

Оригинальная статья

УДК 536.425:539.25:539.351

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-2(42)-3-12

ВЕКТОР РАЗВИТИЯ УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВ ВЭС КАНТОРА

© 2023 г. В. Е. Громов¹, С. В. Коновалов¹, С. Чен², М. О. Ефимов¹, И. А. Панченко¹,
В. В. Шляров¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

²Университет Вэньчжоу (Китай, 325035, провинция Чжэцзян, город Чашань)

Аннотация. Созданный одним из первых более 20 лет назад высокоэнтропийный пятикомпонентный сплав CoCrFeNiMn (сплав Кантора) по-прежнему привлекает внимание исследователей в области физического материаловедения по причине возможного его применения в различных отраслях промышленности благодаря удачному сочетанию прочностных и пластических свойств. К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал по управлению свойствами этого сплава. В настоящей работе выполнен обзор публикаций отечественных и зарубежных авторов по различным направлениям улучшения свойств этого сплава: легированием, выделениями, термической обработкой, использованием фазовых диаграмм Calphad. Проанализирована роль легирования бором, ванадием, алюминием, кремнием, ниобием; роль нановыделений, влияние различных режимов термической и деформационной обработок. Сделан вывод о необходимости проведения экспериментов по легированию ВЭС цирконием и ниобием, хорошо зарекомендовавшими себя в упрочнении сталей. Показано, что создание и модифицирование свойств пятикомпонентных ВЭС возможно при использовании компьютерных программ Calphad, разработанных для расчета диаграмм состояния. Проанализированные результаты публикаций по термодинамическому описанию пятикомпонентных сплавов подтверждены сравнением фазовых диаграмм с имеющимися экспериментальными данными. Показано, что на основе расчета фазовых диаграмм Calphad возможен дизайн нового поколения ВЭС.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав CoCrFeNiMn, легирование, упрочнение, термическая обработка, программа Calphad

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

Для цитирования: Громов В.Е., Коновалов С.В., Чен С., Ефимов М.О., Панченко И.А., Шляров В.В. Вектор развития улучшения свойств ВЭС Кантора // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 2 (44). С. 3–12. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-2\(44\)-3-12](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-2(44)-3-12)

Original article

DEVELOPMENT VECTOR FOR ENHANCEMENT OF CANTOR HEA PROPERTIES

© 2023 V. E. Gromov¹, S. V. Konovalov¹, X. Chen², M. O. Efimov¹, I. A. Panchenko¹,
V. V. Shlyarov¹

¹Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

²Wenzhou University (Wenzhou City, Zhejiang Province, 325035, China)

Abstract. First created over 20 years, high-entropy five-component alloy CoCrFeNiMn (Cantor alloy) still attracts the atten-

tion of researchers in the field of physical materials science because its possible application in various industries due to a successful combination of strength and plastic properties. To date, a large amount of experimental material has been accumulated on how to control the properties of this alloy. This article reviews the publications of Russian and foreign authors in two areas of improving the properties of this alloy: alloying, precipitation and heat treatment and the use of Calphad phase diagrams. In the first direction, the role of alloying with B, V, Al, V, Si, Nb is analyzed; nanoprecipitations, various modes of thermal and deformation processing. It is concluded that it is necessary to conduct experiments alloying HEA with Zr and Nb, which have proven themselves well in steels hardening. The creation and modification of the properties of five-component HEA is possible using the Calphad computer software developed for calculating state diagrams. The results of publications on the thermodynamic description of five-component alloys analyzed in the article are confirmed by comparing the phase diagrams with the available experimental data. It is shown that the development of a new generation of HEAs is possible based on the calculation of the Calphad phase diagrams.

Keywords: high-entropy alloy, CoCrFeNiMn, alloying, hardening, heat treatment, Calphad program

Funding. This study is funded by a grant of the Russian Science Foundation project no. 23-49-00015, <https://rscf.ru/project/23-49-00015/>.

For citation: Gromov V.E., Konovalov S.V., Chen X., Efimov M.O., Panchenko I.A., Shlyarov V.V. Development vector for enhancement of Cantor HEA properties. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 2 (44), pp. 3–12. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-2\(44\)-3-12](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-2(44)-3-12)

Введение

Созданный в начале этого века новый класс металлических материалов (так называемые высокоэнтропийные сплавы (ВЭС)) привлекает внимание исследователей в областях физики конденсированного состояния и физического материаловедения вследствие высокого уровня свойств, заметно превышающих свойства обычных сплавов [1, 2]. Первым пятикомпонентным ВЭС был CoCrFeNiMn (сплав Кантора) [3 – 9], который обладает хорошим сочетанием прочностных и пластических свойств.

