

УДК 536.4

Исследование диффузионных процессов при реакционном синтезе интерметаллидов железа и олова

Г. А. БОЛКУНОВ^{1*}, канд. техн. наук А. В. НОВОТЕЛЬНОВА¹, Н. С. ПОПОВ¹,
Ф. Ю. БОЧКАНОВ², канд. физ.-мат. наук Д. Ю. КАРПЕНКОВ^{2,3}

¹Университет ИТМО

²Национальный исследовательский технологический университет МИСиС

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

E-mail: *genabolkun@gmail.com

Рост цен на редкоземельные металлы и растущее применение постоянных магнитов привел к возобновлению интереса к созданию новых магнитных материалов. Перспективным направлением поиска стали не содержащие редкоземельных элементов материалы на основе системы железо-олово, получаемые методом твердофазного синтеза. Решающее значение при их синтезе имеют диффузионные процессы. Исследованы диффузионные процессы при реакционном синтезе магнитных материалов на основе интерметаллидов системы железо-олово с повышенными термомагнитными свойствами. Синтез производится при нагреве реакционной зоны электрическим током высокой плотности до температур, превышающих температуру плавления олова. Методом математического моделирования проанализировано влияние геометрических размеров реакционной зоны на тепловые режимы и интенсивность диффузионных процессов системы железо — олово при их электротермической обработке. Выполнен анализ расчетных данных по диффузии олова в железо в процессе реакционного синтеза интерметаллидов системы железо-олово в условиях длительного электротермического воздействия. Установлено, что изменение геометрических размеров тигля существенно влияет на температурные режимы и активность диффузионных процессов. Поддержание пропорций тигля обеспечивает согласованное распределение силовых линий электрического тока внутри тигля и заданный температурный режим синтеза, тем самым облегчая получение воспроизводимых результатов. Результаты исследований могут быть использованы при прогнозировании условий получения новых функциональных магнитных материалов.

Ключевые слова: диффузия, синтез, тепловые и электрические поля, интерметаллиды олова и железа, компьютерное моделирование, температура, плавление.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 23.01.2026, одобрена после рецензирования 19.02.2026, принята к печати 25.02.2026

DOI: 10.17586/1606-4313-2026-25-1-62-68

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Болкунов Г. А., Новотельнова А. В., Попов Н. С., Бочканов Ф. Ю., Карпенков Д. Ю. Исследование диффузионных процессов при реакционном синтезе интерметаллидов железа и олова. // Вестник Международной академии холода. 2026. № 1. С. 62–68. DOI: 10.17586/1606-4313-2026-25-1-62-68

Diffusion processes during reaction synthesis of iron-tin intermetallic compounds

G. A. BOLKUNOV^{1*}, Ph. D. A. V. NOVOTELNOVA¹, N. S. POPOV¹,
F. Yu. BOCHKANOV², Ph. D. D. Yu. KARPENKOV^{2,3}

¹ITMO University

²National University of Science and Technology MISIS

³Lomonosov Moscow State University

E-mail: *genabolkun@gmail.com

The growing demand for permanent magnets used in environmentally friendly energy systems, as well as in hybrid and electric vehicle drives, has renewed interest in the development of new magnetic materials that do not contain rare-earth elements. Materials based on the binary iron-tin system produced by reaction synthesis have therefore attracted considerable research attention. In this work, we investigate diffusion processes occurring during the reaction synthesis of magnetic materials based on iron-tin intermetallic compounds with enhanced thermomagnetic properties. Heating of the reaction zone is achieved by passing a high-density electric current. We analyze the influence of the geometric dimensions of the reaction

zone on thermal regimes and on the intensity of diffusion processes in the iron-tin system during electrothermal treatment. The study is carried out using mathematical modeling based on the finite element method. The applied modeling approach allows to consider thermal, electrical, and mass transfer processes occurring in the reaction crucible, taking into account the spatial distribution of components and the processing conditions of the crucible. Numerical data on tin diffusion into iron during the reaction synthesis of iron-tin intermetallic compounds under prolonged electrothermal exposure are analyzed. It has been found that variations in the geometric dimensions of the crucible have a significant effect on temperature regimes and on the activity of diffusion processes. Maintaining appropriate crucible proportions ensures a coordinated distribution of electric current lines within the crucible and a prescribed synthesis temperature regime, thereby enabling the achievement of reproducible results. The obtained results can be used for the analysis of experimental data and for predicting the conditions required for the synthesis of new functional magnetic materials.

