



УДК 669.85

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-10-10

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ И ЛЕГИРУЮЩИХ
ЭЛЕМЕНТОВ В ТЕРМОСТАБИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ
МАТЕРИАЛАХ СИСТЕМЫ РЗМ–Fe–Co–В
МЕТОДОМ АЭС-ИСП**

Р.М. Дворецков

Ф.Н. Карачевцев

кандидат химических наук

Я.А. Исаченко

Т.Н. Загвоздкина

Ноябрь 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Р.М. Дворецков¹, Ф.Н. Карачевцев¹, Я.А. Исаченко¹, Т.Н. Загвоздкина¹

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ И ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТЕРМОСТАБИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ СИСТЕМЫ РЗМ–Fe–Co–B МЕТОДОМ АЭС-ИСП

Разработана методика определения содержания редкоземельных элементов, железа, кобальта, бора и примесей никеля и алюминия в термостабильных магнитных материалах системы РЗМ–Fe–Co–B. Изучены различные условия растворения образцов магнитных материалов и установлены оптимальные условия микроволнового разложения, выбраны основные аналитические линии, свободные от спектральных наложений. Относительная погрешность определения основных элементов не превышает 3%.

Ключевые слова: *методика измерений, АЭС-ИСП, атомно-эмиссионный анализ, индуктивно-связанная плазма, РЗМ, магнитные материалы, термостабильные магниты.*

R.M. Dvoretzskov, F.N. Karachevtsev, Y.A. Isachenko, T.N. Zagvozdina

ICP-AES DETERMINATION OF BASIC AND ALLOYING ELEMENTS IN THERMOSTABLE MAGNETIC MATERIALS OF REM–FE–CO–B SYSTEM

Development of methods for determination of rare earth elements, iron, cobalt, boron and nickel and aluminum impurities in thermostable magnetic materials of REM–Fe–Co–B system. Examined different conditions for dissolving samples of magnetic materials and optimum conditions of microwave decomposition were established, basic analytical lines free from spectral overlap were chosen. Error of definition of base components does not exceed 3% RH.

Keywords: *measurement technique, ICP-AES, atomic-emission analysis, inductively coupled plasma, REM, magnetic materials, thermostable magnets.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Система РЗМ–Fe–Co–В (РЗМ – редкоземельные элементы) является перспективной для создания магнитных (магнитотвердых) материалов [1, 2], которые применяются в навигационных приборах авиационной техники [3]. Эти материалы сочетают в себе как достаточно высокие магнитные характеристики, так и высокую термическую стабильность [4].

Свойства материала всегда являются структурно-зависимыми параметрами [5, 6], в данном случае это магнитные свойства [7–9]. Получить заданный структурно-фазовый состав можно путем отработки технологических приемов, направленных на повышение качества материала [10]. Одним из таких приемов является корректировка химического состава материала с помощью дополнительного легирования [11]. Чтобы обеспечить высокое качество проведения химического анализа новых магнитных материалов системы РЗМ–Fe–Co–В необходимы соответствующие нормативные документы [12].

Существующие методики измерений массовой доли элементов (Fe, Co, В, Cu и РЗМ) невозможно использовать для определения химического состава новых термостабильных магнитных материалов системы РЗМ–Fe–Co–В, так как они не охватывают соответствующие диапазоны массовых долей указанных элементов, в них не учитываются особенности данного химического состава [13, 14]. Например, нет информации о взаимовлиянии указанных элементов друг на друга при спектральном анализе [15, 16].

Для разработки сверхчистых материалов и ресурсосберегающих технологий их изготовления для нового поколения авиационных приборов, а также для обеспечения единства измерений актуальным является создание методики определения количественного химического состава термостабильных магнитных материалов системы РЗМ–Fe–Co–В.

