



УДК 536.425:539.25:539.351

DOI 10.17073/0368-0797-2024-1-47-52



Обзорная статья

Review article

УЛУЧШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА КАНТОРА ЛЕГИРОВАНИЕМ НИОБИЕМ И ЦИРКОНИЕМ

В. Е. Громов¹, С. В. Коновалов¹, М. О. Ефимов¹,
И. А. Панченко¹, С. Чень²

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

² Университет Вэньчжоу (Китай, 325035, провинция Чжэнцзян, г. Чаньшань)

✉ gromov@physics.sibsiu.ru

Аннотация. Созданный в 2004 году высокоэнтروпийный (ВЭС) пятикомпонентный сплав Кантора CoCrFeNiMn по-прежнему находится в фокусе внимания исследователей в области физического материаловедения благодаря хорошему сочетанию прочностных и пластических свойств, которые открывают перспективы его использования в различных наукоемких отраслях промышленности. Выполнен краткий обзор публикаций последних лет отечественных и зарубежных исследователей по улучшению механических свойств сплава Кантора путем легирования ниобием и цирконием, хорошо зарекомендовавшими себя при легировании традиционных сплавов. Легирование цирконием приводит к более низкой температуре плавления из-за образования эвтектики со всеми элементами сплава Кантора. Легирование атомами ниобия в диапазоне 0 – 16 ат. % обеспечивает образование объемной доли фаз Лавеса и σ -фазы до 42 %, что, в свою очередь, ответственно за пятикратное увеличение предела текучести от 202 до 1010 МПа. Проанализированы работы по совместному легированию сплава Кантора системами $Zr + Ti + Y_2O_3$, $Nb + C$, $Nb + V$. При комплексном легировании значительно улучшаются механические свойства. В работе раскрыты и обсуждены физические механизмы упрочнения. Микролегирование 0,2 % Nb сплава с 1,3 % C обеспечивает превосходное сочетание предела текучести (~1096 МПа) и относительного удлинения (~12 %) после отжига при 700 °С.

Ключевые слова: легирование, ниобий, цирконий, сплав Кантора, упрочнение

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

Для цитирования: Громов В.Е., Коновалов С.В., Ефимов М.О., Панченко И.А., Чень С. Улучшение механических свойств сплава Кантора легированием ниобием и цирконием. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(1):47–52.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-1-47-52>

IMPROVEMENT OF THE CANTOR ALLOY'S MECHANICAL PROPERTIES BY ALLOYING WITH NIOBIUM AND ZIRCONIUM

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

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

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

✉ gromov@physics.sibsiu.ru

Abstract. Created in 2004, the high-entropy (HEA) five-component Cantor alloy CoCrFeNiMn is still in the focus of attention of researchers in the field of physical materials science due to a good combination of strength and plastic properties, which open up prospects for its use in various high-tech industries. We performed a brief review of recent publications by domestic and foreign researchers on improving the mechanical properties of the Cantor alloy by alloying with niobium and zirconium, which proved themselves well in alloying traditional alloys. Zirconium alloying leads to a lower melting point due to the formation of eutectic with all elements of the Cantor alloy. Alloying with niobium atoms in the range of 0 – 16 at. % ensures the formation of a volume fraction of the Laves phases and σ -phase up to 42 %, which, in turn, is responsible for a fivefold increase in the yield strength from 202 to 1010 MPa. The work on the joint alloying of the Cantor alloy with $Zr + Ti + Y_2O_3$, $Nb + C$, $Nb + V$ systems was analyzed. With complex alloying, the mechanical properties are significantly improved. The paper reveals and discusses the physical mechanisms of hardening. Microalloying of 0.2 % Nb alloy with 1.3 % C provides an excellent combination of yield strength (~1096 MPa) and elongation (~12 %) after annealing at 700 °C.