Keywords: diffusion, synthesis, thermal and electric fields, iron — tin intermetallics, numerical modeling, temperature, melting.

Article info:

Received 23/01/2026, approved after reviewing 19/02/2026, accepted 25/02/2026

DOI: 10.17586/1606-4313-2026-25-1-62-68

Article in Russian

For citation:

Bolkunov G. A., Novotelnova A. V., Popov N. S., Bochkanov F. Yu., Karpenkov D. Yu. Diffusion processes during reaction synthesis of iron-tin intermetallic compounds. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2026. No 1. p. 62-68. DOI: 10.17586/1606-4313-2026-25-1-62-68

Введение

Растущее значение постоянных магнитов, используемых в экологически чистых источниках энергии и двигателях гибридных и электрических транспортных средств, привело к возобновлению интереса к разработке или открытию новых материалов для постоянных магнитов, которые дешевле и не содержат редкоземельных элементов, а также эффективных методов их синтеза [1, 2]. В этой связи перспективны разработки магнитных материалов на основе бинарной системы железо — олово [3]–[6].

Современные исследования в области синтеза интерметаллидов системы железо — олово направлены не только на создание новых материалов, но и на понимание их фундаментальных электронных и магнитных характеристик. Примером такого подхода является изучение интерметаллида Fe_3Sn_2 , синтез которого был неразрывно связан с открытием в нем топологических Холловских эффектов [7]–[9]. Это вещество является источником большого топологического Холловского эффекта при комнатной температуре и выше. Интерметаллид Fe_3Sn_2 является полупроводником с большой планарной магнитокристаллической анизотропией ($K_1 = 1,8 \text{ МДж/м}^3$), что означает, что его магнитные моменты предпочитают выстраиваться в плоскости кристалла. Также было показано, что его магнитные домены чувствительны к механической деформации.

Соединение FeSn_2 находит свое практическое применение в производстве припоев для электроники [10]. Добавка небольшого количества железа в состав современных безсвинцовых припоев, таких как Sn-Ag-Cu (SAC) улучшает механические свойства соединений. Это приводит к образованию фазы FeSn_2 на границе раздела между припоями и печатными платами, что позволяет контролировать рост интерметаллидных фаз, повысить долговечность и надежность соединений.

Выбор метода синтеза напрямую определяет качество исходного материала и, как следствие, область применения.

Традиционные методы синтеза интерметаллидов железа и олова основаны на твердофазных реакциях — контролируемом взаимодействии элементов при повышенных температурах. Эти методы часто используются для получения материалов высокой фазовой чистоты, что является критически важным условием для детального изучения их электронных, магнитных и топологических свойств. Одной из характерных особенностей твердофазной реакции в системе Fe-Sn является ее чрезвычайно медленная кинетика. Реакция требует длительного времени для достижения полной степени превращения. Например, для синтеза Fe_3Sn_2 потребовалось проведение двухэтапного процесса: первоначальный нагрев до 1073 К с выдержкой в течение одной недели, последующее быстрое охлаждение в воде для разрушения структуры, после чего регранирование материала и вторая стадия нагрева при той же температуре еще одну неделю [11].

Однако низкая скорость синтеза делает традиционные методы синтеза практически неприменимыми для промышленного производства. Эти ограничения стимулировали поиск развития новых, более быстрых и энергоэффективных методов синтеза.

Использование метода механохимического синтеза позволяет получать соединение FeSn_2 . Механическая активация и гомогенизация позволяет ускорить процесс и проводить синтез за часы. Однако, успех процесса оказался критически зависимым от конкретной процедуры механообработки [12] и пока нет данных о возможности синтеза метастабильных фаз.

Исследования в [12] показали, что реакция на границе раздела твердое тело/жидкое тело кинетически ограничена при температурах ниже 1073 К. Жидкое олово плохо смачивает поверхность твердого железа при более низких температурах, что препятствует эффективному контакту и диффузии. Только при температурах выше 1073 К начинается активная реакция.

Метод реакционной тигельной плавки позволяет выходить за рамки равновесных фазовых диаграмм и ста-

билизовать метастабильные соединения. Этот подход был успешно применен для синтеза трех метастабильных интерметаллидов системы Fe-Sn: Fe_3Sn , Fe_5Sn_3 и Fe_3Sn_2 [2].

