

Металлургия. Материаловедение

Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 621.762.22

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31107>



А.Э. Ким , А.К. Мазеева, Н.Г. Разумов,
Е.В. Волокитина, А.А. Попович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

 artem_7.kim@mail.ru

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МАГНИТНОГО ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$

Аннотация. В данной работе получен высокоэнтропийный сплав $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$ методом механического легирования. Изучены микроструктура, фазовый и гранулометрический составы порошка. Методом искрового плазменного спекания с последующей термической обработкой получены образцы выбранного сплава с пористостью менее 0,04%. Фазовый состав образцов после отжига при температурах 900, 950 и 1000°C состоит из двух ОЦК-фаз с близким параметром решетки. Установлено влияние температуры отжига на механические (твердость и прочность на сжатие) и магнитные свойства материалов. Прочность на сжатие образцов составила от 2163 до 2677 МПа, микротвердость – от 646 до 718 HV.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, механическое легирование, искровое плазменное спекание, CALPHAD.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2024-004 от 17.01.2024.

Для цитирования:

Ким А.Э., Мазеева А.К., Разумов Н.Г., и др. Структура и свойства магнитного высокоэнтропийного сплава $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$ // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 102–111. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31107>



Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31107>

*A.E. Kim , A.K. Mazeeva, N.G. Razumov,
E.V. Volokitina, A.A. Popovich*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

 artem_7.kim@mail.ru

STRUCTURE AND PROPERTIES OF MAGNETIC HIGH-ENTROPY ALLOY $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$

Abstract. In this work, high-entropy $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$ alloy was obtained by mechanical alloying. The microstructure, phase and granulometric compositions of the powder were studied. Samples of the selected alloy with a porosity of less than 0.04% were obtained by spark plasma sintering followed by heat treatment. The phase composition of the samples after annealing at temperatures of 900, 950 and 1000°C consists of two body-centered cubic phases with a close lattice parameter. The effect of annealing temperature on the mechanical (hardness and compressive strength) and magnetic properties of the materials was established. The compressive strength of the samples ranged from 2163 to 2677 MPa, microhardness – from 646 to 718 HV.

Keywords: high-entropy alloy, mechanical alloying, spark plasma sintering, CALPHAD.

Acknowledgements: The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment 075-03-2024-004 dated 17.01.2024.

Citation:

Kim A.E., Mazeeva A.K., Razumov N.G., et al., Structure and properties of magnetic high-entropy alloy $Fe_6Co_6Al_3Ni_2Mn$, Global Energy, 31 (01) (2025) 102–111, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31107>

Введение. Сегодня остро ощущается потребность в продукции электротехнической промышленности: электродвигателях, трансформаторах, генераторах, электромагнитах, датчиках магнитного поля и т.д. Поскольку электродвигатели потребляют огромное количество энергии, даже незначительное увеличение характеристик вносит существенный вклад в снижение выбросов CO_2 и снижение себестоимости продукции. Свойства используемых материалов существенно влияют на энергоэффективность и экономическую эффективность [1].

Одной из серьезных проблем отрасли является нехватка магнитомягких материалов с хорошими механическими и химическими свойствами. Традиционные сплавы имеют определенные ограничения [2]. Используемые электротехнические стали показывают высокие магнитные свойства, но имеют низкую пластичность из-за высокой степени структурной упорядоченности [3]. Это обстоятельство ограничивает срок службы и условия эксплуатации изделий. Кроме того, от современных магнитомягких сплавов требуется работа при высоких температурах, в агрессивных средах и т.д. Например, магнитные материалы, используемые в аэрокосмической промышленности, должны обладать хорошей жаропрочностью. Аморфные магнитомягкие материалы обладают отличной коррозионной стойкостью и высоким удельным электрическим сопротивлением [4]. Однако условия производства не позволяют получать объемные аморфные сплавы. Кроме того, невысокая температура кристаллизации значительно сужает области применения аморфных веществ.



