



Оригинальная статья

УДК 536.425:539.25

DOI 10.17073/0368-0797-2021-8-599-605



ФОРМИРОВАНИЕ УЛУЧШЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА Cantor

В. Е. Громов¹, Ю. А. Рубанникова¹, С. В. Коновалов^{1,2},
К. А. Осинцев^{1,2}, С. В. Воробьев¹

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

² Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

Аннотация. Выполнен краткий обзор публикаций последних лет отечественных и зарубежных исследователей по изучению возможностей улучшения механических свойств пятикомпонентного высокоэнтропийного сплава (ВЭС) Cantor различного фазового состава в широком диапазоне температур. Этот один из первых, созданных эквимоллярных ВЭС с ГЦК структурой несмотря на высокую ударную вязкость и повышенное сопротивление ползучести нуждается в улучшении механических свойств ввиду возможных областей использования. Отмечено, что создание бимодального распределения зерен по размерам путем интенсивной пластической деформации кручением при высоком давлении 7,8 ГПа литого сплава и последующего кратковременного отжига при 873 и 973 К способно значительно изменить прочностные и пластические свойства. Для полученного методом магнетронного распыления ВЭС и последующего отжига при 573 К достигался наноразмерный масштаб зерен, окруженных аморфной оболочкой. В таком двухфазном сплаве нанотвердость составляла 9,44 ГПа, а модуль упругости 183 ГПа. Используя эффект пластичности, индуцированной фазовым превращением в сплаве $(\text{CrMnFeCoNi})_{50}\text{Fe}_{50}$, полученном методом лазерной аддитивной технологии, достигался предел прочности 415 – 470 МПа при высоком уровне пластичности до 77 %. Это обеспечивалось бездиффузионным ГЦК → ОЦК превращением. Показано, что различие в виде механизмов пластической деформации литого сплава при 77 и 293 К (дислокационное скольжение и двойникование) определяет комбинацию повышенных свойств прочность – пластичность. Предварительно продеформированные при 77 К образцы для формирования нанодвойников при последующем нагружении при 293 К проявляют повышенную прочность и пластичность по сравнению с недеформированными. Для ВЭС, полученного по лазерной аддитивной технологии, также справедлив этот путь повышения свойств. Отмечен путь улучшения механических свойств за счет электронно-пучковой обработки. Обращено внимание на необходимость учета роли энтропии, искажений кристаллической решетки, ближнего порядка, слабой диффузии и «коктейль» эффекта в анализе механических свойств.

Ключевые слова: сплав Cantor, механические свойства, механизмы деформации, структура, фазовый состав, распределение зерен, двойники

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00452).

Для цитирования: 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>

Original article

GENERATION OF INCREASED MECHANICAL PROPERTIES OF CANTOR HIGH-ENTROPY ALLOY

V. E. Gromov¹, Yu. A. Rubannikova¹, S. V. Konovalov^{1,2},
K. A. Osintsev^{1,2}, S. V. Vorob'ev¹

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

² Samara National Research University (34 Moskovskoe Route, Samara 443086, Russian Federation)

Abstract. The article considers a brief review of the last years of Russian and foreign research on the possibilities of improving mechanical properties of the Cantor quinary high-entropy alloy (HEA) with different phase composition in wide temperature range. The alloy, one of the first created equimolar HEAs with FCC structure, needs mechanical properties improvement in accordance with possible fields of application in spite of its high impact toughness and increased creep resistance. It has been noted that bimodal distribution of the grains by sizes under severe plastic torsional strain at high pressure of 7.8 GPa of cast alloy and subsequent short-time annealing at 873 and 973 K can change strength and plastic properties. Nanodimensional scale of the grains surrounded by amorphous envelope has been obtained for HEA produced by the method of magnetron sputtering and subsequent annealing at 573 K. In such a two-phase alloy nanohardness amounted to 9.44 GPa and elasticity modulus – to 183 GPa. Using plasticity effect induced by phase transformation in $(\text{CrMnFeCoNi})_{50}\text{Fe}_{50}$ alloy obtained by the method of laser additive technology

the ultimate strength of 415 – 470 MPa has been reached at high level of plasticity up to 77 %. It has been ensured by FCC → BCC diffusionless transformation. It is shown that difference in mechanisms of plastic strain of cast alloy at 77 K and 293 K (dislocation glide and twinning) determines a combination of increased “strength-plasticity” properties. Samples for generation of twins prestrained at 77 K exhibit increased strength and plasticity under subsequent loading at 293 K in comparison with the unstrained ones. For HEA obtained by laser additive technology this way of increasing properties is also true. The way of improving mechanical properties at the expense of electron beam processing is noted. The attention is paid to the necessity of taking into account the role of entropy, crystal lattice distortions, short-range order, weak diffusion and “cocktail” effect in the analysis of mechanical properties.

