

---

Научная статья

УДК 669.017.13

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-3-14

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА НА БАЗЕ СИСТЕМЫ ЛЕГИРОВАНИЯ Ni–Cr–Co ПОСЛЕ ВАКУУМНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ВЫПЛАВКИ

И.И. Власов<sup>1</sup>, Г.С. Севальнев<sup>1</sup>, В.С. Климов<sup>1</sup>, А.М. Рогалев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Проведены исследования микроструктуры и фазового состава энтропийного сплава на базе системы легирования Ni–Cr–Co с различными соотношениями базовых и легирующих элементов после вакуумной индукционной выплавки и последующей разливки в тигель при температуре 200 °С. Установлено, что при эквимолярном соотношении элементов формируется твердый раствор с более высокой энтропией смешения, а введение дополнительных легирующих элементов приводит к формированию карбидов и интерметаллидов.

**Ключевые слова:** энтропийные сплавы, легирование, структура, фазовый состав, твердость, эквимолярность

**Для цитирования:** Власов И.И., Севальнев Г.С., Климов В.С., Рогалев А.М. Исследование структуры и фазового состава энтропийного сплава на базе системы легирования Ni–Cr–Co после вакуумной индукционной выплавки // Труды ВИАМ. 2024. № 9 (139). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-3-14.

Scientific article

## STUDY OF THE STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF AN ENTROPY ALLOY BASED ON THE Ni–Cr–Co ALLOYING SYSTEM AFTER VACUUM INDUCTION MELTING

I.I. Vlasov<sup>1</sup>, G.S. Sevalnev<sup>1</sup>, V.S. Klimov<sup>1</sup>, A.M. Rogalev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The work carried out studies of the microstructure and phase composition of an entropy alloy based on the Ni–Cr–Co alloying system with different ratios of base and alloying elements after vacuum induction melting and subsequent casting into a crucible at a temperature of 200 °C. It has been established that with an equimolar ratio of elements, a solid solution with a higher entropy of mixing is formed, and the introduction of additional alloying elements leads to the formation of carbides and intermetallic compounds.

**Keywords:** entropy alloys, alloying, structure, phase composition, hardness, equimolar

**For citation:** Vlasov I.I., Sevalnev G.S., Klimov V.S., Rogalev A.M. Study of the structure and phase composition of an entropy alloy based on the Ni–Cr–Co alloying system after vacuum induction melting. *Trudy VIAM*, 2024, no. 9 (139), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-3-14.

### **Введение**

Большинство современных конструкционных сплавов базируются на основном матричном элементе, в который добавляются дополнительные легирующие элементы с разной степенью растворимости и механизмом взаимодействия с основным элементом, повышающие уровень физико-механических характеристик [1, 2]. Помимо легирования твердого раствора, легирующие элементы способны образовывать избыточные фазы, такие как карбиды, нитриды, интерметаллиды и т. д.

В конце XX в. велись активные исследования сплавов на основе энтропийного подхода, т. е. оценивалась энтропия системы и достигалась ее максимальная степень. В начале 2000-х гг. разными научными коллективами опубликованы серии работ [3–8], которые положены в основу современных исследований по энтропийным сплавам, что привело к формированию нового научного направления и нового класса материалов, впоследствии названных высокоэнтропийными сплавами (ВЭС). В настоящее время это достаточно перспективное направление развития материаловедческой отрасли.

Основа разработок высокоэнтропийных сплавов – смешивание в эквимолярном или эквимольном соотношении элементов. Для достижения высокой энтропии системы количество элементов должно быть не менее пяти, при этом содержание каждого элемента может составлять от 5 до 35 % (по массе).

Высокоэнтропийные сплавы представляют повышенный интерес для исследователей во всем мире, так как за последние 20 лет опубликовано более 4000 значимых работ в этой области, в части которых рассматриваются особенности получения таких сплавов, формирования их структуры, свойств и изменения фазового состава [9–16].

Особенность высокоэнтропийных сплавов в отличие от традиционных – отсутствие матричного базового компонента, на основе которого формируются основные механизмы обеспечения структуры и различных характеристик. Следовательно, разделить элементы состава сплава на основной (базовый) и вспомогательные (легирующие) при эквимолярном содержании этих элементов невозможно. Соответственно, в разупорядоченном твердом растворе все компоненты системы имеют одинаковую вероятность нахождения в узлах кристаллической решетки, а также вероятность формирования химических соединений с другими компонентами в случае легирования базовой системы дополнительными элементами.

Разработка сплавов с эквимолярным соотношением элементов с более чем пятью компонентами представляла сложности при прогнозировании конечной структуры, так как все модели расчета новых материалов базировались на матричной системе, которая в большинстве случаев легирования образовывала хрупкие интерметаллидные, карбидные или нитридные соединения легирующих элементов системы. Преимущественная идея энтропийного подхода конструирования материалов – необходимость получения однофазной структуры в виде разупорядоченного твердого раствора замещения.

Сплавы на основе переходных элементов с незавершенной  $3d$ -орбиталью в настоящее время являются одними из наиболее изученных энтропийных сплавов с высокой степенью энтропии. Благодаря высоким механическим, физическим и триботехническим характеристикам, коррозионной стойкости, а также возможности упрочнения при механическом воздействии эта группа материалов вызывает особый интерес [6, 7, 17–19].

При высокой энтропии смешивания мультикомпонентной системы имеется тенденция к получению повышенных механических характеристик и устойчивости к различным агрессивным средам, а также температурному воздействию. Особо следует отметить момент, связанный с изучением и возможностью применения высокоэнтропийных сплавов, – это их уникальный комплекс характеристик, которого также можно достичь при реализации высоких прочности, пластичности, износо- и коррозионной стойкости [5, 6, 17].

