

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 536

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.005

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ НЕЭКВИАТОМНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ CoCrNi, ЛЕГИРОВАННЫХ Nb И Mn

Сергей Валерьевич Коновалов¹, Владислав Константинович Дробышев²,
Ирина Алексеевна Панченко³, Данил Александрович Бессонов⁴

^{1,2,3,4}Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654006, Новокузнецк, Россия

¹ konovalov@sibsiu.ru, 0000-0003-4809-8660

² drobyshev_v.k@mail.ru, 0000-0002-1532-9226

³ panchenko.sibsiu@yandex.ru, 0000-0002-1631-9644

⁴ dabess@yandex.ru, 0009-0006-6609-0688

Аннотация. Представлены результаты комплексного исследования структуры и элементного состава неэквивалентного среднеэнтропийного сплава системы CoCrNi, легированного ниобием (Nb) и марганцем (Mn), с номинальным составом Nb₂Co₄₀Cr₁₄Ni₄₀Mn₄. Основной целью работы было экспериментальное подтверждение прогнозируемого однофазного состояния твердого раствора и анализ микроструктурных особенностей, формирующихся в процессе вакуумно-дуговой плавки. Для исследования сплава использован комплекс современных методов: рентгеноструктурный анализ, сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионной спектроскопией и просвечивающая электронная микроскопия. Методом: рентгеноструктурного анализа подтверждено, что сплав имеет гранецентрированную кубическую (ГЦК) решетку с параметром 3,568 Å. Установлено, что экспериментальный состав сплава незначительно отклоняется от номинального, а также выявлено наличие примесей железа и алюминия. Микроструктурный анализ выявил развитую дендритную структуру с распределением размера зерен в диапазоне 50–80 мкм. Элементное картирование продемонстрировало однородное распределение кобальта, хрома, никеля и марганца в матрице, в то время как ниобий проявляет склонность к сегрегации в междендритных областях, что объясняется его высокой температурой плавления и положительной теплотой смешения с другими компонентами. Исследования методом просвечивающей микроскопии на наноуровне подтвердили формирование однофазной ГЦК-матрицы с локальными обогащенными ниобием участками на границах зерен. Полученные результаты являются важным этапом в установлении корреляции «структура-свойства» в перспективных среднеэнтропийных сплавах и подтверждают возможность целенаправленного управления их микроструктурой за счет легирования.

Ключевые слова: среднеэнтропийные сплавы, CoCrNi-Nb-Mn, микроструктура, электронная микроскопия, дендритная структура, ГЦК-твёрдый раствор.

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

Для цитирования: Коновалов С.В., Дробышев В.К., Панченко И.А., Бессонов Д.А. Изучение структуры неэквивалентных сплавов системы CoCrNi, легированных Nb и Mn // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23, № 1. С. 51-59. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.005.

Original article

STUDY OF THE STRUCTURE OF NON-EQUIATOMIC ALLOYS OF THE CoCrNi SYSTEM ALLOYED WITH Nb AND Mn

Sergey V. Konovalov¹, Vladislav K. Drobyshev², Irina A. Panchenko³, Danil A. Bessonov⁴^{1, 2, 3, 4}Siberian State Industrial University, 42 Kirov St., Novokuznetsk, 654006, Russia¹ konovalov@sibsiu.ru, 0000-0003-4809-8660² drobyshev_v.k@mail.ru, 0000-0002-1532-9226³ panchenko.sibsiu@yandex.ru, 0000-0002-1631-9644⁴ dabess@yandex.ru, 0009-0006-6609-0688

Abstract. The article presents the results of a comprehensive study of the structure and elemental composition of a nonequiatomic medium-entropy alloy of the CoCrNi system alloyed with niobium (Nb) and manganese (Mn), with a nominal composition of Nb₂Co₄₀Cr₁₄Ni₄₀Mn₄. The main objective of the study was to experimentally confirm the predicted single-phase state of the solid solution and analyze the microstructural features formed during vacuum-arc melting. A set of modern methods was used to study the alloy: X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy, and transmission electron microscopy. The X-ray diffraction method confirmed that the alloy has a face-centered cubic (FCC) lattice with a parameter of 3.568 Å. The experimental alloy composition was found to deviate slightly from the nominal value, and the presence of iron and aluminum impurities was detected. Microstructural analysis revealed a developed dendritic structure with a grain size distribution in the range of 50–80 µm. Elemental mapping demonstrated a uniform distribution of cobalt, chromium, nickel, and manganese in the matrix, while niobium exhibits a tendency to segregate in interdendritic regions, which is explained by its high melting point and positive heat of mixing with other components. Nanoscale transmission microscopy studies confirmed the formation of a single-phase fcc matrix with localized niobium-rich regions at grain boundaries. The obtained results are an important step in establishing the structure-property correlation in promising medium-entropy alloys and confirm the possibility of targeted control of their microstructure through alloying.

Keywords: medium-entropy alloys, CoCrNi-Nb-Mn, microstructure, electron microscopy, dendritic structure, FCC solid solution.

