

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 536.74; 624.762-2

ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ, МАГНИТНЫЕ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА ГЕЙСЛЕРА Co_2TiAl , ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

© 2024 г. М. Л. Бусурина^а*, А. В. Карпов^а, Д. Е. Андреев^а, О. Д. Боярченко^а,
Ю. Г. Морозов^а, Д. М. Икорников^а, А. Е. Сычев^а

^аИнститут структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мержанова РАН, ул. Академика Осипьяна, 8, Черноголовка, 142432 Россия

*e-mail: busurina@ism.ac.ru

Поступила в редакцию 07.05.2024 г.

После доработки 27.06.2024 г.

Принята к публикации 14.07.2024 г.

Впервые методом СВС-металлургии получен термоэлектрический сплав Co_2TiAl . Исследованы микроструктура, магнитные и термоэлектрические свойства синтезированного сплава. Максимальное значение коэффициента Зеебека и термоэлектрической мощности при комнатной температуре составили -29.5 мкВ/К и 1230 мкВт·м⁻¹·К⁻² соответственно. Проведено сравнение влияния модификаций метода СВС на свойства получаемого сплава. Показано, что сплав, синтезированный методом СВС-прессования, имеет более высокие значения термоэлектрических характеристик, чем сплав, полученный методом СВС-металлургии.

Ключевые слова: сплав Гейслера, термоэлектрические свойства, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, намагнитченность

DOI: 10.31857/S0015323024100021, **EDN:** JGFZDW

ВВЕДЕНИЕ

Тройные интерметаллидные системы на основе Ti–Al–Me активно исследуются при разработке новых многофункциональных материалов, к которым относятся и сплавы Гейслера – интерметаллические соединения общей формулы X_2YZ , где X, Y – переходные металлы, Z – элементы III–IV групп [1, 2]. Различные сплавы Гейслера проявляют разного рода свойства: ряд соединений обладает эффектом памяти формы [3], магнитооптическими и магнитокалорическими свойствами [4, 5], часть сплавов проявляют специфические магнитные свойства, такие как гигантское магнитосопротивление (ГМС), высокая спиновая поляризация, ферро-, антиферро- и ферримагнетизм [6]. В последние годы сплавы Гейслера привлекли значительное внимание и как потенциальные термоэлектрические (ТЕ) материалы, преобразующие тепловую энергию непосредственно в электричество [2, 7–10].

Одним из перспективных соединений на основе тройной интерметаллидной системы Co–

Ti–Al является сплав Гейслера Co_2TiAl , относящийся к полуметаллическим ферромагнетикам [2] и проявляющий термоэлектрические свойства [10]. В работе [10] показано, что сплавы на основе Co_2XAl ($X = \text{Ti}, \text{V}, \text{Nb}$) демонстрируют относительно высокие термоэлектрические характеристики (значительно выше, чем у традиционных металлических материалов) благодаря наличию спиновой и зарядовой связи, а вклад в термоэдс от спиновой флуктуации превосходит таковой от диффузии электронов.

Основная задача при разработке термоэлектрических материалов сводится к тому, чтобы получить материал с максимально высоким коэффициентом Зеебека и максимально возможной электропроводностью и низкой теплопроводностью [10]. Под такие критерии в этом отношении подходят ферромагнитные сплавы Гейслера, обладающие металлическим типом проводимости.

Сплавы на основе тройной системы Co–Ti–Al состоят из сравнительно недорогих, нетоксичных и достаточно распространенных в

земной коре химических элементов, обладают значительной механической прочностью и жаростойкостью, что в сочетании с относительно высокими термоэлектрическими характеристиками делает их одними из перспективных термоэлектрических материалов.

Тройные интерметаллиды получают дуговой плавкой [11], искровым плазменным спеканием [12], методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [13]. Одним из наиболее перспективных направлений в развитии СВС-технологий является СВС-металлургия [14, 15], представляющая собой совмещение алюмотермического синтеза с центробежным литьем интерметаллидных сплавов. Преимущества данной модификации СВС заключаются в получении плотного интерметаллидного сплава при малых временных затратах, высоких скоростях синтеза наряду со значительным упрощением технологического процесса. Более того, в ряде работ [16–18] отмечается, что применение метода СВС для синтеза функциональных сплавов Гейслера позволило добиться улучшенных характеристик в сравнении со сплавами, полученными другими методами.

