



УДК 536.425:539.25:539.351

DOI 10.17073/0368-0797-2024-3-283-292

Обзорная статья  
Review article

## ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВ ВЭС САНТОР CoCrFeNiMn и CoCrFeNiAl

В. Е. Громов , С. В. Коновалов, М. О. Ефимов,  
И. А. Панченко, В. В. Шляров

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

 gromov@physics.sibsiu.ru

**Аннотация.** Созданные одними из первых и исследованные более 20 лет назад высокоэнтропийные пятикомпонентные сплавы CoCrFeNiMn (сплав Cantor) и CoCrFeNiAl по-прежнему привлекают внимание исследователей в области физического материаловедения из-за возможности их применения в различных отраслях промышленности благодаря удачному сочетанию прочностных и пластических свойств. К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал по управлению свойствами этих сплавов. В настоящей работе выполнен обзор публикаций отечественных и зарубежных авторов по двум направлениям улучшения свойств этих сплавов: легированием, выделениями и термообработкой и использованием фазовых диаграмм CALPHAD. По первому направлению проанализирована роль легирования бором, алюминием, ванадием, кремнием, ниобием;  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -нановыделениями, различными режимами термической и деформационной обработки. Сделан вывод о необходимости проведения экспериментов по легированию ВЭС Zr и Nb, хорошо зарекомендовавших себя в упрочнении сталей. Создание и модифицирование свойств пятикомпонентных ВЭС возможно при использовании компьютерных программ CALPHAD, разработанных для расчета диаграмм состояния. Проанализированные в статье результаты публикаций по термодинамическому описанию пятикомпонентных сплавов подтверждены сравнением фазовых диаграмм с имеющимися экспериментальными данными. В одной из анализируемых работ по фазообразованию пятикомпонентных состоящих из Co, Cr, Fe, Ni, Al, Mn, Cu ВЭС рассмотрено 2436 композиций, позволивших определить 1761 вариант надежного прогнозирования образования ОЦК/B2 и ГЦК фаз, минуя аморфные фазы и интерметаллиды, тем самым конструируя определенный уровень механических свойств. Показано, что на основе расчета фазовых диаграмм CALPHAD возможен дизайн нового поколения ВЭС.

**Ключевые слова:** высокоэнтропийные сплавы, легирование, упрочнение, термообработка, программа CALPHAD

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда 23-49-00015.

**Для цитирования:** Громов В.Е., Коновалов С.В., Ефимов М.О., Панченко И.А., Шляров В.В. Пути улучшения свойств ВЭС Cantor CoCrFeNiMn и CoCrFeNiAl. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(3):283–292.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-283-292>

## WAYS TO IMPROVE THE PROPERTIES OF HIGH-ENTROPY ALLOYS CANTOR CoCrFeNiMn AND CoCrFeNiAl

V. E. Gromov , S. V. Konovalov, M. O. Efimov,  
I. A. Panchenko, V. V. Shlyarov

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

 gromov@physics.sibsiu.ru

**Abstract.** Created one of the first and studied more than 20 years ago, high-entropy five-component alloys CoCrFeNiMn (Cantor alloy) and CoCrFeNiAl still attract the attention of researchers in the field of physical materials science due to their possible application in various industries because of their successful combination of strength and plastic properties. To date, a large amount of experimental materials has been accumulated on the ways to control the properties of these alloys. This article reviews the publications of domestic and foreign authors in two areas of improving the properties of these alloys: alloying, precipitation and heat treatment, and the use of CALPHAD phase diagrams. In the first direction, the role of alloying with B, Al, V, Si, Nb is analyzed;  $\gamma$  and  $\gamma'$  nanoprecipitations, various modes of thermal and deformation processing. It was concluded that it is necessary to conduct experiments on the alloying of HEAs with Zr and Nb, which have proven themselves well in hardening steels. Creation and modification of the properties of five-component HEAs is possible using the CALPHAD computer programs developed for calcu-

lating 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. In one of the analyzed works on the phase formation of five-component HEAs consisting of Co, Cr, Fe, Ni, Al, Mn, Cu, 2436 compositions were considered, which made it possible to determine 1761 variants of reliable prediction of the formation of bcc/B2 and fcc phases, bypassing amorphous phases and intermetallic compounds, thereby designing a certain level of mechanical properties. It is shown that the design of a new generation of HEAs is possible based on calculation of the CALPHAD phase diagrams.

**Keywords:** high-entropy alloys, CoCrFeNiMn, CoCrFeNiAl, alloying, hardening, heat treatment, CALPHAD

**Acknowledgements:** The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-49-00015.

**For citation:** Gromov V.E., Kononov S.V., Efimov M.O., Panchenko I.A., Shlyarov V.V. Ways to improve the properties of high-entropy alloys Cantor CoCrFeNiMn and CoCrFeNiAl. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(3):283–292.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-283-292>

## ВВЕДЕНИЕ

Созданный в начале XXI века новый класс металлических материалов (так называемые высокоэнтروпийные сплавы (ВЭС)) привлекает внимание исследователей в области физического материаловедения вследствие высокого уровня свойств, заметно превышающих свойства обычных сплавов [1–5]. Среди первых пятикомпонентных ВЭС исследования были проведены на ВЭС CoCrFeNiMn (сплав Cantor) и CoCrFeNiAl [5–10], которые обладают удачным сочетанием прочностных и пластических свойств.