Funding: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-49-00015, <https://rscf.ru/project/23-49-00015>.

For citation: Konovalov S.V., Drobyshev V.K., Panchenko I.A., Bessonov D.A. (2026). Study of the structure of nonequiatomic alloys of the CoCrNi system alloyed with Nb and Mn. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(1), 51-59. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.005.

Введение

Создание сплавов, сохраняющих функциональность при экстремальных механических нагрузках, остается одной из наиболее значимых целей в области современного материаловедения [1]. Основная сложность заключается в необходимости обеспечения оптимального соотношения прочностных характеристик и пластичности в условиях широкого температурного диапазона, поскольку данные свойства обычно являются взаимоисключающими [2]. Существующее ограничение замедляет прогресс в стратегически важных отраслях, например, в производстве турбинных двигателей, для которых принципиально важна комбинация

устойчивости к значительным нагрузкам и сохранения деформационной способности [3, 4].

В последнее время в качестве возможного решения данной проблемы активно исследуются высоко- и среднеэнтропийные сплавы (ВЭС и СЭС). Данные материалы открывают перспективы для достижения нетипичного сочетания прочности и пластичности, отчасти благодаря своей термодинамической стабильности в высокотемпературной среде [5, 6]. Несмотря на это, ВЭС и СЭС имеют ряд недостатков, требующих проведения дополнительных изысканий и целенаправленной модификации для улучшения их эксплуатационных качеств [7, 8]. Большинство однофазных ОЦК-высокоэнтропийных сплавов и среднеэнтропийных сплавов демонстрируют прочность

(400–1000 МПа), но их пластичность при комнатной температуре часто ограничена деформациями менее 10% или даже ниже, что связано с доминированием скольжения дислокаций и склонностью к межзеренному разрушению [9–11].

Сплавы с гранцентрированной кубической (ГЦК) решеткой, такие как CoCrNiFeMn (сплав Кантора) или СЭС CoCrNi, характеризуются повышенной пластичностью и вязкостью разрушения, в том числе при криогенных температурах достигающей до 75%) [12, 13]. Это связано с их низкой энергией дефекта упаковки (ЭДУ), которая способствует активации дополнительных механизмов деформации — прежде всего механического двойникования, наряду с дислокационным скольжением [14, 15]. Также следует отметить, что деформационное двойникование подавляется при комнатных и более высоких температурах, что ведет к ослаблению эффекта дисперсионного упрочнения.

Расширение рабочего температурного интервала потенциально может быть достигнуто за счет целенаправленного изменения структуры методами упрочнения твердого раствора [16, 17] и дисперсионного упрочнения [18, 19]. Наиболее перспективной стратегией считается легирование ГЦК матрицы ниобием (Nb) классическими элементом для жаропрочных сплавов. Марганец введен для стабилизации ГЦК-фазы и снижения энергии дефектов упаковки, что способствует активации двойникования при деформации. Коллективом авторов [20] на основе термодинамического моделирования 194481 композиции системы Ni-Co-Cr-Mn-Nb был проведен целенаправленный поиск перспективных среднеэнтропийных сплавов. Используя критерии образования однофазных твердых растворов (с точностью прогнозирования 62–88%), из всего множества была отобрана 31 композиция. Среди них сплав Nb₂Co₄₀Cr₁₄Ni₄₀Mn₄ был идентифицирован как наиболее оптимальный.

Данный сплав продемонстрировал наибольший расчетный предел текучести (321 МПа при комнатной температуре), что объясняется оптимальным содержанием марганца (6 ат.%), атомный объем которого (12,6 Å³) существенно выше, чем у других элементов. Кроме того, сплав показал превосходную температурную стабильность.

Целью работы является комплексное исследование фазового состава, химической однородности и микроструктурных особенностей

среднеэнтропийного сплава Nb₂Co₄₀Cr₁₄Ni₄₀Mn₄, полученного методом вакуумно-индукционной плавки, с применением рентгеноструктурного анализа, рентгенофлуоресцентной спектроскопии, оптической и сканирующей электронной микроскопии.

Материал и методики исследования

Слитки были изготовлены методом литья в вакуумной печи в форме усеченного конуса (диаметры оснований 50 и 5 мм, высота 15 мм). Получение сплава проводили в медных водоохлаждаемых тиглях с использованием шихты из чистых металлов (Nb, Mn, Co, Ni, Cr). Для минимизации окисления атмосферу в камере дважды заполняли аргоном. Плавление осуществляли вольфрамовым электродом при параметрах тока 200–500 А и напряжения до 20 В. Изготовление сплава включало два вакуумных цикла: первый состоял из двукратной плавки с переворотом слитка, а второй — из четырехкратной. После начальных плавки для удаления образовавшегося черного нагара выполняли кратковременную продувку воздухом с последующей очисткой камеры и поверхностей слитков спиртом. Для обеспечения гомогенности расплава перед вторым циклом слиток устанавливали вертикально, а первую плавку в данном цикле проводили с полным перетеканием материала в горизонтальное положение. Охлаждение после каждой плавки длилось не менее 1 часа в атмосфере аргона.