Цель настоящей работы – получить методом СВС-металлургии компактный беспористый интерметаллидный сплав Гейслера Co_2TiAl , исследовать его микроструктуру, электрофизические и магнитные свойства, а также провести сравнение полученных данных с характеристиками сплава Co_2TiAl , синтезированного ранее методом СВС-прессования в работе [19].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для синтеза сплава на основе $2\text{Co}-\text{Ti}-\text{Al}$ использовали порошки оксида кобальта Co_3O_4 (размером ~ 20 мкм), оксида титана TiO_2 , титана Ti (ПТМ, размером ~ 11 мкм) и алюминия Al (АСД-4, размером ~ 6 мкм). Для экспериментов подготавливали смеси оксидов и элементных порошков:

Смесь I – $(\text{Co}_3\text{O}_4 + \text{TiO}_2 + \text{Al})$;

Смесь II – $(\text{Co}_3\text{O}_4 + \text{Ti} + \text{Al})$.

Смеси рассчитывали на получение Co_2TiAl по следующим уравнениям реакции с избытками по TiO_2 и Ti , соответственно. В первом случае в силу плохой восстановительной способности титана из его оксида, а во втором из-за конкурентирования с алюминием в восстановительных процессах:

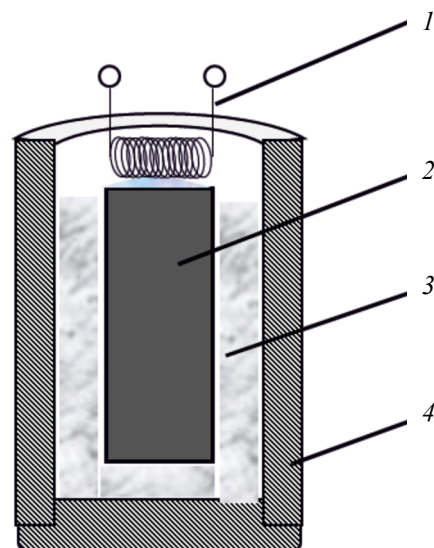
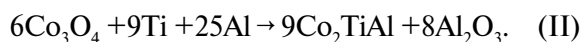
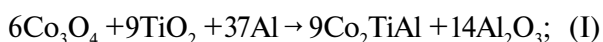


Рис. 1. Схема проведения экспериментов: 1 – иницилирующая спираль; 2 – реакционная смесь в кварцевом стакане; 3 – засыпка из корунда; 4 – графитовая форма.

Расчетная адиабатическая температура для смеси (I) составила 2487°C , для смеси (II) – 2618°C . В обоих случаях выполнены необходимые и достаточные условия для реализации синтеза в режиме горения и перехода как реагентов, так и продуктов реакции в расплавленное состояние.

Приготовленные реакционные смеси засыпали в кварцевые формы ($h = 70$ мм, $d = 50$ мм) с небольшим уплотнением шихты на вибрационном столе. Кварцевые стаканчики помещали в графитовые формы с барьерной засыпкой из корунда (Al_2O_3) дисперсностью 1–3 мм для предотвращения преждевременного разрушения кварца во время синтеза. Сборные формы (рис. 1), состоящие из оболочек кварц/корунд/графит устанавливали в центробежную установку, раскручивали до перегрузки 600 г и инициировали синтез за счет омического разогрева вольфрамовой спирали. Разброс продуктов синтеза для обеих смесей составил не более 5 мас. %.

Конечные продукты в процессе горения находятся в жидком, расплавленном состоянии и из-за различных удельных весов при гравитационном воздействии разделяются на два слоя: нижний – металлический (Co_2TiAl), верхний – оксидный (Al_2O_3). В данной работе исследовали металлический слой. Фазовый состав продуктов горения исследовали методом рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН-3М в $\text{Fe}-\text{K}_\alpha$ -излучении. Микроструктуру синтезированных образцов и химический элементный состав исследовали на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе сверхвы-