Разнообразие высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) позволяет получать ряд уникальных механических, химических и функциональных свойств. Магнитные ВЭС могут сочетать в себе преимущества аморфных и традиционных магнитомягких сплавов. Фазовый состав, микроструктура и макроструктура материалов сильно зависят от условий синтеза. ВЭС являются одними из самых перспективных магнитомягких материалов благодаря возможности формирования компактных изделий, отличной деформируемости, коррозионной и термической стойкости и хорошим функциональным свойствам.

Тройной сплав FeCoNi образует однофазный твердый раствор замещения с ГЦК-структурой. ГЦК-сплавы имеют высокую намагниченность насыщения в отличие от ОЦК-сплавов, что обусловлено более высокой плотностью упаковки атомов и высоким содержанием ферромагнитных элементов [5]. В работе [4] показано, что Cr существенно улучшает коррозионностойкие свойства за счет образования оксидной пленки. Изучено влияние Mn, Al и Ti на структурные свойства сплава NiCoCrFe [5–7]. Результаты показали, что добавление этих элементов привело к значительному увеличению предела текучести и уменьшению пластической деформации [9–12].

Легирование Si и Cu улучшает механические свойства магнитомягких ВЭС за счет измельчения зерна. В [13] получен сплав FeCoNiCu_{0,2}Si_{0,2} с сочетанием хороших магнитных и прочностных свойств. Сплав с добавлением Zr показывает высокую твердость и износостойкость, но магнитное насыщение уменьшается на 15%, а коэрцитивная сила увеличивается на 133% [2]. Так же существуют исследования по легированию ВЭС редкоземельными элементами Nd, Pr, Y, Ho с целью улучшения механических свойств. Добавление 5 ат. % Ho в FeCoNi(CuAl)_{0,8} уменьшает размер зерна, увеличивает долю ОЦК-фазы и улучшает магнитные свойства [14, 15].

Целью данной работы было создание новых высокоэнтропийных материалов с сочетанием высоких механических и магнитомягких свойств методами механического легирования и искрового плазменного спекания, изучение физико-химических особенностей формирования структуры сплавов в зависимости от технологических режимов и влияния получаемого структурного состояния на функциональные свойства материалов.

Материалы и методы исследования

Фазовая диаграмма сплава Fe₆Co₆Al₃Ni₂Mn получена с использованием метода CALPHAD (CALculation of PHAses Diagrams). Для получения сплава был применен метод механического легирования (МЛ), которое проводилось в планетарной мельнице Fritsch Pulverisette 4 из элементарных порошков Fe, Co, Al, Ni, Mn (чистота 99,9%) размером 40–100 мкм. Продолжительность процесса составила 25 часов. Каждые 20 минут оборудование останавливалось на 10 минут для предотвращения перегрева стаканов, мелющих тел и порошка. Внешний радиус каждого из стаканов был равен 37,5 мм, а планетарного диска – 130 мм. Масса размольных шаров превышала массу порошка в 20 раз. Перед проведением МЛ стаканы продувались аргоном в течение 7 минут.

Микроструктура порошков Fe₆Co₆Al₃Ni₂Mn анализировалась с использованием сканирующего электронного микроскопа Mira Tescan, оснащенного энергодисперсионным детектором EDX Oxford Instruments X-Max 80 для рентгеноспектрального анализа.

Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре фирмы Bruker D8 Advance с медным излучением ($\lambda = 1,5443 \text{ \AA}$). Анализ размера частиц образцов после МЛ проводили на лазерном гранулометре Fritsch Analysette 22 NanoTec plus с использованием модели Фраунгофера.