Обсуждение проблемы улучшения механических и эксплуатационных свойств ВЭС Кантора началось вскоре после его создания и активно продолжается до сих пор. В обзорах [10 – 12] проанализированы способы повышения механических свойств сплава CoCrFeNiMn ввиду возможных областей его промышленного использования. Решение этой проблемы предполагало усиление зернограничного упрочнения [10], твердорастворного упрочнения, создание нанокристаллического состояния, упрочнение выделениями, частичной аморфизацией, использование упрочняющих поверхностных обработок, разработку новых способов получения ВЭС, ультразвуковое воздействие, формирование градиентов структуры и т.д. [13 – 15]. Такие подходы могут стимулировать значительное расширение областей применения этого ВЭС. В работе [16] на основе анализа экспериментальных результатов отмечено, что существует несколько сотен пятикомпонентных ВЭС, содержащих свыше 40 разных элементов. Эти элементы условно разделены на девять семейств (1 – на основе переходных 3d-металлов Al, Co, Cr, Fe, Ni, Mn, Cu, Ti; 2 – на ос-

нове тугоплавких металлов Cr, Hf, Mo, Nb, Ta, Ti, V, W, Zr; 3 – на основе Al, Be, Li, Mn, Se, Sn, Ti, Zn; 4 – на основе переходных 4f-металлов Dy, Gd, Lu, Tb, Tm, Y; 5 – на основе бронз и латуней; 6 – на основе Ag, Au, Co, Cr, Cu, Ni, Pd, Pt, Rh, Ru с каталитическими свойствами; 7 – высокоэнтропийные металлические стекла типа $Fe_{26,7}Co_{26,7}Ni_{26,7}Si_9B_{11}$; 8 – высокоэнтропийные бориды, карбиды, нитриды, оксиды, силициды; 9 – ВЭС пленки и покрытия).

Из-за большого объема информации в настоящей работе ограничились анализом экспериментальных работ по упрочнению и модифицированию свойств ВЭС CoCrFeNiMn и использованию для этих целей Calphad за последние три года. Второй путь – анализ работ по предсказанию состава ВЭС с заданным комплексом высоких функциональных свойств, при использовании компьютерного пакета программ Calphad, разработанного для расчета диаграмм состояния [17 – 20]. Такие расчеты часто сочетаются на последней стадии с экспериментальной проверкой созданных материалов (так называемая интегрированная расчетная инженерия (integrated computational materials engineering – ICME)). Считается, что такой путь может привести к дальнейшему прогрессу в создании ВЭС с требуемыми промышленностью свойствами [16]. Необходимость такого анализа обусловлена еще и тем, что наиболее подробный разбор свойств ВЭС, перспектив их применения выполнен три – четыре года назад [21 – 23], однако при современных темпах публикационной активности это достаточно большой период.

В последние два – три года продолжается экспоненциальный рост количества публикаций,

посвященных ВЭС CoCrFeNiMn, в связи с чем возникает необходимость выявления и анализа наиболее перспективных направлений предсказания путей повышения механических и эксплуатационных свойств этого ВЭС, что и являлось целью настоящей работы.

Результаты работы и их обсуждение

Для сплава Кантора CoCrFeNiMn можно выделить основные подходы к решению фундаментальной проблемы физики твердого тела – повышения механических свойств. Это анализ термической обработки, пластической деформации и внешних воздействий; квантомеханические расчеты кристаллической и электронной структуры; компьютерное моделирование; использование расчета фазовых диаграмм (Calphad) и др. [16].

Повышение механических свойств ВЭС Кантора легированием, выделениями и термической обработкой

Первый подход, на взгляд авторов, состоит в поиске закономерностей среди большого количества свежих экспериментальных данных и в формировании критериев улучшения прочностных и пластических свойств ВЭС. Так, варьированием температурных режимов отжига (720 ч при 800 °С) можно достичь в сплаве Кантора выделений ОЦК фазы, обогащенной хромом с содержанием марганца 10 – 15 % (ат.), и σ -фазы с содержанием марганца 25 – 30 % (ат.) соответственно. Сравнениями с вычисленной фазовой диаграммой на основе термодинамической базы данных было подтверждено предсказание стабильности ГЦК фазы и невозможность такого предсказания для стабильности σ - и ОЦК фаз [1, 2, 16]. По данным измерений микротвердости выделения σ -фазы значительно упрочняют ВЭС CoCrFeMnNi_{2-x} ($x = 1,25; 1,5$). Полученные результаты являются основой для разработки состава и параметров термической обработки сплава Кантора.

В последние годы также делаются попытки улучшения механических свойств ВЭС Кантора путем легирования различными элементами. В работе японских исследователей [24] проанализирована роль титана и кремния в фазовом равновесии и изменении механических свойств эвдиатомного сплава Кантора. Показано, что титан стабилизирует σ -фазу, A12 и C14 фазы Ловеса, тогда как кремний стабилизирует A13 фазу. Фазовые соотношения были представлены проекциями на изотермическом поперечном сечении (CoFeMnNi)C_{2-x} при температуре 1000 °С сплава Кантора. Механические испытания показали рост пределов прочности и текучести при легировании титаном и кремнием, причем эффект

влияния добавок титана более значителен. Это может быть связано с различным деформационным упрочнением сплава Кантора с добавками.