В рамках данной работы проведены исследования формирования структуры и фазового состава энтропийного сплава базовой системы легирования Ni–Cr–Co с учетом эквиатомного и эквимассового соотношений, а также дополнительного легирования.

### Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали энтропийные сплавы системы Ni–Co–Cr без и с добавлением легирующих элементов, а также с разным соотношением базовых элементов данной системы легирования для достижения эквиатомного состояния. Выплавку слитков проводили в вакуумно-индукционной печи при нагреве в температурном диапазоне 1500–1600 °С. Разлив жидкого расплава производили в тигель, нагретый до температуры 200 °С, с целью исключения появления трещин, снижения усадки металла и объема усадочной раковины в теле слитка. Масса слитка после выплавки составила 1 кг.

Оценку энтропии бинарных систем проводили с применением открытого программного обеспечения Open-Calphad.

Металлографический анализ структур энтропийных сплавов после выплавки проводили методами: световой микроскопии на оптическом конфокальном инвертированном оптическом микроскопе при увеличении  $\times 500$  и электронной микроскопии в режиме вторичных и обратноотраженных электронов с использованием сканирующего электронного микроскопа при увеличениях  $\times (500–1000)$ . Анализ распределения легирующих элементов проводили с использованием приставки для микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) методом энергодисперсионного картирования при ускоряющем напряжении 15 кВ, расшифровку дифрактограмм – с использованием программного обеспечения Aztec.

Стехиометрический состав частиц оценивали по МРСА с применением формулы

$$\frac{Me_{ar}}{C_{ar}(N_{ar})} = \frac{\% Me_i / A_i}{\% C(\% N) / A_C(A_N)},$$

где  $Me_i$  – содержание элемента в карбиде (нитриде), % (по массе);  $A_i$  – атомная масса  $i$ -го элемента;  $\% C(\% N)$  – содержание углерода (азота) в карбиде (нитриде), % (по массе);  $A_C(A_N)$  – атомная масса углерода (азота).

Идентификацию соединения и стехиометрического состава анализировали в соответствии с открытой базой данных по существованию химических соединений при нормальных условиях [20].

Рентгеновскую съемку для определения фазового состава энтропийного сплава выполняли на дифрактометре с вертикально расположенным гониометром высокого разрешения модульной конструкции в  $Cu K_\alpha$ -излучении. Расшифровку дифрактограмм проводили с применением встроенного программного обеспечения по общепринятым методикам.

Расчет изменения содержания избыточных фаз в сплавах с разным соотношением химических элементов в составе сплава проводили путем обработки изображений методом монохроматической бинаризации. Количественный подсчет проводили в программе с открытым исходным кодом imageJ.

Твердость НВ определяли методом Бринелля с помощью твердомера при нагрузке 187,5 кг при диаметре шарика 2,5 мм в соответствии с ГОСТ 9012–59.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Результаты и обсуждение

Результаты расчетов степени энтропии сплава в программном комплексе Open-Calphad показали, что наибольшая энтропия бинарной системы Ni–Cr достигается в результате эквиатомного соотношения компонентов системы (рис. 1).

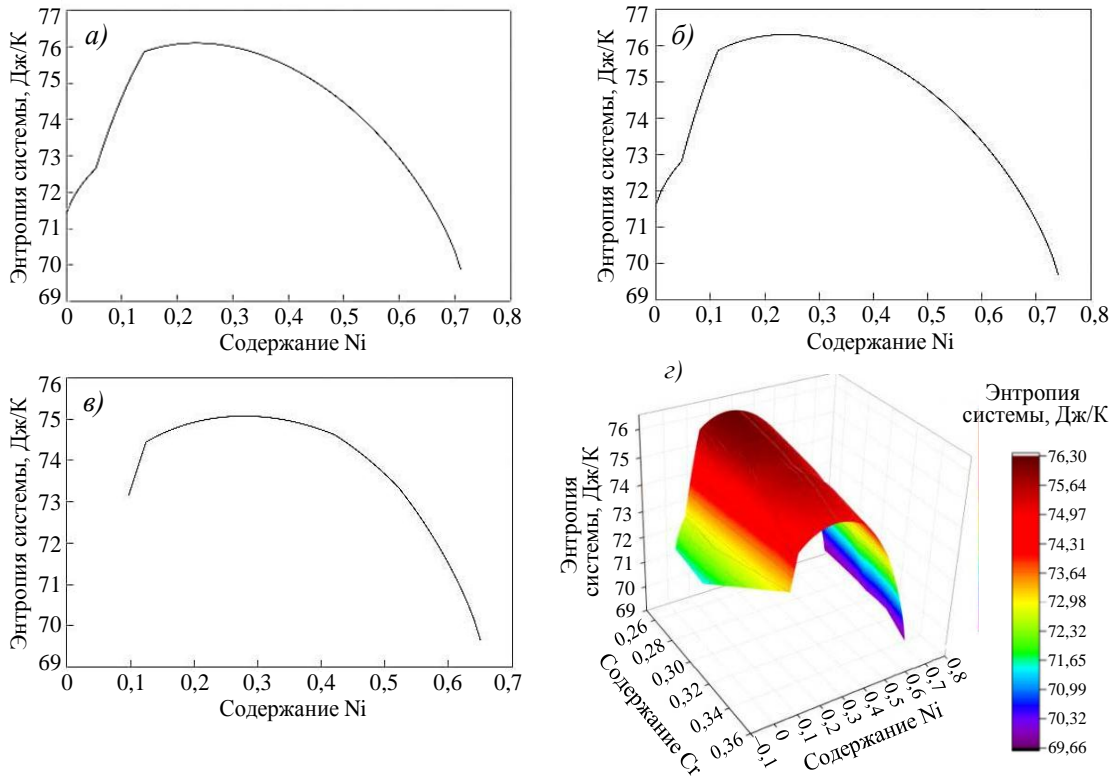


Рис. 1. Расчеты энтропии бинарной системы Ni–Cr в программном комплексе Open-Calphad при изменении содержания Ni (в мольных долях) при заданном содержании Cr (0,26 (а); 0,29 (б); 0,35 (в)) и изменение энтропии системы при взаимном изменении содержания Ni и Cr (г)

На основе расчетов для оценки формирования и изменения структуры выплавлены базовые композиции системы Ni–Co–Cr в двух вариантах при равном соотношении элементов:

- по массовым долям  $33\text{Ni}-33\text{Co}-33\text{Cr}$  – эквимассовый состав;
- по молярной массе  $\text{Ni}_{33}\text{Co}_{33}\text{Cr}_{33}$  – эквиатомный состав.

