



Оригинальная статья

УДК 536.425:539.25:539.531

DOI 10.17073/0368-0797-2022-8-563-572

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2368>

## УПРАВЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА САНТОР CoCrFeMnNi

В. Е. Громов<sup>1</sup>, С. В. Коновалов<sup>1,2</sup>, Ю. А. Шлярова<sup>1</sup>,  
М. О. Ефимов<sup>1</sup>, И. А. Панченко<sup>1</sup>

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

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

**Аннотация.** Выполнен краткий анализ работ по изменению механических свойств высокоэнтропийного сплава (ВЭС) Cantor CoCrFeMnNi различными способами. Рассмотрено влияние легирования алюминием, ванадием, марганцем, титаном, кремнием, углеродом, медью на упрочнение ВЭС, полученного методами вакуумно-дуговой плавки, лазерной плавки, дуговой плавки и капельного литья, механического легирования с последующим плазменным спеканием, газового распыления с последующим ударно-волновым и статическим уплотнением. Показано, что добавки 2,5 % TiC и 5 % WC значительно улучшают предел прочности, но снижают относительное удлинение до разрушения. Влияние размера зерна в диапазоне 4,4 – 155 мкм заключается в увеличении предела прочности с уменьшением размера зерна. Понижение температуры увеличивает пределы прочности и текучести для зерен всех размеров. Интенсивная пластическая деформация, формирующая наноразмерные (~50 нм) зерна, значительно увеличивает предел прочности до 1950 МПа и твердость до 520 HV. Последующие изохронные и изотермические отжиги позволяют варьировать прочность и пластичность ВЭС. Формирование наноструктурно-фазовых состояний при ударном компостировании, механическом легировании и последующем искровом плазменном спекании значительно повышает предел прочности при комнатной температуре, сохраняя отличную пластичность (относительное удлинение примерно 28 %). В качестве одного из методов модифицирования механических свойств ВЭС авторами предложена электронно-пучковая обработка (ЭПО). Выполнен анализ деформационных кривых ВЭС, полученного по технологии проволоочно-дугового аддитивного производства, после ЭПО с плотностью энергии пучка электронов 10 – 30 Дж/см<sup>2</sup>, высказаны и обоснованы предположения о причинах снижения прочностных и пластических характеристик. Проведен сравнительный анализ механических свойств ВЭС Cantor, полученных различными методами, и отмечены причины расхождения значений прочностных и пластических параметров.

**Ключевые слова:** высокоэнтропийный сплав, CoCrFeMnNi, механические свойства, легирование, структура, спекание, упрочнение

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда № 20-19-00452.

**Для цитирования:** Громов В.Е., Коновалов С.В., Шлярова Ю.А., Ефимов М.О., Панченко И.А. Управление механическими свойствами высокоэнтропийного сплава Cantor CoCrFeMnNi // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 8. С. 563–572.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-563-572>

Original article

## CONTROL OF CANTOR CoCrFeMnNi HIGH-ENTROPY ALLOY MECHANICAL PROPERTIES

V. E. Gromov<sup>1</sup>, S. V. Konovalov<sup>1,2</sup>, Yu. A. Shlyarova<sup>1</sup>,  
M. O. Efimov<sup>1</sup>, I. A. Panchenko<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Samara National Research University (34 Moskovskoe Route, Samara 443086, Russian Federation)

**Abstract.** The paper summarizes the research on the control of Cantor CoCrFeMnNi high-entropy alloy (HEA) mechanical properties. We studied the effects of alloying with aluminum, vanadium, manganese, titanium, silicon, carbon, and copper on the hardening of HEAs made by vacuum arc melting, laser melting, arc melting, drip casting, mechanical alloying with subsequent plasma sintering, gas sputtering followed by the shock wave and static compaction. It was shown that the addition of 2.5 % TiC and 5 % WC significantly improves the tensile strength, but reduces the elongation to failure. In the 4.4 – 155 μm grain size range, the tensile strength increases as the grain size decreases. The strength and yield limits for any grain size increase as the temperature decreases. Intensive plastic deformation forming nanoscale (~50 nm) grains significantly increases the tensile strength (up to 1,950 MPa) and hardness (up to 520 HV). The strength and ductility can be adjusted with subsequent isochronous

and isothermal annealing. The formation of nanostructure phase states with shock compression, mechanical alloying, and subsequent spark plasma sintering significantly increase the tensile strength at room temperature while maintaining excellent plasticity (relative elongation ~28 %). We proposed electron-beam processing (EBP) to control the HEA mechanical properties. We analyzed the deformation curves for the HEA made by wire arc additive manufacturing after EBP at 10 – 30 J/cm<sup>2</sup> electron beam energy density and made some assumptions about the reasons for the strength and ductility decrease. We also compared the mechanical properties of Cantor alloys made by various processes and found the reasons for the spread of the strength and ductility values.

