

Научная статья
1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)
УДК 536.425:539.25:539:351
doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.04.002

ПУТИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СВОЙСТВ И ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ КАНТОРОВСКИХ СПЛАВОВ

**Виктор Евгеньевич Громов^{1†}, Сергей Валерьевич Коновалов²,
Алексей Борисович Юрьев³, Михаил Олегович Ефимов⁴**

^{1, 2, 3, 4} Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия

¹ gromov@physics.sibsiu.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

² konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

³ rector@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9932-4755>

⁴ moefimov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4890-3730>

Аннотация. Пятикомпонентные высокоэнтропийные сплавы ВЭС типа сплава CoCrFeNiMn Кантора, обладающие хорошим сочетанием прочностных и пластических свойств и имеющие благоприятные перспективы практического использования, вот уже более четверти века активно исследуются во всем мире. В статье представлен краткий обзор публикаций в основном зарубежных исследователей по поиску направлений изменения, (улучшения) свойств этих сплавов и их практическому применению. Проанализированы теоретические и экспериментальные работы, свидетельствующие о возможности электронных структур в формировании свойств высокоэнтропийных сплавов. Изучение магнитных свойств ВЭС, может дать важную дополнительную информацию об их электронной структуре. На примере ВЭС (CoCrFeMn)_{1-x}Ni_x, содержащих пять ферромагнитных элементов, прослежена эволюция магнитной природы с изменением температуры. Обращено внимание на необходимость ускорения масштабного практического применения ВЭС. Показаны трудности и сдерживающие факторы практического использования ВЭС и пути их преодоления. В этом направлении проведен анализ публикаций в зарубежной печати о путях создания ВЭС из отходов (лома) машиностроительной и металлургической промышленности. Выполнено сравнение структурно-фазовых состояний и механических свойств ВЭС, изготовленных из чистых составляющих элементов и отходов, содержащих нержавеющую сталь, никром, кобальтовые сплавы.

Ключевые слова: модифицирование, высокоэнтропийные сплавы, применение, свойства, структура, фазовый состав.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 23-49-00015, <https://rscf.ru/project/23-49-0015>.

Для цитирования: Громов В.Е., Коновалов С.В., Юрьев А.Б., Ефимов М.О. Пути модифицирования свойств и применения высокоэнтропийных канторовских сплавов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 4. С. 422–427. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.04.002.

Original article

WAYS TO MODIFY THE PROPERTIES AND APPLICATIONS OF HIGH-ENTROPY CANTOR ALLOYS

Viktor E. Gromov^{1†}, Sergey V. Kononov², Alexey B. Yuryev³, Mikhail O. Efimov⁴

^{1, 2, 3, 4} Siberian State Industrial University, Kirova Str., 42, Novokuznetsk, 654006, Russia

¹ gromov@physics.sibsiu.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

² konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

³ rector@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9932-4755>

⁴ moefimov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4890-3730>

Abstract. Five-component high-entropy WPP alloys such as Cantor's CoCrFeNiMn alloy, which have a good combination of strength and plastic properties and have favorable prospects for practical use, have been actively studied all over the world for more than a quarter of a century. The article provides a brief overview of publications

mainly by foreign researchers on the search for directions for changing (improving) the properties of these alloys and their practical application. Theoretical and experimental work has been analyzed, indicating the possibility of electronic structures in the formation of properties of high-entropy alloys. Studying the magnetic properties of wind turbines can provide important additional information about their electronic structure. Using the example of the WPP (CoCrFeMn)_{1-x}Ni_x, containing five ferromagnetic elements, the evolution of the magnetic nature with a change in temperature is traced. Attention is drawn to the need to accelerate the large-scale practical application of WPP. The difficulties and constraints of the practical use of wind farms and ways to overcome them are shown. In this direction, an analysis of publications in the foreign press on ways to create a wind farm from waste (scrap) of the machine-building and metallurgical industries has been carried out. The structural and phase states and mechanical properties of wind turbines made of pure constituent elements and products containing stainless steel, nichrome, and cobalt alloys are compared.

Keywords: modification, high-entropy alloys, application, properties, structure, phase composition.

Acknowledgements: The study was supported by the RGNF grant No. 23-49-00015, <https://rscf.ru/project/23-49-0015>.