Металлографический анализ полученных образцов показал, что выплавка сплава по элементам в равных массовых долях приводит к образованию твердого раствора и соединений легирующих элементов (рис. 2, а). Обеспечение выплавки в равных молярных долях за счет повышения степени энтропии смешения приводит к снижению доли соединений легирующих элементов на 30 % (рис. 2, б).

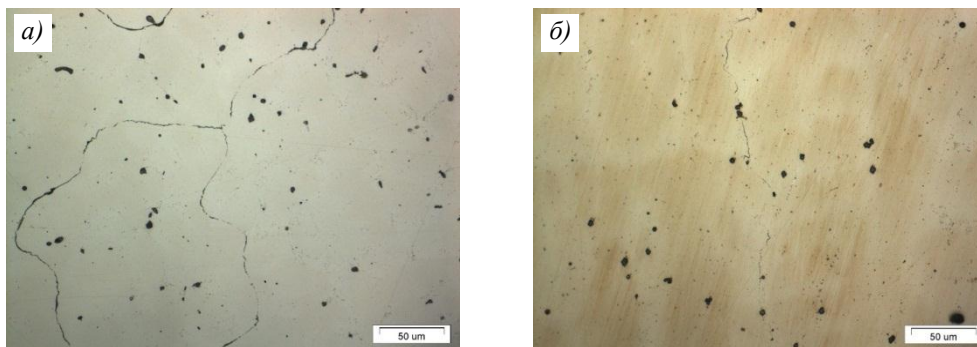


Рис. 2. Микроструктуры ( $\times 500$ ) энтропийного сплава на базе системы легирования Ni–Cr–Co эквимассового (а) и эквиатомного составов (б)

Химический анализ с применением электронной микроскопии сформировавшихся в структуре фаз показал, что в основном данными фазами являются оксиды хрома (рис. 3), однако при выплавке эквимассового состава на границах зерен дополнительно формируются интерметаллидные фазы (рис. 4). В соответствии с существующей открытой базой данных химических соединений и по результатам анализа химического состава полученных фаз наиболее вероятной стехиометрией данного интерметаллида является  $Ni_3Cr$ . В эквиатомном составе данных фаз по границам зерен не обнаружено, что также косвенно доказывает более высокую энтропию смешения легирующих элементов в расплаве с последующим формированием однородного твердого раствора.