**Keywords:** HEA, CoCrFeMnNi, mechanical properties, alloying, structure, sintering, hardening

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

**For citation:** Gromov V.E., Kononov S.V., Shlyarova Yu.A., Efimov M.O., Panchenko I.A. Control of Cantor CoCrFeMnNi high-entropy alloy mechanical properties. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 8, pp. 563–572. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-563-572>

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы внимание ученых в области физического материаловедения привлекают новые сплавы, известные как высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), которые обладают целым комплексом уникальных свойств [1 – 3]. Идея высокоэнтропийных сплавов заключается в том, что атомы всех элементов считаются атомами растворенного вещества, вызывают деформацию кристаллической структуры и улучшают термодинамическую стабильность свойств, связанных с различиями в атомных радиусах компонентов. Это приводит к высокой энтропии системы для дальнейшего производства материала с уникальными свойствами, которые невозможно получить при использовании традиционных методов микролегирования.

Оригинальные результаты, полученные в области ВЭС, подробно рассмотрены в аналитических обзорах и монографиях [4 – 7], где описаны микроструктура, свойства, термодинамика ВЭС, рассмотрены результаты моделирования их структуры и обсуждены новые варианты методов получения многокомпонентных сплавов. Исследования ВЭС показали, что в них возможно формирование наноразмерных структур и даже аморфных фаз вследствие значительных искажений решетки, обусловленных различием атомных радиусов элементов замещения.

Высокоэнтропийный сплав FeCoCrNiMn (сплав Cantor CoCrFeMnNi) был исследован одним из первых. Его особенностью является то, что он не изменяет тип кристаллической решетки (гранцентрированная кубическая) при варьировании режимов термической обработки. Кроме того, он обладает повышенными механическими свойствами [8]. Механические испытания данного сплава при криогенной (77 К) и комнатной температурах выявили, что механизм его пластической деформации обусловлен доминированием двойникования [9]. Низкий предел текучести при комнатной температуре является одним из недостатков сплавов CoCrFeMnNi. Увеличение предела текучести возможно при введении в сплав микродобавок, а также проведением энергетического воздействия, например, воздействия ультразвуком [10], азотирования [11] и борирования [12]. Тем не менее, данные методы сложны для внедрения в промышленность в связи с необходи-

мостью постоянного контроля элементного состава и технологических параметров работы оборудования.

Обработка низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками является одним из интенсивно развиваемых в последнее время методов модификации поверхностных слоев металлических материалов. Такая обработка за счет высокоскоростного нагрева и охлаждения поверхности материала приводит к значительному улучшению его механических свойств путем оптимизации структуры его поверхностного слоя [13]. В целом, механические характеристики металлических изделий, подвергнутых такому энергетическому воздействию, могут вырасти до 20 раз, что существенно превышает эффективность стандартных видов обработки [14, 15]. Кроме этого, воздействие низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками приводит к пластической деформации поверхности, что способствует возникновению дислокаций с высокой плотностью и значительному улучшению физических и механических свойств [16, 17].

Количество работ, посвященных исследованию влияния низкоэнергетических сильноточных электронных пучков (электронно-пучковая обработка (ЭПО)) на высокоэнтропийные сплавы, крайне ограничено. В работе [18] отмечено, что показатели износостойкости, микротвердости, нанотвердости и коррозионных свойств сплава CoCrFeNiMo<sub>0,2</sub> претерпели значительное увеличение в результате воздействия электронным пучком. Показано, что электронно-пучковая обработка приводит к гомогенизации химического состава высокоэнтропийного сплава системы CoCrFeAlNi [19].

Целью настоящей работы является анализ способов управления механическими свойствами высокоэнтропийного сплава Cantor CoCrFeMnNi.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Влияние легирования

В работе [20] охарактеризованы и оценены микроструктура и механические свойства при растяжении ряда высокоэнтропийных сплавов (FeCoNiCrMn)<sub>100-x</sub>Al<sub>x</sub> (x = 0 ÷ 20 % (ат.)), полученных дуговой плавкой. По микроструктурным наблюдениям фазовую диаграмму состояния сплавов, содержащих алюминий, можно раз-

делить на три области: единая ГЦК область с концентрацией алюминия менее 8 % (область I), дууплексные фазы ГЦК + ОЦК области с содержанием алюминия от 8 до 16 % (область II) и область ОЦК твердого раствора с содержанием алюминия более 16 % (область III). В области I ( $Al < 8\%$ ) сплавы ведут себя как твердые растворы с добавлением атома алюминия в качестве основного упрочняющего элемента. Предел прочности сплава при растяжении составляет примерно 500 МПа, предел текучести – примерно 220 МПа и относительное удлинение – от 61,7 до 47,2 %. В области II ( $8\% < Al < 16\%$ ) начинают появляться ОЦК фазы и резко возрастают предел прочности и предел текучести, но резко снижается пластичность. Сплавы в этой области ведут себя как композит. В частности, ВЭС с содержанием алюминия 11 % имеет композиционную структуру, содержащую 25,4 % ОЦК, и демонстрирует максимально достижимую прочность на растяжение 1174 МПа при пластичности 7,7 %. Однако сплавы с содержанием алюминия более 11 % обладают плохой пластичностью. В области III ( $Al > 16\%$ ) сплавы состоят из неупорядоченных выделений A2, внедренных в упорядоченную матрицу B2. Микроструктурная характеристика предполагает, что две ОЦК фазы образовались в результате спинодального распада. Сплавы в этой области чрезвычайно хрупкие.