Обсуждение проблемы улучшения механических и эксплуатационных свойств этих ВЭС началось вскоре после их создания и активно продолжается до настоящего времени. В обзорах [11–14] проанализированы способы повышения механических свойств высокоэнтропийных сплавов CoCrFeNiAl и CoCrFeNiMn ввиду возможных областей их промышленного использования. Решение этой проблемы предполагало усиление зернограницного упрочнения [10], твердорастворного упрочнения, создание нанокристаллического состояния, упрочнение выделениями, частичной аморфизацией, использование упрочняющих поверхностных обработок, разработку новых способов получения ВЭС [14–19], ультразвуковое воздействие [20], формирование градиентов структуры [21] и т.д. Такие подходы могут стимулировать значительное расширение областей применения этих ВЭС. В обзоре [22] на основе анализа экспериментальных результатов отмечено, что существует несколько сотен пятикомпонентных ВЭС, содержащих свыше 40 разных элементов. Все ВЭС условно разделены на девять семейств: 1 – на основе переходных 3d-металлов Al, Co, Cr, Fe, Ni, Mn, Cu, Ti; 2 – на основе тугоплавких металлов 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.

Ввиду колоссально большого объема информации авторы ограничились лишь анализом экспериментальных

работ последних трех лет по упрочнению и модифицированию свойств ВЭС CoCrFeNiMn и CoCrFeNiAl и близких к ним по составу (с использованием CALPHAD). Второй путь исследований – анализ работ по предсказанию состава ВЭС с заданным комплексом высоких функциональных свойств с использованием компьютерного пакета программ CALPHAD, разработанного для расчета диаграмм состояния [23–26]. 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 [22]. Необходимость такого анализа обусловлена еще и тем, что наиболее подробный разбор свойств ВЭС, перспектив их применения выполнен 3–4 года назад [27–29], что при таких темпах публикационной активности является достаточно большим периодом.

В последние 2–3 года продолжается экспоненциальный рост количества публикаций, посвященных ВЭС CoCrFeNiAl и CoCrFeNiMn, в связи с чем возникает необходимость выявления и анализа наиболее перспективных направлений предсказания путей повышения механических и эксплуатационных свойств этих ВЭС, что и являлось целью настоящей работы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для сплавов Cantor CoCrFeNiMn и CoCrFeNiAl можно выделить основные подходы к решению фундаментальной проблемы физики твердого тела (повышение их механических свойств): анализ термической обработки, пластической деформации и внешних воздействий; квантомеханические расчеты кристаллической и электронной структуры; компьютерное моделирование; использование расчета фазовых диаграмм (CALPHAD) и др. [22].

### Повышение механических свойств ВЭС легированием, выделениями и термообработкой

Первый подход состоит в поиске закономерностей среди большого количества свежих эксперименталь-

ных данных и формировании критериев улучшения прочностных и пластических свойств ВЭС.

Оптимальным с точки зрения упрочняющего эффекта для ВЭС с ОЦК и ГЦК решетками является ванадий. Причиной этого является его атомный размер: он велик для ГЦК сплавов и мал для ОЦК. Этому имеется количественное и качественное подтверждение для большого количества сплавов. По мнению авторов работы [30] оптимальная концентрация ванадия должна составлять примерно 25 ат. %.

Варьированием температурных режимов отжига (720 ч при 800 °С) можно достичь выделений ОЦК фазы, обогащенной хромом, и  $\sigma$ -фазы в сплаве Cantor с содержанием марганца 10 – 15 и 25 – 30 ат. % соответственно. Такие выделения не имеют ориентационного соотношения с ГЦК матрицей. Сравнениями с вычисленной фазовой диаграммой на основе термодинамической базы данных было подтверждено предсказание стабильности ГЦК фазы и невозможность такого предсказания для стабильности  $\sigma$  и ОЦК фаз [11; 12; 22]. По данным измерения микротвердости, выделения  $\sigma$ -фазы значительно упрочняют ВЭС CoCrFeMnNi<sub>2-x</sub> ( $x = 1,25; 1,50$ ). Полученные результаты являются основой для разработки состава и термообработки сплава Cantor.

В последние годы также делаются попытки улучшения механических свойств ВЭС Cantor путем легирования различными элементами. В работе японских исследователей [31] проанализирована роль титана и кремния в фазовом равновесии и изменении механических свойств эквивалентного сплава Cantor. Показано, что титан стабилизирует  $\sigma$ -фазу, А12 и С14 фазы Лавеса, тогда как кремний стабилизирует А13 фазу. Фазовые соотношения были представлены проекциями на изотермическом поперечном сечении (CoFeMnNi)-C<sub>2-x</sub> при температуре сплава Cantor 1000 °С. Механические испытания показали рост пределов прочности и текучести при легировании титаном и кремнием, причем эффект добавок титана более значителен. Это может быть связано с различным деформационным упрочнением сплава Cantor с добавками.

В кратком обзоре невозможно претендовать на исчерпывающий анализ состояния проблем улучшения свойств даже двух ВЭС, но можно отметить основные тенденции и подходы по итогам рассмотрения последних наиболее значимых публикаций.