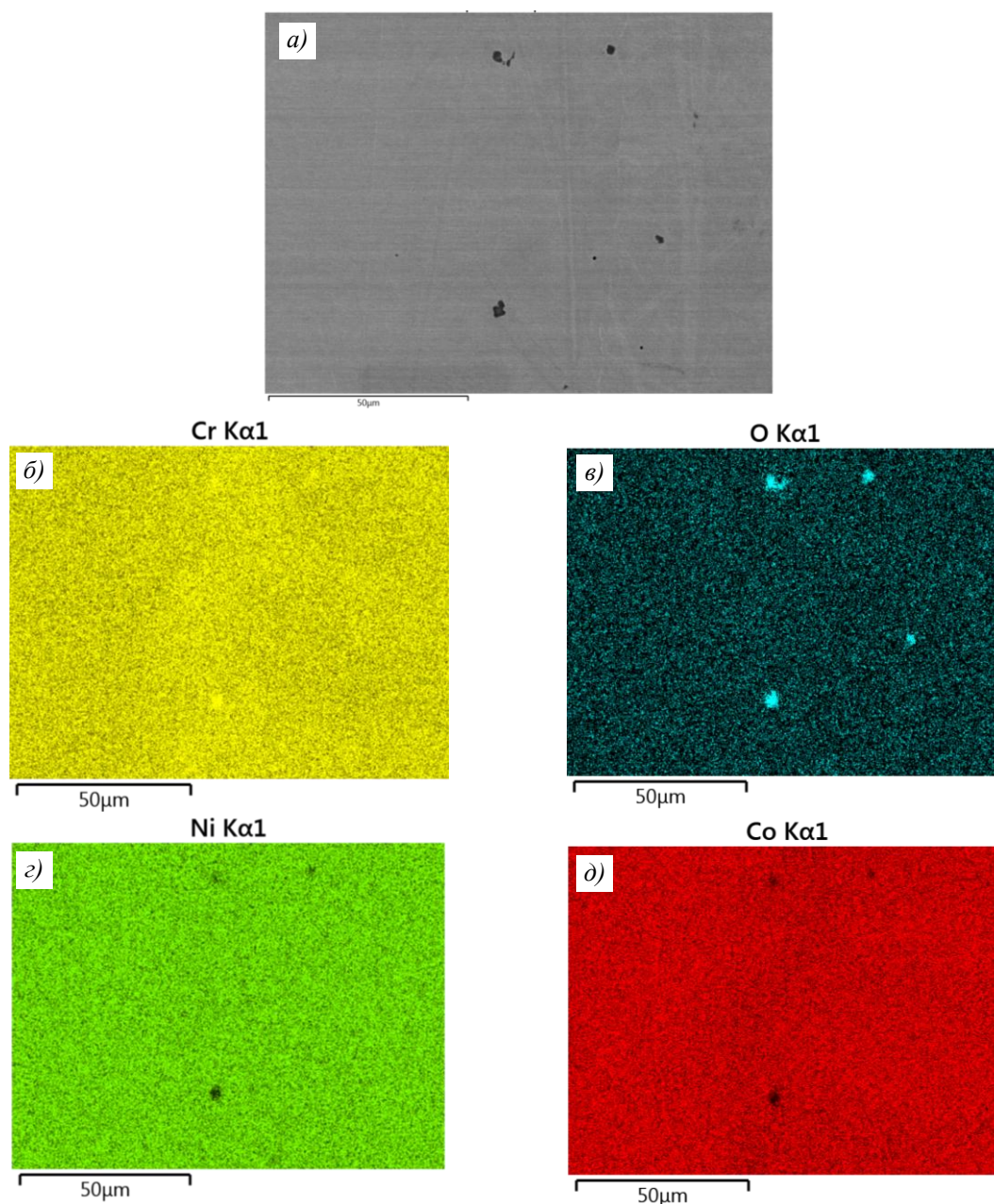


Рис. 3. Электронное изображение микроструктуры эквимассового энтропийного сплава на базе системы легирования Ni–Cr–Co (*a*,  $\times 500$ ) и энергодисперсионные карты элементов: *b* – Cr; *в* – O; *г* – Ni; *д* – Co

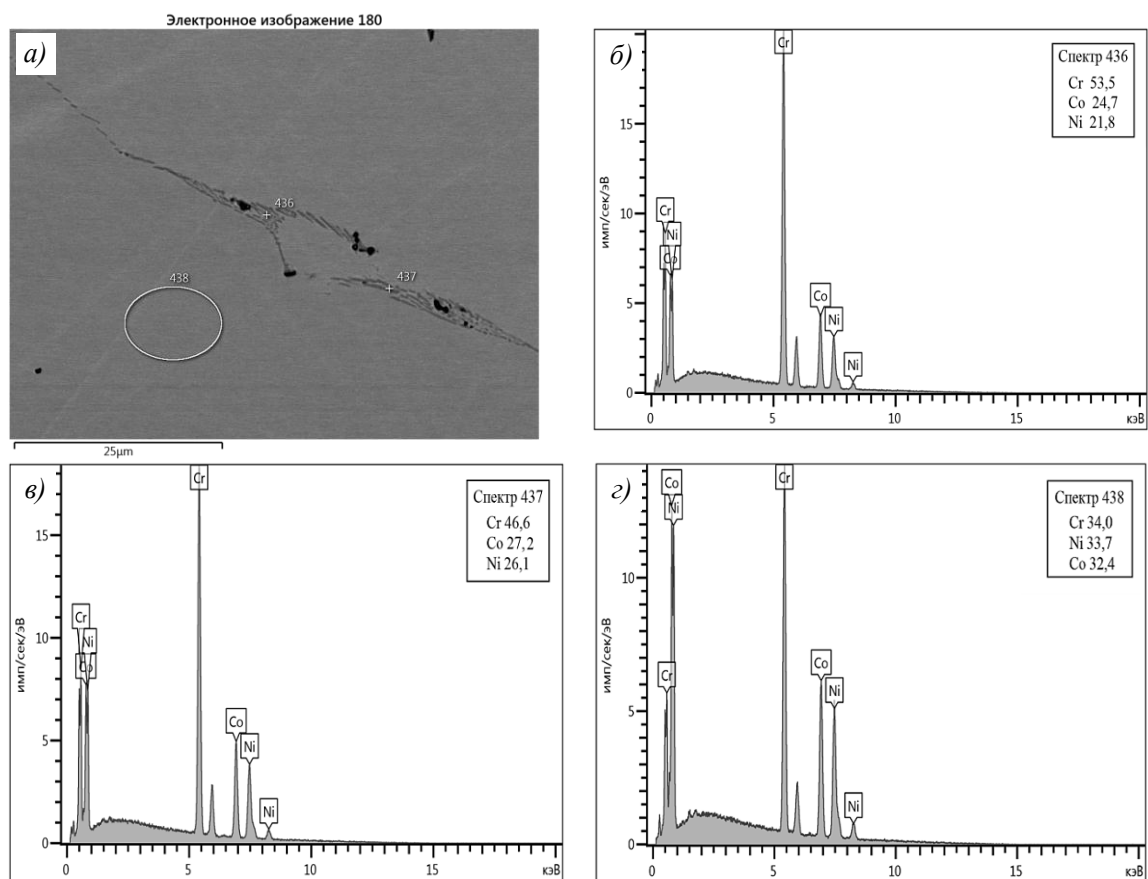


Рис. 4. Электронное изображение микроструктуры эквимассового энтропийного сплава на базе системы легирования Ni–Cr–Co ( $a$ ,  $\times 1000$ ) и энергодисперсионные спектры характеристического рентгеновского излучения фаз:  $b$ ,  $c$  – интерметаллиды на основе хрома;  $d$  – твердый раствор

Анализ фазового состава с применением рентгеноструктурного анализа (рис. 5) позволил установить, что в обоих случаях присутствует твердый раствор, при этом интенсивность дифракционных линий в эквиатомном состоянии ниже, чем в эквимассовом. Это также может подтверждать более высокую энтропию смешения в эквиатомном составе, чем эквимассовом.