В работе [21] исследованы микроструктура и механические свойства высокоэнтروпийных сплавов  $CoCrFeMnNiV_x$  ( $x = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$ ) дуговой плавки в состоянии после затвердевания и отжига при 1000 °C в течение 24 ч. Сплав  $CoCrFeMnNi$  представляет собой однофазный ГЦК твердый раствор. Легирование ванадием приводит к образованию интерметаллидной сигма-фазы в сплавах с  $x \geq 0,25$ . Сигма-фаза обнаружена в сплавах  $CoCrFeMnNiV_{0,5}$ ,  $CoCrFeMnNiV_{0,75}$  и  $CoCrFeMnNiV$  в состоянии после затвердевания и отжига. Отжиг приводит к увеличению объемной доли сигма-фазы в сплавах с  $x = 0,5, 0,75$  и  $1,0$ , а также в сплаве  $CoCrFeMnNiV_{0,25}$ . Объемная доля сигма-фазы увеличивается с ростом содержания ванадия примерно от 2 % при  $x = 0,25$  до 67 – 72 % при  $x = 1,0$ . Измерения микротвердости и испытания на сжатие показали, что легирование ванадием выше  $x = 0,5$  приводит к их повышению и понижению пластичности исходно мягкого и пластичного сплава  $CoCrFeMnNi$ . Например, микротвердость, предел текучести и пластичность сплава  $CoCrFeMnNi$  составили 135 HV, 230 МПа и более 75 % соответственно, а сплава  $CoCrFeMnNiV$  – 636 HV, 1660 МПа и 0,5 % соответственно.

Необычный метод легирования ВЭС порошком марганца при лазерной плавке в порошковом слое предложен в работе [22]. Помимо гомогенного растворения в матрице ВЭС марганец также образует частицы оксидов, появляющиеся как из порошкового сырья, так и из атмосферы, в результате чего образуется легированный, упрочненный дисперсными оксидами ВЭС.

Результатом процесса является ВЭС, который состоит из ГЦК матрицы  $CoCrFeMnNi$  с объемной долей частиц оксида марганца примерно 7 %. Сочетание высокой прочности на растяжение (630/730 МПа – предел текучести/предел прочности на излом) и умеренной пластичности при растяжении (примерно 12 %) было достигнуто с помощью упрочнения дисперсным оксидом марганца. Разработанный ВЭС также сохранил высокую пластичность при сжатии. Прочность такого ВЭС по сравнению с ВЭС  $CoCrFeMnNi$ , изготовленным с использованием предварительно легированного порошка, в основном повышается за счет упрочнения Орована. Субмикронные частицы оксидов препятствуют пластической деформации матрицы, создавая пустоты вдоль направлений скольжения и в определенной степени снижая пластичность при растяжении.

В работе [23] исследовано влияние добавок титана и кремния на фазовое равновесие и механические свойства эквивалентного высокоэнтропийного сплава  $CoCrFeMnNi$ . Установлено, что как добавление титана, так и добавление кремния улучшают прочность сплава на растяжение. Упрочняющая способность добавки титана выше, чем кремния. Добавление титана приводит к более низкой пластичности сплава, чем у сплава Cantor. Разница в пластичности связана с их деформационным упрочнением в диапазоне более высоких деформаций.

В работе [24] исследовано влияние добавки меди на фазовый переход и механические свойства высокоэнтропийного сплава  $CrMnFeCoNiCu_x$ . В сплавах с большим количеством меди наблюдались обедненные медью дендриты и богатые медью и марганцем интердендриты из-за положительной энтальпии смешения между медью и другими элементами в сплаве. Предел текучести и микротвердость увеличиваются с ростом содержания меди: от 188,04 до 350,63 МПа и от 165,35 до 215,84 HV соответственно. Высокая прочность сплава  $CrMnFeCoNiCu$  объясняется наличием в матрице равномерно диспергированных наноразмерных выделений, богатых медью, которые препятствуют движению дислокаций при деформации сплава. Сплавы  $CrMnFeCoNiCu_x$  с добавлением меди также продемонстрировали превосходную способность к деформационному упрочнению во время испытаний на сжатие.

В исследовании [25] высокоэнтропийные сплавы типа Cantor с добавками атомов углерода (0, 0,5 и 2,0 % (ат.)) обрабатывались методом кручения под давлением 6,5 ГПа с 0,5, 1 и 3 оборотами при комнатной температуре. Во всех исследованных составах интенсивная пластическая деформация приводит к резкому измельчению размера зерен вплоть до наноразмерного диапазона и к значительному увеличению плотности дислокаций. Твердость образцов, содержащих 0, 0,5 и 2,0 % (ат.) углерода, приближается к максимальному значению 490, 550 и 640 HV соответственно. Относительное удлинение образцов всех трех исследованных

сплавов превышает 30 %. Значения предела текучести образцов достигают 1,7, 1,9 и 2,4 ГПа соответственно при содержании 0, 0,5 и 2,0 % (ат.) углерода, однако наблюдается резкое снижение пластичности. Анализ факторов, способствующих упрочнению сплавов, показал, что традиционный подход, основанный на движении дислокаций, приводит к значительно завышенным значениям предела текучести по сравнению с экспериментально полученными. Было высказано предположение, что расхождение между теоретической оценкой и экспериментальными результатами связано с возникновением зернограничного скольжения.