Порошки после МЛ консолидировали методом искрового плазменного спекания (ИПС) в установке HPD 25 FCT Systeme GmbH SPS при температуре 1200°C с выдержкой в течение 5 минут. Давление составляло 50 МПа. Диаметр цилиндрической графитовой пресс-формы составил 20 мм. Для измерения микротвердости по Виккерсу были изготовлены полированные образцы. Испытания проводились на цифровом микротвердометре BUEHLER MicroMet. Тестовая нагрузка составила 300 г. Исследование прочности на сжатие проводилось на универсальной разрывной



машине Zwick/Roell Z050. Для исследования магнитных свойств полученных образцов использовался вибрационный магнитометр Lake Shore 7410. Температура измерения составляла 293 К, диапазон напряженности магнитного поля – от –10000 до 10000 Э.

Результаты и обсуждение

На рис. 1а представлены изображения с растрового электронного микроскопа порошка $\text{Fe}_6\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Mn}$ после 25 часов МЛ. В порошке наблюдается гомогенная микроструктура, результаты энергодисперсионного анализа говорят о равномерном распределении элементов [16]. Химический состав порошка представлен в табл. 1. Гранулометрический состав порошка составил $d10 = 7$ мкм, $d50 = 19$ мкм, $d90 = 37$ мкм.

На дифрактограмме порошка после МЛ (рис. 1б) видны пики единственной ОЦК-фазы. Параметр решетки составил $2,867 \text{ \AA}$. Размер областей когерентного рассеяния составил 15 нм, а величина микронапряжений $e_0 = 0,009$.

Таблица 1
Химический состав механически легированного порошка

Table 1

Chemical composition of mechanically alloyed powder

Fe, ат. %	Co, ат. %	Al, ат. %	Ni, ат. %	Mn, ат. %
$30,3 \pm 0,6$	$28,1 \pm 0,8$	$22,3 \pm 0,4$	$14,3 \pm 0,3$	$5,0 \pm 0,2$

Пористость образцов после консолидации методом ИПС была менее 0,04%. После спекания образцы отжигали при температурах 900, 950 и 1000°C.

На рис. 2а представлена фазовая диаграмма сплава $\text{Fe}_6\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Mn}$, полученная в результате термодинамического расчета методом CALPHAD. При температурах выше 1050 К выбранный сплав образует однофазный ОЦК – твердый раствор. При температурах ниже 1050 К ОЦК-фаза распадается на две составляющие: ОЦК#2 и ОЦК#3. Рассчитанные составы фаз представлены в табл. 2.

Таблица 2
Расчетный фазовый состав

Table 2

Calculated phase composition

Фаза	Химический состав, ат. %					Объемная доля, %
	Fe	Co	Al	Ni	Mn	
ОЦК#2	18,9	28,9	25,6	19,9	6,7	71,1
ОЦК#3	58,1	32,8	5,8	2,7	0,6	28,9

На рис. 2б представлены результаты фазового анализа образцов после термической обработки. В связи с перекрытием пиков фаз с близкими параметрами решетки на дифрактограммах всех образцов наблюдается наложение пиков двух ОЦК-фаз.

Микроструктура образцов (рис. 3) после отжига подтверждает наличие двух фаз. Светлые области соответствуют фазе ОЦК#3, состоящей в основном из железа и кобальта, а темные области – фазе ОЦК#2. Из результатов, полученных на сканирующем электронном микроскопе и фазового анализа можно сделать вывод, что структура материала состоит из двух ОЦК-фаз, что согласуется с результатами CALPHAD расчетов.

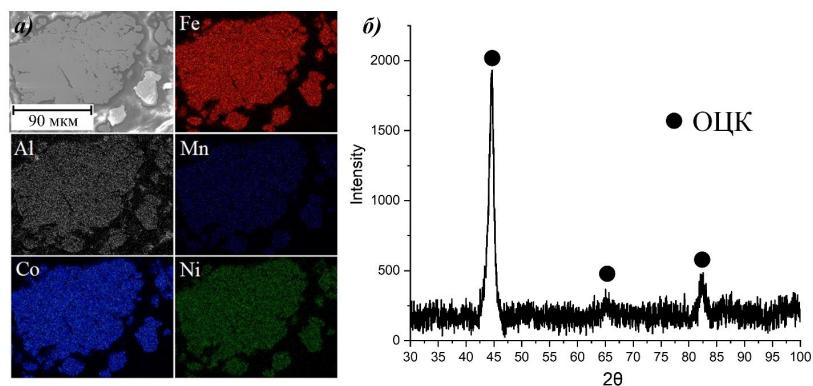


Рис. 1. Элементное распределение (а) и фазовый состав (б) $\text{Fe}_6\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Mn}$
Fig. 1. EDS map of element distribution (a) and phase composition (b) of $\text{Fe}_6\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Mn}$

