

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 537.622.4:621.318.1
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-2-233-237>

Поступило в редакцию 04.03.2020
Received 04.03.2020

А. К. Вечер, А. И. Галяс, Г. А. Говор, К. И. Янушкевич

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
Минск, Республика Беларусь*

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ ЖЕЛЕЗА,
КАПСУЛИРОВАННЫХ ОКСИДНЫМ ПОКРЫТИЕМ**

(Представлено членом-корреспондентом В. М. Федосюком)

Аннотация. Исследованы электрические характеристики композиционных материалов на основе порошков железа ASC 100.29 (Швеция). Поверхность порошков капсулирована изоляционным ферритным покрытием. Для проведения исследований удельной электропроводности и термоЭДС методом прессования изготавливались сердечники, из которых вырезались образцы. Результаты показывают, что уменьшение величины электросопротивления с ростом температуры обусловлено изменением контакта между зёрнами в образце. Изменение границ между зёрнами (или доменами) создает условия образования нового магнона, что оказывает влияние на величину коэффициента термоЭДС. Результаты исследований могут быть использованы при синтезе композитов с заданными электромагнитными характеристиками для практических применений.

Ключевые слова: композиционный материал, железный порошок, ферритовое изоляционное покрытие, удельная электропроводность, термоЭДС

Для цитирования: Электрические свойства композитов на основе порошков железа, капсулированных оксидным покрытием / А. К. Вечер [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 2. – С. 233–237. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-2-233-237>

Alexander K. Vetcher, Anatoly I. Galyas, Gennady A. Govor, Kazimir I. Yanushkevich

*Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

**ELECTRICAL PROPERTIES OF IRON POWDER-BASED COMPOSITES ENCAPSULATED
BY THE OXIDE COATING**

(Communicated by Corresponding Member Valery M. Fedosyuk)

Abstract. The electrical characteristics of composite materials based on iron powders ASC 100.29 (Sweden) were investigated. The surface of powders is encapsulated by an insulating ferrite coating. The conductivity and the thermopower were studied, the cores were made by the pressing method, and then the samples were cut from the cores. The results show that the decrease in the electrical resistance with increasing temperature is due to a change in the contact between the grains in the sample. A change in the boundaries between grains (or domains) creates the conditions for formation of a new magnon, which affects the thermopower coefficient value. The research results can be used in the synthesis of composites with specified electromagnetic characteristics for practical applications.

Keywords: composite material, iron powder, ferrite insulating coating, the conductivity, the thermopower

For citation: Vetcher A. K., Galyas A. I., Govor G. A., Yanushkevich K. I. Electrical properties of iron powder-based composites encapsulated by the oxide coating. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 2, pp. 233–237 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-2-233-237>

Введение. Композиционные материалы на основе порошков железа с оксидными покрытиями используют при изготовлении магнитных компонентов узлов электрических машин. Устройства на основе таких материалов обладают достаточно высоким КПД и небольшими потерями

по сравнению с электротехническим листовым железом [1]. Очевидно, что электрические свойства изделий из капсулированных изоляционным покрытием частиц железа обусловлены толщиной и химическим составом оксидного покрытия. Цель работы – изучение особенностей температурных зависимостей удельной электропроводности и термоЭДС изделий из порошков железа с изоляционным покрытием. Температурные зависимости электросопротивления позволяют получить дополнительную информацию о состоянии межзеренных контактов в разных интервалах температур. Измерения величины коэффициента Зеебека в широком диапазоне температур позволяют выявить влияние изоляционных покрытий частиц железа на проявление особенностей эффекта термоЭДС в композитах.

Материалы и методы исследования. Образцы изделий изготовлены методом прессования из порошков железа фирмы Hoganes 100.29 с изоляционным покрытием частиц зерном от 20 до 150 мкм. Размеры образцов $5 \times 5 \times 10$ мм. Измерения величин удельной электропроводности $\sigma(T)$ и термоЭДС выполнены двухзондовым методом на установке, схема которой представлена на рис. 1 [2]. В качестве материала зонда для контактов выбрана медная фольга по причине, что относительно меди определяются величины термоЭДС и других металлов. Сила прижима медных лепестков зондов к торцам цилиндрической формы образца $\sim 3,0$ Н. Тепловой контакт термопар с образцом осуществлялся через слюду толщиной ~ 50 мкм. При температурах ~ 80 – 300 К в качестве теплопередающей среды использован газообразный азот, в интервале температур 300 – 1100 К – инертный газ аргон. Зависимости удельной электропроводности $\sigma(T)$ и $a(T)$ изучены в интервале температур от ~ 80 до 1100 К. Изменение электросопротивления образцов контролировалось мультиметром KEYSIGHT 34410A, который обеспечивал диапазон измерений от $0,01$ Ом до 1 ГОм.