Методом аддитивной технологии осаждения лазерного расплава были получены композиты ВЭС CoCrFeMnNi [26], содержащие 2,5 % TiC и 5 % WC (по массе). В образцах выявлена непористая, компактная двухфазная микроструктура матрицы ГЦК и выделений. В образцах с добавлением TiC наблюдаются сферические преципитаты карбида титана TiC размером от 200 нм до более 1 мкм. В образцах с добавлением WC наблюдаются выделения  $Me_{23}C_6$  кубической формы размером 50 – 100 нм. Прочность на растяжение ВЭС значительно улучшена за счет добавок в виде частиц в соответствии с комбинированным эффектом измельчения зерна и усиления роли преципитатов. Выявлено повышение предела прочности при растяжении с 550 до 610 МПа при снижении пластичности с 52 до 47 % при добавлении 2,5 % TiC (по массе). Механические характеристики образцов с добавкой 5 % WC (по массе): предел прочности при растяжении 776 МПа, относительное удлинение 37 %. Работа [26] демонстрирует возможности наноразмерных выделений TiC в управлении механическими свойствами ВЭС.

В работе [27] методами механического легирования и последующего искрового плазменного спекания при 800 °С под давлением 50 МПа был синтезирован эквиаомный ВЭС. В процессе механического легирования образуется твердый раствор с измельченной микроструктурой 10 нм, состоящий из ГЦК и ОЦК фаз. После консолидации в объеме ВЭС обнаружена только одна фаза ГЦК с высокой (1987 МПа) прочностью на сжатие. Обнаружен интересный магнитный переход при искровом плазменном спекании, который связан с укрупнением структуры и фазовым превращением.

Наноструктурно-фазовое состояние достигалось и в ВЭС сплаве, изготовленном путем газового распыления и последующего горячего прессования порошков при 1100 °С в течение 2 ч [28]. Спеченный эквиаомный ВЭС представляет собой однородный однофазный твердый раствор ГЦК структуры и равноосные зерна со средним размером примерно 16 мкм. Исследование методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показали, что в спеченных объемах формируются метастабильные структуры размером от 55 до 160 нм, которые были унаследованы от газораспыленных порошков CoCrFeMnNi с наноразмерными

кристаллитами, образующимися в процессе быстрого затвердевания. Предел текучести при комнатной температуре и предел прочности при растяжении спеченного ВЭС достигли 358 и 778 МПа соответственно, при этом сплав сохранил превосходную (примерно 28 %) пластичность. Исследования субструктур при определенных уровнях деформации с помощью EBSD показали, что спеченный ВЭС CoCrFeMnNi сохраняет однофазную ГЦК структуру, а основным механизмом деформации является скольжение дислокаций. Механизм упрочнения объясняется сочетанием эффектов измельчения зерна и наличия наноразмерных метастабильных структур.

### Влияние температуры и микроструктуры

Механические свойства ВЭС зависят от температуры испытаний и микроструктурного состояния. В работе [29] эквиаомный высокоэнтропийный сплав был получен методами дуговой плавки, литья под давлением и прокатки, после чего он был перекристаллизован с получением однофазной ГЦК структуры с тремя различными размерами зерна: 4,4, 50 и 155 мкм. Зависимости его свойств при растяжении от температуры и размера зерен были исследованы в интервале температур 77 – 1073 К.

Вплоть до температур испытаний 873 К предел текучести увеличивался с уменьшением размера зерна, при этом наибольшее увеличение происходило при уменьшении размера зерна от 155 до 4,4 мкм. Предел прочности при растяжении также увеличивался с уменьшением размера зерна, хотя и в меньшей степени, чем предел текучести. Удлинение до разрыва сопоставимо для образцов с размерами зерен 50 и 155 мкм и ниже для более мелкозернистого материала. Для образцов с зернами всех трех размеров (4,4, 50 и 155 мкм) сплав показывает сильное увеличение предела текучести и предела прочности при растяжении при снижении температуры. Относительное удлинение до разрыва также монотонно увеличивалось с понижением температуры, для образцов с размерами зерен 50 и 155 мкм, но с промежуточным температурным минимумом около 673 К для мелкозернистого материала.