Keywords: Cantor alloy, mechanical properties, mechanisms of strain, structure, phase composition, grain distribution, twins

Funding: The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 20-19-00452).

For citation: 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, vol. 64, no. 8, pp. 599–605. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-599-605>

ВВЕДЕНИЕ

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) представляют собой новый класс металлических материалов, которые обладают свойствами, значительно превосходящими свойства обычных сплавов. Следствием этого является повышенный интерес исследователей в области физического материаловедения к таким материалам [1 – 4]. В 2004 г. Cantor с соавторами [5, 6] впервые обратили внимание на ВЭС на основе переходных 3D элементов с разной кристаллической структурой: кобальт (ГПУ), железо (ОЦК), хром (ОЦК), марганец (ОЦК), никель (ГЦК). Таких элементов в действительности 38. Высокоэнтропийные сплавы содержат до пяти – шести элементов в концентрации 5 – 35 %.

В последние годы наблюдается экспоненциальный рост количества публикаций, посвященных созданию и изучению ВЭС. Только за последнее десятилетие их количество в журналах Elsevier возросло почти в сто раз [5]. Кроме традиционных технологий получения ВЭС (таких как различные виды литья) разрабатываются методы порошковой металлургии, лазерной и плазменной наплавки, аддитивные технологии [2, 3].

Один из наиболее изученных ВЭС – сплав CrMnFeCoNi (сплав «Cantor») [5, 7 – 9] с ГЦК решеткой, обладает отличными механическими свойствами, особенно при криогенных температурах (ударная вязкость превышает 200 МПа·м², повышенное сопротивление ползучести [5]). Однако этот сплав обладает невысокой прочностью (менее 400 МПа) при комнатной температуре, что вызывает необходимость его улучшения [10]. Были предприняты значительные усилия решения этой проблемы за счет зернограничного упрочнения [7, 8], твердорастворного упрочнения [9 – 11], упрочнения выделениями [12] и соответствующими теоретическими разработками [13]. Другим путем увеличения прочности является частичная аморфизация, поскольку аморфная структура не содержит границ зерен или дислокаций [14]. Вместе с тем ВЭС CrMnFeCoNi обладает повышенной пластичностью и является одним из самых вязких при повышенных температурах [15].

Сравнительно недавно было показано, что в двухфазном ВЭС Fe₅₀Mn₃₀Co₁₀Cr₁₀ возможно достижение

прочности и пластичности одновременно за счет деформационно-индуцированного превращения ГЦК решетки в ОЦК или ГПУ фазы [16].

Особенно хотелось бы отметить работы по созданию нанокристаллического состояния в ВЭС, например, путем высокого давления при кручении [17]. Недостатком такого подхода является ограниченная пластичность высокопрочного сплава. Выход из ситуации возможен за счет создания бимодального распределения размера зерен путем соответствующей термообработки после деформации кручением при высоком давлении. Это может быть обусловлено тем, что крупные зерна больше аккомодируют деформацию, тогда как мелкие находятся в более сложном напряженно-деформированном состоянии, накапливают дислокации и обеспечивают деформационное упрочнение [17]. Значительного улучшения свойств поверхностных слоев сплавов можно достичь за счет внешних энергетических воздействий, наиболее эффективными из которых являются электронные пучки [18 – 21]. Такие методы обработки могут стимулировать значительное расширение областей использования ВЭС.

Трудности в сравнительном анализе работ по улучшению механических свойств и перспективам их практического использования связаны во многом с различными методами их получения и их составом. Это определяющим образом влияет на роль энтропии, искажений кристаллической решетки, ближнего порядка, слабого диффузионного эффекта, «коктейль» эффекта [5]. Высокоэнтропийный эффект заключается в том, что при разной энтропии смешивания и числе элементов в эквимольном ВЭС может быть сформирована как однофазная, так и многофазная структура. Различие в атомных размерах обеспечивает интенсивное искажение кристаллической решетки. Роль короткодействующего химического порядка конечно же важна и в настоящее время активно исследуется [5].