Для определения ΔE в измерительной ячейке создавался градиент температуры «спиралью», расположенной над образцом. При измерениях разности потенциалов ΔE на торцах образцов

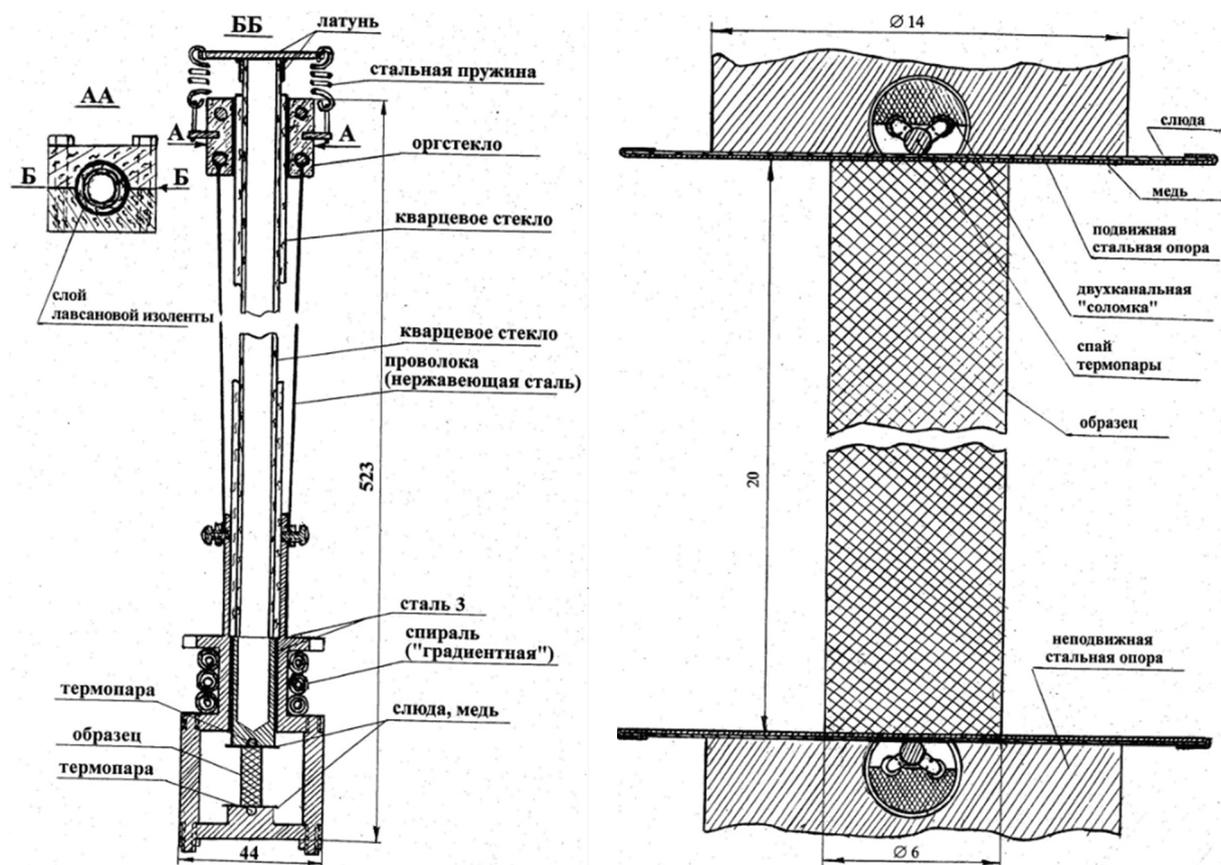


Рис. 1. Схема установки для исследования температурных зависимостей удельного электросопротивления и термоЭДС

Fig. 1. Installation for studying the temperature dependences of electrical resistivity and thermopower