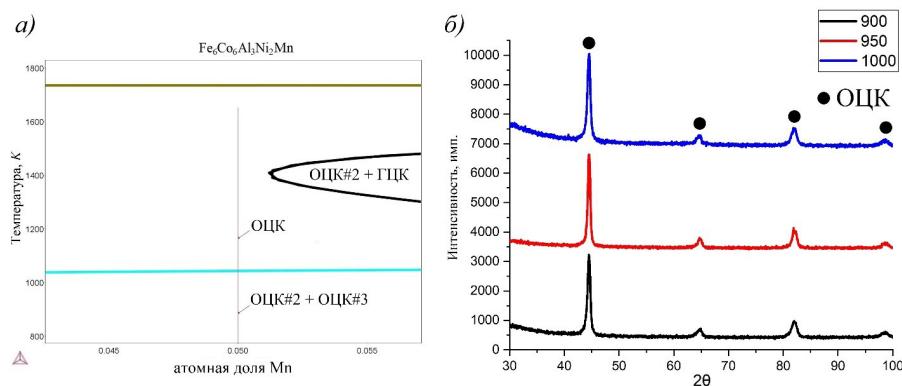


Рис. 2. Фазовая диаграмма (а) сплава $\text{Fe}_6\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Mn}$ и рентгенограммы (б) образцов после отжига
Fig. 2. Phase diagram (a) of the $\text{Fe}_6\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Mn}$ alloy and XRD patterns (b) of the samples after annealing

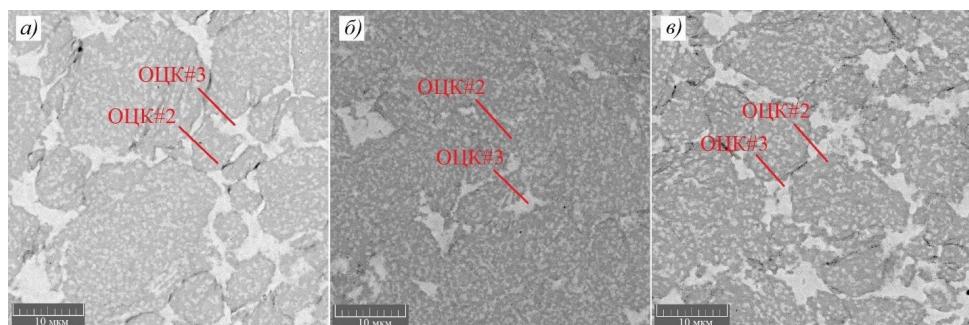


Рис. 3. Микроструктура образцов после отжига при 900 (а), 950 (б) и 1000 °C (в)
Fig. 3. Microstructure of samples after annealing at 900 (a), 950 (b) and 1000 °C (c)

Испытания механических свойств (рис. 4) показали высокие значения твердости и прочности на сжатие образцов. Твердость образцов после отжига при 900, 950 и 1000 °C составила 718, 707 и 646 HV, а прочность на сжатие – 2677, 2334 и 2163 МПа. Выделение твердой фазы ОЦК#3 по границам приводит к низкой пластичности материала. Повышение температуры отжига приводит