Из классического металловедения хорошо известна роль бора в повышении прочности стали и износостойкости наплавочных покрытий за счет образования высокотвердых соединений. Количество работ по влиянию бора на структурно-фазовое состояние и механические свойства пятикомпонентных ВЭС крайне ограничено. В работе [25] на образцах CoCrFeNiCuB_x ($x = 0 - 5$ % (ат.)), полученных двухстадийным спеканием и вакуумно-дуговой плавкой (методами современного физического материаловедения), этот пробел восполнен. Показано, что ВЭС на базе ГЦК матрицы содержат дендритную фазу с высоким содержанием FeCrCoNi и междендритную фазу с высоким содержанием меди. Рост твердости при увеличении содержания бора составил 337 HV. При содержании бора 3 % (ат.) при испытаниях на изгиб была достигнута максимальная прочность 1900 МПа при хороших параметрах пластичности.

Одной из привлекательных стратегий создания многокомпонентных литых ВЭС является предложенная в работе [26] идея фазового разделения (и/или выделения), индуцированного снижением конфигурационной энтропии с понижением температуры при охлаждении и литье. Отмечено, что наличие меди в сплавах, подобных сплаву Кантора, расширяет фазовое разделение (и выделение фаз), поскольку медь обладает высокой положительной энтальпией смешения с рядом переходных металлов. Было предположено, что снижение энтальпии смешения через сепарацию обогащенной иедью фазы от обогащенных Co-Cr или Fe-Cr фаз индуцирует двух- или трехфазную структуры. Ранее авторами работы [26] было отмечено, что иерархически структурированный CrFeNiMn_{0,5}Cu_{0,5} ВЭС обеспечивал великолепное сочетание прочности и пластичности (1,02 ГПа/28 %), что позволяет с оптимизмом предполагать его промышленное использование. Вместе с тем еще не до конца ясны механизмы деформации этого литого сплава с микро- и нановыделениями.

Дисперсионное упрочнение и квазилинейное деформационное упрочнение литого CoCrCu_{1,5}MnNi ВЭС обеспечивают превосходное сочетание предела текучести и пластичности как при комнатной температуре (431,5 МПа/55 %), так и при криогенных условиях (600 МПа/67 %) [26]. Этот сплав имеет двойную ГЦК фазовую структуру с дендритными областями, обогащенными выделениями Co-Cr, и междендритными областями, богатыми выделениями Cu-Mn. Это выделения субмикронного и наноразмерного масштабов (соответственно) появляются благодаря сниже-

нию растворимости элементов в двух фазах. Природа квазилинейного деформационного упрочнения связана с деформационно индуцированным накоплением дефектов дислокационного характера, дефектов упаковки и двойников.

Новая парадигма разработки ВЭС Кантора низкой стоимости предложена в работе [27]. Рассмотрена стратегия проектирования сверхпрочных и пластичных многокомпонентных ГЦК сплавов путем введения так называемого «локального химического порядка», управляемого междуузлиями и создаваемого посредством простой термомеханической обработки. В опытном многокомпонентном сплаве CoCrFeMnNi , обработанном методом частичного рекристаллизационного отжига, преобладает высокая плотность тонких реек, содержащих домены ближнего и среднего порядка. Эти рейки развиваются из плоских дислокационных полос скольжения, обусловленных внутренним ближним порядком сплава при предшествующей холодной деформации. В многокомпонентном метастабильном сплаве $\text{Fe}_{30}\text{Mn}_{30}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ с пониженным содержанием дорогих никеля и кобальта (по отношению к сплаву Кантора) локальный химический порядок состоял в формировании гетероструктур с нерекристаллизованными зернами с тонкими рейками и незначительным количеством рекристаллизованных зерен субмикронного размера с нанонитридами. За счет упрочняющего действия реек локальный химический порядок обеспечивает сверхвысокий (1,34 ГПа) предел текучести, а деформационное двойникование способствует относительному удлинению 13,9 %. Универсальность стратегии дизайна подтверждена на многокомпонентной аустенитной стали. На примере ВЭС CoCrNiMnAl показано, что одним из способов достижения хорошей комбинации свойств прочность – пластичность является изменение химического состава. В ВЭС, не содержащем железа, это во многом определяется отсутствием хрупкой σ -фазы [28, 29]. Подводя краткий итог рассмотрения публикаций по упрочнению пятикомпонентных ВЭС, можно констатировать, что количество статей по всем семействам ВЭС, упрочненных ванадием, цирконием, ниобием, ограничено. Из работ по классическому металлосплавлению, посвященных изучению влияния микролегирования на свойства сталей, известна положительная роль ванадия, циркония и ниобия в упрочнении, например, перлитных сталей. Это позволяет предположить необходимость выяснения их роли в упрочнении ВЭС, что должно стать одним из приоритетных дальнейших направлений исследований. И здесь можно ожидать прорывных достижений.

