований в области наук о материалах, включающих разработку физико-химических основ создания металлических и композиционных наноматериалов и нанотехнологий, керамики, интерметаллидов. В конференции приняли участие молодые научные сотрудники и аспиранты академических институтов, Государственных научных центров, а также студенты Высших учебных заведений России. Сборник предназначен для научных работников, специалистов, аспирантов, работающих в области наук о материалах, а также может быть полезен студентам старших курсов Высших учебных заведений.

Материалы опубликованы в авторской редакции.

Сборник материалов доступен на сайте [www.m.imetran.ru](http://www.m.imetran.ru)

Проведение конференции поддержано фондом РФФИ (грант 17-38-10303 мол\_г).

### **Организаторы конференции:**

Федеральное агентство научных организаций,  
Российская академия наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук,  
ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова,  
Совет молодых ученых РАН,  
Совет молодых ученых ИМЕТ РАН

## МАГНИТНОЕ ТВЕРДЕНИЕ СПЛАВОВ (SM,ZR)(CO,CU,FE)<sub>Z</sub>

Дормидонтов Н.А.

Россия, Институт металлургии и металловедения им. А.А.Байкова РАН, ontip@mail.ru

Постоянные магниты на основе дисперсионно-твердеющих сплавов типа (Sm,Zr)(Co,Cu,Fe)<sub>Z</sub> обладают уникальным сочетанием гистерезисных характеристик и их температурной стабильности. При расширении интервала рабочих температур выше 100°C, применение этих магнитов становится зачастую коммерчески более оправданным, чем магнитов с рекордными энергетическими характеристиками типа NdFeB.

Сплавы (Sm,Zr)(Co,Cu,Fe)<sub>Z</sub> являются сложными металлургическими системами, гистерезисные свойства и структурное состояние которых тесно связаны с химическим составом и режимами термических обработок (ТО). Причем магниты на основе данных сплавов должны быть изготовлены из порошков микронных размеров, в противном случае полная реализация энергетического потенциала композиции невозможна. Эти обстоятельства являются причинами того, что природа высококоэрцитивного состояния (ВКС) в сплавах (Sm,Zr)(Co,Cu,Fe)<sub>Z</sub> и процессы его формирования до конца не выяснены.

ВКС сплавов (Sm,Zr)(Co,Cu,Fe)<sub>Z</sub> достигается в результате ТО на твердый раствор и закалки (SSHT, ≥1150 °C), и двух последовательных отпусков — изотермического (ITA, 750–900°C), и отпуска при медленном охлаждении (PTA, T<sub>ITA</sub>→400°C). Вклад каждого из этих отпусков в формировании ВКС порошковых магнитов конкретного состава являлось целью настоящей работы.

Образцы изготовлены по стандартной порошковой технологии производства спеченных редкоземельных магнитов. Сплав Sm<sub>0,84</sub>Zr<sub>0,16</sub>(Co<sub>0,70</sub>Cu<sub>0,07</sub>Fe<sub>0,23</sub>)<sub>6,25</sub> получен методом индукционного переплава в защитной атмосфере из чистых компонентов. Химический состав контролировался спектрометрично-эмиссионным методом с емкостным микроволновым плазменным разрядом. Порошок со средним размером частиц 4 мкм, полученный шаровым виброразмолом в среде абсолютированного изопропилового спирта, прессовался в магнитном поле 16 кЭ изостатически, в полиуретановой матрице, с усилием 75 кг/мм<sup>2</sup>. Порошковые заготовки спекались в протоке водорода при 1200°C и имели окончательные размеры Ø15×14 мм с плотностью 8,3 г/см<sup>3</sup>. ТО проводились в печи сопротивления с избыточным давлением аргона +0,1 атм. и закалкой в протоке гелия. Температуры ITA – 760, 800, 840 и 880°C, последующее охлаждение до 400°C (PTA) – со скоростью 1,5°/мин. Магнитные свойства исследовали при помощи гистерезисграфа в полях ± 30 кЭ в замкнутой магнитной цепи.

Гистерезисные свойства образцов после ТО представлены на рисунке: 1 - размагничивающие части полных петель гистерезиса образцов после полного цикла ТО (T<sub>ITA</sub> = 760°C); 2 – то же после кратковременного нагрева до температуры ITA и закалки; числа на кривых – время ITA. Для остальных температур наблюдалась аналогичная динамика изменения свойств. Сводные результаты по всем исследованным температурам представлены на полях 3-5: 3 и 4 – коэрцитивная сила H<sub>cj</sub> и критическое поле H<sub>k</sub>, соответственно, после кратковременного нагрева до температуры ITA и закалки (здесь и в дальнейшем а – параметры образцов отпущенных при 760, b – 800, c – 840 и d – 880°C); 5 – зависимость параметра H<sub>k</sub> образцов в ВКС.