Основной задачей изучения материалов, использованных в данном исследовании, было подтверждение однофазного состояния твердого раствора в полученных сплавах. Рентгеноструктурный анализ проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-8Н. Ускоряющее напряжение на рентгеновской трубке составляло 40 кВ, а сила тока — 20 мА. Угловой диапазон (2θ) устанавливали от 30° до 100° с шагом сканирования 0.1° и временем экспозиции 5 с. Идентификацию фаз, качественный и количественный фазовый анализ и уточнение структурных параметров проводили с использованием программного пакета «КДА – Кристаллография и дифракционный анализ». Для исследования использовалось оборудование, позволяющее исследовать структуру на разных масштабах: оптическая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ). Структура и элементный состав образцов были

изучены с помощью сканирующего электронного микроскопа KYKY EM-6900, оснащенного энергодисперсионным рентгеновским спектрометром Oxford Xplore. СЭМ-анализ проводили при ускоряющем напряжении 25 кВ, токе накала 2,09 А и эмиссионном токе 150×10^{-6} А.

ПЭМ анализ проводили на просвечивающем электронном микроскопе, оснащенный приставкой для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Исследование проводили при ускоряющем напряжении 200 кВ, получая микродифракционные картины и проводя последующий анализ в темном поле. Этот процесс проводился при ускоряющем напряжении 6 кВ в течение 10–12 часов.

Результаты исследования и их обсуждение

Методом рентгенофазового анализа, приведенного на рис. 1 подтверждено, что исследуемый литой сплав, демонстрирует рефлексы, соответствующие гранецентрированной кубической (ГЦК) решетке. Пики дифракции несколько уширены и асимметричны, что может указывать на следы второй ГЦК фазы. Параметр решетки исследуемого сплава составил $3,568 \text{ \AA}$, а размер области когерентного рассея-

ния (ОКР) составил 41 нм. Проведенный рентгенофлуоресцентный анализ выявил отклонение прогнозируемого состава сплава $\text{Nb}_2\text{Co}_{40}\text{Cr}_{14}\text{Ni}_{40}\text{Mn}_4$ от экспериментального: Nb – 2,35 ат.%, Co – 39,90 ат.%, Cr – 13,43 ат.%, Ni – 39,04 ат.%, Mn – 3,80 ат.%. Также в изготовленном сплаве присутствовали примеси Fe – 0,19 ат.% и Al – 1,29 ат.%.

На рис. 2 а представлена микроструктура среднеэнтропийного сплава $\text{Nb}_2\text{Co}_{40}\text{Cr}_{14}\text{Ni}_{40}\text{Mn}_4$ в литом состоянии. Металлографическое исследование указывает на наличие развитой дендритной структуры, характерной для литых среднеэнтропийных сплавов. Распределение размера зерна (рис. 2б) имеет выраженную асимметричную форму, характерную для структур, формирующихся при направленном затвердевании.

Основная часть значений сосредоточена в диапазоне 50–80 мкм, где наблюдается максимальная доля измерений — до 8–9 % на интервал, пики вблизи 60–80 мкм подтверждают относительную однородность морфологии дендритных ячеек и стабильность условий кристаллизации в материале.

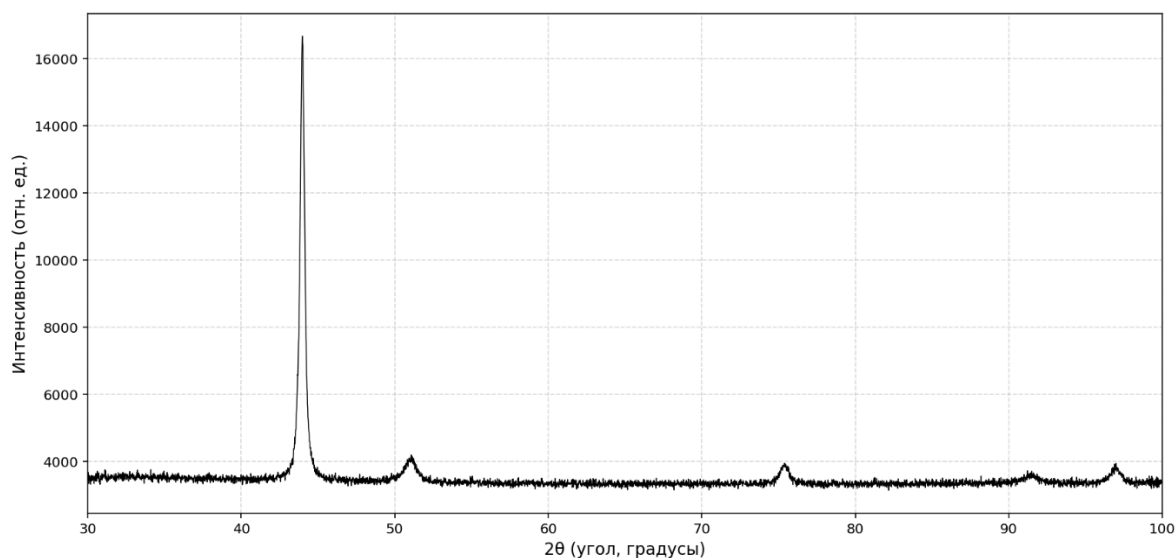


Рис. 1. Рентгенограмма сплава $\text{Nb}_2\text{Co}_{40}\text{Cr}_{14}\text{Ni}_{40}\text{Mn}_4$