В интервале температур 77 – 873 К начальная пластичность вплоть до деформации растяжения около 2 % реализуется исключительно за счет плоскостного скольжения дислокаций  $1/2\langle 110 \rangle$  по плоскостям  $\{111\}$ . При понижении температуры испытаний от комнатной до 77 К наноразмерное двойникование наблюдалось как дополнительная мода деформации, что, вероятно, способствует наблюдаемому увеличению пластичности при низких температурах. Увеличение предела текучести при понижении температуры, наблюдаемое в этом высокоэнтропийном ГЦК сплаве, обычно не наблюдается в чистых ГЦК металлах. Однако известно, что в бинарных ГЦК твердых растворах она проявляется

в разной степени в зависимости от концентрации растворенного вещества. До настоящего времени ПЭМ не дала объяснения этой температурной зависимости предела текучести. Дело в том, что в термически активированных микроструктурных процессах, определяющих текучесть эквиатомных высокоэнтропийных сплавов, термины «растворенное вещество» и «растворитель» теряют свое обычное значение [29].

### **Интенсивная пластическая деформация и ударное нагружение**

Эквиатомный высокоэнтропийный сплав CoCrFeMnNi, полученный методами дуговой плавки и капельного литья, был подвергнут интенсивной пластической деформации (ИПД) кручением под высоким давлением [30]. Этот процесс вызвал существенное измельчение зерна в крупнозернистой отливке до 50 нм. В результате прочность значительно увеличилась до 1950 МПа, а твердость – примерно до 520 HV. После ИПД сплав остается однофазным твердым раствором вплоть до атомарного масштаба. Была проведена изохронная (в течение 1 ч) и изотермическая термообработка с последующими испытаниями на микротвердость и растяжение. Изохронные отжиги привели к заметному увеличению твердости до 630 HV при температуре 450 °С. Дальнейшее повышение температуры привело к снижению твердости. Изотермические отжиги, проведенные при температуре 450 °С, выявили дополнительное повышение твердости до 910 HV через 100 ч. Чтобы прояснить эту неожиданную реакцию на отжиг, был проведен комплексный микроструктурный анализ с использованием ПЭМ и трехмерной атомно-зондовой томографии. Выявлено образование новых наночастиц в исходно однофазном ВЭС. После очень коротких отжигов длительностью 5 мин при 450 °С образовались фаза NiMn и фаза, богатая хромом. С увеличением времени отжига их объемная доля увеличивалась, а также образовывалась третья фаза FeCo. По-видимому, избыток границ зерен в нанокристаллическом ВЭС предполагает множество путей быстрой диффузии и центров зародышеобразования для облегчения этого фазового распада. Повышение твердости, особенно при более длительном времени отжига, может быть связано с наноразмерными фазами, включенными в матрицу ВЭС.

Настоящие результаты дают новое ценное представление о фазовой стабильности однофазных высокоэнтропийных сплавов, а также о механизмах, контролирующих механические свойства.

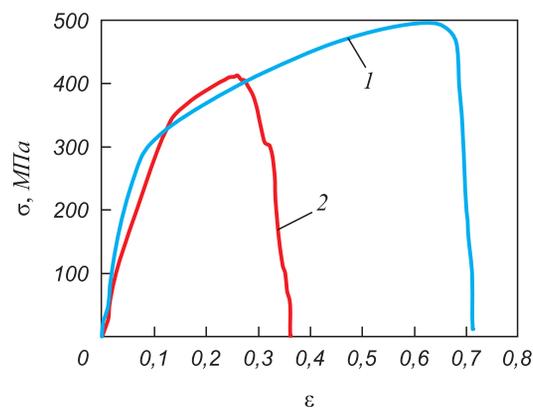
В работе [31] механически легированные порошки высокоэнтропийного сплава были спрессованы путем статического и ударно-волнового уплотнения с последующим спеканием без давления. Показано, что сплав состоит из ГЦК фазы с небольшим количеством оксида ZrO<sub>2</sub> в состоянии после измельчения и спекания. Присутствие оксида ZrO<sub>2</sub> связано с загрязнением при по-

моле, что привело к формированию микроструктуры композита. Статическое уплотнение легированных порошков приводит к увеличению плотности уплотнения (примерно 85 – 88 %) с ростом давления (1 – 3 ГПа), а ударно-волновое уплотнение легированных порошков приводит к высокой (примерно 95 %) относительной плотности с мелкими и изолированными пораками. После спекания в образцах, уплотненных ударной волной, достигнуто практически полное (99,5 %) уплотнение с меньшим размером зерна и лучшими механическими свойствами по сравнению со спеканием образцов, уплотненных в статике. Спеченный образец, уплотненный ударной волной, показал высокий (630 МПа) предел текучести и равномерное распределение деформации.

### **Электронно-пучковая обработка**

По технологии проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM) был получен высокоэнтропийный сплав (ВЭС) CoCrFeMnNi неэквивалентного состава [7]. Сняты и проанализированы кривые деформации при растяжении ВЭС в исходном состоянии и после электронно-пучковой обработки с параметрами: плотность  $E_s$  энергии пучка электронов 10 – 30 Дж/см<sup>2</sup>, длительность 50 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов 0,3 с<sup>-1</sup>.

