

Оригинальная статья

УДК 536.425:539.25:539.351

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-2(48)-69-78

**ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА CANTOR
ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ**

© 2024 г. М. О. Ефимов, В. Е. Громов, С. В. Коновалов, И. А. Панченко, А. П. Семин

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Перспективы использования высокоэнтропийного сплава Cantor CoCrFeNiMn в различных наукоемких отраслях промышленности связаны с хорошим сочетанием прочностных и пластических свойств. Начиная с 2004 года, когда был впервые создан и исследован сплав Cantor, в ведущих научных центрах мира выполнен большой объем исследований по влиянию термической обработки и других методов на его механические свойства. В научной школе СибГИУ в течение последних пяти лет решается проблема формирования высоких функциональных свойств высокоэнтропийных сплавов путем создания нанокристаллического состояния поверхности и ее упрочнения электронно-пучковой обработкой. В работе отмечена актуальность традиционного пути изменения свойств сплавов путем легирования. Выполнен краткий обзор работ за последние годы зарубежных исследователей по модифицированию (улучшению) механических свойств сплава Cantor путем легирования разными элементами. Особое внимание уделено легированию алюминием, ниобием, цирконием, широко используемыми при легировании традиционных сплавов. При анализе работ по легированию алюминием отмечено, что замена марганца на алюминий обеспечивает микроструктурную стабильность и высокие функциональные свойства в широком диапазоне температур. Обращено внимание на перспективную стратегию получения сплава Cantor с алюминием из отходов металлургического и машиностроительного производств. Это расширяет диапазон областей практического применения сплава Cantor. Отмечены преимущества легирования цирконием: быстрота индукционной плавки, хорошая химическая однородность, низкая температура плавления из-за образования эвтектики циркония со всеми компонентами сплава Cantor. Увеличение мольной доли ниобия значительно повышает прочностные свойства сплава и его твердость. Это во многом связано с образованием фазы Лавеса. Хорошее сочетание прочности и пластичности при микролегировании ниобием углеродсодержащего сплава Cantor связано с формированием мелкозернистой структуры. Рассмотрены и обсуждены различные механизмы упрочнения.

Ключевые слова: легирование, сплав Cantor, CoCrFeNiMn, упрочнение, механические свойства

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-49-00015, <https://rscf.ru/project/23-49-00015/>.

Для цитирования: Ефимов М.О., Громов В.Е., Коновалов С.В., Панченко И.А., Семин А.П. Изменение механических свойств сплава Cantor при легировании. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;2(48):69–78. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-69-78](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-69-78)

Original article

**CHANGING OF MECHANICAL PROPERTIES OF CANTOR ALLOY
DURING ALLOYING**

© 2024 M. O. Efimov, V. E. Gromov, S. V. Konovalov, I. A. Panchenko, A. P. Semin

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. The prospects for using Cantor's high-entropy alloy CoCrFeNiMn in various high-tech industries are associated with a good combination of strength and plastic properties. Since 2004, when the Cantor alloy was first created and studied, a large amount of research has been carried out in leading scientific centers around the world on the effects of heat treatment and other methods of improving its mechanical properties. Over the past five years, the scientific school of SibSIU has been solving the problem of forming a high level of functional properties of high-entropy alloys by creating a nanocrystalline state of the surface and strengthening it by electron beam processing. The article notes the relevance of the traditional way of changing the properties of alloys by alloying. A brief review of the work of recent years by foreign researchers on modifying (improving) the mechanical properties of the Cantor alloy by alloying a number of elements has been carried out. Particular attention is paid to the alloying of Al, Nb, and Zr, which are widely used in the alloying of traditional alloys. When analyzing aluminum alloying work, it was noted that the replacement of manganese with aluminum provides microstructural stability and high functional properties over a wide temperature range. Attention is drawn to a promising strategy for producing Cantor's alloy with Al from metallurgical and mechanical engineering waste. This expands the range of practical applications of Cantor alloy. The advantages of Zr alloying are noted: fast induction melting, good chemical homogeneity, and a low melting point due to the formation of Zr eutectic with all components of the Cantor alloy. An increase in the mole fraction of Nb significantly increases the strength properties of the alloy and its hardness. This is largely due to the formation of the Laves phase. A good combination of strength and ductility during microalloying of Nb-carbon-containing Cantor alloy is associated with the formation of a fine-grained structure. Various strengthening mechanisms are reviewed and discussed.

Keywords: alloying, Cantor alloy, CoCrFeNiMn, hardening, mechanical properties

Funding: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 23-49-00015, <https://rscf.ru/prolect/23-49-00015/>.