Одним из наиболее обсуждаемых вопросов упрочнения этих ВЭС является выявление роли  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -нановыделений. В работе [32] была представлена серия ВЭС Ni<sub>60-x</sub>Co<sub>x</sub>Cr<sub>10</sub>Fe<sub>10</sub>Al<sub>18</sub>Mo<sub>2</sub> ( $x = 30; 20; 10; 0$ ) с повышенными прочностными и пластическими свойствами. Рост концентрации никеля со снижением концентрации кобальта обеспечивал образование ГЦК фазы с  $\gamma'$ -частицами в ней. В литом состоянии ВЭС Ni<sub>60</sub>Cr<sub>10</sub>Fe<sub>10</sub>Al<sub>18</sub>Mo<sub>2</sub> со структурой ГЦК/ $\gamma'$  + фаза В2 обеспечивал очень высокие значения  $\sigma_{0,2}$  (831 МПа).

Для ниобийсодержащих ВЭС типа CoCrNi<sub>1,5</sub>Nb<sub>0,2</sub> было проведено систематическое исследование влияния температуры (660 – 960 °С) и времени (1 – 48 ч) старения на механические свойства. Отмечено, что старение при 660 °С приводило к образованию наномасштабных  $\gamma''$ -выделений с суперрешеткой ДО22, упрочняющих ВЭС за счет сдвигового дислокационного механизма [33]. Пределы прочности и текучести росли с увеличением времени старения, приводящим к увеличению объемной доли и размеров  $\gamma''$ -выделений, тогда как относительное удлинение снижалось. Старение при 860 и 960 °С в течение 1 ч приводило к образованию полукоргерентных  $\epsilon$ -выделений со структурой ДО19, меняющих механизм упрочнения на Оровановский.

Для проектирования микроструктуры и, соответственно, свойств почти эквивалентных ВЭС AlCoCrFeNi, разработки дисперсионно-упрочненных сплавов нового поколения предложен шаблон на основе ГЦК матрицы, упрочненной ОЦК упорядоченными В2 выделениями [34]. На основе термодинамического моделирования растворов ВЭС Al<sub>0,5</sub>CoCrFeNi был подвергнут изотермическому старению в твердом состоянии для осаждения внутризеренной мелкомасштабной фазы В2. Ранее в работах этих авторов уже проанализирована положительная роль влияния В2 фазы на предел прочности и деформационное упрочнение. В этой же работе отмечено положительное влияние мелкомасштабной В2 фазы на износ и динамическое сжатие. Напряжение течения при истинной деформации 0,02 % увеличилось более, чем в два раза с 670 до 1350 МПа, а предел прочности при сжатии возрос на 20 % с 1160 до 1500 МПа. При этом износостойкость возросла более чем в пять раз. Последний результат следует признать исключительно важным в рамках предложенного подхода улучшения механических свойств.

Из классического металловедения хорошо известна роль бора в повышении прочности стали и износостойкости наплавочных покрытий за счет образования высокотвердых соединений. Однако количество работ по влиянию бора на структурно-фазовое состояние и механические свойства пятикомпонентных ВЭС крайне ограничено. В работе [35] на образцах CoCrFeNiCuB<sub>x</sub> ( $x = 0 \div 5$  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 составил 337 НВ при увеличении содержания бора. При 3 ат. % В при испытаниях на изгиб достигнута максимальная прочность 1900 МПа при хорошей пластичности.

При создании и исследовании упрочнения новых композиций ВЭС роль термообработки как никогда высока. Это наглядно продемонстрировано в работе [36], в которой образец изготовлен комбиниро-

ваным методом кабельно-проволочной дуговой сварки (CCW-ААМ), изучена эволюция микроструктуры и механических свойств двухфазного сплава CoCrFeNiAl (ГЦК + упорядоченная ОЦК фаза В2) при термообработке в течение 8 ч. При 600 °С в матрице В2 отмечено образование большого количества богатой хромом  $\sigma$ -фазы, а в матрице ГЦК – наноразмерной упорядоченной  $L_{12}$  фазы, что привело к росту прочности с 338 НВ до 420 НВ, предела текучести с 654 до 810 МПа, предела прочности с 876 до 1115 МПа, однако относительное удлинение снизилось с 3,11 до 2,46 %. При повышении температуры термообработки до 800 °С размер частиц  $\sigma$ -фазы увеличивался, фаза  $L_{12}$  трансформировалась в фазу В2 с высоким содержанием AlNi. Прочностные свойства при растяжении оставались неизменными, но относительное удлинение выросло на 176 %. При термообработке при 1000 °С растворенная в матрице В2  $\sigma$ -фаза и стержнеобразные выделения В2 значительно укрупняются, что упрочняет сплав. Твердость (308 НВ) и предел текучести (542 МПа) заметно снизились, однако относительное удлинение существенно возросло (14,2 %). Анализ этих результатов позволяет говорить о перспективах создания ВЭС CoCrFeNiAl с комплексом высоких механических свойств и управления физической природой формирования этих свойств режимами термообработки.