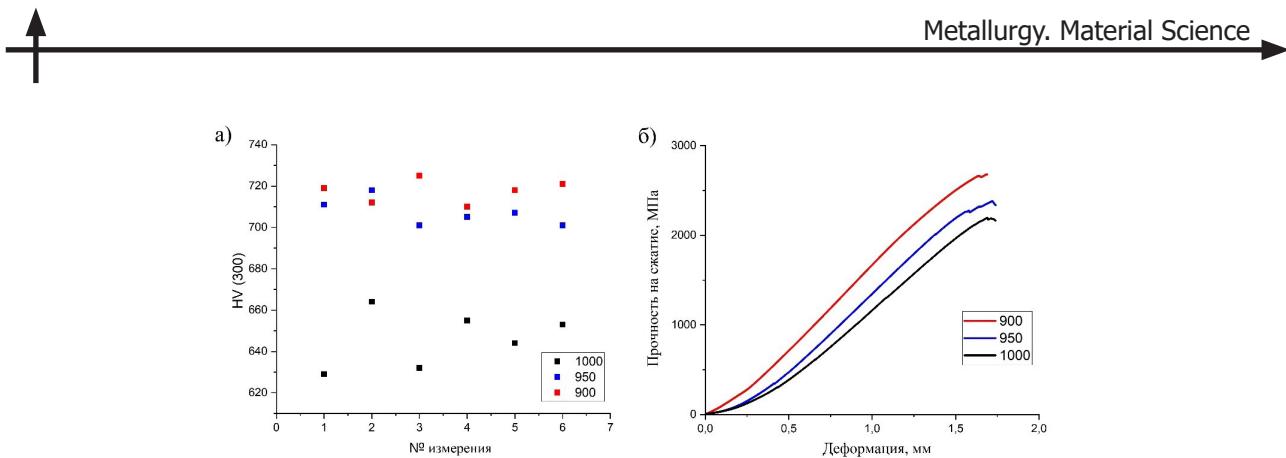


Рис. 4. Механические испытания образцов после отжига: микротвердость (а) и прочность на сжатие (б)

Fig. 4. Mechanical tests of samples after annealing: microhardness (a) and compressive strength (b)

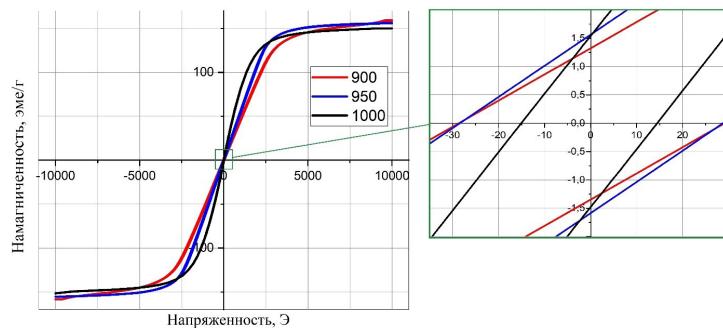


Рис. 5. Петли магнитного гистерезиса образцов

Fig. 5. Magnetic hysteresis loops of samples

к увеличению размера зерна фазы ОЦК#3 (рис. 3), что сопровождается падением механических свойств. Рост зерен фазы ОЦК#2 затруднен из-за ее сложного состава и влияния эффекта замедленной диффузии в ВЭС.

На рис. 5 показано исследование магнитных свойств образцов. Образец после отжига при температуре 1000°C показал наименьшую коэрцитивную силу ($H_c = 14,8$ Э), что, вероятно, связано с ростом доменов фазы ОЦК#3. Наибольшую намагниченность насыщения 159 эме/г показал образец после отжига при температуре 900°C.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что повышение температуры спекания до 1000°C резко снижает механические свойства и увеличивает магнитомягкие свойства.