For citation: Efimov M.O., Gromov V.E., Kononov S.V., Panchenko I.A., Semin A.P. Changes of mechanical properties of Cantor alloy during alloying. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;2(48):69–78. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-69-78](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-69-78)

Введение

Известно, что высокоэнтروпийные сплавы (ВЭС) обладают отменными свойствами: пределом ползучести, ударной вязкостью, твердостью и пластичностью при повышенных и криогенных температурах [1]. У ВЭС хорошая устойчивость к коррозии и окислению, благодаря чему они имеют большие возможности для широкого спектра практических применений. Среди огромного банка данных по ВЭС особое место занимает так называемый «сплав Cantor» CoCrFeNiMn, свойства которого, начиная с момента создания в 2004 году, хорошо изучены в широком диапазоне температур. Так, относительное удлинение до разрушения при комнатной температуре сплава Cantor может достигать примерно 71 %, хотя значения предела текучести и прочности невелики – 215 и 491 МПа соответственно [1, 2]. Практическое применение этого сплава ограничено таким несоответствием между прочностью и пластичностью и может быть устранено легированием без охрупчивания. Актуальная проблема повышения механических свойств этого ВЭС находится в центре внимания исследователей в области физического материа-

ловедения и практиков. Ранее в обзорных работах [3, 4] проанализированы два направления решения этой проблемы: во-первых, путем формирования нанокристаллического состояния, градиентов структуры и поверхностного упрочнения внешними энергетическими воздействиями [5, 6]. Согласно литературным данным не менее привлекательным выглядит и второй путь – компьютерное моделирование создания новых ВЭС с высокими функциональными свойствами на основе комплекса программ CALPHAD, разработанного для расчета диаграмм состояния [7 – 9]. Для решения проблемы путем легирования хорошо изученными элементами для сталей и сплавов необходим тщательный анализ этого традиционного пути.

Анализ литературы показывает, что механические свойства высокоэнтропийных сплавов зависят от многих факторов, таких как легирование, способы обработки, структура, фазовый состав, микроструктура, дисперсные выделения и т.д. Однако наиболее важными факторами, влияющими на механические свойства ВЭС, являются легирующие элементы [10].

Целью настоящей работы является краткий анализ последних публикаций зарубежных исследователей по улучшению механических свойств сплава Cantor путем легирования.

Результаты и обсуждение

Во многих исследовательских работах по ВЭС отмечено, что чаще всего используются такие легирующие элементы как: Al, Si, Ni, V, Ti, Zr, Nb, Cu, Mo, C, Mn. Наибольший интерес из этого ряда представляют Al, Nb, Zr [10].

Легирование алюминием

В исследовании [11] на основе систем сплавов $Al_xCoCrFeNi$ было изучено влияние изменения молярной доли алюминия на механические свойства, микротвердость. В работе отмечено, что при увеличении молярной доли от Al_0 ($x = 0$) до $Al_{0,875}$ ($x = 0,875$) происходит заметное увеличение микротвердости. Однако при дальнейшем увеличении молярной доли алюминия микротвердость сначала снижается, а затем снова увеличивается (рис. 1). Также было замечено, при $Al_{0,375}$ и $Al_{0,875}$ системы сплавов обладают максимальными значениями микротвердости, что обусловлено закалкой в пересыщенном растворе, поскольку они являются однофазными ГЦК и ОЦК соответственно. В работе [12] было изучено влияние изменения содержания алюминия и меди на механические свойства ВЭС $(FeCr-NiCo)Al_xCu_y$. При повышении содержания алюминия в ВЭС $(FeCrNiCo)Al_xCu_y$ микротвердость и прочность на сжатие резко возрастают. Поскольку размер атома алюминия велик, это приводит к искажению решетки ГЦК-фазы и к образованию интерметаллида $NiAl$. Однако при

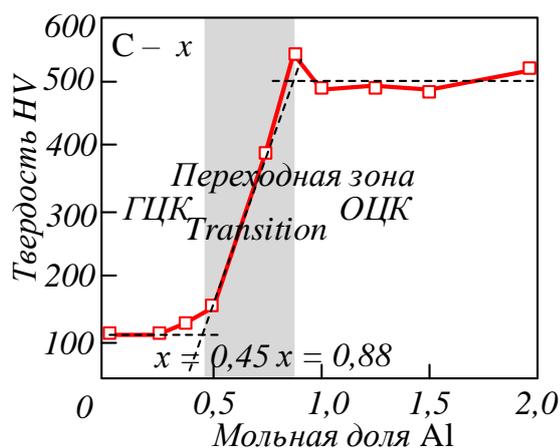


Рис. 1. Зависимость твердости ВЭС от молярной доли алюминия (штриховой линией показана граница переходной области) [10]

Fig. 1. Dependence of microhardness on the molar fraction of aluminum (the dashed line shows the boundary of the transition region) [10]

оценке легирующего влияния алюминия в сплаве $CrNbNiVZr$ было установлено, что добавление алюминия привело к образованию ОЦК решетки с двумя фазами Лавеса $C14$ (HCP), что резко увеличивает микротвердость сплава. При увеличении молярной доли алюминия в диапазоне от 0,25 до 0,5 и при $x = 1$ микротвердость значительно не увеличивается.