Одной из привлекательных стратегий создания многокомпонентных литых ВЭС является предложенная в работе [37] 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 Cantor, расширяет фазовое разделение (и выделение фаз), поскольку медь обладает высокой положительной энтальпией смешения с рядом переходных металлов. Было высказано предположение, что снижение энтальпии смешения через сепарацию обогащенной медью фазы от обогащенных Co–Cr или Fe–Cr фаз индуцирует двух- или трехфазную структуру. Ранее авторами работы [37] было отмечено, что иерархически структурированный ВЭС CrFeNiMn<sub>0,5</sub>Cu<sub>0,5</sub> 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 ВЭС CoCrCu<sub>1,5</sub>MnNi обеспечивают превосходное сочетание предела текучести и пластичности как при комнатной температуре (431,5 МПа, 55 %), так и при криогенных условиях (600 МПа, 67 %) [37]. Этот сплав имеет двойную ГЦК фазовую структуру с дендритными областями, обогащенными Co–Cr, и междендритными областями, богатыми Cu–Mn. Это выделения субмикронного и наноразмерного масштаба соответственно (из-за снижения

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

В работе [38] рассмотрен дизайн эвтектического ВЭС AlCoCrFeNi<sub>2,1</sub> на основе анализа механических свойств, механизмов холодной и горячей деформации. Этот ВЭС имел типичную эвтектическую микроструктуру и состоял из ГЦК фазы и эвтектических В2 фаз с наноразмерными выделениями. Предел прочности и относительное удлинение составляли 1,2 ГПа и 22,8 %. При –196 °С предел текучести составляет 857 МПа, прочности – 1,48 ГПа, коэффициент удлинения – ~20 %. Такая хорошая пластичность может быть связана с превращением фазы  $L_{12}$  в неупорядоченную фазу твердого раствора при низкотемпературной деформации. При высокой температуре упрочнение наноразмерных В12 и  $L_{12}$  фаз осуществляется по механизму Орована и перерезания дислокаций. Отмечается, что пластинчатая структура в литом состоянии трансформировалась в тонкую равноосную, что привело к улучшению прочности и пластичности. Авторы рассмотрели вопрос конструирования ВЭС комплексно, с четырех точек зрения. Первый метод был основан на фазовой диаграмме и ее моделировании, в которой CoCrFeNi рассматривался как один из элементов псевдобинарных эвтектических сплавов. Второй метод основан на учете энтальпии смешения многоэлементных сплавов, где ВЭС AlCoCrFeNi<sub>2,1</sub> являлся эталоном. Имеющие большую отрицательную энтальпию смешения бинарного сплава с никелем цирконий, ниобий и гафний были выбраны для замены алюминия. Третий метод учитывал валентные электроны. В четвертом подходе в настоящей работе рассмотрено создание ВЭС без содержания кобальта из-за его слабого влияния на микроструктуру и фазовый состав. Важность результатов работы [38] состоит в необходимости учета всех четырех точек зрения при конструировании эвтектических ВЭС с высокими свойствами.

Новая парадигма разработки ВЭС Cantor низкой стоимости предложена в работе [39]. 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 порядков. Эти рейки развиваются из плоских дислокационных полос скольжения, обусловленных внутренним ближним порядком сплава при предшествующей холодной деформации. В многокомпонентном метастабильном сплаве Fe<sub>30</sub>Mn<sub>30</sub>Co<sub>10</sub>Cr<sub>10</sub> (ат. %) с пони-

женным содержанием дорогих никеля и кобальта (по отношению к сплаву Cantor) локальный химический порядок состоял в формировании гетероструктур с нерекристаллизованными зернами с тонкими рейками и незначительного количества рекристаллизованных зерен субмикронного размера с нанонитридами. За счет упрочняющего действия реек локальный химический порядок обеспечивает сверхвысокий предел текучести 1,34 ГПа, 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  $\sigma$ -фазы [40]. На основе термодинамических предсказаний было предложено три однофазных ГЦК ВЭС  $\text{Co}_{25}\text{Ni}_{30}\text{Mn}_{30}\text{Cr}_{10}\text{Al}_{15}$ ,  $\text{Co}_{30}\text{Ni}_{25}\text{Mn}_{30}\text{Cr}_{10}\text{Al}_{15}$  и  $\text{Co}_{30}\text{Ni}_{30}\text{Mn}_{25}\text{Cr}_{10}\text{Al}_{15}$ , не содержащих  $\sigma$ -фазы. Показано, что добавление минимального количества алюминия обеспечило упрочняющее действие благодаря образованию контролируемого количества выделений NiAl–B2 в микроструктуре. Подвергнутые интенсивной холодной прокатке с последующим коротким отжигом при 1000 °С сплавы получили высокие значения прочности без потери пластичности. Высокоэнтропийный сплав  $\text{Co}_{30}\text{Ni}_{25}\text{Mn}_{30}\text{Cr}_{10}\text{Al}_{15}$ , обладающий низкой энергией дефекта упаковки, мелким зерном, большой объемной долей двойников и формированием мелкомасштабных выделений, представляет ВЭС с лучшей комбинацией свойств прочность – пластичность.

Подводя краткий итог рассмотрения публикаций по упрочнению пятикомпонентных ВЭС, можно констатировать, что количество статей по всем семействам ВЭС, упрочненных ванадием, цирконием, ниобием, ограничено [41; 42]. Из работ по классическому металлоскопическому изучению влияния микрорегулирования 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 Cantor достаточно дорог для практического применения. В работе [43] 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 стоимости эквивалентного сплава Cantor. Несмотря на то, что при комнатной тем-

пературе сплавы обладали пониженной прочностью по сравнению с эквивалентным ВЭС, при 873 К она была значительно выше. Это во многом объясняется деформационным двойникованием из-за низкой энергии дефектов упаковки при комнатной температуре. При расчете использовалась модель Лабуша для расчета эффекта «размягчения» при твердорастворном упрочнении сплава Cantor. 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 [44]. 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 действительна для всего диапазона составов пятикомпонентных ВЭС.