Выводы

В данной работе получен новый ВЭС $\text{Fe}_6\text{Co}_6\text{Al}_3\text{Ni}_2\text{Mn}$ методом МЛ. Изучены фазовый, гранулометрический состав и микроструктура порошка. Из легированных порошков получены образцы методом ИПС. Проанализировано влияние температуры отжига на механические и магнитные свойства полученных материалов. Исследованы фазовый состав и микроструктура спеченных образцов. Установлено, что наименьшая коэрцитивная сила ВЭС достигается при отжиге при 1000°C за счет роста α -фазы, состоящей в основном из железа и кобальта. По этой же причине образец, отожженный при самой высокой температуре, имеет наименьшую твердость и прочность на сжатие.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Lu T., He T., Andreoli A.F., Yao N., Wan B., Scudino S. The origin of good mechanical and soft magnetic properties in a CoFeNi-based high-entropy alloy with hierarchical structure // Materials Characterization. 2024. Vol. 215. Art. no. 114237. DOI: 10.1016/j.matchar.2024.114237
- [2] Li Z., Qi J., Li Z., Li H., Xu H., Bai G., Liu X., Zhang X. Effect of grain and phase boundaries on soft magnetic properties of FeCoNiAlSi high-entropy alloys // Materials Letters. 2021. Vol. 297. Art. no. 129965. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.129965
- [3] Song Z.B., Huang T.X., Jain A., Wang Y.G. Indirect effect of Si on the ferromagnetic transformation of Mn in FeCoMnAlSi high-entropy soft magnetic alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2024. Vol. 1003. Art. no. 175575. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.175575
- [4] An B.-L., Zhang P.-C., Cao Z.-R., Zhang C., Liu L. Achieving excellent soft-magnetic properties in CoFeAlMnCr high entropy alloy by *in-situ* additive manufacturing // Scripta Materialia. 2024. Vol. 252. Art. no. 116282. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2024.116282
- [5] Wang W., Li H., Wei P., Zhang W., Chen J., Yuan S., Fan Y., Wei R., Zhang T., Wang T., Chen C., Li F. A corrosion-resistant soft-magnetic high entropy alloy // Materials Letters. 2021. Vol. 304. Art. no. 130571. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130571
- [6] Mazeeva A.K., Kim A., Shamshurin A.I., Razumov N.G., Nazarov D.V., Borisov A.N., Popovich A.A. Effect of heat treatment on structure and magnetic properties of $\text{Ni}_{36}\text{Co}_{37}\text{Al}_{27}$ alloy produced by laser powder bed fusion // Journal of Alloys and Compounds. 2023. Vol. 938. Art. no. 168461. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.168461
- [7] Zhao R.-F., Ren B., Zhang G.-P., Liu Z.-X., Cai B., Zhang J. $\text{CoCr}_x\text{CuFeMnNi}$ high-entropy alloy powders with superior soft magnetic properties // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2019. Vol. 491. Art. no. 165574. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.165574
- [8] Ozerskoi N.E., Razumov N.G., Silin A.O., Borisov E.V., Popovich A.A. Mechanical properties of high-nitrogen steel produced via selective laser melting using mechanically alloyed and spheroidized powders // Powder Metallurgy and Functional Coatings. 2024. Vol. 18, No. 1. P. 81–94. DOI: 10.17073/1997-308X-2024-1-81-94
- [9] Moazzen P., Toroghinejad M.R., Zargar T., Cavaliere P. Investigation of hardness, wear and magnetic properties of NiCoCrFeZr_x HEA prepared through mechanical alloying and spark plasma sintering // Journal of Alloys and Compounds. 2022. Vol. 892. Art. no. 161924. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161924
- [10] Popovich A.A., Razumov N.G. Dissolution of alloying elements and phase formation in powder materials Fe-18Cr-8Ni-12Mn-xN during mechanical alloying // Advanced Materials Letters. 2014. Vol. 12, No. 5. P. 683–687. DOI: 10.5185/amlett.2014.6585
- [11] Chen C., Zhang H., Fan Y., Zhang W., Wei R., Wang T., Zhang T., Li F. A novel ultrafine-grained high entropy alloy with excellent combination of mechanical and soft magnetic properties // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2020. Vol. 502. Art. no. 166513. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166513
- [12] Li P., Wang A., Liu C.T. Composition dependence of structure, physical and mechanical properties of $\text{FeCoNi}(\text{MnAl})_x$ high entropy alloys // Intermetallics. 2017. Vol. 87. P. 21–26. DOI: 10.1016/j.intermet.2017.04.007
- [13] Munir K., Biesiekierski A., Wen C., Li Y. Powder metallurgy in manufacturing of medical devices // Metallic Biomaterials Processing and Medical Device Manufacturing. 2020. P. 159–190. DOI: 10.1016/B978-0-08-102965-7.00005-9
- [14] Zhu S., Shittu J., Perron A., Nataraj C., Berry J., McKeown J.T., van de Walle A., Samanta A. Probing phase stability in CrMoNbV using cluster expansion method, CALPHAD calculations and experiments // Acta Materialia. 2023. Vol. 255. Art. no. 119062. DOI: 10.1016/j.actamat.2023.119062
- [15] Zhu J., Lv M., Liu C., Tan X., Xu H. Effect of neodymium and yttrium addition on microstructure and DC soft magnetic property of dual-phase $\text{FeCoNi}(\text{CuAl})_{0.8}$ high-entropy alloy // Journal of Rare Earths. 2023. Vol. 41, No. 10. P. 1562–1567. DOI: 10.1016/j.jre.2022.06.005