Традиционные сплавы Cantor составов $CoCrFeNiAl_x$ (x – молярная доля алюминия) с заменой марганца на алюминий интенсивно изучаются, так как эти сплавы обладают отличными механическими свойствами, сопротивлением окислению, коррозии, износу, ударной вязкости и т.д. [13 – 18]. Кроме того, сплавы этой системы, благодаря хорошей микроструктурной стабильности, сохраняют функциональные свойства в широком диапазоне от криогенных до высоких ($800\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур. В инновационной работе [19] была предложена перспективная стратегия получения ВЭС системы $CoCrFeNiAl_x$ с использованием отходов машиностроительного и металлургического производств в виде нержавеющей сталей. Изменяя содержание примесей до 9 мас. %, можно получать требуемые структуру и свойства, благодаря выделениям твердых фаз (фазы Лавеса и карбиды). Уменьшение размеров зерен структуры и фаз при этом повышало пластичность. Изменением молярной доли алюминия (0,3 – 0,9) авторы добивались однофазной, двухфазной или спинодальной ОЦК/В2 структуры. Примеси в ВЭС в количестве 2 % практически не оказывали влияния на структурно-фазовые состояния и свойства.

Легирование цирконием

Цирконий как легирующий элемент также представляет значительный интерес. Роль добавок 5 % циркония в процессе рекристаллизации экиатомного состава ВЭС Cantor была проанализирована в работе [20]. Для исследования кинетики рекристаллизации холоднокатаный сплав подвергали отжигу в течение 30 минут при высокой ($750 - 1125\text{ }^{\circ}\text{C}$) температуре. Эволюция границ зерен и их размеров были исследованы от литого до рекристаллизованного состояния. Движущей силой рекристаллизации дендритной микроструктуры по мнению авторов работы [20] является процесс снижения скалярной плотности дислокационной субструктуры, сформированной при холодной прокатке. Легирование цирконием, оставляя сплав однородным с ГЦК структурой, обеспечивает более эффективное твердорастворное упрочнение. Дендритная микроструктура трансформируется в поликристаллическую с малым размером зерна, что позволяет рассматривать перспективы промышленного

использования ВЭС CoCrFeNiMn + 5 % Zr при криогенных температурах.

Эффект легирования цирконием значительно возрастает при одновременном введении титана и оксида Y_2O_3 в равных количествах 1 мас. % посредством механического легирования и последующего плазменного спекания [21]. Полученный сплав имел ГЦК решетку, с высокой плотностью оксидов разной морфологии (до $2,01 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$), со средним размером зерен примерно 130 нм. Оксиды имели гексогональную ($YTiO_2$), орторомбическую (Y_2TiO_5), моноклинную (Ti_2O_3 , $Y_2Zr_2O_7$) решетки. Плотность оксидов и субмикронный размер зерна ответственны за уникальные значения микротвердости, предела текучести и прочности 449 HV, 1309 МПа и 2231 МПа соответственно. Установлено, что зернограничное упрочнение и упрочнение Орована были основными механизмами упрочнения. В полученных методом вакуумно-дуговой плавки сплавах CoCrFeNiZr_x с различным содержанием циркония типичная эвтектическая микроструктура выявлена при $x = 0,5$ [22]. Эти сплавы состоят из ГЦК твердого раствора и фазы Лавеса C15 в виде ламелей. Определено кристаллографическое ориентационное соотношение между этими двумя фазами. С увеличением объемной доли твердой фазы Лавеса C15 отмечен рост прочности. Однако при комнатной температуре они стали более хрупкими благодаря тому, что процесс разрушения изменился с кристаллитного разрушения на транскристаллитное. С повышением температуры испытания вид разрушения превратился в вязкий. Это позволило считать, что эвтектическая микроструктура может выдерживать значительные пластические деформации. Этот ВЭС имеет практическое применение при повышенных температурах [22].

Среди последних публикаций по влиянию циркония на механические свойства ВЭС Cantor необходимо выделить работу [23], в которой анализировались образцы, полученные путем вакуумной дуговой плавки предварительно механически легированных порошков с последующей холодной прокаткой на 90 % и рекристаллизационным отжигом при 1143 К. При легировании цирконием отмечены:

1 – быстрый процесс индукционной плавки в вакууме;

2 – более низкая температура плавления из-за образования эвтектики циркония со всеми элементами сплава Cantor;

3 – хорошая химическая однородность сплава;

4 – улучшение механических свойств.

Легирование цирконием ВЭС обеспечивает более высокую температуру рекристаллизации и

меньший размер зерен, что повышает твердость и прочность сплава.

Легирование ниобием

Изучению влияния крупных атомов ниобия на механические свойства системы сплавов CoCrFeNiNb_x посвящена работа [24]. Установлено, что прочность этих ВЭС увеличивается с увеличением концентрации ниобия, что связано с образованием фаз Лавеса. Благодаря твердорастворному упрочнению и упрочнению вторыми фазами, твердость сплава увеличивается с ростом содержания ниобия [25]. При изменении содержания ниобия от 0,1 до 0,8 % твердость линейно возрастает до 712 HV. То, что определяющая роль при этом принадлежит фазам Лавеса, считают авторы работы [26], отмечающие рост предела текучести от 1373 до 2473 МПа при увеличении содержания ниобия от 0 до 5 %. Авторы утверждают, что немаловажная роль при этом принадлежит процессу блокировки движения дислокаций.