Использование программы Calphad

По своему химическому составу эквивалентный сплав Кантора достаточно дорог для практиче-

ского применения. В работе [30] с использованием программы Calphad (Calculation Phase Diagram) был проведен анализ сплавов состава $\text{Co}_{10}\text{Cr}_{12}\text{Fe}_{43}\text{Mn}_{18}\text{Ni}_{17}$, стоимость которых на 40 % ниже. Несмотря на то, что при комнатной температуре сплавы обладали пониженной прочностью по сравнению с эквивалентным ВЭС, при 873 К прочность значительно выше. Это во многом объясняется деформационным двойникованием из-за низкой энергии дефектов упаковки при комнатной температуре. При расчете использовали модель Лабуша для расчета эффекта «размягчения» при твердорастворном упрочнении сплава Кантора. Такие расчеты позволяют создать алгоритм разработки дизайна сплава с набором определенных механических свойств.

Выглядит обоснованной попытка автоматизированной оценки кинетической базы данных для ГЦК ВЭС. Разработка точных кинетических баз данных путем параметризации состава и температурных зависимостей подвижностей атомов необходима для корректировки многокомпонентных расчетов и моделирования Calphad [31]. На примере ВЭС CoCrFeNiMn предлагается автоматизированная процедура оценки, включающая хранение исходных данных и результатов оценки, автоматическое их взвешивание, выбор параметров и повторные оценки. Предлагаемое программное обеспечение, написанное на языке Python, использует только данные о диффузии индикатора для четкого разделения термодинамических и кинетических данных. Созданная база данных действительно для всего диапазона составов пятикомпонентных ВЭС.

На основании экспериментальных данных авторам работы [32] удалось получить полиномиальное уравнение, связывающее значения прочности (твердости) для ВЭС с ГЦК решеткой системы сплава Кантора, содержащей четыре – пять элементов. Важным выводом исследования является утверждение, что с ростом содержания железа прочность пятикомпонентного сплава Кантора снижается. Это обусловлено снижением модуля сдвига при снижении концентрации железа. Важным представляется роль энтальпии смешения и электронной концентрации. Показано, что прочность сплавов Кантора растет при снижении энтальпии смешения и увеличении концентрации валентных электронов. Последнее представляется особенно важным с точки зрения управления механическими свойствами, поскольку позволяет целенаправленно повышать или понижать их значения.

Комплекс программ термодинамических расчетов Calphad может быть весьма полезным для разработки новых ВЭС CoCrFeNiMn с повышенной прочностью. Компьютерное термодинамиче-

ское прогнозирование фазовых равновесий является при этом основой, поскольку механические свойства во многом определяются фазовым составом сплавов. Сама по себе эта задача представляется достаточно сложной ввиду неполноты описания, в частности, тройных систем. В работе [33] сделана удачная попытка разработки самосогласованного термодинамического описания пятикомпонентной системы сплава Кантора путем завершения описания для всех составляющих тройных подсистем и новых термодинамических оценок для сплавов CoCrNi и CoCrMn.

Надежность разработанного термодинамического описания пятикомпонентного сплава Кантора подтверждается сравнением рассчитанных вертикальных сечений пятикомпонентной фазовой диаграммы с имеющимися экспериментальными данными. Это дает основание для термодинамического описания систем более высокого порядка с различными дополнительными элементами.

Для улучшения прочностных характеристик сплава Кантора делались и делаются попытки введения различных легирующих элементов [34 – 36]. Разрабатывая дизайн нового сплава Кантора, необходимо иметь ввиду возможность образования интерметаллидных σ - и B2 фаз [37, 38]. Влияние легирующих элементов на фазовую стабильность очень сложно (их индивидуальный вклад для многокомпонентного сплава, каким является сплав Кантора, невелик), что не позволяет надежно предсказать ее.

Выход видится в учете одновременного влияния различных легирующих элементов. А это может быть реализовано в рамках Calphad (Calculation of Phase Diagram). Коммерческие базы данных (TCHEA и PanHEA) не дают возможности воспроизвести экспериментальные вертикальные сечения ВЭС из пяти элементов и, соответственно, адекватно предсказать фазовое равновесие между ГЦК, ОЦК и σ -фазами. Для этого необходимо термодинамическое описание всех двойных и тройных систем. К сожалению, для большинства многокомпонентных ВЭС это не разработано. Согласно литературным данным легирование ВЭС осуществляется в широком диапазоне концентраций, что выдвигает в число важных проблем термодинамическое описание всех тройных систем, оказывающих существенное влияние на предсказание фазового равновесия.

Наиболее подробный анализ фазообразования в пятикомпонентных ВЭС, состоящих из кобальта, хрома, железа, никеля, марганца, алюминия, меди, был проведен в работе [38]. Было рассмотрено 2436 композиций, из которых Calphad выбрал 1761 вариант для надежного прогнозирования образования ОЦК/B2 и ГЦК фаз, исключая аморфную фазу и интерметаллиды.