Ускорение диффузионных процессов при синтезе бинарных интерметаллидов методом реакционной тигельной плавки может достигаться при прохождении постоянного электрического тока. В этом случае бинарные интерметаллиды на основе олова и железа синтезируются в железном тигле, наполненном оловом в виде порошка [13]. Температура в реакционной зоне за счет Джоулева нагрева повышается выше точки плавления олова, что приводит к возникновению твердо-жидкофазной диффузии ускоряя этот процесс. Ускоряющее действие электрического тока связано с повышенным растворением железа в расплавленном олове и эффектами электромиграции ионов.

Электротермический процесс в реакционном тигле представляет собой сложное взаимодействие электрических, тепловых и химических процессов [13]–[16]. В результате этого взаимодействия в объеме тигля устанавливается определенный тепловой режим. Температура процесса при этом не регулируется, а устанавливается в результате равновесия между энергопотребляющими и энерговыделяющими процессами.

Вместе с тем при анализе результатов синтеза данные о распределении температурных и электрических полей в ходе синтеза необходимы для сопоставления фазового состава продуктов реакции с условиями их получения. Информацию о фазовом составе и диффузионных процессах в ходе синтеза также можно получить постфактум, анализируя состав конечного продукта синтеза. Измерение температуры же внутри реакционной

зоны в ходе реакционного синтеза практически невозможно.

При этом в ходе исследовательских работ возникает ряд вопросов о влиянии отдельных факторов проведения синтеза на интенсивность диффузионных процессов. Получение ответов на эти вопросы с использованием традиционных методов металлографического анализа не всегда дает результат, так как фазовый состав в приграничных слоях может изменяться в ходе длительного синтеза. В таких случаях используются методы математического моделирования тепловых и электрических процессов. Они позволяют как проанализировать процесс в динамике, так и предсказывать свойства продуктов синтеза [15].

Для определения тепловых и электродинамических параметров реакционной зоны тигля, а также их влияние на диффузионную активность требуется математическое моделирование.

Ранее нами было исследовано влияние на диффузионные процессы некоторых технологических факторов таких как степень заполненности тигля компонентом реакции (оловом), величина прикладываемого электрического напряжения, длительность синтеза [15, 16]. Настоящая работа посвящена вопросу о влиянии на интенсивность диффузионных процессов и тепловых и электрических условий в реакционной зоне геометрических размеров тиглей при реакционном синтезе интерметаллидов.

Материалы и методы

Реакционный тигель цилиндрической формы (рис. 1, дет. 2) выполнен из высокочистого железа (компонент реакции), прошедшего закалку в расплаве. Тигель герметизируется крышкой, выполненной из железа, с использованием резьбового соединения. Внутреннее пространство тигля заполняют порошкообразным оловом (рис. 1, дет. 1).

Реакционный тигель закреплен между двумя стальными крышками электродов (рис. 1, дет. 5 и 6) с использованием графитовых вставок — пуансонов (рис. 1, дет. 4 и 3). Разность электрических потенциалов между стальными электродами составляла 1,4 В. Отвод тепла от камеры происходит с помощью водяного охлаждения стальных электродов.

Под действием электрического напряжения через заполненный оловом реакционный тигель протекают токи высокой плотности, вызывающие нагрев джоулевым теплом. Температура тигля в течение нескольких минут повышается до температуры плавления олова. В результате олово расплавляется и вступает в реакцию с железным тиглем.

Электротермическая обработка проводится в вакууме.

Подробно математическая модель, описывающая процесс реакционного синтеза интерметаллидов системы железо-олово описана в работе [15].

Тепловые и диффузионные процессы изучались путем моделирования во временной области. Была рассмотрена эволюция изменения концентрации компонентов в объеме реакционной зоны на протяжении электротермического воздействия в течение 4 ч.