Значительное изменение потенциальной энергии в узлах решетки для составляющих элементов ответственно за высокую энергию активации миграции атомов и пониженные скорости диффузии, что приводит к «вялой» (как описывается в англоязычной литературе) диффузии. «Коктейль» эффект без особого научного

базиса способен формировать непредсказуемые синергетические свойства в ВЭС [22]. Проанализируем, тем не менее, последние публикации по этой проблеме для высокоэнтропийного сплава Cantor CrMnFeCoNi.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Создание бимодального распределения зерен по размерам ВЭС для повышения прочности и пластичности выглядит привлекательным из-за кажущейся простоты реализации [23]. Авторы работ [17, 23, 24] создавали бимодальное распределение зерен путем прокатки иковки гомогенизированных при 1200 °С слитков с последующей интенсивной пластической деформацией кручением при давлении 7,8 ГПа. Бимодальное распределение достигалось термообработкой при промежуточных температурах. Сплав CrMnFeCoNi остается однофазным при температуре выше 800 °С, но при кратковременном (до двух минут) отжиге достигалось до 2,5 % крупнозернистой структуры с одновременным возможным выделением второй фазы (σ -фазы), что является отрицательным эффектом. По мнению авторов работы [23] негативного эффекта можно избежать на стадии изготовления ВЭС путем более интенсивной консолидации крупных и нанозернистых порошков. Термообработка в течение двух минут ухудшает деформационное поведение сплава по сравнению с состоянием после интенсивной пластической деформации (табл. 1).

Сплав разрушался уже в области упругой деформации. При отжиге при 700 °С в течение 1 мин наблюдается сохранение пластичности при уменьшении прочности. Предполагается, что определенное влияние здесь могут оказывать полосы Людерса, не способные проходить через весь образец из-за малой скорости деформационного упрочнения, что приводит к локализации деформации [24]. Результаты фрактографического анализа свидетельствуют о вязком разрушении с образованием ямок. При отжиге при 600 °С ямки мелкие и неглубокие, тогда как при отжиге при 700 °С они больше и формируются вокруг выделений второй фазы. При отжиге при 600 °С отмечается сдвиговое разрушение, а разрушение при 700 °С формирует чашечный и конусный излом.

Обнадёживающе выглядят результаты по формированию прочного ВЭС путем создания наноструктурного

двухфазного аморфно-кристаллического состояния [10]. Наноструктурированный ВЭС Cr₂₀Mn₂₀Fe₂₀Co₂₀Ni₂₀ (ат. %), полученный методом магнетронного распыления, был подвергнут отжигу при 300 °С (состояние 1) и 450 °С (состояние 2). На рентгенограммах образцов (состояние 1) не было обнаружено кристаллического состояния ввиду исключительно малого размера зерен. Данные ПЭМ свидетельствовали о зернах размером приблизительно 3,8 нм, равномерно распределенных в аморфных оболочках. Размер зерен в образцах (состояние 1 и 2) после термообработки вырос приблизительно до 5,8 и 7,2 нм соответственно. Для сплава Cantor это минимальные размеры зерен, упоминаемые в литературе. В исходном состоянии (без термообработки) нанотвердость (H_n) составляет 8,93 ГПа, модуль упругости (E) 162 ГПа (табл. 2).

Высокий уровень наблюдаемых механических свойств, по мнению авторов работы [10], обусловлен двухфазной структурой этого сплава. Наличие аморфной составляющей ведет к снижению уровня напряжений для размножения дислокаций по сравнению с однородным нанокристаллическим состоянием. Кроме того, на межфазной аморфно-кристаллической границе будет наблюдаться более эффективное поглощение дислокаций по сравнению с обычным зернограничным. Вследствие этого для исходного состояния напряжения, необходимые для размножения дислокаций, будут меньше. После термообработки при 300 °С (состояние 1) объемная доля аморфной фазы будет меньше, твердость лишь немного меньше предсказываемого соотношением Холла-Петча. Уменьшение толщины аморфной прослойки, окружающей крошечные нанокристаллы, ведет к ослаблению способности зарождения и поглощения дислокаций на межфазной аморфно-кристаллической границе. Такая двухфазная структура для исходного состояния и после термообработки при 300 °С подобна двухфазному сплаву Cantor, синтезированному размолотом и искровым плазменным спеканием [25]. Такая структура обладает достаточно высокой (6,3 ГПа) твердостью для зерен размером примерно 80 нм, поскольку содержит ГЦК и обогащенную хромом ОЦК фазы. Это дает основание с оптимизмом относиться к возможности увеличения твердости при создании двухфазных ВЭС Cantor.