Высокоэнтропийные сплавы с малым размером зерна, легированные углеродом, обладают хорошим сочетанием прочности и пластичности [27]. Однако они по своей природе имеют негативную тенденцию разлагаться на интерметаллические соединения при термическом воздействии при промежуточных температурах. Селективное микролегирование 0,2 % Nb сплава CoCrFeMnNi-1,3 % C обеспечивает повышение механических свойств при комнатной температуре и предотвращает термическое разложение при промежуточной температуре. Оно также приводит к выделению карбидов NbC при 700 – 900 °С, что упрочняет ВЭС. При добавлении ниобия в ВЭС демонстрируется превосходное сочетание предела текучести (≈ 1096 МПа) и относительного удлинения (≈ 12 %) после термообработки (отжиг при 700 °С в течение 1 ч). При промежуточной температуре (500 °С) микролегирование ниобием препятствует разложению ГЦК матрицы. В частности, отмечено, что образование хрупкой σ -фазы при промежуточной температуре резко снижается, в то время как рост фаз L1₀ и ОЦК/B2 подавляется [27].

Результаты эксперимента по оценке структурно-фазовых состояний и твердости двух неэквивалентных ВЭС Cantor и Cantor + NbC подтвердили теоретические расчеты методом CALPHAD. Такие расчеты основаны на термодинамических правилах, предполагающих наличие двух твердых растворов с высокой энтропией и ГЦК-кристаллической структурой. Микроскопические наблюдения показали, что микроструктура представляет собой дендритную структуру с сегрегацией железа и марганца в

дендритных участках, а междендритные участки обогащены кобальтом, хромом, никелем. При этом в междендритных областях выявлены богатые ниобием наноразмерные выделения со сферической и овальной морфологией. Дифференциальный термический анализ показал высокую температурную стабильность структуры твердого раствора вплоть до температуры плавления.

Как уже упоминалось, во многих работах отмечается положительная роль фаз Лавеса в повышении механических свойств. Так, в работе [28] прослежена эволюция микроструктуры и механических свойств $(\text{CoCrFeNiMn})_{100-x} \cdot \text{Nb}_x$; $0 \leq x \leq 16$ ат. %) при сжатии. Рост предела текучести от 202 до 1010 МПа отмечается, когда содержание фаз Лавеса и σ увеличиваются от 0 до 42 %.

В обзорной работе [10] сделан обобщающий анализ влияния легирующих элементов на механические свойства ВЭС Cantor.

На рис. 2 показано, как некоторые материалы, такие как алюминий [29], иттрий [30], молибден [31], ванадий [32], титан [33], тантал [34], углерод [35], ниобий [36] влияют на твердость ВЭС Cantor. Видно, что твердость колеблется от 140 до 1100 HV. Значения твердости, рассматриваемые в этих работах, являются самыми высокими для сплавов. Например, максимальная твердость ВЭС CrFeCoNiY_x ($x = 0,3$) составляет 400 МПа. Согласно рис. 2, значения твердости ВЭС увеличиваются с ростом концентрации элементов. Влияние алюминия незначительно отличается от общей закономерности. Упрочнение вторыми фазами и твердорастворное упрочнение в основном ответственны за эффекты упрочнения. Что касается роли ниобия, то в ВЭС CrFeCoNiNb_x твердость возрастает линейно до 712 HV при увеличении x от 0,1 до 0,8. Объемная доля фазы Лавеса увеличивается, что также существенно повышает твердость ВЭС.

Анализ литературных данных показывает, что из-за крайне ограниченного количества публикаций нет единой концепции природы влияния алюминия, цинка, ниобия и других легирующих элементов, идет процесс наполнения информации и ее осмысления. Но то, что научное сообщество уже обратилось в своих исследованиях к этой фундаментальной и практически важной проблеме, свидетельствует об ее актуальности.

Выводы

Выполнен краткий обзор работ отечественных и зарубежных исследователей за последние годы по модифицированию механических свойств сплава Cantor путем легирования. Обсуждены физические механизмы упрочнения.

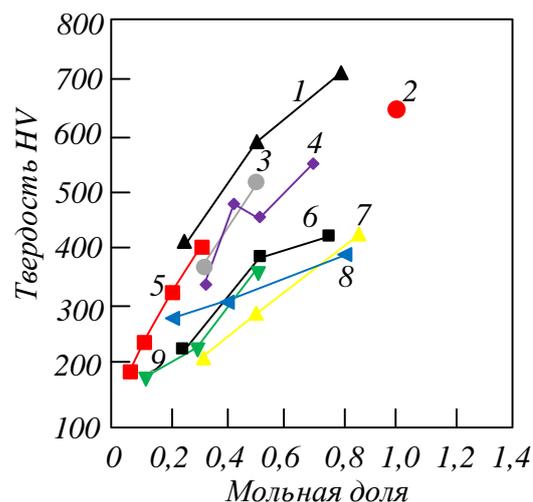


Рис. 2. Влияние мольной доли легирующих элементов на твердость сплава Cantor [10]:

1 – FeCoCrNiNb_x; 2 – FeNiMnCrNiV; 3 – FeCoFeNiTi_x; 4 – FeCoFeNiTa_x; 5 – FeCoCrNiY_x; 6 – FeNiMnCr0,75Al_x; 7 – FeCoCrNiMo_x; 8 – FeCoCrMnNiC_x; 9 – FeCoCrMnNiSn_x.

