



ИМЕТ РАН

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки**

**ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ**

им. А.А. Байкова

Российской академии наук

(ИМЕТ РАН)

119334, г. Москва, Ленинский пр., 49

Тел. +7 (499) 135-20-60, факс: +7 (499) 135-86-80

E-mail: imet@imet.ac.ru <http://www.imet.ac.ru>

ОКПО 02698772, ОГРН 1027700298702

ИНН/КПП 7736045483/773601001

09.09.2025г. № 12202-2912-1058

На № 2725-04-715 от 11 июня 2025 г.

«Об отзыве ведущей организации»

УТВЕРЖДАЮ

**Заместитель директора по
научной работе**

**Федерального государственного
бюджетного учреждения науки**

**Института металлургии и
материаловедения**

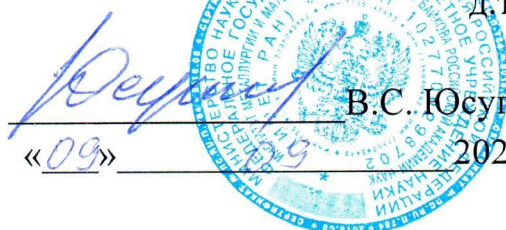
им. А.А. Байкова

Российской академии наук

д.т.н.

В.С. Юсупов

2025г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Бочканова Федора Юрьевича на тему «Влияние электрического тока на фазообразование в реакционных тиглях Fe-Sn и Nd-Zr-Fe-Co-Ti», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Актуальность темы диссертационного исследования

Актуальность темы диссертационного исследования, выполненного Федором Юрьевичем Бочкановым и посвящённого влиянию электрического тока на фазообразование в реакционных тиглях систем Fe-Sn и Nd-Zr-Fe-Co-Ti, определяется несколькими важными аспектами современных материаловедческих и физических наук.

В современных условиях развитие материаловедения требует не только расширения базы знаний о составе и свойствах материалов, но и разработки новых высокоэффективных поисковых методов, способных значительно ускорить нахождение перспективных соединений. В этой связи комбинаторные методы, включая метод реакционного тигля, обеспечивают возможность проведения комплексного анализа множества составов за один эксперимент, что является существенным прогрессом по сравнению с классическими подходами.

Особая актуальность темы связана с использованием электрического тока высокой плотности как дополнительного параметра воздействия на

процессы синтеза и фазообразования. Внешнее электрическое поле рассматривается как фундаментальная переменная, способная изменить кинетику и термодинамику фазовых превращений, что открывает новые пути оптимизации состава и свойств материалов, включая редкоземельные магнитные системы.

Таким образом, тема исследования находится на стыке фундаментальной и прикладной науки, отвечает приоритетам современной научной политики и требованиям промышленности, и имеет высокую актуальность с точки зрения разработки новых материалов и методов их синтеза.

Анализ содержания работы и научных положений, выносимых на защиту

Исследовательская работа Федора Юрьевича Бочканова посвящена актуальной теме исследования фазообразования, фазовых равновесий стабильности образующихся фаз в сложных многокомпонентных системах Fe-Sn и Nd-Zr-Fe-Co-Ti в условиях действия электрического тока высокой плотности в методе реакционного тигля.

В своей работе диссертант доказывает эффективность применения метода реакционного тигля, модифицированного использованием электротермической обработки, для исследований многокомпонентных систем.

Диссертационная работа Федора Юрьевича Бочканова состоит из четырёх глав, включающих обзор литературных данных, описание экспериментальной методики, результаты исследований изучаемых систем и общий анализ полученных данных.

В первой главе представлен обзор современной теории электромиграции, описаны физико-химические принципы влияния электрического тока на диффузионные и фазовые процессы. Рассмотрены существующие методы комбинаторного синтеза и их роль в ускорении поиска новых материалов, акцент сделан на методе реакционного тигля, как ключевом методе исследования. Проанализированы термодинамические и кинетические эффекты, вызываемые внешним электрическим полем в многокомпонентных системах.