Keywords: alloying, niobium, zirconium, Cantor alloy, hardening

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

For citation: Gromov V.E., Kononov S.V., Efimov M.O., Panchenko I.A., Chen X. Improvement of the Cantor alloy's mechanical properties by alloying with niobium and zirconium. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(1):47–52. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-1-47-52>

ВВЕДЕНИЕ

Новый класс металлических материалов – высокоэнтальпийные сплавы (ВЭС), содержащие 5 – 6 элементов в концентрации 5 – 35 % – был разработан в конце XX столетия и с того времени активно исследуется [1; 2]. Эти материалы привлекли внимание исследователей благодаря своим замечательным свойствам, таким как высокие прочность, пластичность, коррозионная стойкость, крио- и жаропрочность, обрабатываемость и т.д. Области применения ВЭС простираются от изготовления режущих инструментов, штампов до деталей ядерной энергетики и аэрокосмической отрасли промышленности [3 – 8]. По данным Scopus за последнюю четверть века по ВЭС опубликовано свыше 30 000 статей. Среди этого огромного банка данных особое место занимает сплав Кантора CoCrFeNiMn, свойства которого, начиная с 2004 г., хорошо изучены при обычных, высоких и низких температурах [1; 2]. Установлено, что относительное удлинение до разрушения при комнатной температуре сплава Кантора может достигать ~71 %, тогда как значения предела текучести и прочности невелики: 215 и 491 МПа соответственно [1; 2]. Практическое применение этого сплава ограничено таким несоответствием между прочностью и пластичностью и должно быть устранено, например, легированием без охрупчивания.

Проблема улучшения механических свойств этого ВЭС находится в центре внимания исследователей в области физического материаловедения. В обзорных работах [9; 10] проанализированы два направления решения этой проблемы. Первый путь – формирование нанокристаллического состояния структуры и поверхностное упрочнение внешними энергетическими воздействиями [11; 12]. Не менее привлекательным выглядит и второй путь: компьютерное моделирование создания высоких функциональных свойств (на основе комплекса программ CALPHAD, разработанного для расчета диаграмм состояния [13 – 15]). Необходим анализ и традиционного пути: легирование хорошо изученными элементами, применяемыми для сталей и сплавов.

Улучшение механических и функциональных свойств ВЭС Кантора может быть связано с легированием хорошо изученными элементами, такими как ниобий и цирконий [2; 9; 16]. Для упрочнения обычных сталей и сплавов широко используется микролегирование этими элементами. Природа и механизмы упрочнения подробно изучены для рельсовой стали в многочисленных работах конца прошлого и начала нынешнего

столетия [17 – 19]. Ниобий является сильно карбидо- и нитридообразующим элементом, связывает углерод и азот, образуя ультрадисперсные наноразмерные карбиды и карбонитриды. Однако частицы микронного размера отрицательно влияют на ударную вязкость. Разрушение образцов характеризуется образованием явно выраженного интеркристаллитного излома. Такой вид излома является одним из наименее энергоемких, то есть наиболее опасных, так как при реализации механизма интеркристаллитного разрушения энергоемкость процесса определяется не характеристиками самого металла, а свойствами ослабленных границ зерен поликристалла.

Во время процесса охлаждения после горячей прокатки ниобий выделяется в виде карбида и/или нитрида ниобия, увеличивает твердость (прочность) перлитной структуры за счет дисперсионного твердения и улучшает сопротивление износу и стойкость к внутреннему усталостному разрушению. Кроме того, ниобий эффективен для предотвращения размягчения зоны теплового воздействия сварного соединения: устойчиво образуются карбид или нитрид ниобия в зоне теплового воздействия в диапазоне от низких до высоких температур, при повторном нагреве до температур ниже или равных точке A_{c1} . Однако, когда содержание ниобия составляет меньше 0,001 %, эти эффекты не могут быть получены в достаточной степени, и улучшения твердости (прочности) перлитной структуры не наблюдается. В то же время, при содержании ниобия больше 0,050 % дисперсионное упрочнение благодаря карбиду или нитриду ниобия становится чрезмерным, перлитная структура становится хрупкой, стойкость рельса к внутреннему усталостному разрушению ухудшается. Следовательно, предпочтительно, чтобы содержание ниобия находилось в диапазоне 0,001 – 0,050 %.