Таблица 1

Механические свойства сплава CrMnFeCoNi [23]

Table 1. Mechanical properties of CrMnFeCoNi alloy [23]

Микроструктурное состояние	σ_B , МПа	δ , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	ψ , %
Крупнозернистый сплав	641 ± 10	25,0 ± 2,0	329 ± 30	76 ± 6
Сплав после интенсивной пластической деформации	1924 ± 124	3,2 ± 1,3	1787 ± 200	30 ± 13
Сплав после термообработки при 600 °С (2 мин)	1669 ± 266	1,5 ± 0,3	–	–
Сплав после термообработки при 700 °С (1 мин)	1216 ± 148	5,4 ± 1,5	1207 ± 151	53 ± 5

Механические свойства сплава Cantor после термообработки [10]

Table 2. Mechanical properties of the alloy Cantor after heat treatment [10]

Состояние	Структура	Размер зерна, нм	E , ГПа	H_{x-n} , ГПа	H_n , ГПа	$\Delta H = H_n - H_{x-n}$, ГПа
Исходное	стеклянная (аморфная) оболочка + нанозерно	3,8	162	12,20	8,93	-3,27
Состояние 1 (300 °С)	размытая стеклянная (аморфная) оболочка + нанозерно	5,8	183	10,11	9,44	-0,67
Состояние 2 (450 °С)	монолитное нанозерно	7,2	220	9,20	13,76	4,56

П р и м е ч а н и е. H_{x-n} – твердость по соотношению Холла-Петча.

Высокая стоимость кобальта и хрома, используемых в сплаве Cantor, заставляет исследователей искать пути создания ВЭС с их меньшим содержанием, но с повышенными механическими свойствами. Такие свойства могут быть достигнуты за счет эффекта пластичности, индуцированной превращением (transformation – induced plasticity – TRIP) [16, 26, 27]. В однофазном сплаве $(CrMnFeCoNi)_{50}Fe_{50}$ с ГЦК структурой, полученном методом лазерной аддитивной технологии, при деформации до разрушения образовывалось до 55 % ОЦК структуры при соответствующем снижении ГЦК фазы до 45 % [28]. Как и в работе [29], это происходило бездиффузионным путем.

По сравнению с традиционным ВЭС сплав Cantor $(CrMnFeCoNi)_{50}Fe_{50}$ обладает высокими прочностными параметрами (предел прочности 415 – 470 МПа) и пластичностью на уровне 45 – 77 % [28]. Фаза ОЦК образовалась в зоне пересечения полос сдвига в зернах ГЦК фазы.

Для понимания природы улучшения механических свойств ВЭС важно знать механизмы пластической деформации и упрочнения. Выполненный в работе [30] комплекс исследований микроструктурных изменений для ВЭС Cantor при низких и комнатных температурах вносит вклад в решение этой проблемы. Было показано, что для традиционно выплавленного сплава до деформации приблизительно 7,4 % при 77 К и приблизительно 25 % при 293 К пластичность является дислокационной. Растягивающие напряжения начала двойникования составляют примерно 720 МПа, а сдвиговые – примерно 235 МПа. Модуль сдвига уменьшается с ростом деформации при 77 и 293 К.

При температуре 77 К вклад двойниковых сдвигов в общую деформацию невелик из-за сравнительно низкой объемной доли двойников. Но он существенен в деформационном упрочнении из-за возникновения границ раздела («динамическое» соотношение Холла-Петча).

Вне зоны 7,4 % истинной деформации скорость упрочнения постоянна при 77 К, поскольку активируется двойникование, которое создает новые границы раздела. При комнатной температуре наблюдается умень-

шение скорости упрочнения с ростом деформации из-за их отсутствия вплоть до разрушения.

Таким образом, комбинация повышенных свойств прочность – пластичность при низких температурах по сравнению с комнатными обусловлена более ранним двойникованием, обеспечивающим дополнительное упрочнение. В соответствии с этим авторы работы [30] показывают, что предварительно продеформированные при 77 К образцы для образования нанодвойников при последующем нагружении при 293 К проявляют повышенные прочность и пластичность по сравнению с недеформированными.