Было показано, что термодинамические расчеты и данные эксперимента практически совпадают. По мере увеличения разницы атомных размеров элементов образуется больше сплавов ОЦК/B2 по сравнению с ВЭС с ГЦК структурой. Было обнаружено, что концентрация валентных электронов является наиболее важным параметром для предсказания фаз ОЦК/B2, ГЦК, ОЦК/B2 + ГЦК. Эти результаты очень важны для дизайна ВЭС с определенной структурой и, соответственно, свойствами.

Новый подход к созданию эвтектических ВЭС из пяти элементов предложен в работе [39]. В основе этого подхода – возможность использования композиционных фазовых диаграмм и энтропии смешения двух и трехкомпонентных эвтектических сплавов при разработке новых ВЭС. Направление поиска таких ВЭС вполне оправдано, поскольку пятикомпонентные эвтектические ВЭС демонстрируют удачную комбинацию высоких прочностных и пластических свойств [40 – 42] благодаря пластинчатым композитным микроструктурам.

Надежных фазовых диаграмм для сплавов из пяти элементов явно недостаточно, поэтому предлагаемый в работе [39] подход выглядит обнадеживающим.

Заключение

В настоящем кратком обзоре проведен анализ работ последних трех лет по легированию, упрочнению выделениями, термической обработкой и использованию фазовых диаграмм Calphad.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy alloys. Springer. Advanced structured materials. 2021. 110 p.
2. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Shlyarova Yu.A., Panchenko I.A. Structure and properties of high-entropy alloys. Moscow: Science, 2021. 203 p.
3. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys // *Annales de Chimie – Science des Matériaux*. 2006. Vol. 31(6). P. 633–648. <http://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648>
4. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys // *Progress in Materials Science*. 2014. Vol. 61. P. 1–93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
5. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multi-component alloys // *Materials Science and Engineering A*. 2004. Vol. 375-377. P. 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>

6. George E.P., Curtin W.A., Tasan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // *Acta Materialia*. 2020. Vol. 188. P. 435–474. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>
7. Li Z., Zhao S., Ritchie R.O., Meyers M.A. Mechanical properties of high-entropy alloys with emphasis on face-centered cubic alloys // *Progress in Materials Science*. 2019. Vol. 102. P. 296–345. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.12.003>
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. Vol. 375-377. P. 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
9. Otto F., Dlouhy A., Somsen C., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61(15). P. 5743–5755. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018>
10. Schuh B., Mendez-Martin F., Volker B., George E.P., Clemens H., Pippan R., Hohenwarter A. Mechanical properties, microstructure and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy after severe plastic deformation // *Acta Materialia*. 2015. Vol. 96. P. 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.025>
11. 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. Т. 64. № 4. С. 249–258. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>
12. 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. Т. 64. № 8. С. 599–605. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-599-605>
13. Ikeda Y., Tanaka I., Neugebauer J., Kormann F. Impact of interstitial C on phase stability and stacking-fault energy of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy // *Physical Review Materials*. 2019. Vol. 3. Article 113603. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.113603>
14. Listyawan T.A., Lee H., Park N., Lee U. Microstructure and mechanical properties of CoCrFeMnNi high entropy alloy with ultrasonic nanocrystal surface modification process // *Journal of Materials Science and Technology*. 2020. Vol. 57. P. 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.02.083>
15. Guo L., Wu W., Ni S., Yuan Z., Cao Y., Wang Z., Song M. Strengthening the FeCoCrNiMo_{0,15} HEA by gradient structure // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 841. Article 155688. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155688>
16. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // *Физика металлов и металловедение*. 2020. Т. 121. № 8. С. 807–841. <https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>
17. Raturi A., Aditya C.J., Gurao N.P., Biswak K. ICME approach to explore equiatomic and non-equiatomic single phase BCC refractory high entropy alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 806. P. 587–595. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.387>
18. 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. Vol. 783. P. 729–742. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.325>
19. Menou E., Tancret F., Toda-Caraballo I., Ramstein G., Castany P., Bertrand E., Gautier N., Rivera Diaz-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. Vol. 156. P. 120–123. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.07.024>
20. 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. Vol. 101. P. 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2018.07.009>
21. Alaneme K.K., Bodunrin M.O., Oke S.R. Processing, alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties of high entropy alloys: a review // *Journal of Materials Research and Technology*. 2016. Vol. 5(4). P. 384–393. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.03.004>
22. High-Entropy Alloys. Second edition / B.S. Murty, J.W. Yeh, Ranganathan S., P.P. Bhattacharjee. Amsterdam: Elsevier, 2019. 374 p.
23. Zhang Y. High-Entropy Materials. A brief introduction. Singapore: Springer Nature, 2019. 159 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8526-1>
24. Yamanaka S., Ikeda K., Miura S. The effect of titanium and silicon addition on phase equilibrium and mechanical properties of CoCrFeMnNi-based high entropy alloy // *Jour-*