Для одновременного определения нескольких элементов (мультиэлементного анализа) в лабораториях металлургических предприятий и НИИ чаще всего применяют методы АЭС-ИСП (атомно-эмиссионный анализ с индуктивно-связанной плазмой) и РФА (рентгенофлуоресцентный анализ). Для данного состава (Pr, Dy, Gd, Sm, Ce, Fe, Co, В, Cu, Al, Ni) оптимальным является выбор метода АЭС-ИСП, так как наилучшие пределы обнаружения и меньшая величина погрешности в РФА достигаются для элементов с атомными номерами $z=20-40$. Ухудшение пределов обнаружения и увеличение погрешности для $z < 20$ (В и Al) вызвано поглощением воздухом длинноволнового излучения «легких» элементов, а в области больших z (Pr, Dy, Gd, Sm, Ce) элементы имеют малоразличающуюся энергию фотонов, что приводит к спектральным наложе-

ниям [17]. Кроме того, для РФА требуется наличие стандартных образцов необходимого состава, которые для материалов системы РЗМ–Fe–Co–В отсутствуют [18, 19]. Возможности метода АЭС-ИСП позволяют получить лучшие метрологические характеристики при определении химического состава новых магнитотвердых материалов.

Таким образом, цель данной работы состояла в разработке методики измерений массовой доли элементов в диапазонах, указанных в табл. 1, методом АЭС-ИСП.

Таблица 1

Диапазоны измерений массовой доли элементов в магнитных материалах системы РЗМ–Fe–Co–В

Элемент	Диапазон измерений, % (по массе)
Празеодим+диспрозий+гадолиний+самарий+ +церий (сумма РЗМ)	От 20 до 60 (вкл.)
Железо	От 30 до 50 (вкл.)
Кобальт	От 15 до 30 (вкл.)
Бор	От 0,5 до 2,0 (вкл.)
Медь	От 0,1 до 10,0 (вкл.)
Алюминий+никель	Не более 1

Материалы и методы

Технология выплавки магнитных сплавов системы Pr–Dy–Fe–Co–В в вакуумной индукционной печи описана в литературе [20, 21].

Определение массовой доли элементов выполняли на спектрометре Varian 730 ES с аксиальным обзором плазмы. Использовали следующие настройки спектрометра: мощность плазмы 1,2 кВт, аксиальный поток 1,5 л/мин, поток распылителя 0,75 л/мин, количество реплик 5, продолжительность чтения реплики 5 с, рабочий газ – аргон высокой чистоты. С целью устранения матричных влияний при построении градуировочных зависимостей выбран метод стандартных добавок.

Для выбора свободных от спектральных наложений аналитических линий проводили определение элементов в модельных растворах, приготовленных из моноэлементных ГСО состава растворов соответствующих элементов.

Результаты

Элементы основы магнитных материалов вышеуказанной системы (Fe, Co, В, Pr, Dy) хорошо растворяются в разбавленных соляной и азотной кислотах. При разработке данной методики образцы растворяли в смесях с разными концентрациями соляной и

азотной кислот на плите во фторопластовых стаканах, а также в системе микроволнового разложения Milestone ETHOS 1 в сосудах PRO 24. На основании полученных результатов установлено, что наиболее полное извлечение Fe, Co, B, Pr и Dy достигается при растворении в системе микроволнового разложения в смеси: H₂O (10 мл)+HCl (1 мл). Использование микроволновых систем разложения уменьшает продолжительность растворения пробы, а также позволяет сократить количество используемых кислот, вредных выбросов в атмосферу, а также устранить вероятность потери вещества в результате разбрызгивания при кипении растворов на плите, а отдельные элементы уберечь от потери при образовании летучих соединений.

Обсуждение и заключения

Выбраны основные аналитические линии, свободные от спектральных наложений, а также несколько альтернативных аналитических линий для определения Pr, Dy, Fe, Co, B, Ni, Al, Gd, Sm и Ce в термостабильных магнитных материалах. Результаты выбора аналитических линий приведены в табл. 2.

Таблица 2

Рекомендуемые аналитические линии

Элемент	Спектральная линия, нм
Pr	410,072; 422,293
Dy	387,211; 340,780
Gd	335,048; 336,224
Sm	446,734; 356,827
Ce	447,124; 457,228
Fe	258,588; 259,837
Co	238,892; 230,786
B	208,956; 182,577
Cu	324,754; 217,895
Ni	216,555; 216,909
Al	396,152; 237,312

Экспериментально изучены различные условия растворения и установлены оптимальные условия микроволнового разложения магнитных материалов.