Т.к. после полной обработки на ВКС H<sub>cj</sub> большинства образцов существенно выше возможностей использованной методики измерений, в качестве критерия коэрцитивности вынужденно принят параметр H<sub>k</sub> – поле начала перемагничивания, при котором остаточная намагниченность снижается на 10% (0,9×4πJ<sub>r</sub>).

Динамика формирования ВКС на стадии изотермического отпуска полностью соответствует известным представлениям об эвтектоидном распаде пересыщенного твердого раствора на основе разупорядоченной фазы типа 1:7 на три структурные составляющие: ячейки (2:17), границы ячеек (1:{5+Δ}) и тонкие (ламельные) пластины Z-фазы. Процессы перемагничивания (коэрцитивность сплава) контролируются соотношениями основных магнитных констант на межфазных поверхностях «ячейка – граница ячейки», то есть напрямую зависят от развития и регулярности ячеистой структуры [1-5]. Рост коэрцитивной силы в период ITA связан с развитием и огрублением ячеистой структуры (см. рис.). До определенного предела, при прочих равных условиях, чем толще граница ячейки, тем сложнее доменной стенке ее преодолеть. Чем выше температура ITA, тем быстрее растет толщина границы, тем быстрее рост коэрцитивной силы в начальный период обработки и тем скорее наступает этап коалесценции выделений, вызывающий статистическую неоднородность толщины границ ячеек и приводящий к потере прямоугольности петли гистерезиса образцов.

Удивительна несимметричность процессов, происходящих при медленном охлаждении (РТА). Кратковременный (всего на 15 мин.) нагрев до  $T_{ГТА}$  приводит к падению  $H_c$  в 2-4 раза (рис., поля 1↔2 и 4↔5). На аналогичных сплавах для высокотемпературных применений это падение превышает 18 [2, 5], 22 [3] и даже 30 раз [4]. При этом, для возвращения уровня  $H_c$  до прежнего ВКС, прежних 15 минут недостаточно, необходимо повторить РТА, т.е. вновь затратить на ТО 5-10 часов. Правда, после повторного РТА, свойства полностью восстанавливаются [1-5].

Сегодня нет однозначного описания фазовых превращений, сопровождающих эту асимметрию.

Сложность исследований связана с масштабами происходящих фазовых трансформаций – период ячеистой структуры в оптимальном ВКС 50-200 нм, а ширина границ ячеек ~10 нм. Однозначно определено, что процессы, контролирующие изменение  $H_c$  и  $H_k$  в таких широких пределах, происходят в рамках  $\pm 20$  нм от середины структурной составляющей границ ячеек. Ряд авторов полагает, что в процессе РТА структурная составляющая, формирующая границу ячеек (или область, примыкающая к межфазной поверхности «ячейка – граница ячейки»), претерпевает спинодальный распад [1-3], другие отрицают возможность подобного превращения в границах ячеек [4]. Ясно одно, объективное толкование процессов, происходящих при отмеченном, асимметричном процессе возврата, позволит не только усовершенствовать сплавы типа  $(Sm,Zr)(Co,Cu,Fe)_z$ , но и значительно приблизит возможность конструирования постоянных магнитов на принципе магнитоэлектрического взаимодействия чередующихся слоев.

Литература

1. Структура и магнитные свойства сплавов Sm-Zr-Co-Cu-Fe в высококоэрцитивном состоянии.
2. Модель формирования структуры / Н.П.Супонев, А.Г.Дормидонтов, В.В.Левандовский, Е.Б.Шаморикова, Е.М.Некрасова // Физика магнитных материалов. – Тверь, 1992. – С.78-98.
2. Microchemistry and magnetization reversal mechanism in melt-spun 2:17-type Sm-Co magnets / A.Yan, O.Gutfleisch, T.Gemming, K.-H.Mueller // Appl. Phys. Lett. – 2003. – Vol.83, No.11. – P.2208-2210.
3. The microstructure of sintered  $Sm(Co_{0,72}Fe_{0,20}Cu_{0,055}Zr_{0,025})_{7,5}$  permanent magnet studied by atom probe / X.Y.Xiong, T.Ohkubo, T.Koyama, K.Obashi, Y.Tawara, K.Hono // Acta Materialia. – 2004. – Vol.52. – P.737-748.
4. Goll D. Micromagnetism and the microstructure of high-temperature permanent magnets / D. Goll, H. Kronmüller, H. N. Stadelmaier // J. Appl. Phys. – 2004. – Vol.96, No.11. – P.6534-6545.
5. Correlation of microchemistry of cell boundary phase and interface structure to the coercivity of  $Sm(Co_{0,784}Fe_{0,100}Cu_{0,088}Zr_{0,028})_{7,19}$  sintered magnets / H.Sepehri-Amin, J.Thielsch, J.Fischbacher, T.Ohkubo, T.Schrefl, O.Gutfleisch, K.Hono // Acta Materialia. – 2017. – Vol.126. – P.1-10.