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of $\text{Nb}_2\text{Co}_{40}\text{Cr}_{14}\text{Ni}_{40}\text{Mn}_4$ alloy

При этом хвост распределения значений размера зерна смещён в область значений до 150–160 мкм, что свидетельствует о наличии зон с укрупнённой дендритной структурой. Подобная неоднородность может быть связана с

локальными изменениями теплового потока, колебаниями скорости кристаллизации или повышенной конвекцией расплава [21]. Распределение такого типа типично для литых среднеэнтропийных сплавов, полученных в условиях

вакуумно-индукционной плавки, где сочетание высокой чистоты расплава и интенсивного перемешивания приводит к конкуренции фронта

роста дендритов и формированию участков с различной степенью разупорядочения структуры [22].

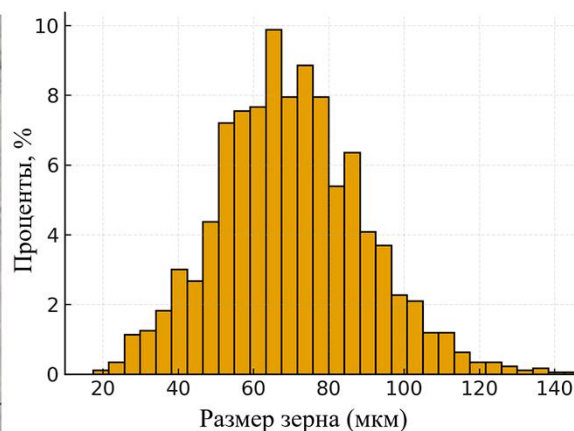
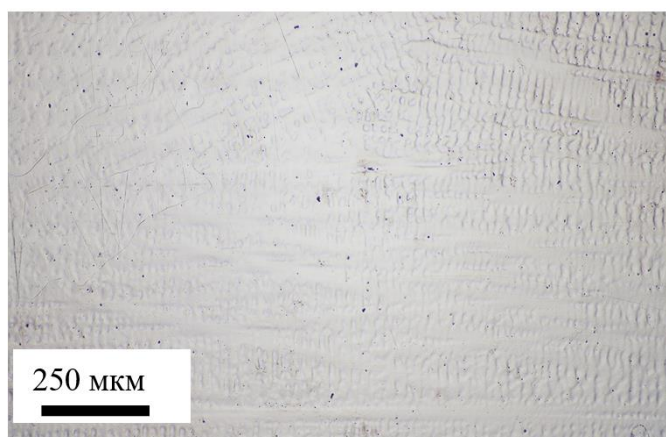


Рис.2. Микроструктура сплава $Nb_2Co_{40}Cr_{14}Ni_{40}Mn_4$ и распределение зерен по размеру (б)

Fig. 2. Microstructure of the $Nb_2Co_{40}Cr_{14}Ni_{40}Mn_4$ alloy (a) and grains size distribution (b)

На рисунке 3 представлено элементное картирование сплава $Nb_2Co_{40}Cr_{14}Ni_{40}Mn_4$, выполненное методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) в сочетании со сканирующей электронной микроскопией. Карты распределения демонстрируют однородное распределение Co, Cr, Ni и Mn в матрице, тогда как Nb концентрируется преимущественно в междендритных областях, что указывает на ограниченную растворимость ниобия в твёрдом растворе.

На рис. 3 представлено элементное картирование сплава $Nb_2Co_{40}Cr_{14}Ni_{40}Mn_4$, выполненное методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) в сочетании со сканирующей электронной микроскопией. Карты распределения демонстрируют однородное распределение Co, Cr, Ni и Mn в матрице, тогда как Nb концентрируется преимущественно в междендритных областях, что указывает на ограниченную растворимость ниобия в твёрдом растворе.