На основании экспериментальных данных разработана методика измерений, проведены исследования метрологических характеристик, экспертиза и аттестация методики измерений. Разработана МИ 1.2.055–2013 «Методика измерений массовой доли легирующих элементов в термостабильных магнитотвердых материалах системы РЗМ–Fe–Co–В». Показатели точности методики приведены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели точности методики (границы относительной погрешности)

Элемент	Диапазон измеряемых значений, % (по массе)	Показатель точности – границы относительной погрешности $\pm\delta$, % (при $P=0,95$)
Празеодим+диспрозий+гадолиний+ +самарий+церий (сумма РЗМ)	От 20 до 60 (вкл.)	2
Железо	От 30 до 50 (вкл.)	2
Кобальт	От 15 до 30 (вкл.)	2
Бор	От 0,5 до 2,0 (вкл.)	3
Медь	От 0,1 до 10 (вкл.)	2
Алюминий+никель	От 0,2 до 1,0 (вкл.)	4

Данная методика внесена в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Она успешно применяется для анализа новых магнитных сплавов в лаборатории «Спектральные, химико-аналитические исследования и эталонные образцы» ВИАМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
2. Каблов Е.Н., Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Валеев Р.А., Моисеева Н.С., Степанова С.В., Петраков А.Ф., Терешина И.С., Репина М.В. Термостабильные кольцевые магниты с радиальной текстурой на основе Nd(Pr)–Dy–Fe–Co–B //Физика и химия обработки материалов. 2011. №3. С. 43–47.
3. Каблов Е.Н., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Оспенникова О.Г., Бузенков А.В., Резчикова И.И. Кольцевые магниты с радиальной текстурой для навигационных приборов //Новости материаловедения. Наука и техника. 2014. №2. Ст. 01 (materialsnews.ru).
4. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
5. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 06 (viam-works.ru).

6. Маркова Е.С., Якушева Н.А., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б. Технологические особенности производства мартенситостареющей стали ВКС-180 //Труды ВИАМ. 2013. №7. Ст. 01 (viam-works.ru).
7. Пискорский В.П., Валеев Р.А., Терешина И.С., Бронфин М.Б., Чабина Е.Б., Давыдова Е.А., Бузенков А.В. Магнитные свойства и фазовый состав материалов системы Pr–Dy–Fe–Co–B //Перспективные материалы. 2007. №3. С. 16–19.
8. Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Мельников С.А., Паршин А.П., Валеев Р.А., Терешина И.С., Иванов С.И. Влияние содержания неодима на свойства наноструктурированных материалов Nd(Pr)–Fe–B, полученных по бинарной технологии //Перспективные материалы. 2010. №3. С. 195–197.
9. Политова Г.А., Терешина И.С., Бурханов Г.С., Чистяков О.Д. Влияние структурного состояния на магнитострикционные свойства соединений типа RFe₂ //Перспективные материалы. 2010. №9. С. 198–203.
10. Мазалов И.С., Филонова Е.В., Ломберг Б.С. Формирование структуры при деформации и термической обработке заготовок деталей из никелевого высокопрочного свариваемого сплава ВЖ172 //Труды ВИАМ. 2013. №12. Ст. 01 (viam-works.ru).
11. Дворецков Р.М., Мазалов И.С., Морозова Г.И., Филонова Е.В. Особенности легирования, фазового состава и структуры никелевого деформируемого жаропрочного сплава ВЖ172 //МиТОМ. 2014. №4. С. 12–18.
12. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники //Авиационные материалы и технологии. Вып. «Методы испытаний и контроля качества металлических и неметаллических материалов». 2001. С. 3–8.
13. ГОСТ 23862.15–79. Иттрий и его окись. Метод определения окисей празеодима, неодима, самария, европия, тербия, диспрозия, гольмия, эрбия, тулия и иттербия. М.: Стандартиформ. 1981. С. 1–5.
14. ГОСТ 22536.8–87. Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения меди. М.: Стандартиформ. 1988. С. 1–5.
15. МИ 1.2.036–2011. Методика измерений массовой доли бора, кремния, церия, иттрия, железа, меди, марганца и фосфора в наноструктурированных деформированных жаропрочных никелевых сплавах методом эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. М.: ВИАМ. 2011. С. 1–5.