Fig. 2. The effect of the molar fraction of alloying elements on the microhardness of the Cantor alloy [10]

1 – FeCoCrNiNb_x; 2 – FeNiMnCrNiV; 3 – FeCoFeNiTi_x; 4 – FeCoFeNiTa_x; 5 – FeCoCrNiY_x; 6 – FeNiMnCr0,75Al_x; 7 – FeCoCrNiMo_x; 8 – FeCoCrMnNiC_x; 9 – FeCoCrMnNiSn_x.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy alloys. Springer. *Advanced structured materials*. 2021;107:110. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>
- Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;375-377:213–218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
- Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021;64(4):249–258. EDN: SPVHFX; <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>
- Громов В.Е., Рубанникова Ю.А., Коновалов С.В., Осинцев К.А., Воробьев С.В. Формирование улучшенных механических свойств высокоэнтропийного сплава Cantor. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021;64(8):599–605. EDN: NREFWK; <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-599-605>
- Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Ефимов М.О., Шлярова Ю.А., Панченко И.А., Коновалов С.В. Структура зоны контакта наплавка-подложка, подвергнутой электронно-пучковой обработке. *Письма в журнал технической физики*. 2023; 49(6):26–31. EDN: DZFBKL; <https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.06.54813.19410>

6. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Коновалов С.В., Шугуров В.В., Ефимов М.О., Тересов А.Д., Петрикова Е.А., Панченко И.А. Шлярова Ю.А. Структура и свойства высокоэнтропийного сплава, подвергнутого электронно-ионно-плазменной обработке. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2022;(4):102–116. EDN: FBKTJE. https://doi.org/10.54826/19979258_2022_4_102
7. Senkov O.N., Zhang C., Pilchak A.L., Payton E.J., Woodward C., Zhang F. CALPHAD-aided development of quaternary multi-principal element refractory alloys based on NbTiZr. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;783:729–742. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.325>
8. Menou E., Tancret F., Toda-Caraballo I., Ramstein G., Castany P., Bertrand E., Gautier N., Rivera Díaz-Del-Castillo P.E.J. Computational design of light and strong high entropy alloys (HEA): Obtainment of an extremely high specific solid solution hardening. *Scripta Materialia*. 2018;156:120–123. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.07.024>
9. Tapia A.J.S.E., Yim D., Kim H.S., Lee B.-J. An approach for screening single phase high-entropy alloys using an in-house thermodynamic database. *Intermetallics*. 2018;101:56–63. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2018.07.009>
10. Kumar Soni V., Kumar Sinha A. Effect of alloying elements, phases and heat treatments on properties of high-entropy alloys: A Review. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2023;76(4):897–914. <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02777-1>
11. Kao Yu.F., Chen T.J., Chen S.K., Ye J.V. Microstructure and mechanical property of as-cast, homogenized, and -deformed $Al_xCoCrFeNi$ ($0 \leq x \leq 2$) high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009;488(1):57–64. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.08.090>
12. Fan K.K., Li B.S., Zhang Y. J. Influence of Al and Cu elements on the microstructure and properties of $(FeCrNiCo)Al_xCu_y$ high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014;614:203–210. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.06.090>
13. Moravcik I., Cizek J., Kovacova Z., Nejezchlebova J., Kitzmantel M., Neubauer E., Kubena I., Hornik V., Dlouhy I. Mechanical and microstructural characterization of powder metallurgy CoCrNi medium entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2017;701:370–380. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.06.086>
14. Ge W., Wu B., Wang S., Xu S., Shang C., Zhang Z., Wang Y. Characterization and properties of CuZrAlTiNi high entropy alloy coating obtained by mechanical alloying and vacuum hot pressing sintering. *Advanced Powder Technology*. 2017;28:2556–2563. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.07.006>
15. Karpets M.V., Myslyvchenko O.M., Makarenko O.S., Gorban V.F., Krapivka M.O. Mechanical Properties and Formation of Phases in High-Entropy CrFeNiCuCoAl_x Alloys. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2015;54:344–352. <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9720-9>
16. You D., Yang G., Choa Y.H., Kim J.K. Crack-resistant σ /FCC interfaces in the Fe₄₀Mn₄₀Co₁₀Cr₁₀ high entropy alloy with the dispersed σ -phase. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;831:142039. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142039>
17. Cao Z.H., Zhai G.Y., Ma Y.J., Ding L.P., Li P.F., Liu H.L., Lu H.M., Cai Y.P., Wang G.J., Meng X.K. Evolution of interfacial character and its influence on strain hardening in dual-phase high entropy alloys at nanoscale. *International Journal of Plasticity*. 2021;145:103081. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2021.103081>
18. Nong Zh., Zhu J., Yang X., Yu H., Lai Z., Wuha J. Effects of annealing on microstructure, mechanical and electrical properties of AlCrCuFeMnTi high entropy alloy. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2013;28:1196–1200. <https://doi.org/10.1007/s11595-013-0844-9>
19. Chao Q., Joseph J., Annasamy M., Hodgson P., Barnett M.R., Fabijanic D. Al_xCoCrFeNi high entropy alloys from metal scrap: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024;976:173002. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.173002>
20. Colombini E., Garzoni A., Giovanardi R., Veronesi P., Casagrande A. Al, Cu and Zr addition to high entropy alloys: The effect on recrystallization temperature. *Materials Science Forum*. 2018;941:1137–1142. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.941.1137>
21. 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;935(2):168166. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168166>
22. Huo W., Zhou H., Fang F., Xie Z., Jiang J. Microstructure and mechanical properties of CoCrFeNiZr_x eutectic high-entropy alloys. *Materials & Design*. 2017;134:226–233. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.08.030>
23. Campari E.G., Casagrande A., Colombini E., Gualtieri M.L., Veronesi P. The effect of Zr