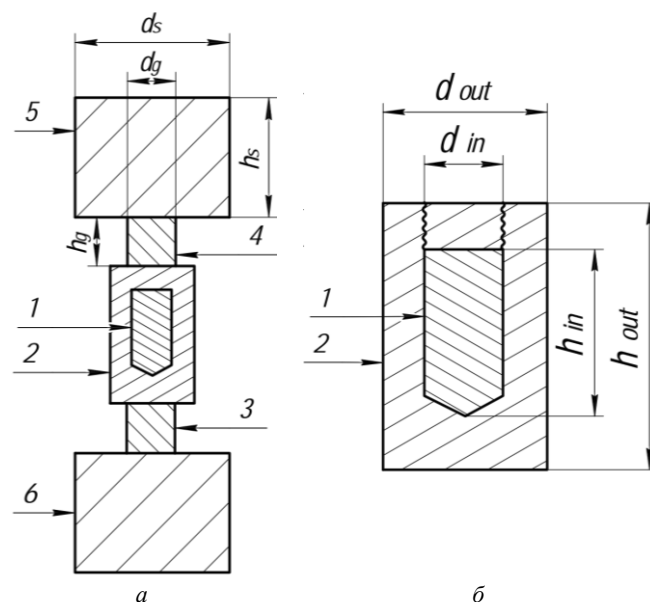


Рис. 1. Геометрическая модель: а — установка; б — тигель. 1 — обрабатываемый материал (олово); 2 — железный тигель; 3, 4 — пуансоны, выполненные из графита; 5, 6 — верхний и нижний стальные электроды

Fig. 1. Geometric model of the unit (a) and crucible (b). 1 — workpiece (tin); 2 — iron crucible; 3, 4 — graphite punches; 5, 6 — upper and lower steel electrodes

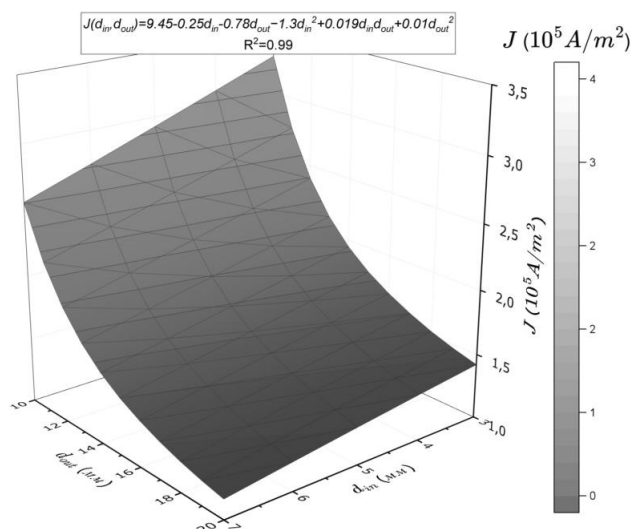


Рис. 2. Влияние геометрических размеров реакционного тигля на средние значения плотности тока в реакционной зоне, заполненной оловом

Fig. 2. The influence of the geometric dimensions of the reaction crucible on the average values of current density in the reaction zone filled with tin

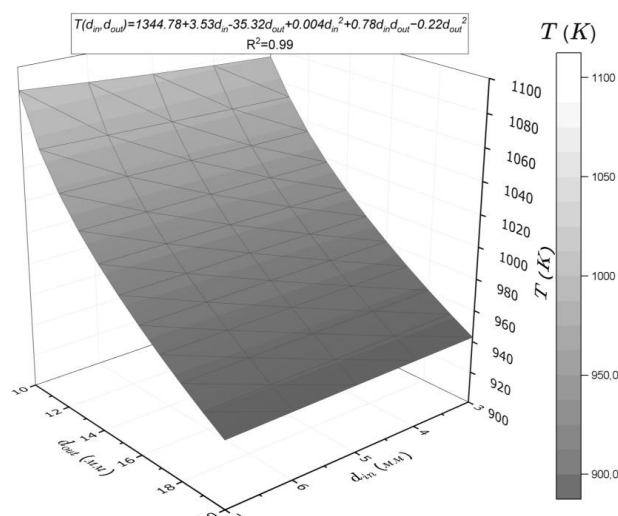


Рис. 3. Влияние геометрических размеров реакционного тигля на средние значения температуры в реакционной зоне, заполненной оловом

Fig. 3. The influence of the geometric dimensions of the reaction crucible on the average temperature values in the reaction zone filled with tin

Для установления влияния геометрических параметров тигля на распределение электрических полей и полей температуры проводилось моделирование процесса реакционного синтеза интерметаллидов системы Fe-Sn с использованием тиглей различных геометрических размеров. При моделировании высота тигля составляла 14,5 мм. Размеры внешнего диаметра d_{out} варьировали от 10 мм до 20 мм шагом 0,5 мм. Величина внутреннего диаметра d_{in} тигля изменялась от 3 до 7 мм с шагом 0,5 мм. Значение геометрических размеров остальных деталей, входящих в состав установки принималось неизменным. Размер верхнего и нижнего стальных электродов (детали 5, 6 на рис. 1) составляли диаметр $d_s = 19,2$ мм, высота $h_s = 15$ мм. Размер графитовых пуансонов (детали 3, 4 на рис. 1) диаметр $d_g = 6$ мм, высота $h_g = 6$ мм.