- [16] Махмутов Т.Ю., Разумов Н.Г., Попович А.А. Разработка способа синтеза однофазных высоконентропийных керамических материалов с высокой степенью химической однородности на примере эквивалентного высоконентропийного карбида (TiZrHfTaNb)C // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 3. С. 109–119. DOI: 10.18721/JEST.27310

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КИМ Артем Эдуардович – магистрант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: artem_7.kim@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2276-1359>

МАЗЕЕВА Алина Константиновна – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: mazeevaalina@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8980-0869>

РАЗУМОВ Николай Геннадьевич – научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: n.razumov@onti.spbstu.ru

ВОЛОКИТИНА Екатерина Владимировна – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: volokitina1606@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5454-7733>

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич – директор ИММиТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

REFERENCES

- [1] T. Lu, T. He, A.F. Andreoli, N. Yao, B. Wan, S. Scudino, The origin of good mechanical and soft magnetic properties in a CoFeNi-based high-entropy alloy with hierarchical structure, *Materials Characterization*, 215 (2024) 114237. DOI: 10.1016/j.matchar.2024.114237
- [2] Z. Li, J. Qi, Z. Li, H. Li, H. Xu, G. Bai, X. Liu, X. Zhang, Effect of grain and phase boundaries on soft magnetic properties of FeCoNiAlSi high-entropy alloys, *Materials Letters*, 297 (2021) 129965. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.129965
- [3] Z.B. Song, T.X. Huang, A. Jain, Y.G. Wang, Indirect effect of Si on the ferromagnetic transformation of Mn in FeCoMnAlSi high-entropy soft magnetic alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 1003 (2024) 175575. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.175575
- [4] B.-L. An, P.-C. Zhang, Z.-R. Cao, C. Zhang, L. Liu, Achieving excellent soft-magnetic properties in CoFeAlMnCr high entropy alloy by *in-situ* additive manufacturing, *Scripta Materialia*, 252 (2024) 116282. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2024.116282
- [5] W. Wang, H. Li, P. Wei, W. Zhang, J. Chen, S. Yuan, Y. Fan, R. Wei, T. Zhang, T. Wang, C. Chen, F. Li, A corrosion-resistant soft-magnetic high entropy alloy, *Materials Letters*, 304 (2021) 130571. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130571