сокого разрешения Zeiss Ultra Plus с системой рентгеновского микроанализа INCA Energy 350 XT, Oxford Instruments. Для проведения электрофизических исследований из синтезированных образцов вырезали пластины прямоугольного сечения размером 1.5×1.5×16.0 мм. Измерения температурной зависимости удельного электросопротивления проводили в вакууме 1.33·10⁻³ Па в диапазоне температур 293–1300 К по четырехточечной методике, описанной в [20]. Коэффициент Зеебека определяли на лабораторной установке в диапазоне температур 300–800 К [21]. Магнитные характеристики синтезированных образцов измеряли на порошковых пробах на вибрационном магнитометре M4500 (EG&G PARC, США) в магнитных полях до 0.8 МА/м (10 кЭ) при комнатной температуре.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рентгенофазовый анализ синтезированных образцов показал, что в обоих случаях (для смесей I и II) основной фазой является Co₂TiAl с характерной для сплавов Гейслера структурой L2₁, массовое содержание которой составило не менее 99 % (рис. 2). Фаза Co₂TiAl кристаллизуется в кубической пространственной группе симметрии *Fm* $\bar{3}$ *m*, где Ti связан в объемно-центрированной кубической геометрии с восемью эквивалентными атомами Co. Каждый атом Co связан в объемно-центрированной кубической геометрии с четырьмя эквивалентными атомами Ti и четырьмя эквивалентными атомами Al [22].

Для образца, синтезированного из смеси II, наблюдается небольшое смещение пиков вправо, что говорит о напряжениях внутри кристаллической решетки. К тому же образцы из смеси II получились очень пористыми, крошились и изготовить шлифы, а также пластины для измерения электросопротивления и термоэдс не представлялось возможным. Таким образом, для получения сплавов Гейслера методом СВС-металлургии предпочтительнее использовать по-

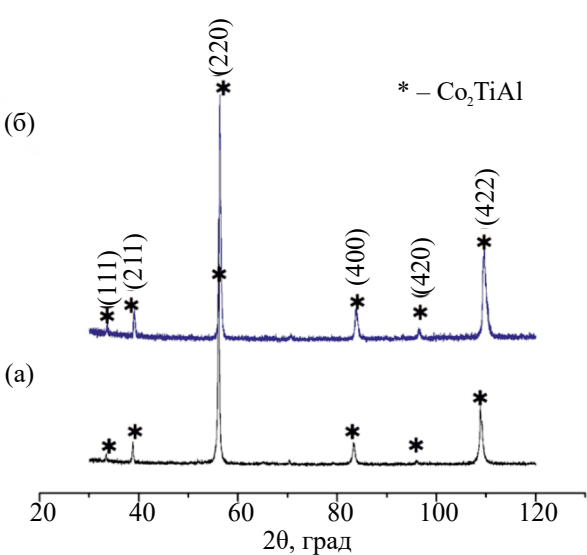


Рис. 2. Дифрактограммы сплавов, синтезированных из реакционной смеси I (а) и смеси II (б).

рошки оксидов кобальта и титана, и в дальнейшем при характеризации образцов (кроме магнитных свойств на рис. 4) речь в настоящей работе будет идти только об образце, синтезированном методом СВС-металлургии из реакционной смеси I.

Параметр элементарной ячейки Co₂TiAl составил *a*=5.83 Å, что соответствует литературным данным для этого соединения [1, 10]. На рис. 3 представлены результаты исследования микроструктуры поверхности шлифа синтезированного сплава и данные энергодисперсионного анализа (ЭДА). Сплав имеет беспористую (плотность синтезированного сплава составила 6.3 г/см³ при теоретической плотности 6.4 г/см³), однородную микроструктуру, состоящую из округлых зерен тройной фазы Co₂TiAl со средним размером 50 мкм. Результаты ЭДА в точках подтвердили химический состав основной фазы Co₂TiAl (рис. 3, точки 3, 4). Зерна тройной фазы Co₂TiAl разделены участками