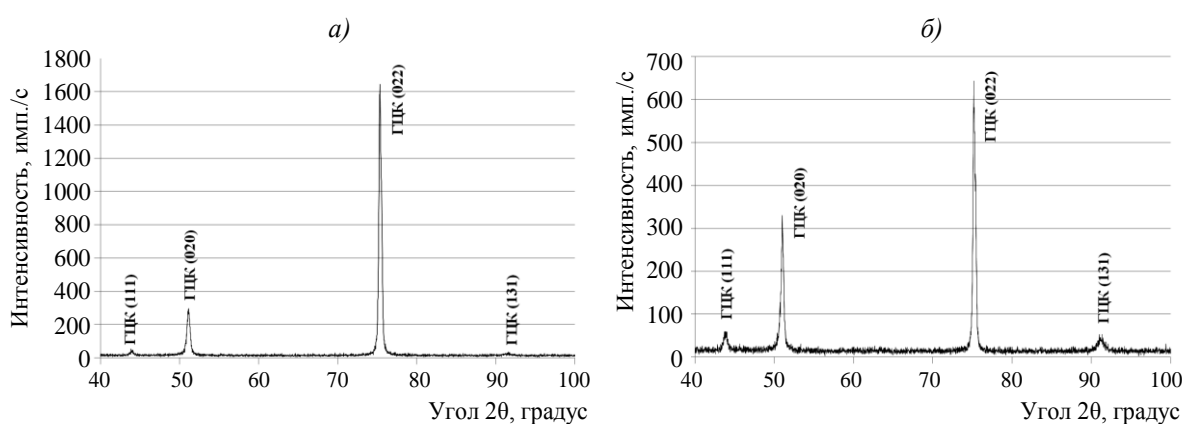


Рис. 5. Дифрактограммы энтропийного сплава на базе системы легирования Ni–Cr–Co эквимассового ( $a$ ) и эквиатомного составов ( $b$ ) (ГЦК – гранецентрированная кубическая решетка)

Измерения твердости полученной структуры также позволили установить, что в эквимассовом составе формируется более высокая твердость, чем в эквиатомном (рис. 6). С одной стороны, это может быть связано с тем, что в эквиатомном составе массовое содержание хрома меньше на 4 % и отсутствуют интерметаллиды, которые могут повышать твердость сплава. С другой стороны, меньшие значения твердости могут свидетельствовать о более равномерном распределении базовых элементов в общей кристаллической решетке, в связи с чем происходит ее меньшее искажение.

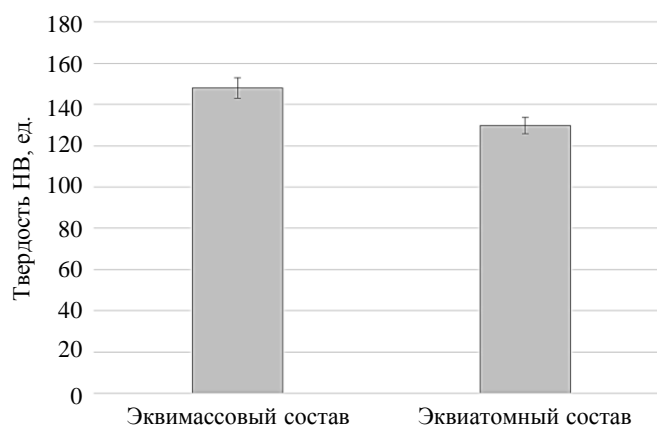


Рис. 6. Результаты измерения твердости энтропийного сплава на базе системы легирования Ni–Cr–Co

Анализ полученных результатов показал, что в эквиатомном составе формируется более равномерный твердый раствор с меньшим содержанием включений хрома, в связи с этим для оценки изменения структуры выбрано эквиатомное базовое соотношение элементов, в которое добавлены дополнительные легирующие элементы (Al, Ti, Nb, Mo, W, C, B, Re) с общим массовым содержанием 6 %, обеспечивающие упрочнение твердого раствора.

Результаты металлографического анализа после выплавки показали, что в такой композиции сплава формируется твердый раствор с большим количеством включений (рис. 7).

Данными включениями по границе и телу зерна являются карбиды на основе ниобия (Nb, Ti)C, а также смесь частиц, таких как карбидные включения и интерметаллиды на основе хрома (рис. 8).

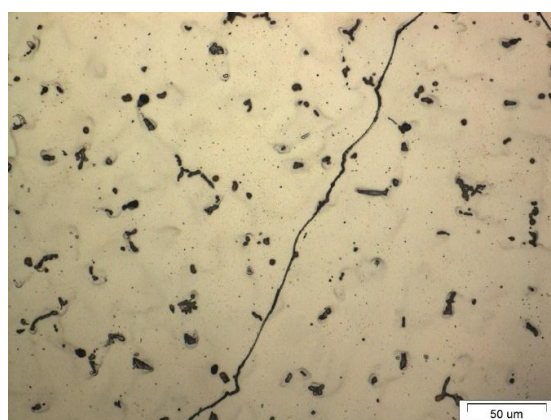


Рис. 7. Микроструктура ( $\times 500$ ) эквиатомного энтропийного сплава на базе системы легирования Ni–Cr–Co с дополнительными легирующими элементами