- addition on melting temperature, microstructure, recrystallization and mechanical properties of a Cantor high entropy alloy. *Materials*. 2021;14(20):5994.
<https://doi.org/10.3390/ma14205994>
24. Liu W.H., He J.Y., Huang H.L., Wang X., Lu Z.P., Liu C.T. Effects of Nb additions on the microstructure and mechanical property of CoCrFeNi high-entropy alloys. *Intermetallics*. 2015;60:1–8.
<https://doi.org/10.1016/J.INTERMET.2015.01.004>
 25. He F., Wang Z., Cheng P., Wang Q., Li J., Dang Y., Wang J., Liu C.T. Designing eutectic high entropy alloys of CoCrFeNiNb_x. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;656:284–289.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.153>
 26. Ma S.G., Zhang Y. Effect of Nb addition on the microstructure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2012;532:480–486.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.10.110>
 27. Abbasi E., Dehghani K. Phase prediction and microstructure of centrifugally cast non-equiatom Co–Cr–Fe–Mn–Ni(Nb,C) high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;783:292–299.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.329>
 28. Qin G., Li Z., Chen R., Zheng H., Fan C., Wang L., Su Y., Ding H., Guo J., Fu H. CoCrFeMnNi high-entropy alloys reinforced with Laves phase by adding Nb and Ti elements. *Journal of Materials Research*. 2019;34(6):1–10.
<https://doi.org/10.1557/jmr.2018.468>
 29. Li R., Zhang V., Zhang Yu., Liao P.K. The effects of phase transformation on the microstructure and mechanical behavior of FeNiMnCr₇₅Al_x high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;138(725):138–147
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.04.007>
 30. Zhang L.J., Zhang M.D., Zhou Z., Fan J.T., Cui P., Yu P. F., Jing C., Ma M. Z., Liao P.K., Li G., Liu R.P. Effects of rare-earth element, Y, additions on the microstructure and mechanical properties of CoCrFeNi high entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;437(725):437–446
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.04.058>
 31. Shun T., Chang L., Shiu M. Microstructure and mechanical properties of multiprincipal component CoCrFeNiMo_x alloys. *Materials Characterization*. 2012;70:63–67.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.05.005>
 32. Salishchev G.A., Tikhonovsky M.A., Shaysultanov D.G., Stepanov N.D., Kuznetsov A.V., Kolodiy I.V., Tortika A.S., Senkov O. N. Effect of Mn and V on structure and mechanical properties of high-entropy alloys based on CoCrFeNi system. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014;591:11–21.
<http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.12.210>
 33. Shun T.T., Chang L.Y., Shiu M.H. Microstructures and mechanical properties of multiprincipal component CoCrFeNiTi_x alloys. *Materials Science and Engineering*. 2012;556:170–174.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.075>
 34. Ai C., He F., Guo M., Zhou J., Wang Z., Yuan Z., Guo Y., Liu Y., Liu L. Alloy design, micromechanical and macromechanical properties of CoCrFeNiTa_x eutectic high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;735:2653–2662.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.015>
 35. Nagase T., Kakeshita T., Matsumura K., Nakazawa K., Furuya S., Ozoe N., Yoshino K. Development of Fe–Co–Cr–Mn–Ni–C high entropy cast iron (HE cast iron) available for casting in air atmosphere. *Materials and Design*. 2019;184:108172.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108172>
 36. He F., Wang Z., Cheng P., Wang Q., Li J., Dang Y., Wang J., Liu C.T. Designing eutectic high entropy alloys of CoCrFeNiNb_x. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;656:284–289.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.153>