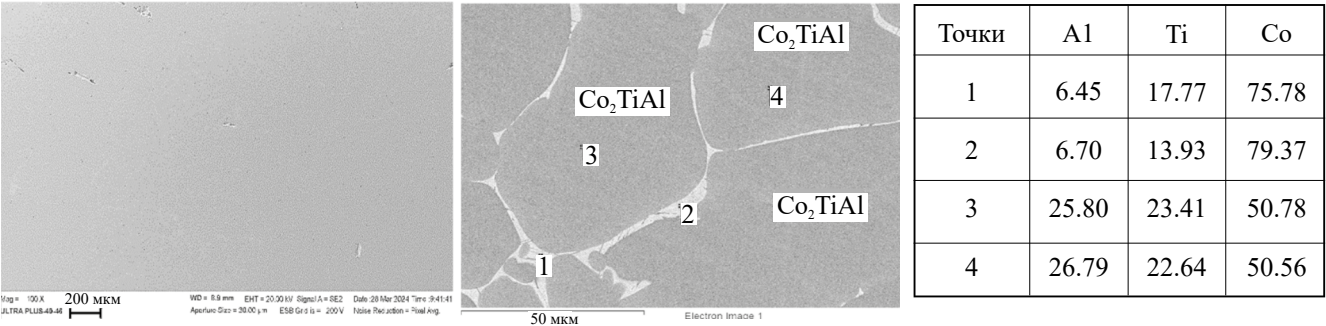


Рис. 3. СЭМ и данные ЭДА (ат. %) сплава Co₂TiAl, синтезированного методом СВС-металлургии.

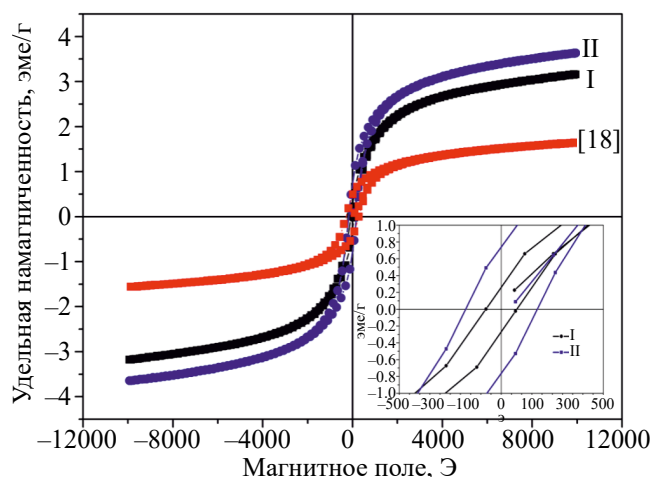


Рис. 4. Кривые намагничивания порошковых образцов: для смесей I и II и сплава, синтезированного в работе [19].

толщиной до 7 мкм, обедненными алюминием (рис. 3, точки 1, 2), соответствующие интерметаллидам переменного состава TiCo_x . Согласно [23], в равновесии с фазой Co_2TiAl могут находиться бинарные интерметаллиды TiCo_3 , TiCo_2 , TiCo . Концентрационное распределение элементов вдоль линии сканирования “зерно – межзеренная прослойка – зерно” также показало, что зерна Co_2TiAl имеют постоянный химический состав по Co, Ti и Al, а в межзеренном промежутке наблюдается снижение концентрации алюминия и титана с одновременным увеличением концентрации кобальта.

Измерения намагниченности показали, что синтезированные сплавы обладают ферромагнитными свойствами (рис. 4). Для образца сплава, синтезированного с использованием оксида титана (смесь I), максимальная величина удельной намагниченности в магнитном поле 10 кЭ составила 3.16 эмс/г, что немного выше, чем у сплава, синтезированного с использованием титана (смесь II) – 3.64 эмс/г. Коэрцитивная сила для сплава, синтезированного методом СВС-прессования [19], значительно выше, чем для сплавов, полученных методом СВС-металлургии. Также отличаются и значения максимальной удельной намагниченности, для сплава, полученного в работе [19], оно ниже примерно в 2 раза.