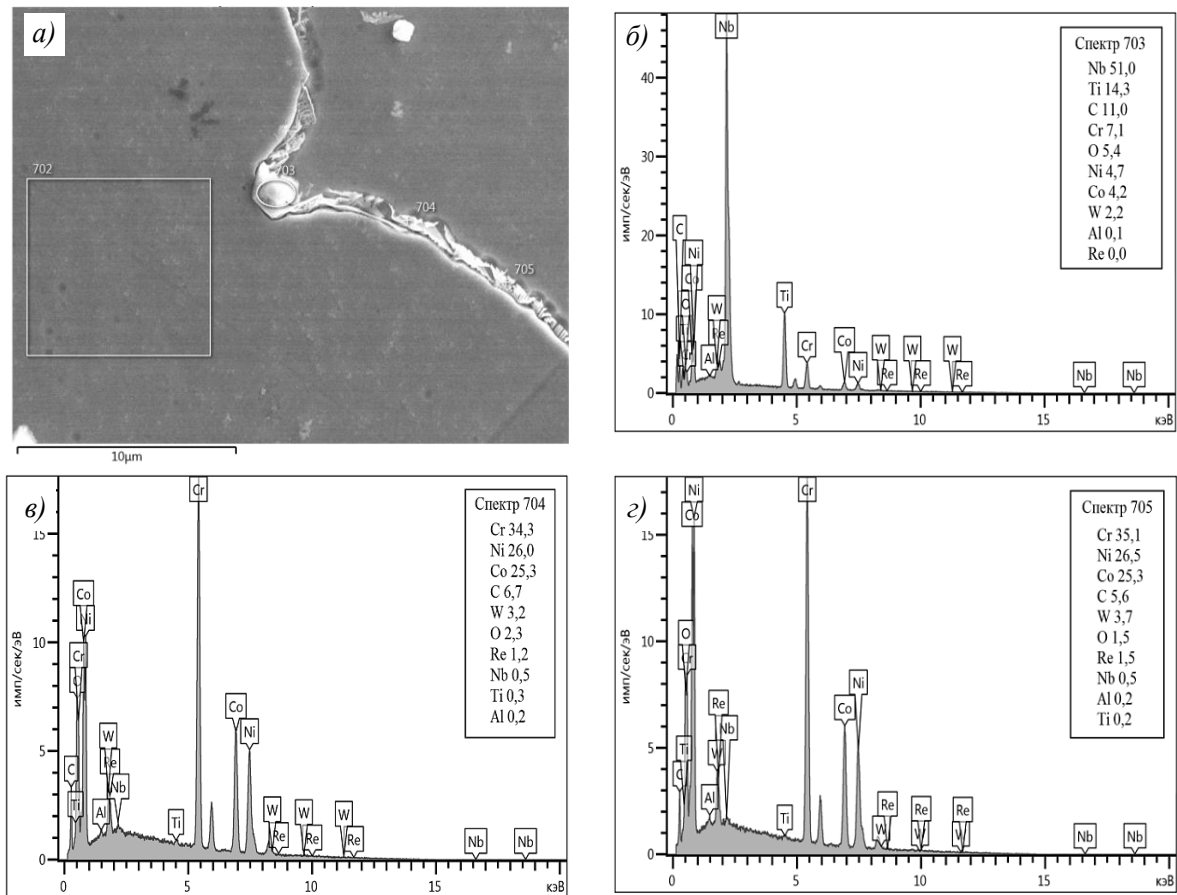


Рис. 8. Электронное изображение микроструктуры энтропийного сплава на базе системы легирования Ni–Cr–Co (а,  $\times 1000$ ) и энергодисперсионные спектры характеристического рентгеновского излучения карбидов и интерметаллидов легирующих элементов (б–д)

Формирование большого количества включений связано со скоростью кристаллизации расплава при вакуумной индукционной выплавке с последующим охлаждением в подогретом тигле и может иметь как положительное, так и отрицательное значение. С точки зрения обеспечения характеристик длительной прочности и ползучести при высоких температурах большое содержание включений по телу зерен, а также по их границам будет препятствовать реализации механизмов разупрочнения и деформации, что может обеспечить высокий уровень свойств получаемого материала. Однако при комнатной температуре такое распределение частиц может приводить к реализации охрупчивания в процессе механического нагружения, из-за чего не достигаются высокие прочностные и пластические характеристики.

Рентгеноструктурный анализ также показал формирование твердого раствора при кристаллизации из расплава (рис. 9). Повышенная интенсивность дифракционных пиков, по сравнению с эквивалентными и эквиатомными составами, свидетельствует о повышенной насыщенности твердого раствора легирующими элементами.

С помощью дюрOMETрического анализа установлено, что твердость эквиатомного состава с дополнительным легированием на 15 % больше по сравнению с эквивалентным сплавом и на 30 % больше по сравнению с эквиатомным составом (рис. 10). В данном случае повышение твердости связано с достаточно равномерным распределением интерметаллидов по объему сплава, приводящим к повышению механических свойств материала, в том числе твердости энтропийного сплава.

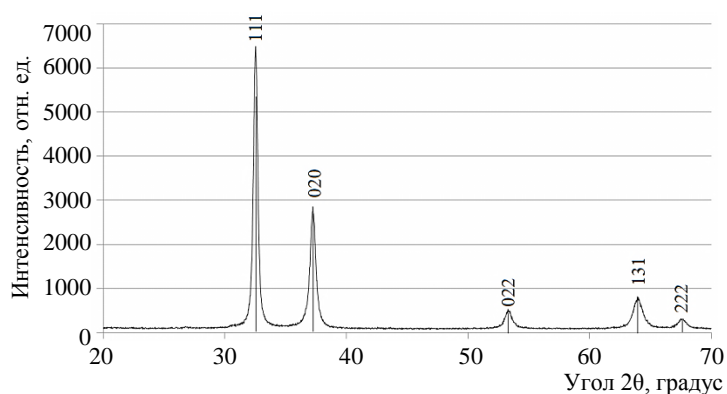


Рис. 9. Дифрактограмма эквиатомного энтропийного сплава на базе системы легирования Ni–Cr–Co с дополнительными легирующими элементами