REFERENCES

1. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy alloys. Springer. *Advanced structured materials*. 2021;107:110.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>
2. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatom multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;375-377:213–218.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
3. Osintsev K.A., Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. High-entropy alloys: Structure, mechanical properties, deformation mechanisms and application. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(4):249–258. (In Russ.). EDN: SPVHFX;
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>
4. Gromov V.E., Rubannikova Yu.A., Konovalov S.V., Osintsev K.A., Vorob'ev S.V. Generation of increased mechanical properties of Cantor high entropy alloy. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(8):599-605. (In Russ.). EDN: NREFWK.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-599-605>
5. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Efimov M.O., Shlyarova Yu.A., Panchenko I.A., Konovalov S.V. The structure of the surfacing contact zone is a sub-

- strate subjected to electron beam processing. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2023;49(6):26–31. (In Russ.). EDN: DZFBKL; <https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.06.54813.19410>
6. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kononov S.V., Shugurov V.V., Efimov M.O., Teresov A.D., Petrikova E.A., Panchenko I.A. Shlyarova Yu.A. Structure and properties of a high-entropy alloy subjected to electron-ion-plasma treatment. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2022;(4):102–116. (In Russ.). EDN: FBKTJE; https://doi.org/10.54826/19979258_2022_4_102
 7. Senkov O.N., Zhang C., Pilchak A.L., Payton E.J., Woodward C., Zhang F. CALPHAD-aided development of quaternary multi-principal element refractory alloys based on NbTiZr. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;783:729–742. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.325>
 8. Menou E., Tancret F., Toda-Caraballo I., Ramstein G., Castany P., Bertrand E., Gautier N., Rivera Díaz-Del-Castillo P.E.J. Computational design of light and strong high entropy alloys (HEA): Obtainment of an extremely high specific solid solution hardening. *Scripta Materialia*. 2018;156:120–123. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.07.024>
 9. Tapia A.J.S.E., Yim D., Kim H.S., Lee B.-J. An approach for screening single phase high-entropy alloys using an in-house thermodynamic database. *Intermetallics*. 2018;101:56–63. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2018.07.009>
 10. Kumar Soni V., Kumar Sinha A. Effect of alloying elements, phases and heat treatments on properties of high-entropy alloys: A Review. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2023;76(4):897–914 <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02777-1>
 11. Kao Yu.F., Chen T.J., Chen S.K., Ye J.V. Microstructure and mechanical property of as-cast, -homogenized, and -deformed $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ ($0 \leq x \leq 2$) high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009;488(1):57–64. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.08.090>
 12. Fan K.K., Li B.S., Zhang Y.J. Influence of Al and Cu elements on the microstructure and properties of $(\text{FeCrNiCo})\text{Al}_x\text{Cu}_y$ high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014;614: 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.06.090>
 13. Moravcik I., Cizek J., Kovacova Z., Nejezchlebova J., Kitzmantel M., Neubauer E., Kubena I., Hornik V., Dlouhy I. Mechanical and microstructural characterization of powder metallurgy CoCrNi medium entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2017;701:370–380. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.06.086>
 14. Ge W., Wu B., Wang S., Xu S., Shang C., Zhang Z., Wang Y. Characterization and properties of CuZrAlTiNi high entropy alloy coating obtained by mechanical alloying and vacuum hot pressing sintering. *Advanced Powder Technology*. 2017;28:2556–2563. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.07.006>
 15. Karpets M.V., Myslyvchenko O.M., Makarenko O.S., Gorban V.F., Krapivka M.O. Mechanical Properties and Formation of Phases in High-Entropy CrFeNiCuCoAl_x Alloys. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2015;54:344–352. <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9720-9>
 16. You D., Yang G., Choa Y.H., Kim J.K. Crack-resistant σ /FCC interfaces in the Fe₄₀Mn₄₀Co₁₀Cr₁₀ high entropy alloy with the dispersed σ -phase. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;831:142039. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142039>
 17. Cao Z.H., Zhai G.Y., Ma Y.J., Ding L.P., Li P.F., Liu H.L., Lu H.M., Cai Y.P., Wang G.J., Meng X.K. Evolution of interfacial character and its influence on strain hardening in dual-phase high entropy alloys at nanoscale. *International Journal of Plasticity*. 2021;145:103081. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2021.103081>
 18. Nong Zh., Zhu J., Yang X., Yu H., Lai Z., Wuha J. Effects of annealing on microstructure, mechanical and electrical properties of AlCrCuFeMnTi high entropy alloy. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed*. 2013;28:1196–1200. <https://doi.org/10.1007/s11595-013-0844-9>
 19. Chao Q., Joseph J., Annasamy M., Hodgson P., Barnett M.R., Fabijanic D. Al_xCoCrFeNi high entropy alloys from metal scrap: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024;976:173002. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.173002>
 20. Colombini E., Garzoni A., Giovanardi R., Veronesi P., Casagrande A. Al, Cu and Zr addition to High Entropy Alloys: The Effect on Recrystallization Temperature. *Materials Science Forum*. 2018;941:1137–1142. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.941.1137>
 21. 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;935(2):168166. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168166>
 22. Huo W., Zhou H., Fang F., Xie Z., Jiang J. Microstructure and mechanical properties of