На рис. 5 представлены температурные зависимости удельного электросопротивления ρ образцов сплава Co_2TiAl , полученных методом СВС-металлургии (настоящая работа) и методом СВС-прессования [19]. В обоих случаях наблюдается металлический тип проводимости, т.е. в переносе электричества участвуют электроны. Для сплава, синтезированного методом

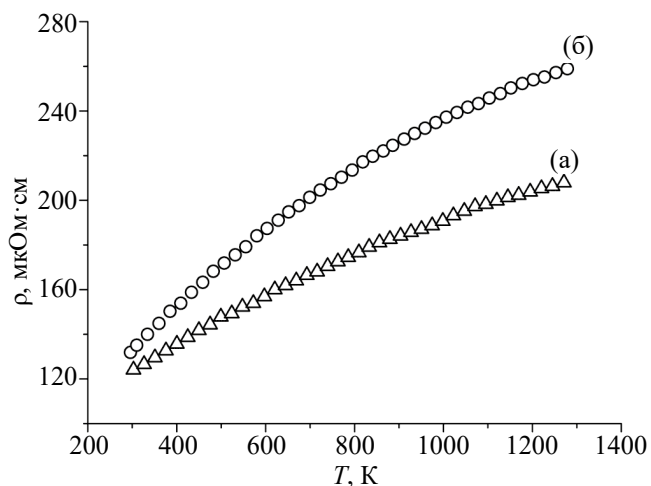


Рис. 5. Кривые температурной зависимости электросопротивления ρ образцов, синтезированных в настоящей работе (а) и в [19] (б).

СВС-металлургии электросопротивление с увеличением температуры растет значительно медленнее, чем для сплава, полученного методом СВС-прессования. При этом значения удельного электросопротивления при комнатной температуре примерно равны. Это может быть связано с разной однородностью структуры полученных сплавов, наличием дефектов и примесных фаз (Al_2O_3 , CoTi , Co_3Ti), а также с пористостью. Сплав Co_2TiAl , синтезированный в работе [19], имеет более низкую плотность 6.2 г/см³.

Значения удельного электросопротивления при комнатной температуре коррелируют с литературными данными [24, 25]. Удельное электросопротивление при комнатной температуре составило 124 мкОм·см.

На рис. 6 представлены зависимости коэффициента Зеебека S от температуры для сплава Co_2TiAl (настоящая работа и работа [19]). В проводниках с электронной проводимостью величина термоЭДС отрицательна, а коэффициент Зеебека меньше нуля. Максимальное значение коэффициента Зеебека, равное -36.5 мкВ/К, на кривой зависимости $S(T)$ наблюдается при температуре ~ 800 К. Значение коэффициента Зеебека при комнатной температуре 300 К составило -29.5 мкВ/К. Значение коэффициента Зеебека при комнатной температуре, полученного в работе [19], равно ~ -40 мкВ/К, что почти в 1.5 раза выше, чем для сплава, полученного методом СВС-металлургии, но немного ниже значения коэффициента Зеебека при комнатной температуре, полученного в работе [10].

В работе [10] относительно большой коэффициент Зеебека для Co_2TiAl авторы связывают с особым ферромагнитным состоянием сплава и

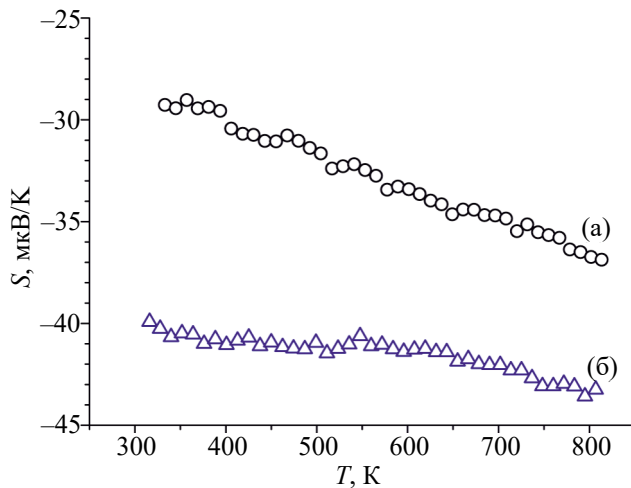


Рис. 6. Температурные кривые зависимости коэффициента Зеебека для сплавов Co_2TiAl , синтезированных в настоящей работе (а) и работе [19] (б).