For citation: Gromov, V. E., Konovalov, S. V., Yuryev, A. B. & Efimov, M. O. (2024). Ways to modify the properties and applications of high-entropy Cantor alloys. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(4), 422–427. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.04.002.

Введение

Традиционный подход к созданию новых сплавов с определенным комплексом свойств на основе одного базового элемента в последние десятилетия становится все менее успешным. В конце прошлого и начале этого века в экономически развитых странах на базе пяти и более элементов были созданы так называемые высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) [1], обладающие целым рядом высоких функциональных свойств, таких как коррозионная и радиационная стойкость, крио и жаропрочность, высокий уровень механических свойств и др.

Исследования структуры, стабильности и свойств ВЭС стали авангардными в физическом материаловедении [2]. Среди более, чем 30 000 статей, опубликованных за последнюю четверть века (по данным базы Scopus), особое место занимают публикации по сплаву Кантора CoCrFeNiMn, обладающему превосходными механическими свойствами при низких и высоких температурах [3]. Возможные области практического применения ВЭС вызвали необходимость тщательного исследования различных аспектов ВЭС от способов их создания до структурно-фазовых состояний и свойств, отраженных в обзорных статьях и монографиях [4, 5]. Применительно к сплаву Кантора проблема улучшения его физико-механических свойств находится в центре внимания исследователей в области физики металлов и материаловедения. В наших статьях [6,7] предложены и проанализированы направления решения этой задачи путем создания градиентных и нанокристаллических структурно-фазовых состояний и использования внешних энергетических воз-

действий. Другие направления улучшения свойств этого сплава связаны с легированием [8], термообработкой [9] и использованием фазовых диаграмм Calphad [10].

В статье [11] отмечено, что легирование Zr приводит к более низкой температуре плавления из-за образования эвтектики со всеми элементами сплава Кантора. Легирование атомами Nb в диапазоне 0-16 (ат. %) обеспечивает образование объемной доли фаз Лавеса и σ фазы до 42 %, что в свою очередь ответственно за пятикратное увеличение предела текучести от 202 МПа до 1010 МПа. Проанализированы работы по совместному легированию сплава Кантора системами Zr+Ti+Y₂O₃; Nb+C; Nb+V [12]. Показан значительный эффект улучшения механических свойств при комплексном легировании, раскрыты и обсуждены физические механизмы упрочнения. Микролегирование 0,2 % Nb сплава с 1,3 % C обеспечивает превосходное сочетание предела текучести ~ 1096 МПа и относительного удлинения ~12 % после отжига при 700 °С.

Новая парадигма разработки ВЭС Кантора низкой стоимости предложена в работе [9]. Рассмотрена стратегия проектирования сверхпрочных и пластичных многокомпонентных ГЦК сплавов путем введения так называемого «локального химического порядка», управляемого междуузлиями и создаваемого посредством простой термомеханической обработки. В опытном многокомпонентном сплаве CoCrFeMnNi, обработанном методом частичного рекристаллизационного отжига, преобладает высокая плотность тонких реек, содержащих домены ближнего и среднего порядка.

Комплекс программ термодинамических расчетов Calphad может быть весьма полезным для разработки новых ВЭС CoCrFeNiMn с повышенной прочностью. Компьютерное термодинамическое прогнозирование фазовых равновесий является при этом основой, поскольку механические свойства во многом определяются фазовым составом сплавов. Сама по себе эта задача представляется достаточно сложной ввиду неполноты описания тройных систем, в частности [10].

Вышеизложенные основные направления повышения свойств сплава Кантора, проанализированные в [4, 6, 7], не исчерпывают многообразия возможных подходов к решению этой проблемы, в связи с чем возникает необходимость анализа новых подходов и перспективных направлений создания канторовских ВЭС с высокими функциональными свойствами, что и явилось целью настоящей работы.

Результаты и их обсуждение

В последние годы в зарубежной печати появились немногочисленные публикации экспериментальных и теоретических исследований роли электронных структур в формировании свойств ВЭС [13]. Детальное знание электронных структур необходимо для понимания свойств материалов и дизайна новых ВЭС с требуемыми свойствами. Такие данные могут ответить на дискутируемый в научной печати вопрос, насколько ВЭС превосходят обычные сплавы (и превосходят ли) [14]?