При подаче электрического напряжения на электроды через установку начинает проходить ток высокой плотности, что приводит к разогреву реакционной зоны до температур, превышающих температуру плавления олова в течение 18 мин. После достижения температуры проведения синтеза плотность, протекающего через заполненную оловом область в 2 раза выше, чем через железный тигель.

При фиксированном значении внешнего диаметра увеличение внутреннего диаметра приводит снижению плотности тока и повышению температуры в реакционной зоне (рис. 2, 3).

Под воздействием повышенных температур и электрического тока в реакционной зоне происходит взаимная диффузия олова и железа с образованием интерметаллических соединений и растворение металла тигля в олове.

Скорость образования слоя интерметаллида и глубина взаимной диффузии зависит от условий синтеза. Для оценки влияния геометрических размеров реакционных тиглей на диффузионные процессы был произведе-

ден расчет толщины эффективного диффузионного слоя D_{eff} (слоя, в котором массовая доля олова составляет не менее 40%). Толщина D_{eff} оценивалась после 4 ч проведения электротермической обработки. Результаты расчета представлены на рис. 4.

Расчетные данные были аппроксимированы (рис. 5.) полиномиальной функцией второго порядка по внутреннему и внешнему диаметрам реакционной зоны.

В результате регрессии получено аналитическое выражение для эффективного коэффициента диффузии:

$$D_{eff}(d_{in}, d_{out}) = 0,02653 + 0,00568d_{in} - 0,00066d_{out} - 0,00027d_{in}^2 + 0,0000159d_{in}d_{out} - 0,0000559d_{out}^2.$$

Коэффициент детерминации модели составил $R^2 = 0,73$.

Обсуждение результатов

Увеличение внутреннего диаметра тигля и объемной доли олова влияет на уменьшение средней плотности тока, а также увеличение средней температуры (см. рис. 2). Увеличение внешнего диаметра и объемной доли железа вызывает падение средней температуры в реакционной зоне на 100–150 К и заметное снижение средней плотности тока в двухкратном размере.

В то же время результаты моделирования показывают обратный вышеупомянутым тенденциям характер зависимости эффективной глубины диффузии от габаритов реакционной зоны. Видно, что рост значения эффективной глубины диффузии происходит в соответствии с ростом температуры при увеличении внутреннего диаметра. Однако форма поверхности соответствующей значениям эффективной глубины диффузии имеет более сложный характер, не совпадающий с поведением расчетных значений температуры и плотности тока.

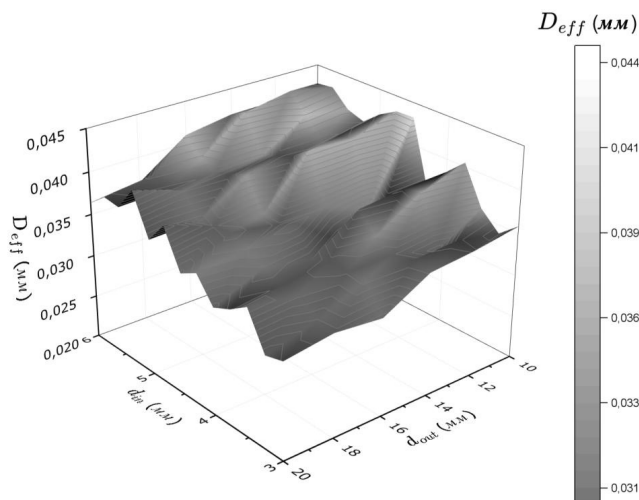


Рис. 4. Влияние геометрических размеров реакционных тиглей на эффективную глубину диффузии

Fig. 4. Influence of the geometric dimensions of reaction crucibles on the effective diffusion depth

На распределение электрических и температурных полей в области реакционного тигля при синтезе действуют несколько факторов. Олово имеет при температурах синтеза большую проводимость. Благодаря этому плотность тока, протекающего через область, заполненную оловом выше, чем проходящего через железный тигель. Уменьшение внутреннего диаметра d_{in} при фиксированном значении d_{out} к повышению плотности тока во внутренней области тигля, что в свою очередь вызывает повышение выделения джоулева тепла и как следствие среднего значения температуры этой области.