- [6] A.K. Mazeeva, A. Kim, A.I. Shamshurin, N.G. Razumov, D.V. Nazarov, A.N. Borisov, A.A. Popovich, Effect of heat treatment on structure and magnetic properties of $\text{Ni}_{36}\text{Co}_{37}\text{Al}_{27}$ alloy produced by laser powder bed fusion, *Journal of Alloys and Compounds*, 938 (2023) 168461. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.168461
- [7] R.-F. Zhao, B. Ren, G.-P. Zhang, Z.-X. Liu, B. Cai, J. Zhang, $\text{CoCr}_x\text{CuFeMnNi}$ high-entropy alloy powders with superior soft magnetic properties, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 491 (2019) 165574. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.165574
- [8] N.E. Ozerskoi, N.G. Razumov, A.O. Silin, E.V. Borisov, A.A. Popovich, Mechanical properties of high-nitrogen steel produced via selective laser melting using mechanically alloyed and spheroidized powders, *Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 18 (1) (2024) 81–94. DOI: 10.17073/1997-308X-2024-1-81-94
- [9] P. Moazzen, M.R. Toroghinejad, T. Zargar, P. Cavaliere, Investigation of hardness, wear and magnetic properties of NiCoCrFeZr_x HEA prepared through mechanical alloying and spark plasma sintering, *Journal of Alloys and Compounds*, 892 (2022) 161924. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161924
- [10] A.A. Popovich, N.G. Razumov, Dissolution of alloying elements and phase formation in powder materials $\text{Fe-18Cr-8Ni-12Mn-xN}$ during mechanical alloying, *Advanced Materials Letters*, 5 (12) (2014) 683–687. DOI: 10.5185/amlett.2014.6585
- [11] C. Chen, H. Zhang, Y. Fan, W. Zhang, R. Wei, T. Wang, T. Zhang, F. Li, A novel ultrafine-grained high entropy alloy with excellent combination of mechanical and soft magnetic properties, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 502 (2020) 166513. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166513
- [12] P. Li, A. Wang, C.T. Liu, Composition dependence of structure, physical and mechanical properties of $\text{FeCoNi}(\text{MnAl})_x$ high entropy alloys, *Intermetallics*, 87 (2017) 21–26. DOI: 10.1016/j.intermet.2017.04.007
- [13] K. Munir, A. Biesiekierski, C. Wen, Y. Li, Powder metallurgy in manufacturing of medical devices, *Metallic Biomaterials Processing and Medical Device Manufacturing*, (2020) 159–190. DOI: 10.1016/B978-0-08-102965-7.00005-9
- [14] S. Zhu, J. Shittu, A. Perron, C. Nataraj, J. Berry, J.T. McKeown, A. van de Walle, A. Samanta, Probing phase stability in CrMoNbV using cluster expansion method, CALPHAD calculations and experiments, *Acta Materialia*, 255 (2023) 119062. DOI: 10.1016/j.actamat.2023.119062
- [15] J. Zhu, M. Lv, C. Liu, X. Tan, H. Xu, Effect of neodymium and yttrium addition on microstructure and DC soft magnetic property of dual-phase $\text{FeCoNi}(\text{CuAl})_{0.8}$ high-entropy alloy. *Journal of Rare Earths*, 41 (10) (2023) 1562–1567. DOI: 10.1016/j.jre.2022.06.005
- [16] T.Y. Makhmutov, N.G. Razumov, A.A. Popovich, Development of synthesis method for singlephase high-entropy ceramic materials with a high degree of chemical homogeneity on the example of equiatomic high-entropy carbide $(\text{TiZrHfTaNb})\text{C}$, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (03) (2021) 109–119. DOI: 10.18721/JEST.27310

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Artem E. KIM – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.

E-mail: artem_7.kim@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2276-1359>

Alina K. MAZEEVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.

E-mail: mazeevaalina@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8980-0869>

Nikolay G. RAZUMOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.

E-mail: n.razumov@onti.spbstu.ru

Ekaterina V. VOLOKITINA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: volokitina1606@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5454-7733>

Anatoliy A. POPOVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: popovicha@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

Поступила: 29.10.2024; Одобрена: 24.12.2024; Принята: 25.12.2024.
Submitted: 29.10.2024; Approved: 24.12.2024; Accepted: 25.12.2024.