16. МИ 1.2.037–2011. Методика измерений массовой доли алюминия, кобальта, рения, рутения, тантала и вольфрама в сплавах на никелевой основе методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. М.: ВИАМ. 2011. С. 1–5.
17. Афонин В.П., Комяк Н.И., Николаев В.П., Плотников Р.И. Рентгенофлуоресцентный анализ. Новосибирск: Наука. 1991. 135 с.
18. Летов А.Ф., Карачевцев Ф.Н., Гундобин Н.В., Титов В.И. Разработка стандартных образцов состава сплавов авиационного назначения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 393–398.
19. Титов В.И., Гундобин Н.В., Пчелкин А.И., Котиков В.Н., Давыдов Д.М. Разработка и выпуск стандартных образцов состава жаропрочных никелевых сплавов системы Ni–Ti–Al–Nb–Cr–Co–Mo–W–Re для спектрального анализа //Литейщик России. 2013. №5. С. 30–33.
20. Kablov E.N., Petrakov A.F., Piskorskii V.P., Valeev R.A., Chabina E.B. Effect of Praseodymium on magnetic properties and phase composition of a material of the Nd–Pr–Dy–Fe–Co–B System //Metal Science and Heat Treatment. 2005. V. 47. №5–6. P. 227–231.
21. Пискорский В.П., Валеев Р.А., Назарова Н.В., Чабина Е.Б., Давыдова Е.А. Влияние самария на магнитные свойства и фазовый состав материалов Nd–Dy–Fe–Co–B //Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. Т. 12. №12. С. 185–190.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelementy – materialy sovremennyh i budushhih vysokih tehnologij [Rare metals and rare-earth elements – materials for current and future high-tech] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
2. Kablov E.N., Piskorskij V.P., Burhanov G.S., Valeev R.A., Moiseeva N.S., Stepanova S.V., Petrakov A.F., Tereshina I.S., Repina M.V. Termostabil'nye kol'cevye magnity s radial'noj teksturoj na osnove Nd(Pr)–Dy–Fe–Co–B [Thermostable ring magnets with radial texture based on Nd(Pr)–Dy–Fe–Co–B] //Fizika i ximija obrabotki materialov. 2011. №3. S. 43–47.
3. Kablov E.N., Piskorskij V.P., Valeev R.A., Ospennikova O.G., Buzenkov A.V., Rezhchikova I.I. Kol'cevye magnity s radial'noj teksturoj dlja navigacionnyh priborov [Ring

- magnets with radial texture for navigation devices] //Novosti materialovedeniya. Nauka i tehnika. 2014. №2. St. 01 (materiasnews.ru).
4. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tehnologiy ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 7–17.
 5. Chabina E.B., Alekseev A.A., Filonova E.V., Lukina E.A. Primenenie metodov analiticheskoj mikroskopii i rentgenostrukturnogo analiza dlja issledovaniya strukturno-fazovogo sostojaniya materialov [Application of the methods of analytical microscopy and X-ray analysis for the study of structural-phase state materials] //Trudy VIAM. 2013. №5. St. 06 (viam-works.ru).
 6. Markova E.S., Jakusheva N.A., Pokrovskaja N.G., Shal'kevich A.B. Tehnologicheskie osobennosti proizvodstva martensitostarejushhej stali VKS-180 [Technological features of production martensitostareyushey steel VKS-180] //Trudy VIAM. 2013. №7. St. 01 (viam-works.ru).
 7. Piskorskij V.P., Valeev R.A., Tereshina I.S. i dr. Magnitnye svojstva i fazovyy sostav materialov sistemy Pr–Dy–Fe–Co–B [Magnetic properties and phase composition of the material of Pr-Dy-Fe-Co-B] //Perspektivnye materialy. 2007. №3. S. 16–19.
 8. Piskorskij V.P., Burhanov G.S., Mel'nikov S.A., Parshin A.P., Valeev R.A., Tereshina I.S., Ivanov S.I. Vlijanie sodержaniya neodima na svojstva nanostrukturirovannykh materialov Nd(Pr)–Fe–B, poluchennykh po binarnoj tehnologii [Effect of neodymium properties of nanostructured materials of Nd(Pr)–Fe–B, obtained by the binary technology] //Perspektivnye materialy. 2010. №3. S. 195–197.
 9. Politova G.A., Tereshina I.S., Burhanov G.S., Chistjakov O.D. Vlijanie strukturnogo sostojaniya na magnitostriktionnye svojstva soedinenij tipa RFe₂ [The influence of the structural state on the magnetostrictive properties of the compounds of type RFe₂] //Perspektivnye materialy. 2010. №9. S. 198–203.
 10. Mazalov I.S., Filonova E.V., Lomberg B.S. Formirovanie struktury pri deformacii i termicheskoj obrabotke zagotovok detalej iz nikelovogo vysokoprochnogo svariyaemogo splava VZh172 [The formation of structure in the deformation and heat treated blanks welded high-strength nickel alloy VZh172] //Trudy VIAM. 2013. №12. St. 01 (viam-works.ru).
 11. Dvoreckov R.M., Mazalov I.S., Morozova G.I., Filonova E.V. Osobennosti legirovaniya, fazovogo sostava i struktury nikelovogo deformiruемого zharoprochnogo