Второй фактор — это перенос энергии, обусловленный теплопроводностью. Увеличение внешнего диаметра d_{out} способствует теплопереносу от более разогретой внутренней области тигля и снижает среднее значение температуры в ней.

Помимо этого, на диффузионные процессы оказывают влияние и соотношение исходных компонентов реакции при изменении размеров тигля.

Как видно из рис. 4 наименьшая толщина эффективного диффузионного слоя наблюдается в случае, когда соотношение объема компонентов смещено в сторону железа ($d_{out}=20$ мм, $d_{in}=3$ мм). Изменение соотношения компонентов твердотельной реакции и температурного и электрического режима ее проведения может оказывать влияние на фазовый состав. И напротив смещение соотношения объемов исходных компонентов в сторону олова, для которого свойственна ионная миграция в температурном диапазоне, используемом для проведения синтеза, сопровождается ускорением растворения железа в олове и ростом эффективности диффузии.

Заключение

В заключение можно сказать, что система Fe-Sn является чрезвычайно перспективной для дальнейших исследований в области синтеза интерметаллидов. Синтез интерметаллидов системы Fe-Sn является не самоцелью,

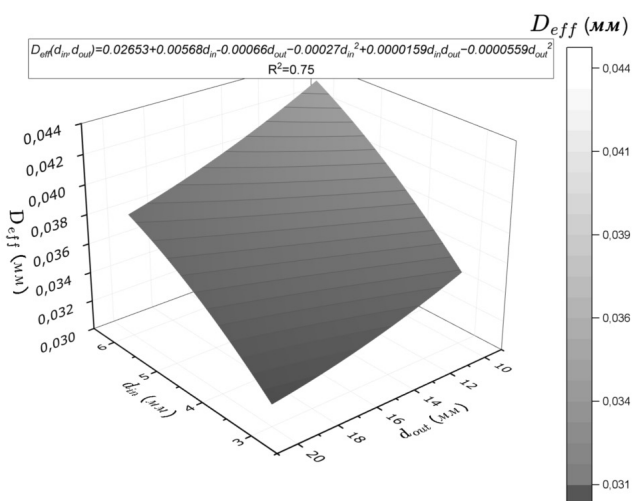


Рис. 5. Влияние геометрических размеров реакционных тиглей на эффективную глубину диффузии после аппроксимации

Fig. 5. Influence of the geometric dimensions of reaction crucibles on the effective diffusion depth after approximation

а средством для получения материалов с уникальными и многообещающими физическими свойствами.

Важной задачей при рассмотрении процессов твердотельного синтеза интерметаллидов служит исследование диффузионных процессов и факторов на него влияющих.

Методом математического моделирования процессов методом конечных элементов, было исследовано влияние геометрических размеров цилиндрического реакционного тигля на электрические и температурные поля и интенсивность диффузии.

Изменение размеров внутреннего или внешнего диаметра тигля приводит к изменению электрического режима и соотношения доступного для реакции количества компонентов. В свою очередь это воздействует на температурный режим в реакционной зоне и на активность диффузионных процессов.

Поддержание пропорций тигля обеспечивает согласованное распределение силовых линий электрического тока внутри тигля и заданный температурный режим синтеза, тем самым облегчая получение воспроизводимых результатов.

Дальнейший прогресс в области синтеза интерметаллидов будет зависеть от развития методов синтеза, позволяющих еще более точно контролировать микроструктуру и фазовый состав, что, в свою очередь, откроет двери для открытия новых физических явлений и создания более совершенных материалов.

Литература/References

1. Sales B., Saparov B., McGuire M. et al. Ferromagnetism of Fe_3Sn and Alloys. *Scientific Reports*. 2014. No 4, p. 7024. DOI: 10.1038/srep07024.
2. Dally R. L., Phelan D., Bishop N., Ghimire N. J., Lynn J. W. Isotropic Nature of the Metallic Kagome Ferromagnet Fe_3Sn_2 at High Temperatures. *Crystals (Basel)*. 2021; 11 (3): 10.3390/cryst11030307. DOI: 10.3390/cryst11030307.