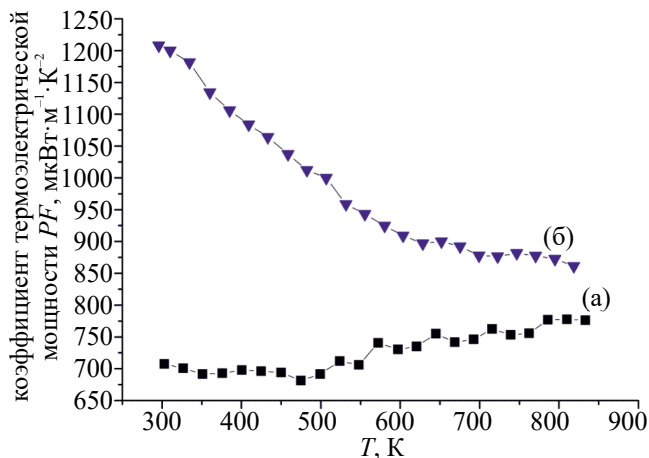


Рис. 7. Температурные зависимости коэффициента термоэлектрической мощности (PF) для сплавов, синтезированных в настоящей работе (а) и работе [19] (б).

наибольшим вкладом магнотонного увлечения в возникновение термоэдс по сравнению с традиционным диффузионным механизмом для большинства термоэлектрических материалов.

Эффективность термоэлектрических материалов определяется безразмерным показателем добротности zT : $zT = S^2T/\rho k$, где S — коэффициент Зеебека, ρ — удельное электросопротивление, S^2/ρ — коэффициент термоэлектрической мощности (PF — Power Factor), T — абсолютная температура, k — коэффициент теплопроводности. Коэффициент термоэлектрической мощности Co_2TiAl может достигать $4000 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-2}$ [10], что сопоставимо с коэффициентом мощности обычных полупроводниковых термоэлектрических материалов [26, 27]. Соответствующий

показатель добротности zT может достигать ≈ 0.1 при комнатной температуре, что значительно больше, чем у традиционных металлических материалов [10].

С использованием экспериментальных данных температурных зависимостей коэффициента Зеебека и удельного электросопротивления ρ был рассчитан коэффициент термоэлектрической мощности $PF = S^2/\rho$ (рис. 7). Для сплава Co_2TiAl , синтезированного в [19], значение PF при комнатной температуре составляет $1230 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-2}$, что в несколько раз выше, чем для сплава, полученного методом СВС-металлургии.

Полученный результат может быть связан с присутствием в составе сплава примесных фаз [19], таких как оксид алюминия и интерметаллиды переменного состава Co_3Ti , CoTi , что снижает электропроводность и влияет на термоэлектрические свойства. При этом с ростом температуры значение PF уменьшается, в то время как для сплава, полученного методом СВС-металлургии наблюдается небольшое увеличение PF . Этот экспериментальный факт требует дополнительного исследования.

ВЫВОДЫ

Методом СВС-металлургии впервые был синтезирован беспористый интерметаллид Co_2TiAl (сплав Гейслера). Исследованы структура, электрофизические и магнитные свойства синтезированного продукта. Проведено сравнение свойств образцов сплава Co_2TiAl , полученного методами СВС-металлургии и СВС-прессования.

Рентгенофазовый анализ образца, синтезированного методом СВС-металлургии, показал формирование единственной фазы Co_2TiAl со структурой $L2_1$, массовое содержание которой составило 99 мас. %. Параметр элементарной ячейки Co_2TiAl $a = 5.83 \text{ \AA}$. Сплав имеет однородную беспористую микроструктуру со средним размером зерна $\sim 50 \text{ мкм}$. Максимальное значение удельной намагниченности синтезированного образца в поле 10 кЭ при комнатной температуре составило $3.16 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$.

В интервале температур $300\text{--}800 \text{ К}$ значение коэффициента Зеебека изменилось от -29.5 мВ/К до -36.5 мВ/К . Значение коэффициента Зеебека при комнатной температуре почти в 1.5 раза ниже значения, полученного для сплава Co_2TiAl , синтезированного методом СВС-прессования. Результаты исследования свойств сплавов Гейслера, синтезированных разными методами, показывают, что на термоэлектрические характеристики большое влия-

ние оказывает наличие дополнительных интерметаллидных фаз, однородность и пористость структуры.

Сравнение методов синтеза и исследование свойств синтезированных материалов может способствовать поиску способа получения сплавов с оптимальными значениями коэффициента Зеебека и удельного электросопротивления для достижения максимальных значений добротности.

Авторы благодарят И.Д. Ковалева за проведение рентгенофазового анализа. В работе использованы ресурсы Распределенного центра коллективного пользования (РЦКП ИСМАН).