\*\*\*\*\*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО ВЯЖУЩЕГО НА ОСНОВЕ ДОМЕННОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО ШЛАКА С ДОБАВЛЕНИЕМ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА, ПОЛУЧЕННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ МАГНИТНО-ИНДУКЦИОННОГО ПОМОЛА**

**Дружинина М.Э.**

*Россия, ФГАОУ ВПО Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС», ms.marina.druzhinina@mail.ru*

Металлургическое производство является важной составляющей экономики страны, но также приводит к возникновению ряда экологических проблем. Важно не только модифицировать производство с целью уменьшения технологических отходов, но и решать проблему их накопления с помощью своевременной утилизации. Решением проблемы промышленных отходов является внедрение безотходных технологий, когда отходы или побочные продукты одних предприятий являются исходными материалами других.

Металлургические шлаки – это продукты высокотемпературного взаимодействия компонентов исходных материалов (топлива, руды, плавней, газовой среды); основные промышленные отходы, которые подразделяются на шлаки цветной и чёрной металлургии. Шлаки черной металлургии – наибольший по объёму отход. Десятилетиями в нашей стране накапливаются шлаки в виде отвалов, которые занимают значительные территории (тысячи гектар), которые могли бы быть использованы более рационально. Превращение металлургических шлаков и других отходов в вяжущие материалы малоэнергетическими безобжиговыми способами является актуальной задачей.

Денисенко А.В., 450  
Денисов А.А., 103, 492  
Дормидонтов Н.А., 335  
Дружинина М.Э., 336  
Евсевская Н.П., 219  
Егоров А.А., 266  
Ёлохова А.А., 26  
Елсуков С.К., 27  
Елшина В.А., 29  
Елькин И.А., 81  
Жарков С.Ю., 452  
Желтов К.А., 337  
Желтякова И.С., 31  
Загайнов И.В., 180  
Зайцева Е.С., 101  
Заспанова Ю. А., 339  
Захаров А.Д., 32  
Захарова Е.С., 52  
Захарова Е.С., 105  
Захарьев И.Ю., 106  
Звекон А.А., 108  
Зиновеев Д.В., 416  
Зобков Ю.В., 267  
Золотухин Д.С., 109  
Зубарев Я.Ю., 181  
Зубаткина Л.В., 287  
Иванников А. Ю., 130  
*Иванов А. В.*, 341  
Извин А. В., 375  
Икорников Д.М., 183  
Илькив Б.И., 185  
Имшинецкий И.М., 454  
Исаева Н.В., 288  
Камышная К.С., 186  
Кандауров М.В., 111  
Каплан М.А., 456  
Капустин Р.Д., 33  
Карпов М.И., 31  
Карпова Ж.А., 34  
Картавых Е. А., 113  
Кель И.Н., 417  
Кизим Н.Ф., 414  
Китаева Д.А., 116  
Клетиков С.С., 237  
Климашин А. А., 118  
Коберник Н.В., 490  
Ковалев В.В., 458  
Ковалев И.А., 229  
Козерожец И.В., 290, 342  
Колмакова А.А., 511  
Колобова А.Ю., 36  
Колотова Л. Н., 119  
Колчанов Д.С., 188  
Комаров В.С., 120  
Комолова О.А., 421  
Коморников В. А., 343  
Кондратенко Ю.А., 36  
Кондрашкова И.С., 189  
Коннова С.А., 191  
Константинов А. С., 386  
Конушкин С.В., 239  
Коняев И.В., 345  
Копьёв Д.Ю., 422  
Костина В.С., 38  
Котяков А.А., 268  
Коченгин А.Е., 121  
Кочнев В.К., 115  
Кравченко К. Н., 346  
Кремлев К.В., 40  
Кретинина В.Н., 348  
Криницын М.Г., 459  
Крылов А.И., 193  
Кудряшова А.А., 240  
Кузнецова Т.В., 350  
Кузьмина В.О., 460  
Кульбакин И.В., 194  
Курилкин В.В., 70  
Кутепов С.Н., 40, 42  
Ларионов М.Д., 195  
Лебедев Д.И., 462  
Левина А. А., 196  
Леонов А.В., 464  
Леонтьев И.М., 44  
Линок Е.В., 198  
Лобанов А.А., 269  
Ложкомоев А.С., 351  
Лозанов В. В., 353  
Локшин Э.П., 88  
Лончаков С.А., 517  
**Лончакова О.В.**, 519  
Лужкова И.В., 354  
Лукин Е. И., 46  
Лукьянова О.А., 199  
Лучникова Г.Г., 355  
Лысенков А. С., 356  
Маклакова А. В., 358  
Малахов А.Ю., 465  
Мальшев И.А., 122  
Мальцева И.Е., 359  
Мальчев А.Г., 48  
Мамедова Г.А., 360  
Маркова И.Ю., 52  
Маркова И.Ю., 105  
Мартыненко Н.С., 241