Эту точку зрения разделяют китайские исследователи, данные которых были получены на ВЭС, изготовленном по лазерной аддитивной технологии [31]. Преимущество такой технологии состоит в большой скорости затвердевания ($10^4 - 10^6$ К/с), способствующей улучшению растворимости и обеспечивающей формирование твердорастворной фазы. При этом микроструктура является однородной из-за подавления сегрегаций элементов. Плотность дислокаций выше, чем в ВЭС Cantor, полученном в работе [30] путем традиционной плавки благодаря высоким скоростям затвердевания. Это является решающим моментом в увеличении предела текучести по сравнению со сплавом с таким же размером зерна [32].

На начальных стадиях деформации дислокационное скольжение является преобладающим механизмом, а появляющиеся на поздних стадиях двойники улучшают и прочность, и пластичность, особенно при низких температурах. Формирование препятствий для движения дислокаций из-за двойникования несомненно упрочняет сплав.

Облучение импульсными электронными пучками с плотностью энергии 30 Дж/см² не изменяет элементный состав сплава, полученного методом проволоочно-дугового аддитивного производства ВЭС AlCoCrFeNi, сопровождается гомогенизацией поверхностного слоя и образованием субмикро-нанокристаллической структуры ([33], что должно обеспечивать, в соответствии с результатами [18 – 21], повышение механических свойств.

Выводы

В последние годы отмечен экспоненциальный рост количества исследований высокоэнтروпийных сплавов, которые обладают высокими механическими и эксплуатационными свойствами. Сделана попытка выполнить краткий анализ последних публикаций в основном зарубежных авторов по поиску возможных путей улучшения механических свойств классического ВЭС Cantor

(CoCrMnFeNi). Акцентируется внимание на создании бимодального распределения размеров зерен, формировании наноразмерного масштаба зерен с аморфным окружением, эффекте пластичности, индуцированном фазовым превращением ГЦК → ОЦК, роли смены дислокационного скольжения на двойникование, а также применении внешних энергетических воздействий. Указаны трудности проведения сравнительного анализа путей повышения механических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Yeh J.W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys // *JOM. The Journal of the minerals, metals and materials society*. 2013. Vol. 65. No. 12. P. 1759–1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>
2. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys // *Annales de Chimie: Science des Materiaux*. 2006. Vol. 31. No. 6. P. 633–648. <https://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648>
3. 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>
4. Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Осинцев К.А., Рубанникова Ю.А., Перегудов О.А., Семин А.П. Высокоэнтропийные сплавы. Новокузнецк: Полиграфист, 2021. 178 с.
5. 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>
6. 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. 375–77. P. 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
7. Otto F., Dlouhý A., Somsen Ch., 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. No. 15. P. 5743–5755. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018>
8. Schuh B., Mendez-Martin F., Völker 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. P. 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.025>
9. Li Z., Tasan C.C., Springer H., Gault B., Raabe D. Interstitial atoms enable joint twinning and transformation induced plasticity in strong and ductile high-entropy alloys // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. Article 40704. <https://doi.org/10.1038/srep40704>
10. Xiao L.L., Zheng Z.Q., Guo S.W., Huang P., Wang F. Ultra-strong nanostructured CrMnFeCoNi high entropy alloys // *Materials and Design*. 2020. Vol. 194. Article 108895. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108895>
11. Coury F.G., Kaufman M., Clarke A.J. Solid-solution strengthening in refractory high entropy alloys // *Acta Materialia*. 2019. Vol. 175. P. 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.06.006>
12. Ikeda Y., Tanaka I., Neugebauer J., Körmann F. Impact of interstitial C on phase stability and stacking-fault energy of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy // *Physical Review Materials*. 2019. Vol. 3. No. 11. Article 113603. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.113603>
13. Laplanche G., Kostka A., Horst O.M., Eggeler G., George E.P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 118. P. 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.038>
1. Yeh J.W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *JOM. The Journal of the minerals, metals and materials society*. 2013, vol. 65, no. 12, pp. 1759–1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>
2. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie: Science des Materiaux*. 2006, vol. 31, no. 6, pp. 633–648. <https://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648>
3. 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, vol. 64, no. 4, pp. 249–258. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>
4. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Rubannikova Yu.A., Peregudov O.A., Semin A.P. *High Entropy Alloys*. Novokuznetsk: Poligrafist, 2021, 178 p. (In Russ.).
5. 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>
6. 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. 375–77, pp. 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
7. Otto F., Dlouhý A., Somsen Ch., 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, no. 15, pp. 5743–5755. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018>
8. Schuh B., Mendez-Martin F., Völker 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>
9. Li Z., Tasan C.C., Springer H., Gault B., Raabe D. Interstitial atoms enable joint twinning and transformation induced plasticity in strong and ductile high-entropy alloys. *Scientific Reports*. 2017, vol. 7, article 40704. <https://doi.org/10.1038/srep40704>
10. Xiao L.L., Zheng Z.Q., Guo S.W., Huang P., Wang F. Ultra-strong nanostructured CrMnFeCoNi high entropy alloys. *Materials and Design*. 2020, vol. 194, article 108895. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108895>
11. Coury F.G., Kaufman M., Clarke A.J. Solid-solution strengthening in refractory high entropy alloys. *Acta Materialia*. 2019, vol. 175, pp. 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.06.006>
12. Ikeda Y., Tanaka I., Neugebauer J., Körmann F. Impact of interstitial C on phase stability and stacking-fault energy of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Physical Review Materials*. 2019, vol. 3, no. 11, article 113603. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.113603>
13. Laplanche G., Kostka A., Horst O.M., Eggeler G., George E.P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2016, vol. 118, pp. 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.038>