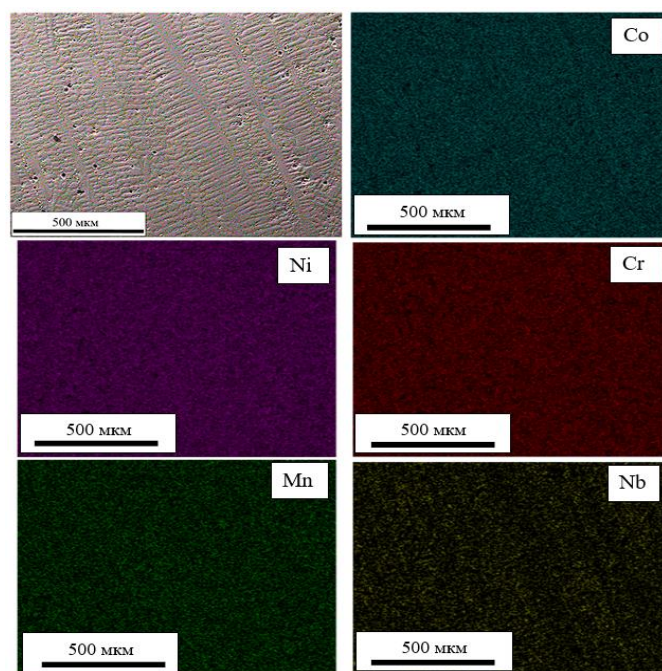


Рис. 3 – Элементное картирование сплава $Nb_2Co_{40}Cr_{14}Ni_{40}Mn_4$, где 1–8 – участки микрорентгеноспектрального сканирования

Fig. 3 – Elemental mapping of the $Nb_2Co_{40}Cr_{14}Ni_{40}Mn_4$ alloy, where 1–8 are sections of micro-X-ray spectral scanning

Карты распределения элементов, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии с использованием энергодисперсионного анализа приведены на рис. 4. На на-

ноуровне подтверждается формирование однофазной ГЦК-матрицы с локальными сегрегациями ниобия на границах зёрен и в приграничных областях. Равномерное распределение Co, Cr, Ni и Mn свидетельствует о высокой степени гомогенизации твёрдого раствора, достигнутой переплавкой в вакуумной печи. Ниобий является самым тугоплавким элементом ($T_{пл} = 2468^\circ\text{C}$) в данном сплаве и имеет положительную теплоту смешения с другими компонентами (особенно с Co, Ni, Cr), что приводит к его отталкиванию в междендритные области во время кристаллизации. Это напрямую подтверждается данными микроанализа элементного состава участков $\text{Nb}_2\text{Co}_{40}\text{Cr}_{14}\text{Ni}_{40}\text{Mn}_4$, приведенных в таблице 1, где содержание Nb колеблется от 1,50% до 2,96%. Марганец имеет более низкую температуру плавления (1246°C) и также может сегрегировать, хотя и менее выражено, чем Nb (разброс Mn от 3.75% до 4.17%).

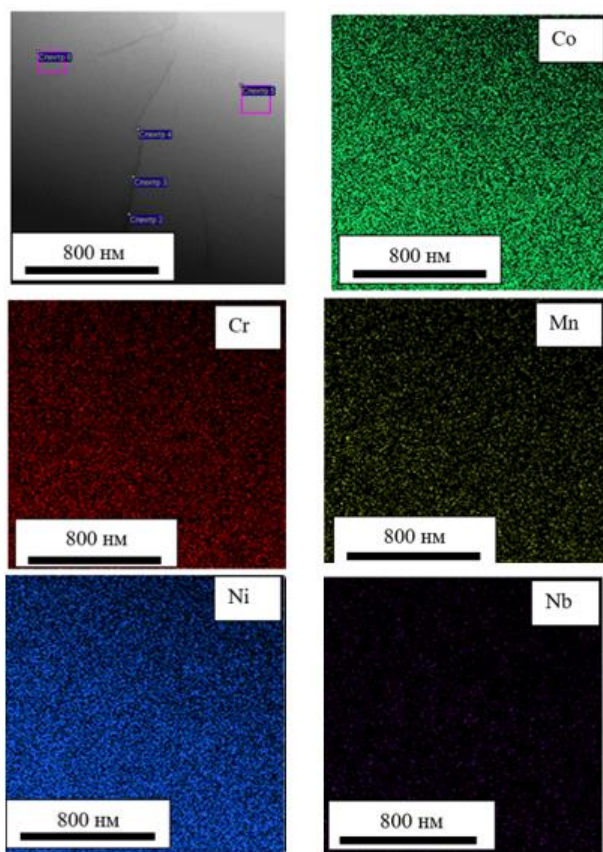


Рис. 4 – Карты распределения элементов, полученные с помощью просвечивающего электронного микроскопа

Fig. 4 – Element distribution maps obtained using a transmission electron microscope

Таблица 1. Результаты микроанализа элементного состава участков $\text{Nb}_2\text{Co}_{40}\text{Cr}_{14}\text{Ni}_{40}\text{Mn}_4$, обозначенного цифрами на рис. 4

Table 1. Results of microanalysis of the elemental composition of the $\text{Nb}_2\text{Co}_{40}\text{Cr}_{14}\text{Ni}_{40}\text{Mn}_4$ section, indicated by numbers in Fig. 4

Спектр	Cr	Mn	Co	Ni	Nb
Суммарный	14.78	4.08	39.50	38.95	2.69
2	15.22	4.17	39.41	38.71	2.48
3	14.97	4.09	40.11	38.50	2.32
4	14.77	4.14	40.40	38.21	2.48
5	15.13	3.75	40.87	38.75	1.50
6	14.24	4.10	39.41	39.29	2.96
Среднее	14.85	4.05	39.95	38.74	2.41
Станд. отклонение	0.35	0.15	0.61	0.37	0.50
Макс.	15.22	4.17	40.87	39.29	2.96
Мин.	14.24	3.75	39.41	38.21	1.50