Во второй главе описана экспериментальная установка, специально разработанная для электротермической обработки реакционных тиглей с возможностью работы при различных режимах электрического тока (постоянном, переменном и импульсном). Приведено описание методик анализа фазового состава и микроструктуры образцов с использованием электронного микроскопа, оснащенного приставкой для энергодисперсионного анализа, методов дифракции отражённых электронов, магнитооптической микроскопии, а также калориметрических измерений

энтальпий образования фаз. Проведено численное моделирование электротермических процессов посредством COMSOL Multiphysics, что позволило оценить распределение температуры и электрического тока в реакционном тигле.

В третьей главе изложены результаты исследования системы Fe-Sn: показано, что применение электрического тока высокой плотности позволяет решить проблему "исчезнувших" фаз, стабилизируя интерметаллические соединения, которые традиционно сложно получить при изотермическом отжиге. Анализ кинетики массопереноса и фазообразования подкреплён экспериментальными результатами и результатами моделирования.

В четвёртой главе рассмотрена многокомпонентная система Nd-Zr-Fe-Co-Ti. На основании расчётов с использованием модифицированного метода Миедемы с учётом симметрии кристаллической решётки определены интервалы стабильности новых интерметаллических фаз. Установлено влияние химического состава реакционного тигля и его геометрии на качество синтезируемых образцов. Работа демонстрирует смещение фазового равновесия под воздействием электрического тока, что имеет важное значение для создания магнитных материалов нового поколения.

Таким образом, диссертационная работа характеризуется глубиной теоретического анализа, высокой экспериментальной проработкой и новизной научных положений, что делает её результаты важными для физики конденсированного состояния и прикладных материаловедческих исследований.

Среди основных результатов диссертационной работы следует отметить следующее.

Создана экспериментальная установка для электро-термообработки реакционных тиглей при различных режимах электрического тока (постоянном, переменном, импульсном). Приложение электрического тока значительно расширило возможности исследования эволюции фазообразования в многокомпонентных системах и позволило наблюдать явления, ранее невозможные для детектирования в традиционных комбинаторных методиках.

Установлено, что применение тока высокой плотности приводит к изменению кинетики фазообразования, стабилизации всех интерметаллических фаз в системе Fe-Sn, что решает проблему отсутствия некоторых фаз при условиях большого градиента концентрации компонент и прохождения процесса фазообразования в присутствии нескольких интерметаллических фаз.

Исследование влияния импульсного режима электротермического воздействия, показало, что при высоких значениях плотности тока (более 10^8 А/м²) может быть изменен стехиометрический состав интерметаллических фаз, выходящий за пределы областей гомогенности равновесной фазовой диаграммы.

Проведен анализ роли элементного состава сосуда реакционного тигля на конечный фазовый состав продуктов реакции. Показано, что выбор материала тигля существенно влияет на качество полученных фаз.

Разработан подход для расчёта энтальпий образования многокомпонентных интерметаллидов, основанный на методике Миеды с учетом пространственной группы симметрии соединений.

Эти результаты представляют весомый вклад в развитие теории и практики материаловедения, открывают перспективы создания новых классов функциональных материалов, включая перспективные соединения с особыми магнитными свойствами.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации заключается в расширении представлений о влиянии электрического тока высокой плотности на фазообразование в многокомпонентных системах. В работе разработан модифицированный метод реакционного тигля в присутствии электрического тока высокой плотности для комбинаторного анализа многокомпонентных систем, исследовано влияние химического состава тигля, геометрии реакционного тигля, градиента температур и распределения силовых линий электрического поля в реакционном объеме на протекание реакции.

Обоснованность и достоверность результатов

Результаты диссертационного исследования, выполненного Федором Юрьевичем Бочкановым, отличаются высокой степенью обоснованности и достоверности, что подтверждается комплексным применением современных экспериментальных и теоретических методов.

Для проведения экспериментов была разработана и собрана специализированная установка, обеспечивающая высокотемпературную электротермическую обработку реакционных тиглей с контролируемыми режимами электрического тока (постоянный, переменный, импульсный), что позволило получать воспроизводимый экспериментальный материал для анализа.