Когда ниобий содержится в таком многоэлементном сплаве, как сплав Кантора, роль легирующих добавок в формировании структуры и свойств ВЭС может быть выявлена лишь при исследовании на наномасштабном уровне при использовании просвечивающей электронной микроскопии.

Из-за крайне ограниченного количества публикаций нет единой концепции природы влияния ниобия и циркония, в настоящее время идет процесс наполнения информации и ее осмысления. Но тот факт, что научное сообщество уже обратилось в своих исследованиях к этой практически важной проблеме, свидетельствует об ее актуальности и практической значимости.

Целью настоящей работы является краткий анализ последних публикаций по улучшению механических

свойств сплава Кантора путем легирования ниобием и цирконием.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Роль добавки 5 % циркония в процессе рекристаллизации эквиатомного состава Кантора была проанализирована в работе [20]. Холоднокатаный сплав подвергали отжигу в течение 30 мин при высокой температуре (750 – 1125 °С) для исследования кинетики рекристаллизации. Эволюция границ зерен и их размера были исследованы от литого до перекристаллизованного состояния. Показано, что движущей силой рекристаллизации дендритной микроструктуры является процесс устранения дислокационной субструктуры, возникшей при холодной прокатке. Легирование обеспечивает более эффективное твердорастворное упрочнение по сравнению со сплавом без добавок циркония, оставляя его однофазным с ГЦК структурой. Дендритная микроструктура трансформируется в поликристаллическую с малым размером зерна, что позволяет рассматривать использование ВЭС $\text{CoCrFeNiMn} + 5\% \text{Zr}$ при криогенных температурах.

Влияние легирования цирконием значительно усиливается при одновременном введении титана и оксида иттрия Y_2O_3 в равных количествах 1 мас. % посредством механического легирования и последующего плазменного спекания [21]. Такой сплав имел ГЦК решетку, содержащую высокую плотность оксидов разной морфологии (до $2,01 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$), ответственных за высокие механические свойства. Средний размер зерен составлял примерно 130 нм. Оксиды имели гексогональную (YTiO_2), орторомбическую (Y_2TiO_5), моноклинную (Ti_2O_3 , $\text{Y}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$) решетки. Такая высокая плотность оксидов и малый размер зерна обеспечивали уникальные значения микротвердости, предела текучести и прочности: 449 HV, 1309 МПа и 2231 МПа соответственно. Основными механизмами упрочнения при таком легировании были зернограничное упрочнение и упрочнение Орована.

В работах [2; 22] обширные сведения по изменению механических свойств сплава Кантора проанализированы при легировании различными элементами. Показано, что твердость сплава увеличивается с ростом содержания ниобия [23], циркония [24], благодаря твердорастворному упрочнению и упрочнению вторыми фазами. При изменении содержания ниобия от 0,1 до 0,8 мас. % твердость линейно возрастает до 712 HV. Определяющая роль при этом принадлежит фазам Лавеса. К такому же заключению приходят авторы работы [25], в которой демонстрируется рост предела текучести от 1373 до 2473 МПа при увеличении содержания ниобия от 0 до 5 мас. %. Немаловажная роль при этом принадлежит процессу блокировки движения дислокаций.

В работе [24] методом вакуумно-дуговой плавки были получены сплавы CoCrFeNiZr_x с различным содержанием циркония. Типичная эвтектическая микрострук-

тура выявлена в литом сплаве с $x = 0,5$. Показано, что сплавы состоят из гранецентрированного кубического твердого раствора и фазы Лавеса C15 в виде ламелей. Определена кристаллографическая ориентационная связь между этими двумя фазами. С увеличением объемной доли твердой фазы Лавеса C15 полученные сплавы показали рост прочности, но стали более хрупкими при комнатной температуре; процесс разрушения изменился с пластичного межпластинчатого разрушения на хрупкое транспластинчатое. Однако с повышением температуры испытания вид разрушения превратился в вязкий. Таким образом, эвтектическая микроструктура может выдерживать значительные пластические деформации и имеет потенциал для инженерных применений, связанных с повышенными температурами [24]. Эффект легирования значительно усиливается при совместном введении $\text{Nb} + \text{V}$ [26] и $\text{Nb} + \text{C}$ [27].