В статье [14] были экспериментально проанализированы концентрационные зависимости параметров сплавов канторовского состава $(\text{CrMnFeCo})_{1-x}\text{Ni}_x$ и $(\text{CrMnCoNi})_{1-x}\text{Fe}_x$, приготовленных из компонентов высокой чистоты ($> 99,95\%$). Кроме традиционных методов физического материаловедения (рентгеновская дифрактометрия, сканирующая электронная микроскопия, наноиндентирование) были проведены дифференциальная сканирующая калориметрия, измерения магнитной восприимчивости, намагниченности, фотоэмиссионных спектров. Ранее предсказание фазообразования на основе разработанных критериев, учитывающих термофизические параметры, отличие атомных размеров, концентрацию валентных электронов (КВЭ), электроотрицательность и др., было осуществлено в работе [5]. Концентрация валентных электронов, как показывает анализ концентрационных зависимостей параметров и свойств сплавов канторовского типа

[14], является основной характеристикой. При КВЭ $> 7,8$ стабильной будет ГЦК фаза [14].

Разные значения величин межатомного взаимодействия составляющих элементов канторовских сплавов будут обеспечивать неоднородное распределение элементов внутри этих ВЭС. А поскольку в составе сплава Кантора присутствуют ферромагнитные элементы, то и магнитные свойства будут во многом определяться их распределением. Катрирование в исследованных канторовских сплавах показало неоднородное распределение элементов на микроуровне.

Термический анализ ВЭС очень часто не проводится, что вносит значительные погрешности в оценке параметров [14]. Выполненные методами дифференциальной сканирующей калориметрии исследования показали существование различных фаз при разных значениях x . Важно отметить, что полученная при высоких температурах часть фазовой диаграммы (при $x \geq 0,2$) качественно и количественно совпала с Calphad расчетами [15]. Сравнение этих данных с результатами для обычных сплавов позволило утверждать, что термическая стабильность последних (при $x \geq 0,35$) выше, чем у ВЭС, а, следовательно, использование ВЭС при повышенных температурах нецелесообразно.

При пониженных температурах фазовая диаграмма ВЭС канторовского типа становится более сложной из-за наличия различных фаз в различных температурных и концентрационных интервалах. Продолжительный отжиг этих первоначальных ВЭС при $T < 900\text{ K}$ приводит к выделению вторых фаз, лимитирующих использование ВЭС при повышенных температурах. Выполненный в [14] анализ фотоэмиссионных спектров канторовских ВЭС с разной концентрацией Fe и Ni позволил провести сравнение со спектрами составляющих элементов, их зонной структурой и магнитными параметрами. Вид спектров сильно изменяется с изменением x , особенно для сплава $(\text{CoCrMnNi})_{1-x}\text{Fe}_x$.

Знание магнитного состояния ВЭС может дать важную дополнительную информацию о его электронной структуре. В ряде ВЭС, содержащих ферромагнетики, обнаружен новый механизм упрочнения – магнитное упрочнение [16, 17]. Это важное направление дальнейшего изучения канторовских сплавов, тем более что в литературе имеется значительные расхождения по значениям температуры Кюри и магнитным атомным моментам. Последнее, скорее всего, связано с тем, что канторовские ВЭС содержат пять ферромагнитных элементов с ши-

роким распределением обменных взаимодействий составляющих атомов и ориентаций их магнитных моментов. Изотермы намагниченности ВЭС $(\text{CoCrFeMn})_{1-x}\text{Ni}_x$ с малым содержанием Ni при 2 К свидетельствуют о его неферромагнитной природе. Отмеченный многочисленными исследователями ферромагнетизм, скорее всего, обусловлен наличием ферромагнитных кластеров в неполностью гомогенизированном материале. Моделирование методом Монте Карло подтверждает, что канторовский сплав при 10 К имеет неферромагнитную природу.

Сделанные в работе [14] выводы отличаются от уже устоявшихся представлений для ВЭС. В частности, показано, что свойства ВЭС Кантора не обязательно должны превосходить их производные с более низкой конфигурационной энтропией. Таким образом, теоретический и экспериментальный анализ электронной структуры и магнитных свойств является новым перспективным вектором в поиске путей улучшения свойств ВЭС канторовского типа.