поддерживалась разность температур $\Delta T \approx 10^\circ$. Температура контролировалась двумя термодарами хромель–алюмель. Погрешность измерения термоЭДС 0,01 мВ/°.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2, а представлены зависимости удельного электрического сопротивления $\rho = f(T)$ образцов композитов, изготовленных из частиц с изоляционным покрытием на основе порошков железа разных фракций зернистости: $d > 100$ мкм; $d < 100$ мкм. Наибольшее различие в электросопротивлении исследуемых композитов, около двух порядков, наблюдается при температуре ~ 80 К. В интервале температур 500–870 К различие в электросопротивлении минимально. На температурных зависимостях $\rho = f(T)$ исследуемых композитов можно выделить следующие интервалы температур с различным по характеру изменением электросопротивления: ~ 80 –400; 400–600; 600–800; 850–1100 К. Для температурных интервалов 600–800 и 900–1100 К характерно наиболее слабое изменение электросопротивления исследуемых композитов. Независимо от фракции зернистости порошков железа температурные зависимости $\rho = f(T)$ обоих композитов имеют тенденцию к уменьшению величины электрического сопротивления с увеличением температуры во всем температурном диапазоне, как и у полупроводниковых материалов. Состав покрытия, наносимого на частицы порошка железа разной зернистости, обладает свойствами изолятора. Для полупроводников изменение $\rho = f(T)$ характерно экспоненциальное уменьшение электросопротивления и незначительного его увеличения при переходе от примесной проводимости к собственной. Переход от примесной проводимости к собственной у полупроводников обычно происходит при достаточно высоких температурах. Температурные зависимости электропроводности $\ln \sigma = f(10^3 / T)$ (рис. 2, б) исследуемых композитов не содержат протяженных строго линейных участков выше температуры фазового превращения. Поэтому можно сделать вывод, что температурные зависимости удельного электросопротивления $\rho = f(T)$ отражают состояние изменения сопротивления межзеренных контактов с увеличением температуры.

Коэффициент термоЭДС определялся из соотношения $\alpha = \Delta E / (T_1 - T_2)$, где ΔE – разность потенциала по длине образца; T_1 и T_2 – температуры оснований цилиндра образца соответственно.

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента Зеебека $\alpha = f(T)$ железа (рис. 3, кривая 1) и исследуемых композитов (рис. 3, кривые 2, 3). Температурная зависимость $\alpha = f(T)$ железа (на рис. 3, кривая 1) находится в хорошей корреляции с результатами экспериментов, выполненных авторами работ [3–5]. Величины коэффициента термоЭДС образцов, на которых выполнены измерения, различны. Величина α для образца из Ст3 при комнатной и азотной температурах значительно меньше, чем у образцов композитов. Наибольшей величиной α при ~ 80 К обладает

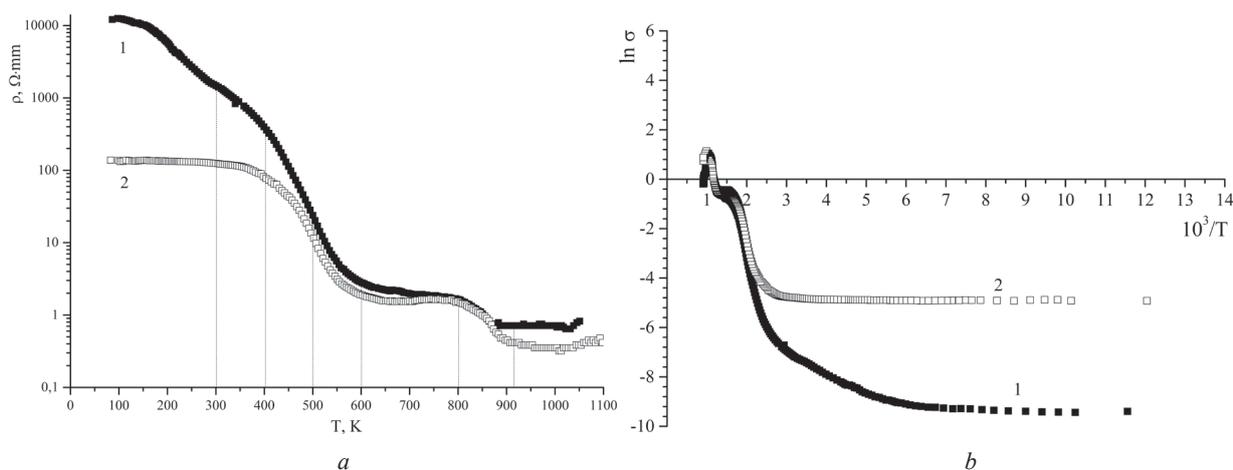


Рис. 2. Зависимость $\rho = f(T)$ (а) и $\sigma = f(10^3 / T)$ (б) композиционных материалов на основе порошка железа Hoganes 100.29: 1 – композит на основе порошка Fe с размером зерна $d < 100$ мкм; 2 – композит на основе порошка Fe с размером зерна $d > 100$ мкм