Исследование микроструктуры и фазового состава образцов проводилось с использованием современных инструментальных методов: сканирующей электронной микроскопии (электронный микроскоп TESCAN VEGA с системой энергодисперсионного рентгеновского анализа), а также магнитооптической микроскопии. Эти методы обеспечивают высокую точность анализа исследуемых параметров.

Изменения термодинамических параметров, таких как энтальпия образования интерметаллических фаз, определялись при помощи высокоточного калориметра Tian-Calvet Alexsys 1000, что обеспечивает достоверность количественных значений. Разработанный автором модифицированный метод расчёта энтальпий с учётом пространственной симметрии кристаллических решёток способствует повышению точности расчётов.

Диссертантом было выполнено моделирование электрофизических и термических процессов в реакционном тигле с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics, которое включало расчёт распределения температуры, плотности тока и силовых линий электрического поля, что позволило объяснить наблюдаемые явления и подтвердить физическую базу экспериментов.

Наконец, научная новизна и обоснованность положений подтверждаются публикациями в рецензируемых журналах, выступлениями на международных и всероссийских конференциях, а также включением результатов исследований в отчёты государственных и грантовых научных программ, что свидетельствует о признании их достоверности и значимости.

Таким образом, высокий уровень методической проработки, комплексность экспериментальных и теоретических подходов, а также многократная проверка и апробация результатов обеспечивают их высокую обоснованность и достоверность, что делает выводы диссертации надёжной основой для дальнейших научных и прикладных исследований.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведённых в диссертации

Полученные в диссертационной работе результаты и научные положения могут найти практическое применение в области комбинаторного материаловедения, разработки новых магнитных материалов и оптимизации технологических процессов высокотемпературного синтеза под воздействием электрического тока.

Внедрение модифицированного метода реакционного тигля с электротермической обработкой рекомендуется на научно-исследовательских предприятиях и производственных площадках, занимающихся синтезом и разработкой многокомпонентных магнитных материалов, таких как НПО «Электромашина», ОАО «Русские Магниты», а также на заводах металлургической промышленности, где осуществляется производство редкоземельных и безредкоземельных магнитов.

Автором диссертации продемонстрирована возможность использования разработанных алгоритмов и программных средств расчёта энтальпий образования с учётом пространственной симметрии кристаллических структур в научно-образовательных учреждениях (НИТУ МИСИС, МГУ им. М.В. Ломоносова, УрФУ и другие университеты) для подготовки специалистов и проведения фундаментальных исследований в области физики конденсированного состояния и материаловедения.

Для промышленного применения может быть рекомендовано проведение опытно-конструкторских работ по внедрению метода электротермической обработки реакционных тиглей с высоким электрическим

током при изготовлении магнитных материалов для устройств четвёртого энергоперехода (электродвигатели, генераторы, накопители энергии и пр.), что будет способствовать снижению зависимости от редкоземельных элементов и улучшению экологических показателей производства.

Следует сделать ряд замечаний по содержанию работы и полученным результатами:

1. В работе не проанализировано возможное влияния микрошлаков и примесей, возникающих при взаимодействии компонентов исследуемой системы с расплавом, на выявленные изменения фазового равновесия в системе Nd-Zr-Fe-Co-Ti под действием электрического тока, а также влияние на конечный состав продуктов реакции элементного состава тигля.

2. В исследовании не учтено влияние неоднородностей в реакционном объеме тигля, например, слоев интерметаллидов на интерфейсе с сосудом тигля или частиц интерметаллических фаз, на локальные эффекты распределения тока и температуры при расчётах методом конечных элементов.

3. Автор работы указывает, что лишь при достижении критических плотностей тока 10^8 А/м² возможно изменить пределы растворимости в фазе со стехиометрическим составом 3:29, однако в тексте диссертации отсутствуют исследования элементного и фазового состава продуктов реакции при обработке токами меньшей плотности.