Заключение

Проведенное исследование структуры и элементного состава среднеэнтропийного сплава $\text{Nb}_2\text{Co}_{40}\text{Cr}_{14}\text{Ni}_{40}\text{Mn}_4$ позволило сделать следующие основные выводы:

1. Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что литой сплав кристаллизуется в однофазной гранецентрированной кубической (ГЦК) структуре с параметром решетки $3,568 \text{ \AA}$. Незначительное уширение дифракционных пиков может указывать на наличие микрогетерогенности в структуре.
2. Металлографический анализ подтвердил формирование характерной для литых сплавов дендритной структуры. Распределение размера зерен является асимметричным с преобладающим диапазоном $50\text{--}80 \text{ мкм}$, что свидетельствует об относительно стабильных условиях кристаллизации.
3. Комплексный анализ элементного состава методами СЭМ/EDS и ПЭМ/EDS выявил общую гомогенность матрицы по основным компонентам (Co, Cr, Ni, Mn). Ключевой особенностью является сегрегация ниобия в междендритных областях и на границах зерен, что обусловлено его ограниченной растворимостью в ГЦК-решетке при кристаллизации, высоким температурой плавления и положительной теплотой смешения.

Установлено незначительное отклонение экспериментального состава от номинального,

а также наличие микропримесей, что, однако, не привело к образованию интерметаллидных фаз в объеме материала.

Список литературы

1. Nutor R., Cao Q., Wei R., Su Q., Du G., Wang X., Li F., Zhang D., Jiang J. A dual-phase alloy with ultrahigh strength-ductility synergy over a wide temperature range // *Science Advances*. 2021. Vol. 7. DOI: 10.1126/sciadv.abi4404.
2. Chou T., Li W., Chang H., Cao B., Luan J., Huang J., Yang T. Suppressing temperature-dependent embrittlement in high-strength medium-entropy alloy via hetero-grain/precipitation engineering // *Scripta Materialia*. 2023. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2023.115377.
3. Wen C., Shen H., Tian Y., Lou G., Wang N., Su Y. Accelerated discovery of refractory high-entropy alloys for strength-ductility co-optimization: An exploration in NbTaZrHfMo system by machine learning // *Scripta Materialia*. 2024. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2024.116240.
4. Park H., Son S., Ahn S., Ha H., Kim R., Lee J., Joo H., Kim J., Kim H. Hyper-adaptor; Temperature-insensitive tensile properties of Ni-based high-entropy alloy a wide temperature range // *Materials Research Letters*. 2025. Vol. 13. DOI: 10.1080/21663831.2025.2457346.
5. Ma E., & Liu, C. Chemical inhomogeneities in high-entropy alloys help mitigate the strength-ductility trade-off // *Progress in Materials Science*. 2024. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2024.101252.
6. Zhang C., Yu Q., Tang Y., Xu M., Wang H., Zhu C., Ell J., Zhao S., MacDonald B., Cao P., Schoenung J., Vecchio K., Reed R., Ritchie R., Lavernia E. Strong and Ductile FeNiCoAl-based High-Entropy Alloys for Cryogenic to Elevated Temperature Multifunctional Applications // *Acta Materialia*. 2022. DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118449.
7. Kumar P., Kim S., Yu Q., Ell J., Zhang M., Yang Y., Kim J., Park H., Minor A., Park E., Ritchie R. Compressive vs. tensile yield and fracture toughness behavior of a body-centered cubic refractory high-entropy superalloy Al_{0.5}Nb_{1.25}Ta_{1.25}TiZr at temperatures from ambient to 1200°C // *Acta Materialia*. 2022. DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118620.
8. George E., Curtin W., Tazan C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // *Acta Materialia*. 2020. DOI: 10.1016/j.actamat.2019.12.015.
9. Tsuru T., Han S., Matsuura S., Chen Z., Kishida K., Iobzenko I., Rao S., Woodward C., George E., Inui H. Intrinsic factors responsible for brittle versus ductile nature of refractory high-entropy alloys // *Nature Communications*. 2024. Vol. 15. DOI: 10.1038/s41467-024-45639-8.
10. Gludovatz B., Ritchie R. Fracture properties of high-entropy alloys // *MRS Bulletin*. 2022. Vol. 47. DOI: 10.1557/s43577-022-00267-9.
11. Liu F., Liaw P., Zhang Y. Recent Progress with BCC-Structured High-Entropy Alloys // *Metals*. 2022. DOI: 10.3390/met12030501.
12. Bajpai S., MacDonald B., Rupert T., Hahn H., Lavernia E., Apelian D. Recent Progress in the CoCrNi Alloy System // *Materialia*. 2022. DOI: 10.1016/j.mtla.2022.101476.
13. Naeem M., He H., Zhang F., Huang H., Harjo S., Kawasaki T., Wang B., Lan S., Wu Z., Wang F., Wu Y., Lu Z., Zhang Z., Liu C., Wang X. Cooperative deformation in high-entropy alloys at ultralow temperatures // *Science Advances*. 2020. Vol. 6. DOI: 10.1126/sciadv.aax4002.
14. Zhao Y., Yang T., Tong Y., Wang J., Luan J., Jiao Z., Chen D., Yang Y., Hu A., Liu C., Kai J. Heterogeneous precipitation behavior and stacking-fault-mediated deformation in a CoCrNi-based medium-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 138. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.07.029.
15. Fang Y., Chen Y., Chen B., Li S., Gludovatz B., Park E., Sheng G., Ritchie R., Yu Q. An in situ ambient and cryogenic transmission electron microscopy study of the effects of temperature on dislocation behavior in CrCoNi-based high-entropy alloys with low stacking-fault energy // *Applied Physics Letters*. 2021. DOI: 10.1063/5.0069086.
16. Wu C., Tsai P., Kuo C., Tsai C. Effect of Atomic Size Difference on the Microstructure and Mechanical Properties of High-Entropy Alloys // *Entropy*. 2018. Vol. 20. DOI: 10.3390/e20120967.
17. Вяродова А. В. The influence of chemical composition on solid solution and strain hardening of single crystals of fcc high-entropy alloys // *ФММ*. 2022. № 1. С. 15–23.
18. Dasari S., Jagetia A., Chang Y., Soni V., Gwalani B., Gorsse S., Yeh A., Banerjee R. Engineering multi-scale B2 precipitation in a heterogeneous FCC based microstructure to enhance the mechanical properties of a Al_{0.5}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5} high entropy alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 830. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.154707.