3. Miyasato T., Abe N., Fujii T., Asamitsu A., Onose Y., Onoda S., Tokura Y. Anomalous Hall effect and Nernst effect in itinerant ferromagnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007, vol. 310 (2), p. 1053–1055. DOI: 10.1016/j.jmmm.2006.10.239
4. Predel B. Fe-Sn (Iron-tin). *Dy-Er — Fr-Mo*. 1995. p. 1–5. DOI: 10.1007/10474837_1342.
5. Li H. et al. Large anisotropic topological Hall effect in a hexagonal non-collinear magnet Fe_5Sn_3 . *Applied Physics Letters*. 2020. vol. 116. no. 18. p. 182405. DOI: 10.1063/5.0005493
6. Fayyazi B. et al. Bulk combinatorial analysis for searching new rare-earth free permanent magnets: Reactive crucible melting applied to the Fe-Sn binary system. *Acta Materialia*. 2017. vol. 141. p. 434–443. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.09.036
7. Zhang H., Xu C. Q., Ke X. Topological Nernst Effect, Anomalous Nernst Effect, and Anomalous Thermal Hall Effect in the Dirac Semimetal Fe_3Sn_2 . *Phys. Rev. B*. 2021. Vol. 103, p. 201101. DOI: 10.1103/physrevb.103.1201101
8. Yin J. X., Lian B., Hasan M. Z. Topological kagome magnets and superconductors. *Nature*, 2022. Vol. 612. P. 647–657. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05516-0>
9. Deli Kong, András Kovács, Michalis Charilaou et al. Strain Engineering of Magnetic Anisotropy in the Kagome Magnet Fe_3Sn_2 . *ACS Nano*. 2025, vol. 19, no. 8, p. 8142–8151. DOI: 10.1021/acsnano.4c16603
10. Shen C., Samathrakris I., Hu K. et al. Thermodynamical and topological properties of metastable Fe_3Sn . *npj Computational Materials*. 2022. Vol. 8 (1), p. 248. DOI: 10.1038/s41524-022-00917-1
11. Mohd Izrul Izwan Ramli, Mohd Arif Anuar Mohd Salleh, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah et al. Formation and Growth of Intermetallic Compounds in Lead-Free Solder Joints: A Review. *Materials*. 2022, vol. 15 (4), p. 1451. DOI: 10.3390/ma15041451
12. Nattaya Tosangthum, Pinya Meesa-Ard, Ruangdaj Tong Sri. Fe-Sn Intermetallic Compound Synthesized via Mechanical Alloying and Liquid Phase Sintering. *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*. 2017 16 (4):239–253. DOI: 10.12982/CMUJNS.2017.0019
13. Bochkanov F., Karpenkov D., Fomin V., Tukmakova A., Kvashnin A., Novotelnova A., Kutsemako O., Kulesh N., Kurichenko V., Bajenova I., Khvan A. Electrical current-assisted reactive crucible melting technique: Case study of the Fe-Sn system. *Materialia*. 2024. Vol. 36, pp. 102152. DOI: 10.1016/j.mtla.2024.102152
14. Bochkanov F. Y., Kutsemako O. D., Fomin V. E., Novotelnova A. V., Karpenkov D. Y. The influence of temperature gradients in the diffusion zone of the Fe-Sn reaction crucible on the process of phase formation during its electrothermal treatment // Челябинский физико-математический журнал [Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal] 2025, Vol. 10, No. 1, pp. 174–181. DOI: 10.47475/2500-0101-2025-10-1-174-181
15. Фомин В., Тукмакова А. С., Болкунов Г. А., Новотельнова А. В., Боцканов Ф. Ю., Карпенков Д. Ю. Моделирование диффузионных процессов при электротермической обработке реакционных тиглей системы железо — олово // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 1 (143). С. 202–209. DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-202-209 [Fomin V., Tukmakova A. S., Bolkunov G. A., Novoselnova A. V., Bochkanov F. Yu., Karpenkov D. Yu. Simulation of diffusion processes during electrothermal treatment of reaction crucibles of the Fe-Sn system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2023. Vol. 23. No. 1 (143). pp. 202–209. (in Russian)]
16. Фомин В., Новотельнова А. В., Болкунов Г. А., Боцканов Ф. Ю., Карпенков Д. Ю. Оценка влияния степени заполнения реакционного тигля железо-олово на процессы тепло- и массопереноса в присутствии электрического тока высокой плотности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 5 (147). С. 1065–1072. DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-5-1065-1072 [Fomin V., Novotelnova A. V., Bolkunov G. A., Bochkanov F. Yu., Karpenkov D. Yu. Study of heat and mass transfer processes in the Fe-Sn reaction crucible in the presence of high-density electric current. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2023. Vol. 23. No. 5 (147). pp. 1065–1072. (in Russian)]