4. В работе основной акцент сделан на магнитные материалы с использованием метода оптического эффекта Керра для выявления одноосной анизотропии, однако не рассмотрена возможность применения разработанных методов для оценки физических свойств других функциональных материалов.

Заключение

Диссертационная работа Бочканова Федора Юрьевича на тему: «Влияние электрического тока на фазообразование в реакционных тиглях Fe-Sn и Nd-Zr-Fe-Co-Ti» по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и содержит результаты для научно обоснованного подхода к решению задачи по разработке комбинаторного метода поиска новых соединений в многокомпонентных системах.

По совокупности приставных в диссертации результатов, актуальности, научной и практической значимости, обоснованности и достоверности основных результатов, а также по объёму личного вклада автора, данная диссертация отвечает критериям, установленным в п.2 «Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСИС», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор Бочканов Федор Юрьевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа Бочканова Ф.Ю. рассмотрена и обсуждена на совместном научном семинаре лабораторий конструкционных сталей и сплавов им. академика Н.Т. Гудцова (лаб. 7) и лаборатории физикохимии тугоплавких и редких металлов и сплавов (лаб. 12) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук 9 сентября 2025 года (протокол № 2/25). Данный отзыв одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Зав. лаб. конструкционных сталей
и сплавов им. академика Н.Т. Гудцова
член-корр. РАН
Тел.: +7(499)-135-44-94
Эл. почта: ibannykh@imet.ac.ru



И.О. Банных

Зав. лаб. физикохимии тугоплавких
и редких металлов и сплавов
д.т.н.
Тел.: +7(499)-135-96-15
Эл. почта: nkolchugina@imet.ac.ru



Н.Б. Кольчугина

Сведения о ведущей организации:

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук

Адрес: Российская Федерация, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49, 119334

Телефон: + 7 (499) 135-20-60

Эл.почта: imet@imet.ac.ru

Адрес официального сайта в сети «Интернет»: <https://www.imet.ac.ru>

Список основных публикаций работников ведущей организации по тематике диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. K. Skotnicova, G. S. Burkhanov, N. B. Kolchugina, M. Kursa, T. Cegana, A. A. Lukin, O. Zivotsky, P. A. Prokofev, J. Jurica, Y. Li, Structural and magnetic engineering of (Nd, Pr, Dy, Tb)–Fe–B sintered magnets with Tb₃Co_{0.6}Cu_{0.4}Hx composition in the powder mixture, J. Magn. Mater., 2020, v. 498, paper 166220; DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.166220, Web of Sci, Scopus, IF 2.717.

2. Kolchugina, N.B., Zheleznyi, M.V., Savchenko, A.G., Menushenkov, V.P., Burkhanov, G.S., Koshkid'ko, Y.S., Cwik, J., Dormidontov, N.A., Skotnicova, K., Kursa, M., Prokofev, P.A., Simulating the Hysteretic Characteristics of Hard Magnetic Materials Based on Nd₂Fe₁₄B and Ce₂Fe₁₄B Intermetallics, Crystals, 2020, 10 (6), article no. 518. p. 1-11; DOI: 10.3390/cryst10060518.

3. Ćwik J., Koshkid'ko Y., Małacka M., Weise B., Krautz M., Mikhailova A., Kolchugina N. Magnetocaloric prospects of mutual substitutions of rare-earth elements in pseudobinary Tb_{1-x}HoxNi₂ compositions (x = 0.25–0.75), 2021, Journal of Alloys and Compounds, 886, 161295; DOI 10.1016/j.jallcom.2021.161295

4. Cwik J., Koshkid'ko Y., Nenkov K., Mikhailova A., Małacka M., Romanova T., Kolchugina N., De Oliveira N.A. «Experimental and theoretical analysis of magnetocaloric behavior of Dy_{1-x}Er_xNi₂ intermetallics (x=0.25, 0.5, 0.75) and their composites for low-temperature refrigerators performing an Ericsson cycle» 2021, Physical Review B, 103(21), 214429; DOI 10.1103/PhysRevB.103.214429