Несмотря на достигнутые успехи в разработке, создании и исследовании различных канторовских и других пятикомпонентных ВЭС пока еще рано говорить об их реальном масштабном внедрении в каких-либо отраслях промышленности. Идет процесс накопления и осмысления информации о структуре, дефектной субструктуре и различных свойствах ВЭС [2]. Исследования ВЭС с улучшенным комплексом эксплуатационных свойств в основном проводятся в лабораторных условиях с использованием технически чистых порошковых заготовок. По сравнению с обычными сплавами решающим фактором, сдерживающим практическое применение изделий из ВЭС, может явиться стоимость сырья и затрат на его обработку (переработку). Последние операции (извлечение чистых элементов) из руд или отработанных сплавов приводит к нарушению экологии из-за выбросов парниковых газов и оксидов углерода, что также является сдерживающим фактором на практическом пути коммерческого внедрения ВЭС. В работе [18] продемонстрировано получение ВЭС эквиатомного состава из отходов (нержавеющая сталь, нихром, медная проволока), который имел микроструктуру, аналогичную той, что получилась из чистых элементов. Опасность создания ВЭС из отходов (лома) металлургического и машиностроительного производств заключается в повышенном уровне примесей, способных привести к выделению хрупких фаз, таких как фазы Лавеса, карбиды σ -фазы.

Обнадеживающие результаты при решении проблемы создания ВЭС продемонстрированы в работе [19], в которой проанализированы сплавы AlCoCrFeNi , изготовленные из чистых элементов и лома с содержанием примесей (до 20 легирующих элементов) (мас. %) 2 % и 9 %. Эти ВЭС исследовались в литом и гомогенизирующем состояниях (1100 °С в течение 24 часов). Однофазный сплав $\text{Al}_{0,3}\text{CoCrFeNi}$ имел ГЦК структуру, многофазный $\text{Al}_{0,6}\text{CoCrFeNi}$ имел ГЦК/ОЦК структуру, а $\text{Al}_{0,9}\text{CoCrFeNi}$ имел спинадальную ОЦК/В2 структуру. Проведенные методами современного физического материаловедения исследования показали, что:

1. ВЭС с низким (~ 2 % масс.) содержанием примесей имели аналогичную микроструктуру и механические свойства, что и изготовленные из чистых элементов.

2. ВЭС с высоким содержанием примесей (~ 9 % масс.) обладал более высокими прочностными характеристиками (из-за фаз Лавеса и карбидов) и параметрами пластичности (из-за измельчения зеренной структуры).

3. Различные уровни примесей не оказали значительного влияния на микроструктуру $\text{Al}_{0,3}\text{CoCrFeNi}$ сплава в чистом и гомогенизированном состоянии.

4. Для ВЭС $\text{Al}_{0,6}\text{CoCrFeNi}$ роль примесей более заметна, отмечен переход крупноцентричной зеренной структуры (чистый $\text{Al}_{0,6}\text{CoCrFeNi}$) в равноосную при ~ 9 % масс и тонкую дендритную структуру при содержании примесей ~ 2 % масс. При этом высокий уровень примесей (~ 9 % масс.) приводил к сильному измельчению ГЦК фазы.

5. Для ВЭС $\text{Al}_{0,9}\text{CoCrFeNi}$ высокое содержание примесей препятствовало образованию ГЦК фазы и обеспечивало высокий предел текучести (~ 1,5 ГПа) и удовлетворительную пластичность.

Резюмируя вышеизложенные в [18, 19] результаты можно утверждать, что показан перспективный путь создания ВЭС для их практического применения.

Заключение

Представлен краткий обзор последних работ зарубежных и отечественных исследователей по разным направлениям модифицирования свойств высокоэнтропийных сплавов канторовского типа. Особое внимание обращено на анализ теоретических и экспериментальных работ о роли электронных структур в формировании свойств ВЭС. Проанализированы результаты исследований возможностей создания ВЭС из

отходов промышленных производств и их практического использования.