- nal of Materials Research. 2021. Vol. 36. P. 2056–2070. <https://doi.org/10.1557/s43578-021-00251-0>
25. Algan Şimşek İ.B., Arik M.N., Talaş Ş., Kurt A. The Effect of B Addition on the Microstructural and Mechanical Properties of FeNiCoCrCu High Entropy Alloys // Metallurgical and Materials Transactions A. 2021. Vol. 52. P. 1749–1758. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06186-9>
26. Shim S.H., Pouraliakbar H., Lee B.J., Kim Y.K., Rizi M.S., Hong S.I. Strengthening and deformation behavior of as-cast CoCrCu1.5MnNi high entropy alloy with micro-/nanoscale precipitation // Materials science and Engineering A. 2022. Vol. 853. Article 143729. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143729>
27. He Z., Guo Y., Sun L., Yan H.-L., Guan X., Jiang S., Shen Y., Yin W., Zhao X., Li Z., Jia N. Interstitial-driven local chemical order enables ultrastrong face-centered cubic multicomponent alloys // Acta Materialia. 2023. Vol. 243. Article 118495. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.118495>
28. Knieps M.S., Messe O.M.D.M., Barriobero-Vila P., Hecht U. Advanced characterization of two novel Fe-rich high entropy alloys developed for laser powder bed fusion in the Al-Co-Cr-Fe-Ni-Zr system // Materialia. 2022. Vol. 26. Article 101615. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101615>
29. 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. Vol. 783. P. 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.329>
30. Conway P.L.J., Klaver T.P.C., Steggo J., Ghassemali E. High entropy alloys towards industrial applications: High-throughput screening and experimental investigation // Materials Science and Engineering: A. 2022. Vol. 830. Article 142297. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142297>
31. Abrahams K., Zomorodpoosh S., Khorasgani A., Roslyakova I., Steinbach I., Kundin J. Automated assessment of a kinetic database for fcc Co–Cr–Fe–Mn–Ni high entropy alloys // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 29. No. 5. Article 055007. <https://doi.org/10.1088/1361-651X/abf62b>
32. Shafiei A. Simple approach to model the strength of solid-solution high entropy alloys in Co–Cr–Fe–Mn–Ni system // Strength of materials. 2022. Vol. 54. P. 705–716. <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00448-6>
33. Do H.-S., Choi W., Byeong-Joo L. A thermodynamic description for the Co–Cr–Fe–Mn–Ni system // Journal of Materials Science. 2022. Vol. 57. P. 1373–1389. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06604-8>
34. Gao N., Lu D.H., Zhao Y.Y., Liu X.W., Liu G.H., Wu Y., Liu G., Fan Z.T., Lu Z.P., George E.P. Strengthening of a CrMnFeCoNi high-entropy alloy by carbide precipitation // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 792. P. 1028–1035. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.121>
35. Jo Y.H., Jung S., Choi W.-M., Sohn S.S., Kim H.S., Lee B.-J., Kim N.J., Lee S. Cryogenic strength improvement by utilizing room-temperature deformation twinning in a partially recrystallized VCrMnFeCoNi high-entropy alloy // Nature Communications. 2017. Vol. 8. Article 15719. <https://doi.org/10.1038/ncomms15719>
36. Lu Y., Dong Y., Guo S., Jiang L., Kang H., Wang T., Wen B., Wang Z., Jie J., Cao Z., Ruan H., Li T. A Promising New Class of High-Temperature Alloys: Eutectic High-Entropy Alloys // Scientific Reports. 2014. Vol. 4. Article 6200. <https://doi.org/10.1038/srep06200>
37. Otto F., Dlouhý A., Pradeep K.G., Kuběnová M., Raabe D., Eggeler G., George E.P. Decomposition of the single-phase high-entropy alloy CrMnFeCoNi after prolonged anneals at intermediate temperatures // Acta Materialia. 2016. Vol. 112. P. 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.04.005>
38. Stepanov N.D., Shaysultanov D.G., Ozerov M.S., Zherebtsov S.V., Salishchev G.A. Second phase formation in the CoCrFeNiMn high entropy alloy after recrystallization annealing // Materials Letters. 2016. Vol. 185. P. 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.08.088>
39. Shafiei A. Design of Eutectic high entropy alloys // Metallurgical and Materials Transactions A. 2022. Vol. 53. P. 4329–4361. <https://doi.org/10.1007/s11661-022-06831-x>
40. Wani I.S., Bhattacharjee T., Sheikh S., Bhattacharjee P.P., Guo S., Tsuji N. Tailoring nanostructures and mechanical properties of AlCoCrFeNi2.1 eutectic high entropy alloy using thermo-mechanical processing // Materials Science and Engineering: A. 2016. Vol. 675. P. 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.048>
41. Zhang P.C., Zhai B., Wang H.P. Effect of microstructure, strain rate, and elevated temperature on the compression property of Fe–Co–Ni–Cr–Zr Alloy // Metallurgical and Materials Transactions A. 2023. Vol. 54. P. 346–357. <https://doi.org/10.1007/s11661-022-06887-9>

42. Wu M., Wang S., Huang H., Shu D., Sun B. CALPHAD aided eutectic high-entropy alloy design // *Materials Letters*. 2020. Vol. 262. Article 127175. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127175>