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Webster P.J. Heusler Alloys // *Contemp. Phys.* 1969. V. 10. P. 559–577.
2. Марченков В.В., Ирхин В.Ю. Полуметаллические ферромагнетики, спиновые бесщелевые полупроводники и топологические полуметаллы на основе сплавов Гейслера: теория и эксперимент // *ФММ*. 2021. Т. 122. № 12. С. 1221–1246.
3. Васильев А.Н., Бучельников В.Д., Такаги Т., Ховайло В.В., Эстрин Э.И. Ферромагнетики с памятью формы // *УФН*. 2003. Т. 173. № 6. С. 577–608.
4. Ishida S., Otsuka Y., Kubo Y., Ishida J. Orbital angular momentum in Co_2MnSn // *J. Phys. F: Met. Phys.* 1983. V. 13. P. 1173–1178.
5. Zimm C., Jastrab A., Sternberg A., Pecharsky V., Gschneidner K. Jr., Osborne M., Anderson I. Description and performance of a near-room temperature magnetic refrigerator / In: Kittel P. (eds) *Advances in Cryogenic Engineering. Advances in Cryogenic Engineering*. V. 43. Springer, Boston, MA. P. 1759–1766.
6. Graf T., Felser C., Parkin S.S.P. Simple rules for the understanding of Heusler compounds // *Prog. Solid. State Chem.* 2011. V. 39. P. 1.
7. Suzuki R., Kyono T. Thermoelectric properties Fe_2TiAl Heusler Alloys // *J. Alloys Compounds*. 2004. V. 377. P. 38–42.
8. Hayashi K., Eguchi M., Miyazaki Y. Structural and thermoelectric properties of ternary full-Heusler alloys // *J. Electron. Mater.* 2017. V. 46. P. 2710–2716.
9. Шредер Е.И., Филанович А.Н., Чернов Е.Д., Лукоянов А.В., Марченков В.В., Сташкова Л.А. Электронная структура, термоэлектрические и оптические свойства сплавов Гейслера Mn_2MeAl ($\text{Me} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$) // *ФММ*. 2023. Т. 124. № 7. С. 608–615.
10. Gui Z., Wang G., Wang H., Zhang Y., Li Y., Wen X., Li Y., Peng K., Zhou X., Ying J., Chen X. Large improvement of thermoelectric performance by magnetism in Co-based full-Heusler alloys // *Adv. Sci.* 2023. V. 10. P. 2303967.
11. Zhang W., Zhao L., Qian Z., Sui Y., Liu Y., Su W., Zhang M., Liu Z., Liu G., Wu G. Magnetic properties of the Heusler alloy Co_2TiAl synthesized by melt-spinning technique // *J. Alloys Compounds*. 2007. V. 431. P. 65–67.
12. Koller M., Chráska T., Cinert J., Heczko O., Kopeček J., Landa M., Mušálek R., Rameš M., Seiner H., Stráský J., Janeček M. Mechanical and magnetic properties of semi-Heusler/light-metal composites consolidated by spark plasma sintering // *Mater. Design*. 2017. V. 126. P. 351–357.
13. Итин В.И., Найбороденко Ю.С. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1989. 209 с.
14. Yukhvid V.I. Modifications of SHS processes // *Pure Appl. Chem.* 1992. V. 64. Iss. 7. P. 977–988.
15. Andreev D.E., Zakharov K.V., Yukhvid V.I., Schukin A.S., Golosova O.A. Centrifugal high-temperature synthesis of $\text{Co}_x\text{-CrNbWMoAlC}$ cast alloys // *High Temp. Mater. Processes*. 2023. V. 27. Iss. 3. P. 9–16.
16. Hu T., Poudeu-Poudeu P., Yang D., Yan Y., Cao Y., Zhang T., Su X., Liu W., Tang X., Cao W. Ultra-fast fabrication of bulk ZrNiSn thermoelectric material through self-propagating high-temperature synthesis combined with in-situ quick pressing // *Scripta Mater.* 2019. V. 165. P. 140–146.
17. Xing Y., Liu R., Sun Y.-Y., Chen F., Zhao K., Zhu T., Bai S., Chen L. Self-propagating high-temperature synthesis of half-Heusler thermoelectric materials: reaction mechanism and applicability // *J. Mater. Chem. A*. 2018. V. 6. P. 19470–19778.
18. Xing Y., Liu R., Liao J., Zhang Q., Xia X., Wang C., Huang H., Chu J., Gu M., Zhu T., Zhu C., Xu F., Yao D., Zeng Y., Bai S., Uher C., Chen K. High-efficiency half-Heusler thermoelectric modules enabled by self-propagating synthesis and topologic structure optimization // *Energ. Environ. Sci.* 2019. V. 12. P. 3390–3399.
19. Бусурина М.Л., Карнов А.В., Щербаков В.А., Грядунов А.Н., Сачкова Н.В., Сычев А.Е. Электрофизические свойства сплава на основе 2Co-Ti-Al , полученного методом СВС-прессования // *Перспект. матер.* 2020. № 1. С. 5–12.
20. Karpov A.V., Morozov Y.G., Bunin V.A., Borovinskaya I.P. Effect of Yttria additions on the electrical conductivity of SHS nitride ceramics // *Inorg Mater.* 2002. V. 38. P. 631–634.
21. Карнов А.В., Сычев А.Е., Сивакова А.О. Устройство для измерения коэффициента Зеебека термоэлектрических материалов в диапазоне температур 300–800 К // *Измер. Техн.* 2023. № 8. С. 67–72.
22. <https://nexten.materialsproject.org/materials/mp5407?chemsys=Al-Ti-Co>
23. Буханько Н.Г., Казакова Е.Ф., Соколовская Е.М. Взаимодействие алюминия с кобальтом и титаном // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия*. 2002. Т. 43. № 1. С. 51–57.
24. Коуров Н.И., Перевозчикова Ю.А., Weber H.W., Марченков В.В. Особенности электросопротивления полуметаллических ферромагнетиков Co_2MeAl ($\text{Me} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}$) // *ФТТ*. 2016. Т. 58 (7). С. 1311–1316.