14. Li F., Zhao H., Yue Y., Yang Z., Zhang Y., Guo L. Dual-phase super-strong and elastic ceramic // *ACS Nano*. 2019. Vol. 13. No. 4. P. 4191–4198. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b09195>
15. Gludovatz B., Hohenwarther A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications // *Science*. 2014. Vol. 345. No. 6201. P. 1153. <https://doi.org/10.1126/science.1254581>
16. Li Z., Körmann 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. Vol. 136. P. 262–270. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.07.023>
17. Schuh B., Völker B., Todt J., Kormout K.S., Hohenwarther A., Schell N. Influence of annealing on microstructure and mechanical properties of a nanocrystalline CrCoNi medium-entropy alloy // *Materials*. 2018. Vol. 11. No. 5. Article 662. <https://doi.org/10.3390/ma11050662>
18. Усталость сталей, модифицированных высокоинтенсивными электронными пучками / В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, С.В. Воробьев, С.В. Горбунов, Д.А. Бессонов, В.В. Сизов, С.В. Коновалов. Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2012. 403 с.
19. Коновалов С.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Влияние электромагнитных полей и токов на пластическую деформацию металлов и сплавов. Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2013. 293 с.
20. Громов В.Е., Аксенова К.В., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф. Повышение усталостного ресурса силумина электронно-пучковой обработкой // *Успехи физики металлов*. 2015. Т. 16. № 4. С. 265–297.
21. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Konovalov S.V., Alsarava 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. Vol. 79. No. 9. P. 1169–1172. <https://doi.org/10.3103/S1062873815090087>
22. Ranganathan S. Alloyed pleasures: Multimetallic cocktails // *Current Science*. 2003. Vol. 85. P. 1404–1406.
23. Schuh B., Pippan R., Hohenwarther A. Tailoring bimodal grain size structures in nanocrystalline compositionally complex alloys to improve ductility // *Materials Science and Engineering: A*. 2019. Vol. 748. P. 379–385. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.073>
24. Tian Y.Z., Gao S., Zhao L.J., Lu S., Pippan R., Zhang Z.F., Tsuji N. Remarkable transitions of yield behavior and Lüders deformation in pure Cu by changing grain sizes // *Scripta Materialia*. 2018. Vol. 142. P. 88–91. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.08.034>
25. Abhijit A., Varghese J., Chalavadi P., Sai Karthik P., Bhanu Sankara Rao K., Rajulapati K.V. Negative strain rate sensitivity in two-phase nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy with broader grain size distribution studied by nanoindentation // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019. Vol. 72. No. 10. P. 2861–2867. <https://doi.org/10.1007/s12666-019-01762-5>
26. Li Z., Gokuldoss Pradeep K., Deng Y., Raabe D., Tسان C.C. Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strength-ductility trade-off // *Nature*. 2016. Vol. 534. P. 227–230. <https://doi.org/10.1038/nature17981>
27. Bae J.W., Seol J.B., Moon J., Sohn S.S., Jang M.J., Um H.Y., Lee B.-J., Kim H.S. Exceptional phase-transformation strengthening of ferrous medium-entropy alloys at cryogenic temperatures // *Acta Materialia*. 2018. Vol. 161. P. 388–399. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.09.057>
28. Li J., Luan H., Zhou L., Amar A., Li R., Huang L., Liu X., Le G., Wang X., Wu J., Jiang C. Phase transformation – induced strengthening of an additively manufactured multi-principal element CrMnFeCoNi alloy // *Materials and Design*. 2020. Vol. 195. Article 108999. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108999>
29. Huang H., Wu Y., He J., Wang H., Liu X., An K., Wu W., Lu Z. Phase-transformation ductilization of brittle high-entropy alloys via metastability engineering // *Advanced Materials*. 2017. Vol. 29. No. 30. Article 1701678. <https://doi.org/10.1002/adma.201701678>
30. Laplanche G., Kostka A., Horst O.M., Eggeler G., George E.P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 118. P. 152–163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.038>
14. Li F., Zhao H., Yue Y., Yang Z., Zhang Y., Guo L. Dual-phase super-strong and elastic ceramic. *ACS Nano*. 2019, vol. 13, no. 4, pp. 4191–4198. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b09195>
15. Gludovatz B., Hohenwarther A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*. 2014, vol. 345, no. 6201, pp. 1153. <https://doi.org/10.1126/science.1254581>
16. Li Z., Körmann 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, vol. 136, pp. 262–270. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.07.023>
17. Schuh B., Völker B., Todt J., Kormout K.S., Hohenwarther A., Schell N. Influence of annealing on microstructure and mechanical properties of a nanocrystalline CrCoNi medium-entropy alloy. *Materials*. 2018, vol. 11, no. 5, article 662. <https://doi.org/10.3390/ma11050662>
18. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorob'ev S.V., Gorbunov S.V., Bessonov D.A., Sizov V.V., Konovalov S.V. *Fatigue of Steels Modified with High-Intensity Electron Beams*. Novokuznetsk: Inter-Kuzbass, 2012, 403 p. (In Russ.).
19. Konovalov S.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. *Influence of Electromagnetic Fields and Currents on Plastic Deformation of Metals and Alloys*. Novokuznetsk: Inter-Kuzbass, 2013, 293 p. (In Russ.).
20. Gromov V.E., Akseanova K.V., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F. Increasing the fatigue life of silumin by electron beam treatment. *Uspekhi fiziki metallov*. 2015, vol. 16, no. 4, pp. 265–297. (In Russ.).
21. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Konovalov S.V., Alsarava 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, vol. 79, no. 9, pp. 1169–1172. <https://doi.org/10.3103/S1062873815090087>
22. Ranganathan S. Alloyed pleasures: Multimetallic cocktails. *Current Science*. 2003, vol. 85, pp. 1404–1406.
23. Schuh B., Pippan R., Hohenwarther A. Tailoring bimodal grain size structures in nanocrystalline compositionally complex alloys to improve ductility. *Materials Science and Engineering: A*. 2019, vol. 748, pp. 379–385. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.073>
24. Tian Y.Z., Gao S., Zhao L.J., Lu S., Pippan R., Zhang Z.F., Tsuji N. Remarkable transitions of yield behavior and Lüders deformation in pure Cu by changing grain sizes. *Scripta Materialia*. 2018, vol. 142, pp. 88–91. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.08.034>
25. Abhijit A., Varghese J., Chalavadi P., Sai Karthik P., Bhanu Sankara Rao K., Rajulapati K.V. Negative strain rate sensitivity in two-phase nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy with broader grain size distribution studied by nanoindentation. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019, vol. 72, no. 10, pp. 2861–2867. <https://doi.org/10.1007/s12666-019-01762-5>
26. Li Z., Gokuldoss Pradeep K., Deng Y., Raabe D., Tسان C.C. Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strength-ductility trade-off. *Nature*. 2016, vol. 534, pp. 227–230. <https://doi.org/10.1038/nature17981>
27. Bae J.W., Seol J.B., Moon J., Sohn S.S., Jang M.J., Um H.Y., Lee B.-J., Kim H.S. Exceptional phase-transformation strengthening of ferrous medium-entropy alloys at cryogenic temperatures. *Acta Materialia*. 2018, vol. 161, pp. 388–399. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.09.057>
28. Li J., Luan H., Zhou L., Amar A., Li R., Huang L., Liu X., Le G., Wang X., Wu J., Jiang C. Phase transformation – induced strengthening of an additively manufactured multi-principal element CrMnFeCoNi alloy. *Materials and Design*. 2020, vol. 195, article 108999. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108999>
29. Huang H., Wu Y., He J., Wang H., Liu X., An K., Wu W., Lu Z. Phase-transformation ductilization of brittle high-entropy alloys via metastability engineering. *Advanced Materials*. 2017, vol. 29, no. 30, article 1701678. <https://doi.org/10.1002/adma.201701678>
30. Laplanche G., Kostka A., Horst O.M., Eggeler G., George E.P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2016, vol. 118, pp. 152–163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.038>