- CoCrFeNiZr_x eutectic high-entropy alloys. *Materials & Design*. 2017;134:226–233.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.08.030>
23. Campari E.G., Casagrande A., Colombini E., Gualtieri M. L., Veronesi P. The effect of Zr addition on melting temperature, microstructure, recrystallization and mechanical properties of a Cantor high entropy alloy. *Materials*. 2021;14(20):5994.
<https://doi.org/10.3390/ma14205994>
 24. Liu W.H., He J.Y., Huang H.L., Wang X., Lu Z.P., Liu C.T. Effects of Nb additions on the microstructure and mechanical property of CoCrFeNi high-entropy alloys. *Intermetallics*. 2015;60:1–8.
<https://doi.org/10.1016/J.INTERMET.2015.01.004>
 25. He F., Wang Z., Cheng P., Wang Q., Li J., Dang Y., Wang J., Liu C.T. Designing eutectic high entropy alloys of CoCrFeNiNb_x. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;656:284–289.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.153>
 26. Ma S.G., Zhang Y. Effect of Nb addition on the microstructure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2012; 532: 480–486.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.10.110>
 27. Abbasi E., Dehghani K. Phase prediction and microstructure of centrifugally cast non-equiatomic Co–Cr–Fe–Mn–Ni(Nb,C) high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;783:292–299.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.329>
 28. Qin G., Li Z., Chen R., Zheng H., Fan C., Wang L., Su Y., Ding H., Guo J., Fu H. CoCrFeMnNi high-entropy alloys reinforced with Laves phase by adding Nb and Ti elements. *Journal of Materials Research*. 2019;34(6):1–10.
<https://doi.org/10.1557/jmr.2018.468>
 29. Li R., Zhang V., Zhang Yu., Liao P.K. The effects of phase transformation on the microstructure and mechanical behavior of FeNiMnCr₇₅Al_x high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;138(725):138–147.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.04.007>
 30. Zhang L.J., Zhang M.D., Zhou Z., Fan J.T., Cui P., Yu P. F., Jing C., Ma M. Z., Liao P.K., Li G., Liu R.P. Effects of rare-earth element, Y, additions on the microstructure and mechanical properties of CoCrFeNi high entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;437(725):437–446
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.04.058>
 31. Shun T., Chang L., Shiu M. Microstructure and mechanical properties of multiprincipal component CoCrFeNiMo_x alloys. *Materials Characterization*. 2012;70:63–67.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.05.005>
 32. Salishchev G.A., Tikhonovsky M.A., Shaysultanov D.G., Stepanov N.D., Kuznetsov A.V., Kolodiy I.V., Tortika A.S., Senkov O. N. Effect of Mn and V on structure and mechanical properties of high-entropy alloys based on CoCrFeNi system. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014;591:11–21.
<http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.12.210>
 33. Shun T.T., Chang L.Y., Shiu M.H. Microstructures and mechanical properties of multiprincipal component CoCrFeNiTi_x alloys. *Materials Science and Engineering*. 2012;556:170–174.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.075>
 34. Ai C., He F., Guo M., Zhou J., Wang Z., Yuan Z., Guo Y., Liu Y., Liu L. Alloy design, micromechanical and macromechanical properties of CoCrFeNiTa_x eutectic high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;735:2653–2662.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.015>
 35. Nagase T., Kakeshita T., Matsumura K., Nakazawa K., Furuya S., Ozoe N., Yoshino K. Development of Fe–Co–Cr–Mn–Ni–C high entropy cast iron (HE cast iron) available for casting in air atmosphere. *Materials and Design*. 2019;184:108172.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108172>
 36. He F., Wang Z., Cheng P., Wang Q., Li J., Dang Y., Wang J., Liu C.T. Designing eutectic high entropy alloys of CoCrFeNiNb_x. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;656:284–289.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.153>

Сведения об авторах:

Михаил Олегович Ефимов, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: moefimov@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4890-3730

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343
SPIN-код: 2834-4090

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: konovalov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0003-4809-8660
SPIN-код: 4391-7210

Ирина Алексеевна Панченко, к.т.н., доцент, заведующий научной лаборатории электронной микро-

скопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: i.r.i.ss@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-1631-9644

SPIN-код: 4253-6679

Александр Петрович Семин, к.т.н., старший научный сотрудник, доцент кафедры инженерных конструкций, строительных технологий и материалов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: syomin53@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3989-7420

SPIN-код: 3170-1385

Information about the authors:

Mikhail O. Efimov, Candidate of the Department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University

E-mail: moefimov@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4890-3730

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Department of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-5147-5343

SPIN-код: 2834-4090

Sergei V. Konovalov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University

E-mail: konovalov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4809-8660

SPIN-код: 4391-7210

Irina A. Panchenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Scientific Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

E-mail: i.r.i.ss@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-1631-9644

SPIN-код: 4253-6679

Aleksandr P. Semin, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Engineering Structures, Building Technologies and Materials, Siberian State Industrial University

E-mail: syomin53@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3989-7420

SPIN-код: 3170-1385

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 06.10.2023

После доработки 23.05.2024

Принята к публикации 27.05.2024

Received 06.10.2023

Revised 23.05.2024

Accepted 27.05.2024