В работе [28] рассмотрены «подводные камни» в анализе изменения твердости CoCrFeNi при механическом легировании 1 – 4 ат. % циркония. После отжига при температурах ниже 700 °С первоначально сформировавшиеся нанокристаллические зерна не изменяли своего размера, который составлял ~10 нм, твердость – ~500 HV. Начиная с 900 °С наблюдался аномальный рост зерен до 250 нм при 900 °С и даже до зерен микронного размера при 1100 °С. При этом распределение размеров зерен может открыть новые возможности получения ВЭС с улучшенным сочетанием свойств благодаря включению крупных зерен в мелкозернистую матрицу.

Среди публикаций по влиянию циркония на температуру плавления, микроструктуру, рекристаллизацию и механические свойства ВЭС Кантора необходимо выделить работу [29]. Образцы для исследований получали путем вакуумной дуговой плавки предварительно механически легированных порошков с последующей холодной прокаткой на 90 % и рекристаллизационным отжигом при 1143 К. Основными преимуществами добавления циркония являются: быстрый процесс индукционной плавки в вакууме; более низкая температура плавления из-за образования эвтектики циркония со всеми элементами сплава Кантора; хорошая химическая однородность сплава; улучшение механических свойств перекристаллизованных зерен с когерентной структурой. Модифицированный цирконием ВЭС имеет более высокую температуру рекристаллизации и меньший размер зерен после рекристаллизации по сравнению с исходным сплавом, что повышает твердость и прочность сплава.

Положительное влияние микролегирования ниобием углеродсодержащего сплава Кантора отмечено в работе [30]. Мелкозеренные ВЭС, легированные углеродом, обладают хорошим сочетанием предела текучести и пластичности. Однако углеродсодержащие ВЭС по своей природе имеют тенденцию разлагаться на интерметаллические соединения при термическом воздействии при промежуточных тем-

пературах. Селективное микролегирование 0,2 % Nb в сплав CoCrFeMnNi – 1,3 % C (Nb – ВЭС) обеспечивает улучшение механических свойств при комнатной температуре и предотвращает термическое разложение при промежуточной температуре. Микролегирование ниобием в легированном углеродом высокоэнтروпийном сплаве приводит к выделению карбидов NbC при 700 – 900 °C, что упрочняет его. Сплав Nb + ВЭС демонстрирует превосходное сочетание предела текучести (≈ 1096 МПа) и относительного удлинения (≈ 12 %) после отжига при 700 °C в течение 1 ч. Кроме того, микролегирование ниобием препятствует разложению ГЦК матрицы при промежуточной температуре (500 °C). В частности, образование хрупкой σ -фазы при промежуточной температуре резко снижается, в то время как рост фаз L10 и ОЦК/B2 подавляется.

Комплекс программ CALPHAD позволяет предсказать поведение ВЭС Кантора при легировании [23]. Основываясь на компьютерных термодинамических расчетах, была разработана псевдоэвтектическая бинарная система сплавов CoCrFeNiNb_x ($x = 0,10, 0,25, 0,50$ и $0,80$). Экспериментальные результаты показывают, что эвтектические сплавы состоят из пластичной границентрированной кубической фазы (ГЦК) и твердой фазы Лавеса с тонкой слоистой структурой. Разработанные сплавы обладают превосходными комплексными механическими свойствами (пластичности и прочности). Для сплава CoCrFeNiNb_{0,5} прочность на разрыв при сжатии и деформация до разрушения могут достигать более 2300 МПа и 23,6 % соответственно. Руководствуясь предсказаниями CALPHAD [26], был разработан по методу плавления эвтектический высокоэнтропийный сплав с семью компонентами (Fe, Ni, Cr, V, Co, Mn и Nb). Конфигурационная энтропия, оцененная для двухфазной микроструктуры, позволяет отнести сплав к высокоэнтропийным. Когда содержание ниобия превышало 9,7 ат. %, микроструктура изменилась от доэвтектической с первичной границентрированной кубической фазой до заэвтектической с первичной фазой Лавеса.