5. Pankratov N.Yu., Tereshina I.S., Politova G.A., 3, Aleroeva T.A., Filimonov A.V., Vanina P.Yu., Alekseeva O.A., Cwik J., Koshkid'ko Yu S., Ilyushin A.S. Features of magnetostriction behavior of the intermetallic compound Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe₂ near the spin reorientation transitions. Journal of Magnetism and Magnetic Materials (2021) 527, 167728, doi: 10.1016/j.jmmm.2021.167728 (Q2)

6. Politova G., Tereshina I., Ovchenkova I., Aleroev A-R., Koshkid'ko Yu., Ćwik J., Drulis H., Investigation of Magnetocaloric Properties in the TbCo₂-H System, Crystals 2022, 12(12), 1783; DOI 10.3390/cryst12121783 (Q2)

7. Zheleznyi, M.V., Kolchugina, N.B., Kurichenko, V.L. Dormidontov N.A., Prokofev P.A., Milov Y.V., Andreenko A.S., Sipin I.A., Dormidontov A.G. and Bakulina A.S., Micromagnetic Simulation of Increased Coercivity of (Sm, Zr) (Co, Fe, Cu) z Permanent Magnets» Crystals, 2023, 13(2), 177.

8. Politova, G.A., Tereshina, I.S., Karpenkov, A.Yu., Chzhan, V.B., Cwik, J.6 Magnetism, magnetocaloric and magnetostrictive effects in RCo₂ – type (R = Tb,

Dy, Ho) Laves phase compounds, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, V. 591, 1 February 2024, 171700, DOI 10.1016/j.jmmm.2023.171700

9. Denisova L.T., Chumilina L.G., Kargin Yu.F., Vasil'ev G.V., Beletskii V.V., Denisov V.M. SYNTHESIS AND THERMODYNAMIC PROPERTIES OF THE $\text{Ca}_3\text{Sc}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ GERMANATE Inorganic Materials. 2024. T. 60. № 6. С. 703-707.

10. Vasilyev, D., Thermal expansion anisotropy of the $\text{Fe}_{23}\text{Mo}_{16}$ and Fe_7Mo_6 μ -phases predicted using first-principles calculations, Physical Chemistry Chemical Physics, 26 (2024) 3482-3499. <http://dx.doi.org/10.1039/D3CP04266A>

11. Vasilyev, D., Ikhsanov, R., Zheleznyi, M., Kartsev, A., Calculations of elastic and thermal properties of the strengthening C14 $\text{Fe}_6\text{Nb}_4\text{Al}_2$ Laves phase using the density functional theory, Journal of Materials Science, 60 (2025) 5427 – 5441. <https://doi.org/10.1007/s10853-025-10754-4>.

12. Vasilyev, D., Gorev, V., Thermal expansion path, mechanical and thermodynamic properties of C14 Fe_2Nb Laves phase calculated using density functional theory, Physica B: Condensed Matter. 699, (2025) 416850. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.416850.1>.

13. Ищенко А.В., Ахмадуллина Н.С., Леонидов И.И., Сиротинкин В.П., Вайнштейн И.А., Каргин Ю.Ф., Фазообразование и оптические свойства оксинитрида алюминия, легированного ванадием, Журнал неорганической химии. 2025. Т. 70. № 4. С. 485-494.

14. Киселева Н.Н., Дударев В.А., Столяренко А.В., Сенько О.В., Докукин А.А., Кузнецова Ю.О., Прогнозирование соединений состава ABX (X - As, Sn, Sb, Pb или Bi) со структурой типа MmGaGaS и параметров их кристаллической решетки, Перспективные материалы. 2025. № 3. С. 5-13

15. Бецофен С.Я., Ашмарин А.А., Прокопенко Д.А., Максименко Е.И., исследование термического расширения интерметаллидной фазы T1 (Al_2CuLi) сплава В-1480 системы Al-Cu-Li, Деформация и разрушение материалов, 2025. № 4. С. 13-20.