REFERENCES

- Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. *Structure and properties of high-entropy alloys*. Springer. Advanced structured materials. 2021, 110 p.
- Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Shlyarova Yu.A., Panchenko I.A. *Structure and properties of high-entropy alloys*. Moscow: Science, 2021. 203 p.
- Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie – Science des Matériaux*. 2006, vol. 31(6), pp. 633–648. <http://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648>
- Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 2014, vol. 61, pp. 1–93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
- George E.P., Curtin W.A., Tazan C.C. High entropy alloys: a focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia*. 2020, vol. 188, pp. 435–474. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>
- Li Z., Zhao S., Ritchie R.O., Meyers M.A. Mechanical properties of high-entropy alloys with emphasis on face-centered cubic alloys. *Progress in Materials Science*. 2019, vol. 102, pp. 296–345. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.12.003>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
- Otto F., Dlouhy A., Somsen C., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2013, vol. 61 (15), pp. 5743–5755. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018>
- Schuh B., Mendez-Martin F., Volker B., George E.P., Clemens H., Pippin R., Hohenwarter A. Mechanical properties, microstructure and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy after severe plastic deformation. *Acta Materialia*. 2015, vol. 96, pp. 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.025>
- 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 vuzov. Ferrous metallurgy*. 2021, vol. 64, no.4, pp. 249–258. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>
- Gromov V.E., Rubannikova Yu.A., Konovalov S.V., Osintsev K.A., Vorobyov S.V. Formation of improved mechanical properties of the high-entropy Cantor alloy. *Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp 599–605. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-599-605>
- Ikeda Y., Tanaka I., Neugebauer J., Kormann F. Impact of interstitial C on phase stability and stacking-fault energy of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Physical Review Materials*. 2019, vol. 3, article 113603. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.113603>
- Listyawan T.A., Lee H., Park N., Lee U. Microstructure and mechanical properties of CoCrFeMnNi high entropy alloy with ultrasonic nanocrystal surface modification process. *Journal of Materials Science and Technology*. 2020, vol. 57, pp. 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.02.083>
- Guo L., Wu W., Ni S., Yuan Z., Cao Y., Wang Z., Song M. Strengthening the FeCoCrNiMo_{0,15} HEA by gradient structure. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020, vol. 841, article 155688. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155688>
- Rogachev A.S. Structure, stability and properties of high entropy alloys. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2020, vol. 121, no. 8, pp. 807–841. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>
- Raturi A., Aditya C.J., Gurao N.P., Biswak K. ICME approach to explore equiatomic and non-equiatomic single phase BCC refractory high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019, vol. 806, pp. 587–595. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.387>
- 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, vol. 783, pp. 729–742. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.325>
- Menou E., Tancret F., Toda-Caraballo I., Ramstein G., Castany P., Bertrand E., Gautier N., Rive-