Список литературы

- Miracle D.B. High entropy alloys as a bold step forward in alloy development // *Nature Communications*. 2019. V. 10. P. 1805.
- Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy alloys. Springer. Advanced structured materials, 2021. 110 p.
- Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Shlyarova Yu.A., Panchenko I.A. Structure and properties of high-entropy alloys. Ru. Science Moscow, 2021. 203 p.
- George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys // *Nat. Rev. Mater.* 2019. N 4. P. 515–534.
- Gao M.C., Yeh J.-W., Liaw P.K., Zhang Y. High Entropy Alloys; Springer International Publisher: Cham, Switzerland, 2016. 516 p.
- Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Ефимов М.О., Шлярова Ю.А., Панченко И.А. и др. Структура зоны контакта наплавка-подложка, подвергнутой электронно-пучковой обработке // *Письма в ЖТФ*. 2023. Т. 49, № 6. С. 26–31.
- Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Коновалов С.В., Шугуров В.В., Ефимов М.О. и др. Структура и свойства высокоэнтروпийного сплава, подвергнутого электронно-ионно-плазменной обработке // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2022. № 4. С. 102–116.
- Gao N., Lu D.H., Zhao Y.Y., Liu X.W., Liu G.H. et al. Strengthening of a CrMnFeCoNi high-entropy alloy by carbide precipitation // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. V. 792. P. 1028–1035.
- He Z., Guo Y., Sun L., Yan H.-L., Guan X. et al. Interstitial-driven local chemical order enables ultrastrong face-centered cubic multicomponent alloys // *Acta Materialia*. 2023. V. 243. 118495.
- Abrahams K., Zomorodpoosh S., Khorasani A., Roslyakova I., Steinbach I. et al. Automated assessment of a kinetic database for fcc Co–Cr–Fe–Mn–Ni high entropy alloys // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2021. V. 29. 055007.
- Zeng Z., Xiang M., Dan Z., Shi J., Wang W. et al. Mechanical properties of Cantor alloys driven by additional elements: a review // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. V. 15. P. 192–1934.
- Peng S., Lu Z., Gao S., Li H. Improved microstructure and mechanical properties of ODS-CoCrFeNiMn high entropy alloys by different Ti, Zr and Y₂O₃ addition // *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. V. 935. 168166.
- Biljaković K., Remenyi G., Figueroa I.A., Ristić R., Pajić D. et al. Electronic structure and properties of (TiZrNbCu)_{1-x}Ni_x high entropy amorphous alloys // *J. Alloys Compd.* 2017. V. 695. P. 2661–2668.
- Babić E., Drobac D., Figueroa I.A., Brocq M.L., Marohnić Z. et al. Transition from High-Entropy to Conventional Alloys: Which Are Better? // *Materials*. 2021. V. 14. P. 5824.
- Bracq G., Laurent-Brocq M., Perriere L., Pires R., Joubert J.-M. et al. The fcc solid solution stability in the Co–Cr–Fe–Mn–Ni multicomponent system // *Acta Mater.* 2017. V. 128. P. 327–336.
- Niu C., LaRosa C.R., Miao J., Mills M.J., Ghazisaeidi M. Magnetically-driven phase transformation strengthening in high entropy alloys // *Nat. Comm.* 2018. N 9. 1363.
- Yang Z., Sun J., Lu S., Vitos L. A comparative study of solid-solution strengthening in Cr–Co–Ni complex concentrated alloys: The effect of magnetism // *Comp. Mater. Sci.* 2021. V. 192. 110408.
- Hariharan K., Sivaprasad K. Sustainable Low-Cost Method for Production of High Entropy Alloys from Alloy Scraps // *J. Sustain. Metall.* 2022. V. 8. P. 625–631.
- Chao Q., Joseph J., Annasamy M., Hodgson P., Barnett M.R. et al. Al_xCoCrFeNi high entropy alloys from metal scrap: Microstructure and mechanical properties // *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. V. 976. 173002.

Информация об авторах

В. Е. Громов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

С. В. Коновалов – доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Сибирского государственного индустриального университета.

А. Б. Юрьев – доктор технических наук, профессор, ректор Сибирского государственного индустриального университета.

М. О. Ефимов – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

References

- Miracle, D. B. (2019). High entropy alloys as a bold step forward in alloy development. *Nature Communications*, 10, 1805.