Структурно-фазовые состояния и твердость двух неэквивалентных ВЭС Кантора и Кантора + NbC были подвергнуты тщательному исследованию в работе [27]. Результаты эксперимента подтвердили теоретические расчеты, основанные на методе CALPHAD и термодинамических правилах, предполагающие наличие двух твердых растворов с высокой энтропией и ГЦК кристаллической структурой после центробежного литья. Микроскопические наблюдения и анализ твердости выявили незначительные изменения микроструктуры по толщине обоих сплавов. По результатам микроскопии также установлено, что микроструктура представляет собой дендритную структуру с сегрегацией железа и марганца в дендритных участках, а междендритные участки богаты кобальтом, хромом, никелем. Выявлены богатые ниобием наноразмерные выделения в междендритных областях со сферической и овальной

морфологией. Дифференциальный термический анализ не выявил пика вплоть до температуры плавления, что свидетельствует о высокой температурной стабильности структуры твердого раствора в обоих сплавах.

Во многих работах по ВЭС отмечается положительная роль фаз Лавеса в повышении механических свойств ВЭС. В работе [31] прослежена эволюция микроструктуры и механических свойств (CoCrFeNiMn)_{100-x}Nb_x; $0 \leq x \leq 16$ ат. % при сжатии. Показано, что содержание вторых фаз (фаза Лавеса и σ -фаза) увеличивается от 0 до 42 % объемных долей в указанном диапазоне легирования, что приводит к росту предела текучести от 202 до 1010 МПа.

В работе [32] охарактеризована и исследована стабильность эвтектических структур в ВЭС CoCrFeNiNb_x. Установлено, что пластинчатые структуры ВЭС стабильны при температуре отжига ниже 750 °C, но их сфероидизация происходит при повышении температуры до 900 °C. Пластинчатые структуры обладают превосходными механическими свойствами. Хотя механические свойства ухудшаются по мере разрушения этих структур после отжига при 900 °C, ВЭС из CoCrFeNiNb_x сохраняют хорошие механические свойства.

Выводы

Выполнен краткий обзор работ отечественных и зарубежных исследователей за последние годы по модифицированию сплава Кантора путем легирования цирконием, ниобием и комплексного легирования системами Nb + V, Nb + C, Zr + Ti + V₂O₃. Обсуждены физические механизмы упрочнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. 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>
2. Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Advanced structured materials. In: *Structure and Properties of High-Entropy Alloys*. Springer; 2021:107–110.
3. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*. 2014;345(6201): 1153–1158. <https://doi.org/10.1126/science.1254581>
4. Xia S.Q., Yang X., Yang T.F., Liu S., Zhang Y. Irradiation resistance in Al_xCoCrFeNi high entropy alloys. *JOM*. 2015; 67:2340–2344. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1568-4>
5. Chuang M.-H., Tsai M.-H., Wang W.-R., Lin S.-J., Yeh J.-W. Microstructure and wear behavior of Al_xCo_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_y high-entropy alloys. *Acta Materialia*. 2011;59(16):6308–6317. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.06.041>
6. Senkov O.N., Wilks G.B., Miracle D.B., Chuang C.P., Liaw P.K. Refractory high-entropy alloys. *Intermetallics*. 2010;18(9): 1758–1765. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2010.05.014>
7. Zou Y., Maiti S., Steurer W., Spolenak R. Size-dependent plasticity in an Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ refractory high-entropy