Механические испытания ВЭС в исходном и облученном состояниях, выполненные путем одноосного растяжения плоских пропорциональных образцов, показали, что в исходном состоянии (до облучения) сплав обладает высокими пластичностью (относительное удлинение превышает 70 %) и прочностью (предел прочности достигает 500 МПа) (рисунок, кривая 1). Облучение сплава импульсным электронным пучком в режиме высокоскоростного плавления и последующей высокоскоростной кристаллизации поверхностного слоя при-



Деформационные кривые, полученные при растяжении ВЭС в исходном состоянии (1) и после облучения импульсным электронным пучком (2) при  $E_s = 30$  Дж/см<sup>2</sup>

Deformation curves for the HEA tension in its initial state (1) and after pulsed electron-beam processing (2) at  $E_s = 30$  J/cm<sup>2</sup>

водит к снижению прочности и пластичности материала (рисунок, кривая 2).

Одновременно с этим облучение ВЭС сопровождается снижением в 1,6 раза микротвердости обработанного слоя (от 3,1 ГПа до облучения до 1,85 ГПа после облучения при  $E_s = 30$  Дж/см<sup>2</sup>). Очевидно, что столь существенные изменения прочностных и пластических свойств сплава обусловлены изменениями его дефектной субструктуры, инициированными термическим воздействием на материал импульсным электронным пучком.

Облучение поверхности ВЭС импульсным электронным пучком с различной плотностью вводимой в материал энергии позволило проследить за эволюцией дефектной субструктуры сплава, формирующейся при высокоскоростном нагреве и охлаждении. Облучение электронным пучком при  $E_s = 10$  Дж/см<sup>2</sup> сопровождается протеканием в поверхностном слое процесса первичной рекристаллизации сплава.

При большей величине плотности энергии пучка электронов (15 – 30 Дж/см<sup>2</sup>) в поверхностном слое ВЭС развивается процесс собирательной рекристаллизации, который сопровождается увеличением размеров зерен. Средний размер зерен возрастает от 35 до 120 мкм при увеличении плотности энергии пучка электронов от 15 до 30 Дж/см<sup>2</sup>.

Анализ структуры поверхности облучения и тонкого поверхностного слоя, осуществленный методами

сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, показал, что высокоскоростное термическое воздействие, инициированное облучением, приводит к формированию в поверхностном слое структуры ячеистой кристаллизации. Средний размер ячеек кристаллизации зависит от плотности энергии пучка электронов и увеличивается от 310 нм при  $E_s = 15$  Дж/см<sup>2</sup> до 800 нм при  $E_s = 30$  Дж/см<sup>2</sup>.

Анализ поверхности разрушения образцов, формирующейся при одноосном растяжении, показал, что толщина поверхностного слоя с ячеистой структурой составляет приблизительно 5 мкм. Ячейки имеют близкую к равноосной форму и формируют столбчатую структуру. Следует отметить, что формирование структуры высокоскоростной кристаллизации приводит к образованию вдоль границы раздела модифицированного слоя и основного объема материала прослойки микропор, в модифицированном слое и прилегающем к нему объеме сплава фиксируются микротрещины. Формирование такой дефектной субструктуры может быть одной из причин снижения прочностных и пластических свойств ВЭС при ЭПО.

Сравнительный анализ механических свойств ВЭС CoCrFeMnNi приведен в таблице.

Выявленные значительные расхождения могут быть обусловлены формой и размером образцов, способом их получения, режимами испытаний.

**Сравнительный анализ механических свойств высокоэнтропийного сплава системы CoCrFeMnNi, полученного различными методами**

**Comparative analysis of the mechanical properties for the CoCrFeMnNi alloys obtained by various processes**

Способ получения	Тип теста	Условный предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительная деформация, %	Микротвердость, HV
Настоящая работа	Сжатие	279	1689	54	153
	Растяжение	279	499	63	
Литье [20]	Сжатие	208	–	75	144
Литье [21]	Растяжение	230	–	62	176
Селективное лазерное плавление [22]	Растяжение	624	747	12,3	–
Осаждение лазерного расплава [26]	Растяжение	245	550	52	–
Дуговое плавление, холодная прокатка + отжиг при 800 °С [29]	Растяжение	350	670	–	–
Дуговое плавление, холодная прокатка + отжиг при 1000 °С [29]	Растяжение	180	580	–	–
Дуговое плавление, холодная прокатка + отжиг при 1150 °С [29]	Растяжение	160	530	–	–
Интенсивная пластическая деформация [30]	Растяжение	1900	1950	–	–
Механическое легирование и плазменное спекание [27]	Растяжение	1760	1950	–	–
Механическое легирование и ударно-волновое спекание (1 ч) [31]	Растяжение	630	800	–	–
Газовое распыление порошков и горячее прессование [28]	Растяжение	358	778	–	–

## Выводы

Созданный в 2004 г. ВЭС Cantor CoCrFeMnNi с ГЦК структурой с хорошим сочетанием прочности и пластичности в широком интервале температур имеет относительно низкий предел текучести при комнатной температуре. Проведен анализ работ по изменению механических свойств ВЭС CoCrFeMnNi экви- и неэквипотомного составов за счет различных методов его получения. Рассмотрено и проанализировано влияние легирования алюминием, ванадием, марганцем, титаном, кремнием, углеродом и медью на деформационное упрочнение и свойства. В широком интервале температур (77 – 1073 К) прослежено влияние размера зерна 4,4 – 155 мкм и микроструктуры на предел прочности и текучести. Отмечено, что введение добавок TiC и WC в количестве 2,5 и 5,0 % (по массе) существенно увеличивает предел прочности, но снижает относительное удлинение до разрушения. Использование ин-