- ra 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, vol. 156, pp. 120–123. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.07.024>
20. 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, vol. 101, pp. 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2018.07.009>
 21. Alaneme K.K., Bodunrin M.O., Oke S.R. Processing, alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties of high entropy alloys: a review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2016, vol. 5(4), pp. 384–393. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.03.004>
 22. High-entropy alloys. Second edition / B.S. Murty, J.W. Yeh, Ranganathan S., P.P. Bhattacharjee. Amsterdam: Elsevier, 2019, 374 p.
 23. Zhang Y. *High-entropy materials. A brief introduction*. Singapore: Springer Nature, 2019, 159 pp. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8526-1>
 24. Yamanaka S., Ikeda Ki., Miura S. The effect of titanium and silicon addition on phase equilibrium and mechanical properties of CoCrFeMnNi-based high entropy alloy. *Journal of Materials Research*. 2021, vol. 36, pp. 2056–2070. <https://doi.org/10.1557/s43578-021-00251-0>
 25. Algan Şimşek İ.B., Arık M.N., Talaş Ş., Kurt A. The effect of B addition on the microstructural and mechanical properties of FeNiCoCrCu high entropy alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2021, vol. 52, pp. 1749–1758. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06186-9>
 26. Shim S.H., Pouraliakbar H., Lee B.J., Kim Y.K., Rizi M.S., Hong S.I. Strengthening and deformation behavior of as-cast CoCrCu1.5MnNi high entropy alloy with micro-/nanoscale precipitation. *Materials science and Engineering A*. 2022, vol. 853, article 143729. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143729>
 27. He Z., Guo Y., Sun L., Yan H.-L., Guan X., Jiang S., Shen Y., Yin W., Zhao X., Li Z., Jia N. Interstitial-driven local chemical order enables ultrastrong face-centered cubic multicomponent alloys. *Acta Materialia*. 2023, vol. 243, article 118495. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.118495>
 28. Knieps M.S., Messe O.M.D.M., Barriobero-Vila P., Hecht U. Advanced characterization of two novel Fe-rich high entropy alloys developed for laser powder bed fusion in the Al-Co-Cr-Fe-Ni-Zr system. *Materialia*. 2022, vol. 26, article 101615. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101615>
 29. 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, vol. 783, pp. 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.329>
 30. Conway P.L.J., Klaver T.P.C., Steggo J., Ghassemali E. High entropy alloys towards industrial applications: high-throughput screening and experimental investigation. *Materials Science and Engineering: A*. 2022, vol. 830, article 142297. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142297>
 31. Abrahams K., Zomorodpoosh S., Khorasgani A., Roslyakova I., Steinbach I., Kundin J. Automated assessment of a kinetic database for FCC Co-Cr-Fe-Mn-Ni high entropy alloys. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2021, vol. 29, no. 5, article 055007. <https://doi.org/10.1088/1361-651X/abf62b>
 32. Shafiei A. Simple approach to model the strength of solid-solution high entropy alloys in Co-Cr-Fe-Mn-Ni system. *Strength of materials*. 2022, vol. 54, pp. 705–716. <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00448-6>
 33. Do H.-S., Choi W., Byeong-Joo L. A thermodynamic description for the Co-Cr-Fe-Mn-Ni system. *Journal of Materials Science*. 2022, vol. 57, pp. 1373–1389. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06604-8>
 34. Gao N., Lu D.H., Zhao Y.Y., Liu X.W., Liu G.H., Wu Y., Liu G., Fan Z.T., Lu Z.P., George E.P. Strengthening of a CrMnFeCoNi high-entropy alloy by carbide precipitation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019, vol. 792, pp. 1028–1035. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.121>
 35. Jo Y.H., Jung S., Choi W.-M., Sohn S.S., Kim H.S., Lee B.-J., Kim N.J., Lee S. Cryogenic strength improvement by utilizing room-temperature deformation twinning in a partially recrystallized VCrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Nature Communications*. 2017, vol. 8, article 15719. <https://doi.org/10.1038/ncomms15719>
 36. Lu Y., Dong Y., Guo S., Jiang L., Kang H., Wang T., Wen B., Wang Z., Jie J., Cao Z., Ru-an H., Li T. A promising new class of high-temperature alloys: eutectic high-entropy alloys. *Scientific Reports*. 2014, vol. 4, article 6200. <https://doi.org/10.1038/srep06200>
 37. Otto F., Dlouhý A., Pradeep K.G., Kuběnová M., Raabe D., Eggeler G., George E.P. Decomposition of the single-phase high-entropy alloy CrMnFeCoNi after prolonged anneals at intermediate temperatures. *Acta Materialia*.

- 2016, vol. 112, pp. 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.04.005>
38. Stepanov N.D., Shaysultanov D.G., Ozerov M.S., Zherebtsov S.V., Salishchev G.A. Second phase formation in the CoCrFeNiMn high entropy alloy after recrystallization annealing. *Materials Letters*. 2016, vol. 185, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.08.088>
39. Shafiei A. Design of eutectic high entropy alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2022, vol. 53, pp. 4329–4361. <https://doi.org/10.1007/s11661-022-06831-x>
40. Wani I.S., Bhattacharjee T., Sheikh S., Bhattacharjee P.P., Guo S., Tsuji N. Tailoring nanostructures and mechanical properties of AlCoCrFeNi_{2.1} eutectic high entropy alloy using thermo-mechanical processing. *Materials Science and Engineering: A*. 2016, vol. 675, pp. 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.048>
41. Zhang P.C., Zhai B., Wang H.P. Effect of microstructure, strain rate, and elevated temperature on the compression property of Fe–Co–Ni–Cr–Zr alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2023, vol. 54, pp. 346–357. <https://doi.org/10.1007/s11661-022-06887-9>
42. Wu M., Wang S., Huang H., Shu D., Sun B. CALPHAD aided eutectic high-entropy alloy design. *Materials Letters*. 2020, vol. 262, article 127175. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127175>

Сведения об авторах:

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

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-4809-8660
E-mail: konovserg@gmail.com

Сиджан Чен, PhD, профессор, профессор университета Вэньчжоу, г. Вэньчжоу, Китай
ORCID: 0000-0003-1649-1820
E-mail: chenxizhang@wzu.edu.cn

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

Ирина Алексеевна Панченко, к.т.н., заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-1631-9644
E-mail: i.r.i.ss@yandex.ru

Виталий Владиславович Шляров, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-8130-648X
E-mail: shlyarov@mail.ru

Information about the authors

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343

Sergey V. Konvalov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University
E-mail: konovserg@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4809-8660

Xizhang Chen, PhD, Professor of Wenzhou University, Wenzhou, China
E-mail: chenxizhang@wzu.edu.cn
ORCID: 0000-0003-1649-1820

Mikhail O. Efimov, Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University
E-mail: moefimov@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4890-3730

Irina A. Panchenko, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University
E-mail: i.r.i.ss@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-1631-9644

Vitaly V. Shlyarov, Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Researcher of Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University
E-mail: shlyarov@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8130-648X

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 05.05.2023
 После доработки 19.05.2023
 Принята к публикации 22.05.2023

Received 05.05.2023
 Revised 19.05.2023
 Accepted 22.05.2023