Fig. 2. Dependences $\rho = f(T)$ (a) and $\sigma = f(10^3 / T)$ (b) of composite materials based on iron powder Hoganes 100.29: 1 – composite based on Fe powder with grain size $d < 100 \mu\text{m}$; 2 – composite based on Fe powder with grain size $d > 100 \mu\text{m}$

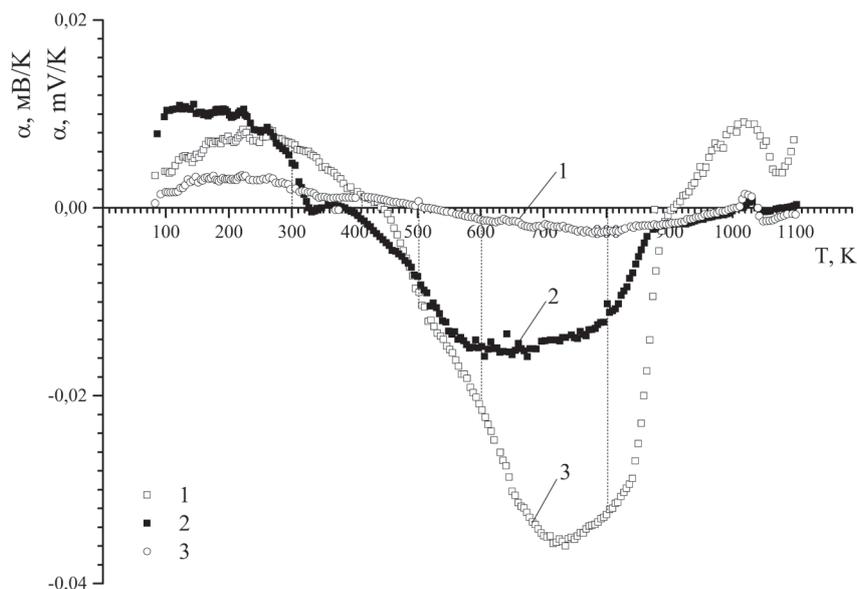


Рис. 3. Температурная зависимость термоЭДС композиционных материалов на основе порошка железа Hoganes 100.29: 1 – железо (Ст3); 2 – композит на основе порошка Fe с размером зерна $d > 100$ мкм; 3 – композит на основе порошка Fe с размером зерна $d < 100$ мкм

Fig. 3. Temperature dependence of thermoEMF of composite materials based on Hoganes 100.29 iron powder: 1 – iron (St3); 2 – composite based on Fe powder with grain size $d > 100$ μm ; 3 – composite based on Fe powder with grain size $d < 100$ μm

композит на основе порошка железа фракции $d > 100$ мкм. Практически одинаковый ход зависимостей $\alpha = f(T)$ изменения величины α железа и композитов на его основе косвенным путем подтверждает вывод о преимущественной роли межзеренных контактов в проявлении особенностей изменения электропроводности исследуемых композитов в интервале температур ~ 80 – 1100 К.

Зависимости $\alpha = f(T)$ в интервале температур ~ 80 – 320 К содержат значения коэффициента термоЭДС с положительным знаком его величины и максимумом вблизи комнатных температур. Среди ферромагнитных 3d-элементов триады Fe, Co, Ni это свойственно только элементу железа. В диапазоне температур 80 – 1100 К кобальт и никель обладают отрицательными значениями коэффициента Зеебека, независимо от вещества зондов, относительно которых оценивается величина α . Это явление авторами работы [3] объяснено наличием воздействия на электроны магнов. Авторы работы [5] интерпретировали этот результат эксперимента следствием изменений в зонной структуре под воздействием увеличения температур от низких до комнатных. Для электронного состояния переходных 3d-элементов характерно наличие двух d-подзон. В Fe одна подзона энергетического состояния заполнена полностью электронами, а вторая минимально частично. В кобальте и никеле электронами практически полностью заполнены обе подзоны. При любой версии интерпретации наличие положительного знака термоЭДС в железе, впервые обнаруженного нами в композитах на его основе в интервале температур ~ 80 – 320 К, является следствием перераспределения носителей заряда на «горячем» и «холодном» конце железосодержащего образца, приводящего к изменению электрического потенциала. Положительные значения α и наличие небольшой величины максимумов на зависимостях $\alpha = f(T)$ при температурах вблизи комнатных и резкое уменьшение электрического сопротивления в интервале температур ~ 80 – 600 К связано не только с изменениями на границах между частицами капсулированных порошков железа, но и с изменениями границ между доменами и размеров магнитных доменов в самих зернах железа. Особенно заметно проявление влияния этих факторов на зависимостях $R = f(T)$, $\ln \sigma = f(10^3 / T)$, $\alpha = f(T)$ композитов на основе капсулированных порошков железа вблизи температур магнитного фазового превращения «магнитный порядок–магнитный беспорядок».