- alloy. *Acta Materialia*. 2014;65:85–97.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.11.049>
8. Maiti S., Steurer W. Structural-disorder and its effect on mechanical properties in single-phase TaNbHfZr high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2016;106:87–97.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.018>
 9. 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>
 10. 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>
 11. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Ефимов М.О., Шлярова Ю.А., Панченко И.А., Коновалов С.В. Структура зоны контакта наплавка-подложка, подвергнутой электронно-пучковой обработке. *Письма в ЖТФ*. 2023;49(6):26–31. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.06.54813.19410>
Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Efimov M.O., Shlyarova Yu.A., Panchenko I.A., Konovalov S.V. The structure of the contact zone of the surfacing-substrate subjected to electron-beam processing. *Technical Physics Letters*. 2023;49(6):26–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.06.54813.19410>
 12. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Коновалов С.В., Шугуров В.В., Ефимов М.О., Тересов А.Д., Петрикова Е.А., Панченко И.А., Шлярова Ю.А. Структура и свойства высокоэнтропийного сплава, подвергнутого электронно-ионно-плазменной обработке. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2022;(4):102–116. https://doi.org/10.54826/19979258_2022_4_102
Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Konovalov S.V., Shugurov V.V., Efimov M.O., Teresov A.D., Petrikova E.A., Panchenko I.A., Shlyarova Yu.A. Structure and properties of a high-entropy alloy subjected to electron-ion-plasma treatment. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2022;(4):102–116. (In Russ.). https://doi.org/10.54826/19979258_2022_4_102
 13. 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>
 14. Menou E., Tancet 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>
 15. 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>
 16. Zeng Z., Xiang M., Zhang D., Shi J., Wang W., Tang X., Tang W., Wang Ye, Ma X., Chen Z., Ma W., Morita K. Mechanical properties of Cantor alloys driven by additional elements: a review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:1920–1934. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.019>
 17. Тушинский Л.И., Плохов А.В., Мочалина Н.С. Макро-, мезо- и наноструктурные основы создания оптимальных структур углеродистых сталей при регулируемом термопластическом упрочнении. *Материаловедение*. 2008;(5):31–35.
Tushinskii L.I., Plokhov A.V., Mochalina N.S. Macro-, meso- and nanostructural foundations for creating optimal structures of carbon steels with controlled thermoplastic hardening. *Materialovedenie*. 2008;(5):31–35. (In Russ.).
 18. Тушинский Л.И., Мочалина Н.С., Плохов А.В., Кузьмин Н.Г. Свойства стали после регулируемого термопластического упрочнения при формировании структуры на макро-, мезо- и наноуровнях. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2010;53(4):37–40.
Tushinskii L.I., Mochalina N.S., Plokhov A.V., Kuz'min N.G. Properties of steel after controlled thermoplastic hardening during structure formation at macro-, meso- and nanoscale levels. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010;53(4):37–40. (In Russ.).
 19. Мочалина Н.С. Формирование нанодисперсных упрочняющих фаз в процессе регулируемого термопластического упрочнения микролегированной стали и их влияние на конструктивную прочность. В кн.: *Современные проблемы в технологии машиностроения*. Новосибирск: изд. НГТУ; 2009:213–214.
 20. Colombini E., Garzoni A., Giovanardi R., Veronesi P., Casagrande A. Al, Cu and Zr addition to high entropy alloys: The effect on recrystallization temperature. *Materials Science Forum*. 2018;941:1137–1142. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.941.1137>
 21. Peng S., Lu Z., Gao S., Li H. Improved microstructure and mechanical properties of ODS-CoCrFeNiMn high entropy alloys by different Ti, Zr and Y₂O₃ addition. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023;935(2):168166. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168166>
 22. Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Коновалов С.В., Воробьев С.В., Перегудов О.А. Применение высокоэнтропийных сплавов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021;64(10):747–754. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-10-747-754>
Gromov V.E., Shlyarova Yu.A., Konovalov S.V., Vorob'ev S.V., Peregudov O.A. Application of high-entropy alloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(10):747–754. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-10-747-754>
 23. He F., Wang Z., Cheng P., Wang Q., Li J., Dang Y., Wang J., Liu C.T. Designing eutectic high entropy alloys of CoCrFeNiNb_x. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;656:284–289. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.153>
 24. Huo W., Zhou H., Fang F., Xie Z., Jiang J. Microstructure and mechanical properties of CoCrFeNiZr_x eutectic high-entropy alloys. *Materials & Design*. 2017;134:226–233. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.08.030>