19. Li Z., Fu L., Peng J., Zheng H., Ji X., Sun Y., Shuo M., Shan A. Improving mechanical properties of an FCC high-entropy alloy by γ' and B2 precipitates strengthening // *Materials Characterization*. 2020. Vol. 159. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.109989.

20. Осинцев К. А., Кузнецова В. А., Панова В. С., Коновалов С. В., Панченко И. А. Твердорастворное упрочнение ниобием и марганцем однофазных сплавов системы Ni-Co-Cr // *Физика металлов и металловедение*. 2026. (Принята в печать).

21. Tiwari S., Ghosh S. Orientation selection in alloy dendritic evolution during melt-pool solidification // *Computational Materials Science*. 2025. DOI: 10.1016/j.commatsci.2025.113664.

22. Wang Y., Jiao Z., Bian G., Yang H., He H., Wang Z., Liaw P., Qiao J. Dynamic tension and constitutive model in Fe40Mn20Cr20Ni20 high-entropy alloys with a heterogeneous structure // *Materials Science and Engineering: A*. 2022. Vol. 857. P. 144125. DOI: 10.1016/j.msea.2022.144125.

Информация об авторах

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

В.К. Дробышев – научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета;

И.А. Панченко – кандидат технических наук, заведующий лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета;

Д.А. Бессонов – старший научный сотрудник Управления научных исследований Сибирского государственного индустриального университета.

References

1. Nutor, R., Cao, Q., Wei, R., Su, Q., Du, G., Wang, X., Li, F., Zhang, D., & Jiang, J. (2021). A dual-phase alloy with ultrahigh strength-ductility synergy over a wide temperature range. *Science Advances*, 7. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abi4404>
2. Chou, T., Li, W., Chang, H., Cao, B., Luan, J., Huang, J., & Yang, T. (2023). Suppressing

temperature-dependent embrittlement in high-strength medium-entropy alloy via hetero-grain/precipitation engineering. *Scripta Materialia*. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2023.115377>

3. Wen, C., Shen, H., Tian, Y., Lou, G., Wang, N., & Su, Y. (2024). Accelerated discovery of refractory high-entropy alloys for strength-ductility co-optimization: An exploration in NbTaZrHfMo system by machine learning. *Scripta Materialia*.

<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2024.116240>

4. Park, H., Son, S., Ahn, S., Ha, H., Kim, R., Lee, J., Joo, H., Kim, J., & Kim, H. (2025). Hyperadaptor; Temperature-insensitive tensile properties of Ni-based high-entropy alloy a wide temperature range. *Materials Research Letters*, 13. <https://doi.org/10.1080/21663831.2025.2457346>

5. Ma, E., & Liu, C. (2024). Chemical inhomogeneities in high-entropy alloys help mitigate the strength-ductility trade-off. *Progress in Materials Science*. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101252>

6. Zhang, C., Yu, Q., Tang, Y., Xu, M., Wang, H., Zhu, C., Ell, J., Zhao, S., MacDonald, B., Cao, P., Schoenung, J., Vecchio, K., Reed, R., Ritchie, R., & Lavernia, E. (2022). Strong and ductile FeNiCoAl-based high-entropy alloys for cryogenic to elevated temperature multifunctional applications. *Acta Materialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.118449>