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках совместного проекта БРФФИ–Узбекистан (Т19УЗБГ-011).

Acknowledgements. This work was financially supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research as part of the joint project BRFFR–Uzbekistan (T19УЗБГ-011).

Список использованных источников

1. Говор, Г. А. Особенности магнитных характеристик новых композиционных материалов на основе порошков железа / Г. А. Говор, А. К. Вечер, К. И. Янушкевич // Перспективные материалы и технологии / под ред. В. В. Клубовича. – Витебск, 2017. – Т. 2. – С. 278–299.
2. Тернов, Е. В. Об автоматизации измерений термоЭДС и удельного сопротивления материалов при высоких температурах / Е. В. Тернов, А. И. Галяс, Д. А. Кривченя // Сб. докладов VIII Междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы физики твердого тела–2018». – Минск, 2018. – Т. 3. – С. 264–266.
3. Magnon-drag thermopower in iron / F. J. Blatt [et al.] // *Physical Review Letters*. – 1967. – Vol. 18, N 11. – P. 395–396. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.18.395>
4. Greig, O. Thermoelectricity in transition metals / O. Greig // *Thermoelectricity in Metallic Conductors*. – N. Y.; London, 1978. – P. 91–106. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6830-5_11
5. Коломеец, Н. В. Термоэлектрические свойства ферромагнитных металлов и их сплавов / Н. В. Коломеец, М. В. Ведерников // *Физика твердого тела*. – 1961. – Т. 3, вып. 9. – С. 2734–2745.

References

1. Govor G. A., Vecher A. K., Yanushkevich K. I. Features of the magnetic characteristics of new composite materials based on iron powders. Klubovich V. V. (ed.). *Perspektivnye materialy i tekhnologii* [Promising Materials and Technologies], Vitebsk, 2017, vol. 2, pp. 278–299 (in Russian).
2. Ternov E. V., Galyas A. I., Krivchenya D. A. About automation of measurements of thermopower and resistivity of materials at high temperatures. *Sbornik dokladov VIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Aktual'nye problemy fiziki tverdogo tela–2018»* [Materials of the VIII International Scientific Conference “Actual Problems of Solid State Physics–2018”]. Minsk, 2018, vol. 3, pp. 264–266 (in Russian).
3. Blatt F. J., Flood D. J., Rowe V., Schroeder P. A., Cox J. E. Magnon-drag thermopower in iron. *Physical Review Letters*, 1967, vol. 18, no. 11, pp. 395–396. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.18.395>
4. Greig O. Thermoelectricity in transition metals. *Thermoelectricity in Metallic Conductors*. New York, London, 1978, pp. 91–106. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6830-5_11
5. Kolomeets N. V., Vedernikov M. V. Thermoelectric properties of ferromagnetic metals and their alloys. *Fizika tverdogo tela = Physics of the Solid State*, 1961, vol. 3, no. 9, pp. 2734–2745 (in Russian).

Информация об авторах

Вечер Александр Константинович – ст. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vetcher@physics.by.

Галяс Анатолий Иванович – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: demiden@physics.by.

Говор Геннадий Антонович – д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: govor@physics.by.

Янушкевич Казимир Иосифович – д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kazimir@physics.by.

Information about the authors

Vetcher Alexander K. – Senior researcher. Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vetcher@physics.by.

Galyas Anatoly I. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior researcher. Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: demiden@physics.by.

Govor Gennady A. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief researcher. Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: govor@physics.by.

Yanushkevich Kazimir I. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory. Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kazimir@physics.by.