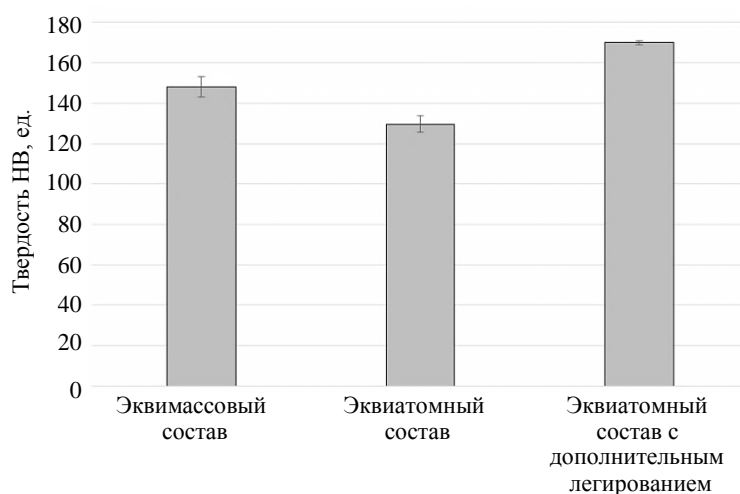


Рис. 10. Результаты измерения твердости энтропийного сплава на базе системы легирования Ni–Cr–Co

### Заключения

Высокоэнтропийные сплавы являются уникальными материалами из-за отсутствия базового матричного компонента и формирования разупорядоченного твердого раствора на основе мультикомпонентной системы. Высокая энтропия системы позволяет получать материалы с повышенным комплексом физико-механических свойств, а также стойкостью к различным агрессивным средам, в связи с чем разработка высокоэнтропийных сплавов является перспективной задачей современного материаловедения.

При исследовании структуры и фазового состава энтропийного сплава на базе системы легирования Ni–Cr–Co после вакуумной индукционной выплавки получены следующие результаты:

- во всех случаях при вакуумной индукционной выплавке с последующей разливкой в тигель при температуре 200 °С формируются твердые растворы на основе никеля, о чем свидетельствуют данные дифрактограмм;

- содержание в эквиатомном составе соединений легирующих элементов (преимущественно оксидов хрома) на 30 % ниже, чем в эквимассовом составе, косвенно подтверждает более высокую энтропию смешения без значительных искажений кристаллической решетки. Это также подтверждается результатами рентгеноструктурного анализа, в котором в эквиатомном составе дифракционные пики твердого раствора на основе никеля имеют меньшую интенсивность, чем в эквимассовом составе;

– добавление дополнительных легирующих элементов (Al, Ti, Nb, Mo, W, C, B, Re), обеспечивающих упрочнение твердого раствора, не приводит к значительному изменению фазового состава. Результаты исследований структуры методом электронной микроскопии показывают, что в структуре формируется твердый раствор, а также соединения интерметаллидов и карбидов легирующих элементов по границе зерен, что будет способствовать обеспечению высокого уровня механических характеристик при высокотемпературном механическом нагружении;

– измерение твердости образцов различных составов показало – эквиатомный состав обладает меньшей твердостью, чем эквимассовый, что также косвенно подтверждает более высокую энтропию смешения базовых элементов Ni, Cr и Co. Твердость эквиатомного состава с дополнительным легированием на 15 % больше по сравнению с эквимассовым сплавом и на 30 % больше по сравнению с эквиатомным составом. В данном случае повышение твердости связано с достаточно равномерным распределением интерметаллидов по объему сплава, приводящим к повышению механических свойств материала, в том числе и твердости энтропийного сплава.

*Работы (исследования) выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-11-2021-085 от 22.12.2021).*

### Список источников

1. Севальнев Г.С., Коробова Е.Н., Дворецков Р.М., Дорошенко А.В., Музафарова С.-В.Р., Самойлова И.И. Влияние степени дисперсности структуры мартенсита и размера карбидной фазы на фрикционное взаимодействие в условиях сухого трения скольжения высокоуглеродистой комплексно-легированной стали // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-15-26.
2. Севальнев Г.С. Бериллийсодержащие стали – перспективный материал с высоким уровнем физико-механических свойств // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
3. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // Materials Science and Engineering: A. 2004. Vol. 375–377. P. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
4. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys // Entropy. 2014. Vol. 16. No. 9. P. 4749–4768.
5. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J. et al. Nanostructured highentropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes // Advanced Engineering Materials. 2004. Vol. 6. P. 299–303. DOI: 10.1002/adem.200300567.
6. Yeh J.-W. Recent progress in high-entropy alloys // Annales de Chimie-Science des Materiaux. 2006. Vol. 31. P. 633–648. DOI: 10.3166/acsm.31.633-648.
7. Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S.-K. High-entropy alloys – a new era of exploitation // Materials Science Forum. 2007. Vol. 560. P. 1–9. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1.
8. Yeh J.-W., Chen S.-K., Gan J.-Y. et al. Formation of simple crystal structures in Cu–Co–Ni–Cr–Al–Fe–Ti–V alloys with multiprincipal metallic elements // Metallurgical and Materials Transactions: A. 2004. Vol. 35. P. 2533–2536. DOI: 10.1007/s11661-006-0234-4.
9. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // Acta Materialia. 2017. Vol. 122. P. 448–511. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.08.081.
10. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys // Nature Reviews Materials. 2019. Vol. 4. P. 515–534. DOI: 10.1038/s41578-019-0121-4.