- splava VZh172 [Features le-doping, the phase composition and structure of the nickel-titanium deformable creep resisting alloy VZh172] //MiTOM. 2014. №4. S. 12–18.
12. Kablov E.N. Kontrol' kachestva materialov – garantija bezopasnosti jekspluatacii aviacionnoj tehniki [Quality control – a guarantee safe operation of aeronautical engineering] //Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Metody ispytanij i kontrolja kachestva metallich-eskih i nemetallicheskih materialov». 2001. S. 3–8.
 13. GOST 23862.15–79. Ittrij i ego okis'. Metod opredelenija okisej prazeodima, neodima, sa-marija, evropija, terbija, disprozija, gol'mija, jerbija, tulija i itterbija [Yttrium oxide and its. Method for determination of oxides of praseodymium, neodymium, samarium, europium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium and ytterbium]. M.: Standartinform. 1981. S. 1–5.
 14. GOST 22536.8–87. Stal' ugljerodistaja i chugun nelegirovannyj. Metody opredelenija medi [Carbon steel and alloyed cast iron. Methods for determination of copper]. M.: Standartin-form. 1988. S. 1–5.
 15. MI 1.2.036–2011. Metodika izmerenij massovoj doli bora, kremnija, cerija, ittrija, zheleza, medi, marganca i fosfora v nanostrukturirovannyh deformirovannyh zharo-prochnyh nikelovyh splavah metodom jemissionnoj spektrometrii s induktivno-svjazannoj plazmoj [Technique for measuring the mass fraction of boron, silicon, cerium, yttrium, iron, copper, manganese and phosphorus in nanostructured deformed heat-resistant nickel alloys by emission spectrometry with inductively coupled plasma]. M.: VIAM. 2011. S. 1–5.
 16. MI 1.2.037–2011. Metodika izmerenij massovoj doli aljuminija, kobal'ta, renija, rutenija, tantala i vol'frama v splavah na nikelovej osnove metodom atomno-jemissionnoj spektrometrii s induktivno-svjazannoj plazmoj [Technique for measuring the mass fraction of aluminum, cobalt, rhenium, ruthenium, tantalum, and tungsten in the nickel-based alloys by atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma]. M.: VIAM. 2011. S. 1–5.
 17. Afonin V.P., Komjak N.I., Nikolaev V.P., Plotnikov R.I. Rentgenofluorescentnyj analiz [X-ray fluorescence analysis]. Novosibirsk: Nauka. 1991. 135 s.
 18. Letov A.F., Karachevcev F.N., Gundobin N.V., Titov V.I. Razrabotka standartnyh obrazcov sostava splavov aviacionnogo naznachenija [Development of standard samples of alloys for aircraft industry] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 393–398.

19. Titov V.I., Gundobin N.V., Pchelkin A.I. i dr. Razrabotka i vypusk standartnyh obrazcov sostava zharoprochnyh nikelovyh splavov sistemy Ni–Ti–Al–Nb–Cr–Co–Mo–W–Re dlja spektral'nogo analiza [Development and production of standard samples of heat-resistant nickel alloys of the Ni–Ti–Al–Nb–Cr–Co–Mo–W–Re for spectral analysis] //Litejshhik Rossii. 2013. №5. S. 30–33.
20. Kablov E.N., Petrakov A.F., Piskorskii V.P., Valeev R.A., Chabina E.B. Effect of Praseodymium on magnetic properties and phase composition of a material of the Nd–Pr–Dy–Fe–Co–B System //Metal Science and Heat Treatment. 2005. V. 47. №5–6. P. 227–231.
21. Piskorskij V.P., Valeev R.A., Nazarova N.V. i dr. Vlijanie samarija na magnitnye svojstva i fazovyj sostav materialov Nd–Dy–Fe–Co–B [Effect of Samarium on the magnetic properties and phase composition of the materials Nd–Dy–Fe–Co–B] //Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'. 2007. T. 12. №12. S. 185–190.