31. Qiu Z., Yao C., Feng K., Li Z., Chu P.K. Cryogenic deformation mechanism of CrMnFeCoNi high-entropy alloy fabricated by laser additive manufacturing process // *International Journal of Light-weight Materials and Manufacture*. 2018. Vol. 1. No. 1. P. 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.02.001>
32. Otto F., Dlouhý 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. No. 15. P. 5743–5755. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018>
33. Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А., Чэнь С. Влияние облучения импульсным электронным пучком на структуру поверхности не эквивалентного высокоэнтропийного сплава AlCoFeCrNi // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2021. № 8. С. 76–81. <https://doi.org/10.31857/S1028096021080112>
31. Qiu Z., Yao C., Feng K., Li Z., Chu P.K. Cryogenic deformation mechanism of CrMnFeCoNi high-entropy alloy fabricated by laser additive manufacturing process. *International Journal of Light-weight Materials and Manufacture*. 2018, vol. 1, no. 1, pp. 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.02.001>
32. Otto F., Dlouhý 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, no. 15, pp. 5743–5755. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018>
33. Osintsev K.A., Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu. F., Panchenko I.A., Chen S. Effect of pulsed electron beam irradiation on the surface structure of a non-equiatom high-entropy alloy of the Al–Co–Cr–Fe–Ni. *System Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*. 2021, no. 8, pp. 76–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S1028096021080112>