тенсивной пластической деформации увеличивает предел прочности до 1950 МПа и твердости до 520 HV за счет формирования наноразмерной (приблизительно 50 нм) зеренной структуры. Варьирование механических свойств может быть осуществлено последующими изохорными и изотермическими отжигами. Нано-структурно-фазовые состояния, формирующиеся при ударном компактировании, механическом легировании и последующем плазменном спекании, существенно повышают предел прочности с сохранением высокой пластичности (относительное удлинение составляет 28 %). Выполнен анализ деформационных кривых ВЭС неэквипотомного состава, полученных по технологии проволоочно-дугового аддитивного производства после электронно-пучковой обработки, и дана интерпретация снижения прочностных и пластических свойств. Высказаны причины различия механических свойств ВЭС Cantor CoCrFeMnNi, полученных различными методами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

- George E.P., Curtin W.A., Tazan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // *Acta Materialia*. 2020. Vol. 188. P. 435–474. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>
- Shivam V., Basu J., Pandey V.K., Shadangi Y., Mukhopadhyay N.K. Alloying behaviour, thermal stability and phase evolution in quinary AlCoCrFeNi high entropy alloy // *Advanced Powder Technology*. 2018. Vol. 29. No. 9. P. 2221–2230. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.06.006>
- Ganesh U.L., Raghavendra H. Review on the transition from conventional to multi-component-based nano-high-entropy alloys-NHEAs // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 139. P. 207–216. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08360-z>
- Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 122. P. 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
- Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys // *Science China Materials*. 2018. Vol. 61. No. 1. P. 2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
- 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>
- Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. High-entropy alloys of AlCoCrFeNi-system // *Advanced Structured Materials*. 2021. Vol. 107. P. 79–110. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8_6)
- Zhang T., Xin L., Wu F., Zhao R., Xiang J., Chen M., Jiang S., Huang Y., Chen S. Microstructure and mechanical of Fe<sub>x</sub>CoCrNiMn high-entropy alloys // *Journal of Materials Science and Technology*. 2019. Vol. 35. No. 10. P. 2331–2335. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.05.050>
- Gludovatz B.A., Hohenwarter A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. Fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications // *Science*. 2014. Vol. 345. No. 6201. P. 1153–1158. <https://doi.org/10.1126/science.1254581>
- Listyawan T.A., Lee H., Park N., Lee U. Microstructure and mechanical properties of CoCrFeMnNi high entropy alloy with ultrasonic nanocrystal modification process // *Journal of Materials Sci-*
- George E.P., Curtin W.A., Tazan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia*. 2020, vol. 188, pp. 435–474. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>
- Shivam V., Basu J., Pandey V.K., Shadangi Y., Mukhopadhyay N.K. Alloying behaviour, thermal stability and phase evolution in quinary AlCoCrFeNi high entropy alloy. *Advanced Powder Technology*. 2018, vol. 29, no. 9, pp. 2221–2230. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.06.006>
- Ganesh U.L., Raghavendra H. Review on the transition from conventional to multi-component-based nano-high-entropy alloys-NHEAs. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020, vol. 139, pp. 207–216. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08360-z>
- Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017, vol. 122, pp. 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
- Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*. 2018, vol. 61, no. 1, pp. 2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
- 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>
- Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. High-entropy alloys of AlCoCrFeNi-system. *Advanced Structured Materials*, 2021, vol. 107, pp. 79–110. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8_6)
- Zhang T., Xin L., Wu F., Zhao R., Xiang J., Chen M., Jiang S., Huang Y., Chen S. Microstructure and mechanical of Fe<sub>x</sub>CoCrNiMn high-entropy alloys. *Journal of Materials Science and Technology*. 2019, vol. 35, no. 10, pp. 2331–2335. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.05.050>
- Gludovatz B.A., Hohenwarter A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. Fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*. 2014, vol. 345, no. 6201, pp. 1153–1158. <https://doi.org/10.1126/science.1254581>
- Listyawan T.A., Lee H., Park N., Lee U. Microstructure and mechanical properties of CoCrFeMnNi high entropy alloy with ultrasonic nanocrystal modification process. *Journal of Materials Sci-*