2. Gromov, V. E., Konovalov, S. V., Ivanov, Yu. F. & Osintsev, K. A. (2021). Structure and properties of high-entropy alloys. Springer. Advanced structured materials. P. 110.
3. Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Osintsev, K. A., Shlyarova, Yu. A. & Panchenko, I. A. (2021). Structure and properties of high-entropy alloys. Ru. Science Moscow. P. 203.
4. George, E. P., Raabe, D. & Ritchie, R. O. (2019). High-entropy alloys. *Nat. Rev. Mater.*, (4), 515–534.
5. Gao, M. C., Yeh, J.-W., Liaw, P. K. & Zhang, Y. (2016). High Entropy Alloys; Springer International Publisher: Cham, Switzerland. P. 516.
6. Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E., Efimov, M. O., Shlyarova, Yu. A. & Panchenko, I. A. i dr. (2023). Структура зоны контакта наплавка-подложка, подвергнутой электронно-пучковой обработке. *Pis'ma v ZHTF*, 49(6), 26–31. (In Russ.).
7. Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E., Konovalov, S. V., Shugurov, V. V. & Efimov, M. O. i dr. (2022). Структура и свойства высокоэнтропийного сплава, подвергнутого электронно-ионно-плазменной обработке. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*, (4), 102–116. (In Russ.).
8. Gao, N., Lu, D. H., Zhao, Y. Y., Liu, X. W. & Liu, G. H. et al. (2019). Strengthening of a CrMnFeCoNi high-entropy alloy by carbide precipitation. *Journal of Alloys and Compounds*, 792, 1028–1035.
9. He, Z., Guo, Y., Sun, L., Yan, H.-L. & Guan, X. et al. (2023). Interstitial-driven local chemical order enables ultrastrong face-centered cubic multicomponent alloys. *Acta Materialia*, 243, 118495.
10. Abrahams, K., Zomorodpoosh, S., Khorasgani, A., Roslyakova, I. & Steinbach, I. et al. (2021). Automated assessment of a kinetic database for fcc Co–Cr–Fe–Mn–Ni high entropy alloys. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 29, 055007.
11. Zeng, Z., Xiang, M., Dan, Z., Shi, J. & Wang, W. et al. (2021). Mechanical properties of Cantor alloys driven by additional elements: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 192–1934.
12. Peng, S., Lu, Z., Gao, S. & Li, H. (2023). Improved microstructure and mechanical properties of ODS-CoCrFeNiMn high entropy alloys by different Ti, Zr and Y₂O₃ addition. *Journal of Alloys and Compounds*, 935, 168166.
13. Biljaković, K., Remenyi, G., Figueroa, I. A., Ristić, R. & Pajić, D. et al. (2017). Electronic structure and properties of (TiZrNbCu)_{1-x}Ni_x high entropy amorphous alloys. *J. Alloys Compd.*, 695, 2661–2668.
14. Babić, E., Drobac, D., Figueroa, I. A., Brocq, M. L. & Marohnić, Z. et al. (2021). Transition from High-Entropy to Conventional Alloys: Which Are Better? *Materials*, 14, 5824.
15. Bracq, G., Laurent-Brocq, M., Perriere, L., Pires, R. & Joubert, J.-M. et al. (2017). The fcc solid solution stability in the Co–Cr–Fe–Mn–Ni multi-component system. *Acta Mater.*, 128, 327–336.
16. Niu, C., LaRosa, C. R., Miao, J., Mills, M. J. & Ghazisaeidi, M. (2018). Magnetically-driven phase transformation strengthening in high entropy alloys. *Nat. Comm.*, (9), 1363.
17. Yang, Z., Sun, J., Lu, S. & Vitos, L. (2021). A comparative study of solid-solution strengthening in Cr–Co–Ni complex concentrated alloys: The effect of magnetism. *Comp. Mater. Sci.*, 192, 110408.
18. Hariharan, K. & Sivaprasad, K. (2022). Sustainable Low-Cost Method for Production of High Entropy Alloys from Alloy Scraps. *J. Sustain. Metall.*, 8, 625–631.
19. Chao, Q., Joseph, J., Annasamy, M., Hodgson, P. & Barnett, M. R. et al. (2024). Al_xCoCrFeNi high entropy alloys from metal scrap: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 976, 173002.

Information about the authors

V. E. Gromov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.

S. V. Konovalov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities of the Siberian State Industrial University.

A. B. Yuryev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of the Siberian State Industrial University.

M. O. Efimov – PhD student, Department of Natural Sciences prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 09.09.2024; одобрена после рецензирования 17.10.2024; принята к публикации 02.12.2024.

The article was received by the editorial board on 09 Sept. 2024; approved after reviewing 17 Oct. 2024; accepted for publication 02 Dec. 2024.