7. Kumar, P., Kim, S., Yu, Q., Ell, J., Zhang, M., Yang, Y., Kim, J., Park, H., Minor, A., Park, E., & Ritchie, R. (2022). Compressive vs. tensile yield and fracture toughness behavior of a body-centered cubic refractory high-entropy superalloy Al0.5Nb1.25Ta1.25TiZr at temperatures from ambient to 1200°C. *Acta Materialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.118620>

8. George, E., Curtin, W., & Tسان, C. (2020). High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>

9. Tsuru, T., Han, S., Matsuura, S., Chen, Z., Kishida, K., Iobzenko, I., Rao, S., Woodward, C., George, E., & Inui, H. (2024). Intrinsic factors responsible for brittle versus ductile nature of refractory high-entropy alloys. *Nature Communications*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45639-8>

10. Gludovatz, B., & Ritchie, R. (2022). Fracture properties of high-entropy alloys. *MRS Bulletin*, 47. <https://doi.org/10.1557/s43577-022-00267-9>

11. Liu, F., Liaw, P., & Zhang, Y. (2022). Recent progress with BCC-structured high-entropy alloys. *Metals*. <https://doi.org/10.3390/met12030501>
12. Bajpai, S., MacDonald, B., Rupert, T., Hahn, H., Lavernia, E., & Apelian, D. (2022). Recent progress in the CoCrNi alloy system. *Materialia*. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101476>
13. Naeem, M., He, H., Zhang, F., Huang, H., Harjo, S., Kawasaki, T., Wang, B., Lan, S., Wu, Z., Wang, F., Wu, Y., Lu, Z., Zhang, Z., Liu, C., & Wang, X. (2020). Cooperative deformation in high-entropy alloys at ultralow temperatures. *Science Advances*, 6. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax4002>
14. Zhao, Y., Yang, T., Tong, Y., Wang, J., Luan, J., Jiao, Z., Chen, D., Yang, Y., Hu, A., Liu, C., & Kai, J. (2017). Heterogeneous precipitation behavior and stacking-fault-mediated deformation in a CoCrNi-based medium-entropy alloy. *Acta Materialia*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.07.029>
15. Fang, Y., Chen, Y., Chen, B., Li, S., Gludovatz, B., Park, E., Sheng, G., Ritchie, R., & Yu, Q. (2021). An in situ ambient and cryogenic transmission electron microscopy study of the effects of temperature on dislocation behavior in CrCoNi-based high-entropy alloys with low stacking-fault energy. *Applied Physics Letters*. <https://doi.org/10.1063/5.0069086>
16. Wu, C., Tsai, P., Kuo, C., & Tsai, C. (2018). Effect of atomic size difference on the microstructure and mechanical properties of high-entropy alloys. *Entropy*, 20. <https://doi.org/10.3390/e20120967>
17. Vyrodova, A. V. (2022). The influence of chemical composition on solid solution and strain hardening of single crystals of fcc high-entropy alloys [Original: ФММ]. *Physics of Metals and Metallography*.
18. Dasari, S., Jagetia, A., Chang, Y., Soni, V., Gwalani, B., Gorsse, S., Yeh, A., & Banerjee, R. (2020). Engineering multi-scale B2 precipitation in a heterogeneous FCC based microstructure to enhance the mechanical properties of a Al0.5Co1.5CrFeNi1.5 high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 830. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154707>
19. Li, Z., Fu, L., Peng, J., Zheng, H., Ji, X., Sun, Y., Shuo, M., & Shan, A. (2020). Improving mechanical properties of an FCC high-entropy alloy by γ' and B2 precipitates strengthening. *Materials Characterization*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109989>
20. Osintsev, K. A., Kuznetsova, V. A., Panova, V. S., Konovalov, S. V., & Panchenko, I. A. (in press). Solid-solution strengthening of single-phase Ni-Co-Cr system alloys with niobium and manganese [Original: Твердо-растворное упрочнение ниобием и марганцем однофазных сплавов системы Ni-Co-Cr]. *Physics of Metals and Metallography*.
21. Tiwari, S., & Ghosh, S. (2025). Orientation selection in alloy dendritic evolution during melt-pool solidification. *Computational Materials Science*. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2025.113664>
22. Wang, Y., Jiao, Z., Bian, G., Yang, H., He, H., Wang, Z., Liaw, P., & Qiao, J. (2022). Dynamic tension and constitutive model in Fe40Mn20Cr20Ni20 high-entropy alloys with a heterogeneous structure. *Materials Science and Engineering: A*, 857, 144125. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144125>

Information about the authors

S.V. Konovalov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University

V.K. Drobyshev – Researcher, Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University;

I.A. Panchenko – Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University;

D.A. Bessonov – Candidate of Technical Sciences, Senior Research Associate of the Department of Scientific Research, Siberian State Industrial University

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30.11.2025; одобрена после рецензирования 23.02.2026; принята к публикации 02.03.2026.

The article was received by the editorial board on 30 Nov. 2025; approved after reviewing 23 Feb. 2026; accepted for publication 02 Mar. 2026.