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

Юлия Андреевна Рубанникова, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-5677-1427
E-mail: rubannikova96@mail.ru

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, профессор, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-4809-8660
E-mail: ksv@ssau.ru

Кирилл Александрович Осинцев, аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-1150-6747
E-mail: osincev.ka@ssau.ru

Сергей Владимирович Воробьев, д.т.н., старший научный сотрудник Управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-3957-0249
E-mail: sparrow1981@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

Yuliya A. Rubannikova, Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0001-5677-1427
E-mail: rubannikova96@mail.ru

Sergei V. Konovalov, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Chair of Metals Technology and Aviation Materials, Samara National Research University, Prof., Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-4809-8660
E-mail: ksv@ssau.ru

Kirill A. Osintsev, Postgraduate of the Chair of Metals Technology and Aviation Materials, Samara National Research University, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-1150-6747
E-mail: osincev.ka@ssau.ru

Sergei V. Vorob'ev, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Department of Scientific Researches, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-3957-0249
E-mail: sparrow1981@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ:

Громов В.Е. – сравнительный анализ различных способов улучшения механических свойств ВЭС Cantor в широком интервале температур.

Коновалов С.В. – сравнение данных микроструктурных исследований и механизмов пластической деформации и управления ВЭС Cantor при 77 К и 293 К. Выявление роли двойникования в формировании комплекса комбинации повышенных свойств «прочность–пластичность».

Осинцев К.А. – оценка роли способа получения ВЭС Cantor в формировании высокого уровня механических свойств.

Рубанникова Ю.А. – подбор англоязычной литературы по возможным способам улучшения механических свойств ВЭС Cantor за последние годы.

Воробьев С.В. – выявление трудностей при анализе работ по улучшению механических свойств с учетом роли энтропии, искажений кристаллической, ближнего порядка, слабой диффузии и «коктейль» эффекта.

Поступила в редакцию 27.04.2021
 После доработки 11.05.2021
 Принята к публикации 12.05.2021

Received 27.04.2021
 Revised 11.05.2021
 Accepted 12.05.2021