Сведения об авторах

Болкунов Геннадий Александрович

Аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, genabolkun@gmail.com. ORCID 0000-0003-3297-3395

Новотельнова Анна Владимировна

К. т. н., доцент, доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, novotelnova@yandex.ru. ORCID 0000-0003-0073-2415

Попов Никита Сергеевич

Аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, ditiissimus104@gmail.com. ORCID 0009-0001-7814-0316

Information about authors

Bolkunov Gennadiy A.

Postgraduate student of the Educational center «Energy Efficient engineering Systems», ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, genabolkun@gmail.com. ORCID: 0000-0003-3297-3395

Novotelnova Anna V.

Ph. D., Associate Professor, Associate Professor of Educational center «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, novotelnova@yandex.ru. ORCID: 0000-0003-0073-2415

Popov Nikita S.

Postgraduate student, Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, ditiissimus104@gmail.com. ORCID:0009-0001-7814-0316

Бочканов Федор Юрьевич

Младший научный сотрудник, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049, Москва, Ленинский пр, 4, стр. 1.
Bochkanov_fy@mail.ru, ORCID 0000-0001-9258-2551

Bochkanov Fedor Yu.

Junior Researcher, National University of Science and Technology MISIS, 119049, Moscow, Leninsky Prospekt, 4, building 1. Bochkanov_fy@mail.ru.
ORCID 0000-0001-9258-2551

Карпенков Дмитрий Юрьевич

К. физ.-мат. н., доцент каф. функциональных наносистем и высокотемпературных материалов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049, Москва, Ленинский пр, 4, стр. 1; старший научный сотрудник, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991, РФ,
karpenkov_d_y@mail.ru, ORCID 0000-0001-8686-2303

Karpenkov Dmitry Yu.

Ph. D., Associate Professor, Department of Functional Nanosystems and High-temperature Materials, National Research Technological University «MISiS», 119049, Moscow, Leninsky Prospekt, 4, building 1; Senior Researcher, Lomonosov Moscow State University, 119991, Russia, Moscow, karpenkov_d_y@mail.ru, ORCID 0000-0001-8686-2303



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»



XVII Международная специализированная выставка

6 – 9 октября 2026 г.

Уникальный отраслевой проект, способствующий комплексному решению проблем энергетики в промышленности и ЖКХ, инфраструктурного развития территорий, энерго- и экологической безопасности, демонстрирующий научно-технические разработки и достижения в области энергосбережения, прогрессивные решения для энергетического сектора и современные эффективные технологии энергокомплекса.

Выставка «**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ**» традиционно пройдет совместно с международными специализированными выставками «**РОС-ГАЗ-ЭКСПО**» и «**КОТЛЫ И ГОРЕЛКИ**». Тематики всех мероприятий логически дополняют друг друга.

Тематики выставки:

- Энергоэффективность и энергосбережение при транспортировке энергетических ресурсов и выработке тепловой и электрической энергии.
- Энергосберегающие технологии в инженерных системах промышленных предприятий, зданий и сооружений.
- Энергоэффективное оборудование, устройства, изделия и материалы.
- Ресурсосберегающее ведение строительно-монтажных работ.
- Обеспечение безопасности при транспортировке, хранении и использовании топливно-энергетических ресурсов. Промышленная безопасность и экология.
- Учет и мониторинг энергосбережения и потребления топливно-энергетических ресурсов.
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами в промышленности, энергетике и в сфере потребления ТЭР.
- Диагностика. Неразрушающий контроль.
- Возобновляемые источники энергии (ВИЭ).
- Альтернативные источники энергии (АИЭ).
- Переработка и утилизация промышленных и бытовых отходов.
- Светотехника.

Место проведения:

Санкт-Петербург, Петербургское шоссе, 64/1, КВЦ "Экспофорум"
Бесплатный трансферный автобус от станции метро "Московская"

Организатор выставки:
ООО "ФАРЭКСПО"

Подробная информация на сайте:
<https://energysaving-expo.ru/>