На основании экспериментальных данных авторам работы [45] удалось получить полиномиальное уравнение прочности (твердости) для ВЭС с ГЦК решеткой, содержащих 4–5 элементов системы сплава Cantor. Важным выводом исследования является утверждение, что с ростом содержания железа прочность пятикомпонентного сплава Cantor снижается. Это обусловлено снижением модуля сдвига при снижении концентрации железа. Важным представляется роль энтальпии смешения и электронной концентрации. Показано, что прочность в сплавах Cantor 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 термодинамическое прогнозирование фазовых равновесий является при этом основой, поскольку механические свойства во многом определяются фазовым составом сплавов. Сама по себе эта задача представляется достаточно сложной ввиду неполноты описания тройных систем. В работе [46] сделана удачная попытка разработки самосогласованного термодинамического описания пятикомпонентной системы сплава Cantor путем завершения описания для всех составляющих тройных подсистем и новых термодинамических оценок для CoCrNi и CoCrMn.

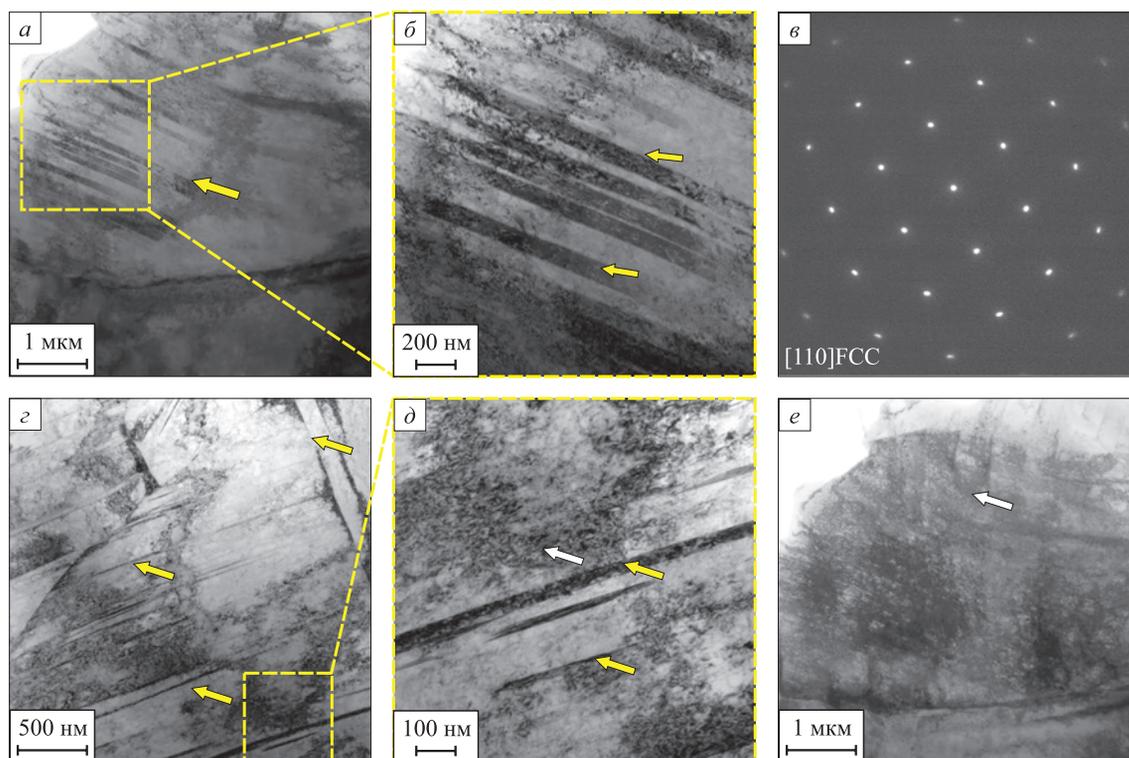
Надежность разработанного термодинамического описания пятикомпонентного сплава Cantor подтверждается сравнением рассчитанных вертикальных сечений пятикомпонентной фазовой диаграммы с имеющимися экспериментальными данными. Это дает основание термодинамического описания систем более высокого порядка с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

Для улучшения прочностных характеристик сплава Cantor делались и делаются попытки введения различных легирующих элементов [47–52]. Разрабатывая дизайн нового сплава Cantor, необходимо учитывать возможность образования интерметаллидных  $\sigma$ - и  $B2$ -фаз [53–55]. Влияние легирующих элементов на фазовую стабильность очень сложно (их индивидуальный вклад для многокомпонентного сплава, каким является сплав Cantor, 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) [56]. Коммерческие базы данных (TCHEA и PanHEA) не дают возможности воспроизвести экспериментальные вертикальные сечения ВЭС из пяти элементов и, соответственно, адекватно предсказать фазо-

вое равновесие между ГЦК, ОЦК и  $\sigma$ -фазами. Для этого необходимо термодинамическое описание для 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 для 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 и меди, был проведен в работе [57]. 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



ПЭМ-изображения разрушенного сплава  $Co_{14}Cr_{30}Ni_{50}Mo_6$  [63]:

- a, б* – изображения полос сдвига в светлом поле и соответствующие дифракционные картины выбранной области;
- г, д* – взаимодействие дислокаций с полосами сдвига;
- е* – светлое поле, изображения клубковой дислокационной субструктуры в другом зерне

TEM images of the destroyed alloy  $Co_{14}Cr_{30}Ni_{50}Mo_6$  [63]:

- a, б* – images of shear bands in a light field and corresponding diffraction patterns of the selected area;
- г, д* – interaction of dislocations with shear bands; *е* – light field, images of a tangle dislocation substructure in another grain

дизайна ВЭС с определенной структурой и, соответственно, свойствами.