25. Ma S.G., Zhang Y. Effect of Nb addition on the microstructure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2012;532:480–486. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.10.110>
26. Rahul M.R., Phanikumar G. Design of a seven-component eutectic high-entropy alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2019;50:2594–2598. <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05210-3>
27. Abbasi E., Dehghani K. Phase prediction and microstructure of centrifugally cast non-equiatom Co-Cr-Fe-Mn-Ni(Nb,C) high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;783:292–299. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.329>
28. Tekin M., Polat G., Kotan H. An investigation of abnormal grain growth in Zr doped CoCrFeNi HEAs through in-situ formed oxide phases. *Intermetallics*. 2022;146:107588. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107588>
29. Campari E.G., Casagrande A., Colombini E., Gualtieri M.L., Veronesi P. The effect of Zr addition on melting temperature, microstructure, recrystallization and mechanical properties of a Cantor high entropy alloy. *Materials*. 2021;14(20):5994. <https://doi.org/10.3390/ma14205994>
30. Wang M., Zhan L., Peng J. Nb micro-alloying on enhancing yield strength and hindering intermediate temperature decomposition of a carbon-doped high-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023;940:168896. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.168896>
31. Qin G., Li Z., Chen R., Zheng H., Fan C., Wang L., Su Y., Ding H., Guo J., Fu H. CoCrFeMnNi high-entropy alloys reinforced with Laves phase by adding Nb and Ti elements. *Journal of Materials Research*. 2019;34(6):1011–1020. <https://doi.org/10.1557/jmr.2018.468>
32. He F., Wang Z., Shang X., Leng C., Li J., Wang J. Stability of lamellar structures in CoCrFeNiNb_x eutectic high entropy alloys at elevated temperatures. *Materials & Design*. 2016;104:259–264. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.044>

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.sibsui.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.i.ss@yandex.ru

Сичжан Чень, профессор, Университет Вэньчжоу
ORCID: 0000-0003-1649-1820
E-mail: chenxinzhang@wzu.edu.cn

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
ORCID: 0000-0002-5147-5343
E-mail: gromov@physics.sibsui.ru

Sergei V. Kononov, 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.i.ss@yandex.ru

Xinzhang Chen, Prof., Wenzhou University
ORCID: 0000-0003-1649-1820
E-mail: chenxinzhang@wzu.edu.cn

Вклад авторов

В. Е. Громов – концепция статьи, обоснование областей применения ВЭС Кантора, написание черного варианта статьи.
С. В. Коновалов – подбор и анализ зарубежных статей, содержащих сведения о последних областях использования сплава Кантора в наукоемких технологиях.
М. О. Ефимов – анализ статей по совместному влиянию ниобия, циркония и других элементов на свойства сплава Кантора.
И. А. Панченко – анализ природы влияния ниобия и циркония на механические свойства сплава Кантора.
С. Чень – анализ работ китайских авторов, написание окончательного варианта статьи.

Contribution of the Authors

V. E. Gromov – conceptualization of the article, justification of application fields of the Cantor HEA, writing the text.
S. V. Kononov – selection and analysis of foreign articles containing information on the latest areas of use of the Cantor alloy in high-tech technologies.
M. O. Efimov – analysis of articles on the combined effect of niobium, zirconium and other elements on the Cantor alloy's properties.
I. A. Panchenko – analysis of influence of niobium and zirconium on the Cantor alloy's mechanical properties.
X. Chen – analysis of the Chinese articles, writing the article final version.

Поступила в редакцию 10.11.2023
 После доработки 04.12.2023
 Принята к публикации 18.12.2023

Received 10.11.2023
 Revised 04.12.2023
 Accepted 18.12.2023