25. *Yakhmi J.V., Gopalakrishnan I.K., Grover A.K.* Electrical resistivity studies on the Heusler alloys $\text{Co}_2\text{T}_{1-x}\text{Al}_{1+x}$ ($\text{T} = \text{Ti}$ or Zr) // *Phys. Status Solidi (A)*. 1984. V.85. P. 89–92.
26. *Zheng Y., Lu T., Polash M.H., Rasoulianboroujeni M., Liu N., Manley M.E., Deng Y., Sun P.J., Chen X.L., Hermann R.P., Vashae D., Heremans J.P., Zhao H.* Paramagnon drag in high thermoelectric figure of merit Li-doped MnTe // *Sci Adv*. 2019. V. 5. Iss. 9. P. 1–7.
27. *Witting I.T., Chasapis T.C., Ricci F., Peters M., Heinz N.A., Hautier G., Snyder G.J.* The Thermoelectric Properties of Bismuth Telluride // *Adv. Electron Mater.* 2019. V. 5. Iss. 6. P. 1800904.

ELECTRICAL RESISTANCE, MAGNETIC AND THERMOELECTRIC PROPERTIES OF THE HEUSLER ALLOY Co_2TiAl OBTAINED BY SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS

**M. L. Busurina^{1,*}, A. V. Karpov¹, D. E. Andreev¹, O. D. Boyarchenko¹, Yu. G. Morozov¹,
D. M. Ikornikov¹, and A. E. Sytshev¹**

¹*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka,
Moscow Region, 142432 Russia*

**e-mail: busurina@ism.ac.ru*

A thermoelectric Co_2TiAl alloy was obtained by the SHS-metallurgy method for the first time. The microstructure and the magnetic and thermoelectric properties of the synthesized alloy were investigated. The maximum value of the Seebeck coefficient and thermoelectric power at room temperature were $-29.5 \mu\text{V/K}$ and $1230 \mu\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-2}$, respectively. The comparison of the influence of the SHS-method modifications on the properties of the synthesized alloy was made. It has been shown that the alloy synthesized by SHS pressing has higher thermoelectric characteristics than the alloy obtained by the SHS-metallurgy method.

Keywords: Heusler alloy, thermoelectric properties, self-propagating high-temperature synthesis, magnetization