Новый подход к созданию эвтектических ВЭС из пяти элементов предложен в работе [58]. Он основан на возможности 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 [59 – 62] благодаря пластинчатым композитным микроструктурам.

Надежных фазовых диаграмм для сплавов из пяти элементов явно недостаточно, поэтому предлагаемый в работе [58] подход выглядит обнадеживающим. Это подтверждают экспериментальные результаты создания эвтектических сплавов систем AlCoCrFeNi и CoCrFeNiTi.

Для разработки новых ВЭС с высоким пределом текучести предлагается метод, сочетающий расчет фазовых диаграмм CALPHAD, разности электроотрицательности и машинное обучение (*machine learning*) [63]. На первом этапе это позволяет избежать образования нежелательных хрупких фаз. Затем, следуя траектории создания новых ВЭС, выявляют в однофазной области точки с высоким пределом текучести и элементный интервал. При этом, если содержание молибдена и железа составляет 6 и 0 % ат. % соответственно, то для никеля и кобальта интервалы расширяются. Дальнейший шаг – экспериментальная проверка разработанного сплава. Показано, что предел текучести однофазного ВЭС  $\text{Co}_{14}\text{Cr}_{30}\text{Ni}_{50}\text{Mo}_6$  с размером зерна 17,1 мкм составил 472 МПа при разнице электроотрицательности 0,136. Высокая пластичность и способность к деформационному упрочнению сплава обусловлены высокой плотностью полос сдвига дислокаций и их взаимодействием. Расстояние между полосками сдвига порядка 100 нм (см. рисунок, б). Видно, что контраст от полос сдвига более темный, чем ГЦК матрица, а наличие высокой плотности клубковых дислокаций в полосах сдвига (см. рисунок, е) свидетельствует об интенсивной деформации.

Для аэрокосмической отрасли может быть полезен ВЭС  $\text{Al}_{10}\text{Co}_{19}\text{Cr}_{16}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{35}$ , полученный в литом состоянии, гомогенизированный при 1200 °С в течение 8 ч и подвергнутый ступенчатому отжигу при 800 °С (24 ч) и 590 °С (120 ч) [64]. Это обеспечило микроструктуру ГЦК матрицы с В2 выделениями и карбидом, обогащенным хромом. Дизайн этого ВЭС был получен на основе расчета фазовой диаграммы CALPHAD. Механические испытания показали отличное сочетание прочности и пластичности: предел текучести составил 470 МПа, прочности – 790 МПа, а относительное удлинение – 48 %. Результаты этой работы – яркое свидетельство возможностей создания ВЭС нового поколения на базе фазовых диаграмм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с накопившимся большим банком публикаций по различным направлениям повышения механических свойств ВЭС CoCrFeNiMn (сплав Cantor) и CoCrFeNiAl проведен анализ работ последних трех лет по легированию, упрочнению выделениями, термической обработкой и использованию фазовых диаграмм CALPHAD.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie – Science des Matériaux*. 2006;31(6):633–648. <http://dx.doi.org/10.3166/acsm.31.633-648>
2. Ma L.-S., Fu G.-L., Tian F.-C., Zhang T.-Y. Recent progress in high-entropy alloys. *Advanced Materials Research*. 2013;631–632:227–232. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.631-632.227>
3. 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;61:1–93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
4. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;375–377: 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
5. George E.P., Curtin W.A., Tazan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia*. 2020;188:435–474. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>
6. Osintsev K.A., Konovalov S.V., Glezer A.M., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A., Sundeev R.V. Research on the structure of  $\text{Al}_{2.1}\text{Co}_{0.3}\text{Cr}_{0.5}\text{FeNi}_{2.1}$  high-entropy alloy at submicro- and nano-scale levels. *Materials Letters*. 2021;294: 129717. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129717>
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;102: 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;375–377: 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;61(15):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;96:258–268. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.025>
11. 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.
12. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Shlyarova Yu.A., Panchenko I.A. Structure and Properties of High-Entropy Alloys. Moscow: RuScience; 2021:203.

13. Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021;64(4):249–258.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>  
Osintsev K.A., Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. High-entropy alloys: Structure, mechanical properties, deformation mechanisms and application. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(4):249–258. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>
14. Громов В.Е., Рубанникова Ю.А., Коновалов С.В., Осинцев К.А., Воробьев С.В. Формирование улучшенных механических свойств высокоэнтропийного сплава Cantor. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021; 64(8): 599–605. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-599-605>  
Gromov V.E., Rubannikova Yu.A., Konovalov S.V., Osintsev K.A., Vorob'ev S.V. Generation of increased mechanical properties of Cantor high-entropy alloy. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(8):599–605. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-599-605>
15. Coury F.G., Kaufman M., Clarke A.J. Solid-solution strengthening in refractory high entropy alloys. *Acta Materialia*. 2019;175:66–81.  
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.06.006>
16. 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;3:113603.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.113603>
17. Li F., Zhao H., Yue Y., Yang Z., Zhang Y., Gou L. Dual-phase super-strong and elastic ceramic. *ACS Nano*. 2019;13(4): 4191–4198. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.8b09195>
18. Li Z., Kormann F., Grabowski B., Neugebauer J., Raabe D. Ab initio assisted design of quinary dual-phase high-entropy alloys with transformation-induced plasticity. *Acta Materialia*. 2017;136:262–270.  
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.07.023>
19. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Konovalov S.V., Alsaravaeva K.V. Structural evolution of silumin treated with a high-intensity pulse electron beam and subsequent fatigue loading up to failure. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. 2015;79(9):1169–1172.  
<https://doi.org/10.3103/S1062873815090087>
20. 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;57: 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.02.083>
21. Guo L., Wu W., Ni S., Yuan Z., Cao Y., Wang Z., Song M. Strengthening the FeCoCrNiMo<sub>0.15</sub> HEA by gradient structure. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;841:155688.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155688>
22. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов. *Физика металлов и металловедение*. 2020;121(8):807–841.  
<https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>  
Rogachev A.S. Structure, stability and properties of high entropy alloys. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2020; 121(8):807–841. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>
23. 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;806:587–595.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.387>
24. Senkov O.N., Zhang C., Pilchak A.L., Payton E.J., Woodward C., Zhang F. CALPHAD-aided development of quaternary multi-principal element refractory alloys based on NbTiZr. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;783: 729–742. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.325>
25. Menou E., Tancret F., Toda-Caraballo I., Ramstein G., Castany P., Bertrand E., Gautier N., Rivera Díaz-Del-Castillo P.E.J. Computational design of light and strong high entropy alloys (HEA): Obtainment of an extremely high specific solid solution hardening. *Scripta Materialia*. 2018;156:120–123.  
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.07.024>
26. Tapia A.J.S.E., Yim D., Kim H.S., Lee B.-J. An approach for screening single phase high-entropy alloys using an in-house thermodynamic database. *Intermetallics*. 2018;101:56–63.  
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2018.07.009>
27. 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;5(4):384–393.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.03.004>
28. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. High-Entropy Alloys. 2<sup>nd</sup> ed. Amsterdam: Elsevier; 2019:374.
29. Zhang Y. High-Entropy Materials. A Brief Introduction. Singapore: Springer Nature; 2019:159.
30. Yin B., Maresca F., Curtin W.A. Vanadium is an optimal element for strengthening in both fcc and bcc high-entropy alloys. *Acta Materialia*. 2020;188:486–491.  
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.01.062>
31. 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;36:2056–2070.  
<https://doi.org/10.1557/s43578-021-00251-0>
32. Jia Y., Wang Z., Wu Q., He F., Li J., Wang J. Enhancing the yield strength of Ni-Co-Cr-Fe-Al as-cast hypoeutectic high-entropy alloys by introducing  $\gamma'$  precipitation. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;858:144190.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144190>
33. Zhou H., Lin Y., Chen F., Shen Q. Effect of precipitation behavior on mechanical properties of a Nb-containing CoCrNi-based high-entropy alloy. *Metals and Materials International*. 2023;29:674–692.  
<https://doi.org/10.1007/s12540-022-01265-x>
34. Gwalani B., Torgerson T., Dasari S., Jagetia A., Nartu M.S.K.K.Y., Gangireddy S., Pole M., Wang T., Scharf T.W., Banerjee R. Influence of fine-scale B2 precipitation on dynamic compression and wear properties in hypo-eutectic Al<sub>0.5</sub>CoCrFeNi high-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;853:157126.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157126>
35. 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;52:1749–1758.  
<https://doi.org/10.1007/s11661-021-06186-9>