11. Senkov O.N., Wilks G.B., Scott J.M., Miracle D.B. Mechanical properties of Nb<sub>25</sub>Mo<sub>25</sub>Ta<sub>25</sub>W<sub>25</sub> and V<sub>20</sub>Nb<sub>20</sub>Mo<sub>20</sub>Ta<sub>20</sub>W<sub>20</sub> refractory high entropy alloys // *Intermetallics*. 2011. Vol. 11. P. 698–706. DOI: 10.1016/j.intermet.2011.01.004.
12. Zhang Y., Zhou Y.J., Lin J.P. et al. Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys // *Advanced Engineering Materials*. 2018. Vol. 10 (6). P. 534–538. DOI: 10.1002/adem.200700240.
13. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Проблемы создания и перспективы использования жаропрочных высокоэнтропийных сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
14. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Осин И.В., Дворецков Р.М. Исследование возможности получения высокоэнтропийного сплава VNbMoTaW путем смешивания элементарных порошков с дальнейшим компактированием методом гибридного искрового плазменного спекания // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 12–20. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-12-20.
15. Капланский Ю.Ю., Мазалов П.Б. Мировые тенденции развития тугоплавких высокоэнтропийных сплавов для теплонагруженных узлов аэрокосмической техники (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-30-42.
16. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Мин П.Г., Вадеев В.Е., Крамер В.В. Исследование и разработка технологических параметров плавки в вакууме коррозионностойких жаропрочных никелевых сплавов // *Металлург*. 2021. № 2. С. 62–67.
17. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S., Bhattacharje P.P. High-entropy alloys. Amsterdam: Elsevier, 2019. 374 p.
18. Tsai M.-H., Yeh J.-W. High-entropy alloys: a critical review // *Materials Research Letters*. 2014. Vol. 2 (3). P. 107–123. DOI: 10.1080/21663831.2014.912690.
19. Singh S., Wanderka N., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi highentropy alloy // *Acta Materialia*. 2011. Vol. 59. P. 182–190. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.09.023.
20. The Materials Project. URL: [materialsproject.org](http://materialsproject.org) (дата обращения: 10.12.2023).

### References

1. Sevalnev G.S., Korobova E.N., Dvoreckov R.M., Doroshenko A.V., Muzafarova S.-V.R., Samoilova I.I. Influence of the degree of martensitic structure dispersion and size of carbide phase on the frictional interaction under conditions of dry sliding friction of high-carbon complex alloy steel. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 15, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-15-26.
2. Sevalnev G.S. Beryllium-containing steels – perspective material with a high level of physical and mechanical properties. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 15, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
3. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 375–377, pp. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
4. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*. 2014, vol. 16, no. 9, pp. 4749–4768.
5. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J. et al. Nanostructured highentropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 2004, vol. 6, pp. 299–303. DOI: 10.1002/adem.200300567.
6. Yeh J.-W. Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie-Science des Materiaux*, 2006, vol. 31, pp. 633–648. DOI: 10.3166/acsm.31.633-648.
7. Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S.-K. High-entropy alloys – a new era of exploitation. *Materials Science Forum*, 2007, vol. 560, pp. 1–9. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1.

8. Yeh J.-W., Chen S.-K., Gan J.-Y. et al. Formation of simple crystal structures in Cu–Co–Ni–Cr–Al–Fe–Ti–V alloys with multiprincipal metallic elements. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2004, vol. 35, pp. 2533–2536. DOI: 10.1007/s11661-006-0234-4.
9. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 2017, vol. 122, pp. 448–511. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.08.081.
10. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys. *Nature Reviews Materials*, 2019, vol. 4, pp. 515–534. DOI: 10.1038/s41578-019-0121-4.
11. Senkov O.N., Wilks G.B., Scott J.M., Miracle D.B. Mechanical properties of Nb<sub>25</sub>Mo<sub>25</sub>Ta<sub>25</sub>W<sub>25</sub> and V<sub>20</sub>Nb<sub>20</sub>Mo<sub>20</sub>Ta<sub>20</sub>W<sub>20</sub> refractory high entropy alloys. *Intermetallics*, 2011, vol. 11, pp. 698–706. DOI: 10.1016/j.intermet.2011.01.004.
12. Zhang Y., Zhou Y.J., Lin J.P. et al. Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys. *Advanced Engineering Materials*, 2018, vol. 10 (6), pp. 534–538. DOI: 10.1002/adem.200700240.
13. Trofimenko N.N., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N. Problems of creation and prospects for the use of heat-resistant high-entropy alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
14. Trofimenko N.N., Efimochkin I.Yu., Osin I.V., Dvoretzskov R.M. The research of the possibility of high entropy alloy VNbMoTaW production by mixing elementary powders with further hybrid spark plasma sintering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 12–20. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-12-20.
15. Kaplanskii Yu.Yu., Mazalov P.B. World trends in the development of refractory high-entropy alloys for heat-loaded units of aerospace technics (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 12, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-30-42.
16. Kablov E.N., Sidorov V.V., Min P.G., Vadeev V.E., Kramer V.V. Research and development of technological parameters for vacuum melting of corrosion-resistant heat-resistant nickel alloys. *Metallurg*, 2021, no. 2, pp. 62–67.
17. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S., Bhattacharje P.P. *High-entropy alloys*. Amsterdam: Elsevier, 2019, 374 p.
18. Tsai M.-H., Yeh J.-W. High-entropy alloys: a critical review. *Materials Research Letters*, 2014, vol. 2 (3), pp. 107–123. DOI: 10.1080/21663831.2014.912690.
19. Singh S., Wanderka N., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi highentropy alloy. *Acta Materialia*, 2011, vol. 59, pp. 182–190. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.09.023.
20. *The Materials Project*. Available at: [materialsproject.org](https://materialsproject.org) (accessed: December 10, 2023).

**Информация об авторах**

**Власов Иван Игоревич**, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Севальнев Герман Сергеевич**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Климов Владимир Сергеевич**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Рогалев Алексей Михайлович**, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Ivan I. Vlasov**, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**German S. Sevalnev**, Head of Sector, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Vladimir S. Klimov**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Alexey M. Rogalev**, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 29.12.2023; получена после доработки 14.05.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.05.2024.  
The article was submitted 29.12.2023; received in revised form 14.05.2024; approved and accepted for publication after reviewing 14.05.2024.