36. Shen Q., Kong X., Chen X. Significant transitions of microstructure and mechanical properties in additively manufactured Al-Co-Cr-Fe-Ni high-entropy alloy under heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*. 2021;815:141257. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141257>
37. Shim S.H., Pouraliakbar H., Lee B.J., Kim Y.K., Rizi M.S., Hong S.I. Strengthening and deformation behavior of as-cast CoCrCu<sub>1.5</sub>MnNi high entropy alloy with micro-/nanoscale precipitation. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;853:143729. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143729>
38. Xie X., Li N., Liu W., Huang S., He X., Yu Q., Xiong H., Wang E., Hou X. Research progress of refractory high entropy alloys: A review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022;35:142. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00814-0>
39. 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;243:118495. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.118495>
40. Mehranpour M.S., Shahmir X., Kim H.S. Microstructure tailoring by manipulating chemical composition in novel CoNiMnCrAl high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023;944:169207. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169207>
41. 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;26:101615. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101615>
42. Abbasi E., Dehghani K. Phase prediction and microstructure of centrifugally cast non-equiatomic Co-Cr-Fe-Mn-Ni(Nb,C) high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;783:292–299. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.329>
43. 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;830:142297. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142297>
44. 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;29:055007. <https://doi.org/10.1088/1361-651X/abf62b>
45. 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;54:705–716. <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00448-6>
46. Do H.-S., Choi W.-M., Lee B.-J. A thermodynamic description for the Co-Cr-Fe-Mn-Ni system. *Journal of Materials Science*. 2022;57:1373–1389. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06604-8>
47. Li Z., Pradeep K.G., Deng Y., Raabe D., Tasan C.C. Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strength-ductility trade-off. *Nature*. 2016;534:227–230. <https://doi.org/10.1038/nature17981>
48. 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;792:1028–1035. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.121>
49. Wang Z., Baker I., Guo W., Poplawsky J.D. The effect of carbon on the microstructures, mechanical properties, and deformation mechanisms of thermo-mechanically treated Fe<sub>40.4</sub>Ni<sub>11.3</sub>Mn<sub>34.8</sub>Al<sub>7.5</sub>Cr<sub>6</sub> high entropy alloys. *Acta Materialia*. 2017;126:346–360. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.12.074>
50. Peng H., Hu L., Li L., Gao J., Zhang Q. On the correlation between L1<sub>2</sub> nanoparticles and mechanical properties of (NiCo)<sub>52+2x</sub>(AlTi)<sub>4+2x</sub>Fe<sub>29-4x</sub>Cr<sub>15</sub> (x=0–4) high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;817:152750. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152750>
51. 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;8:15719. <https://doi.org/10.1038/ncomms15719>
52. 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;4:6200. <https://doi.org/10.1038/srep06200>
53. Zhang Y., Chen Z., Cao D., Zhang J., Zhang P., Tao Q., Yang X. Concurrence of spinodal decomposition and nanoprecipitation in a multi-component AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019;8(1):726–736. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.020>
54. 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;112:40–52. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.04.005>
55. Stepanov N.D., Shaysultanov D.G., Ozerov M.S., Zhreb-tsov S.V., Salishchev G.A. Second phase formation in the CoCrFeNiMn high entropy alloy after recrystallization annealing. *Materials Letters*. 2016;185:1–4. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.08.088>
56. Lukas H.L., Fries S.G., Sundman B. *Computational Thermodynamics: The Calphad Method*. Cambridge: Cambridge University Press; 2007:313. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511804137>
57. Wang C., Zhong W., Zhao J. Insights on phase formation from thermodynamic calculations and machine learning of 2436 experimentally measured high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;915:165173. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165173>
58. Shafiei A. Design of Eutectic high entropy alloys. *Metalurgical and Materials Transactions A*. 2022;53:4329–4361. <https://doi.org/10.1007/s11661-022-06831-x>
59. Gao X., Lu Y., Zhang B., Liang N., Wu G., Sha G., Liu J., Zhao Y. Microstructural origins of high strength and high ductility in an AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2017;141:59–66. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.07.041>
60. Wani I.S., Bhattacharjee T., Sheikh S., Bhattacharjee P.P., Guo S., Tsuji N. Tailoring nanostructures and mechanical properties of AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high entropy alloy using thermo-mechanical processing. *Materials Science and*

*Engineering: A.* 2016;675:99–109.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.048>

61. 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;54:346–357.

<https://doi.org/10.1007/s11661-022-06887-9>

62. Wu M., Wang S., Huang H., Shu D., Sun B. CALPHAD aided eutectic high-entropy alloy design. *Materials Letters.* 2020;262:127175.

<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127175>

63. Yan J., Song Z., Fang W., He X., Chang R., Huang S., Huang J., Yu H., Yin F. Composition design of high yield strength points in single-phase Co-Cr-Fe-Ni-Mo multi-principal element alloys system based on electronegativity, thermodynamic calculations, and machine learning. *Tungsten.* 2023;5:169–178.

<https://doi.org/10.1007/s42864-021-00129-y>

64. Yen S., Liu Y., Chu S., Chang C., Lin S., Tsai M. B2-strengthened Al-Co-Cr-Fe-Ni high entropy alloy with high ductility. *Materials Letters.* 2022;325:132928.

<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132828>

## Сведения об авторах

## Information about the Authors

**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

**Михаил Олегович Ефимов**, соискатель степени к.т.н. 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

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

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

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

ORCID: 0000-0003-4809-8660

E-mail: konovserg@gmail.com

**Mikhail O. Efimov**, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-4890-3730

E-mail: moefimov@mail.ru

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

ORCID: 0000-0002-1631-9644

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

**Vitaly V. Shlyarov**, Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Research Associate of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0001-8130-648X

E-mail: shlyarov@mail.ru

## Вклад авторов

## Contribution of the Authors

**В. Е. Громов** – анализ работ зарубежных авторов по упрочнению CoCrFeNiMn и CoCrFeNiAl ВЭС путем легирования.

**С. В. Коновалов** – анализ работ зарубежных авторов по упрочнению CoCrFeNiMn и CoCrFeNiAl ВЭС на основе программ CALPHAD.

**М. О. Ефимов** – анализ рисунков и электронных микроскопических изображений в работах зарубежных авторов по упрочнению ВЭС путем легирования.

**И. А. Панченко** – анализ рисунков и электронных микроскопических изображений в работах зарубежных авторов по упрочнению ВЭС на основе программ CALPHAD.

**В. В. Шляров** – оформление статьи, обсуждение результатов.

**V. E. Gromov** – analysis of the works of foreign authors on strengthening of CoCrFeNiMn and CoCrFeNiAl HEAs by alloying.

**S. V. Konovalev** – analysis of the works of foreign authors on strengthening of CoCrFeNiMn and CoCrFeNiAl HEAs based on CALPHAD programs.

**M. O. Efimov** – analysis of drawings and EM images in the works of foreign authors on strengthening of HEAs by alloying.

**I. A. Panchenko** – analysis of drawings and EM images in the works of foreign authors on strengthening of HEAs based on CALPHAD programs.

**V. V. Shlyarov** – design of the article, discussion of the results.

Поступила в редакцию 10.05.2023

После доработки 25.12.2023

Принята к публикации 29.03.2024

Received 10.05.2023

Revised 25.12.2023

Accepted 29.03.2024