- ence and Technology. 2020. Vol. 57. P. 123–130.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.02.083>
11. Meng F., Baker I. Nitriding of a high entropy FeNiMnAlCr alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 645. P. 376–381.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.05.021>
  12. Lindner T., Löbel M., Sattler B., Lampke T. Surface hardening of FCC phase high-entropy alloy system by powder-pack boriding // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 371. P. 389–394.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.017>
  13. Proskiryovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E., Ivanov Yu.F., Markov A.B. Physical foundations for surface treatment of materials with low energy, high current electron beams // *Surface and Coatings Technology*. 2000. Vol. 125. No. 1-3. P. 49–56.  
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00604-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00604-0)
  14. Valkov S., Ormanova M., Petrov P. Electron-beam surface treatment of metals and alloys: Techniques and trends // *Metals*. 2020. Vol. 10. No. 9. Article 10091219. <https://doi.org/10.3390/met10091219>
  15. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V., Panchenko I. Fatigue-induced evolution of AISI 310S steel microstructure after electron beam treatment // *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 20. Article 4567.  
<https://doi.org/10.3390/ma13204567>
  16. Zhang C., Lv P., Xia H., Yang Z., Konovalov S., Chen X., Guan Q. The microstructure and properties of nanostructured Cr-Al alloying layer fabricated high-current pulsed electron beam // *Vacuum*. 2019. Vol. 167. P. 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.06.022>
  17. Konovalov S.V., Komissarova I.A., Kosinov D.A., Ivanov Yu.F., Ivanova O.V., Gromov V.E. Structure of titanium alloy, modified by electron beams and destroyed during fatigue // *Letters on Materials*. 2017. Vol. 7. No. 3. P. 266–271.  
<https://doi.org/10.22226/2410-3535-2017-3-266-271>
  18. Lyu P., Peng T., Miao Y., Liu Z., Gao Q., Zhang C., Jin Y., Guan Q., Cai J. Microstructure and properties of CoCrFeNiMo<sub>0.2</sub> high-entropy alloy enhanced by high-current pulsed electron beam // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 410. Article 126911.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126911>
  19. Osintsev K., Gromov V., Ivanov Y., Konovalov S., Panchenko I., Vorobyev S. Evolution of structure in AlCoCrFeNi high-entropy alloy irradiated by a pulsed electron beam // *Metals*. 2021. Vol. 11. No. 8. Article 1228. <https://doi.org/10.3390/met11081228>
  20. He J.Y., Liu W.H., Wang H., Wu Y., Liu X.J., Nieh T.G., Lu Z.P. Effects of Al addition on structural evolution and tensile properties of the FeCoNiCrMn high-entropy alloy system // *Acta Materialia*. 2014. Vol. 62. P. 105–113.  
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.09.037>
  21. Stepanov N.D., Shaysultanov D.G., Salishchev G.A., Tikhonovskiy M.A., Oleynik E.E., Tortika A.S., Senkov O.N. Effect of V content on microstructure and mechanical properties of the CoCrFeMnNiV<sub>x</sub> high entropy alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 628. P. 170–185.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.157>
  22. Chen P., Yang C., Li S., Attallah M.M., Yan M. In-situ alloyed, oxide-dispersion-strengthened CoCrFeMnNi high entropy alloy fabricated via laser powder bed fusion // *Materials & Design*. 2020. Vol. 194. Article 108966. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108966>
  23. Yamanaka S., Ikeda K-i., Miura S. The effect of titanium and silicon addition on phase equilibrium and mechanical properties of CoCrFeMnNi-based high entropy alloy // *Journal of Materials Research*. 2021. Vol. 36. No. 10. P. 2056–2070.  
<https://doi.org/10.1557/s43578-021-00251-0>
  24. Xian X., Lin L., Zhong Z., Zhang C., Chen C., Song K., Cheng J., Wu Y. Precipitation and its strengthening of Cu-rich phase in CrMnFeCoNiCu<sub>x</sub> high-entropy alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 713. P. 134–140.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.060>
  25. Lu Y., Mazilkin A., Boll T., Stepanov N., Zhrebztov S., Salishchev G., Ódore É., Ungar T., Lavernia E., Hahn H., Ivanisenko Y. *ence and Technology*. 2020, vol. 57, pp. 123–130.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.02.083>
  11. Meng F., Baker I. Nitriding of a high entropy FeNiMnAlCr alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015, vol. 645, pp. 376–381.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.05.021>
  12. Lindner T., Löbel M., Sattler B., Lampke T. Surface hardening of FCC phase high-entropy alloy system by powder-pack boriding. *Surface and Coatings Technology*. 2019, vol. 371, pp. 389–394.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.017>
  13. Proskiryovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E., Ivanov Yu.F., Markov A.B. Physical foundations for surface treatment of materials with low energy, high current electron beams. *Surface and Coatings Technology*. 2000, vol. 125, no. 1-3, pp. 49–56.  
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00604-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00604-0)
  14. Valkov S., Ormanova M., Petrov P. Electron-beam surface treatment of metals and alloys: Techniques and trends. *Metals*. 2020, vol. 10, no. 9, article 10091219. <https://doi.org/10.3390/met10091219>
  15. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V., Panchenko I. Fatigue-induced evolution of AISI 310S steel microstructure after electron beam treatment. *Materials*. 2020, vol. 13, no. 20, article 4567.  
<https://doi.org/10.3390/ma13204567>
  16. Zhang C., Lv P., Xia H., Yang Z., Konovalov S., Chen X., Guan Q. The microstructure and properties of nanostructured Cr-Al alloying layer fabricated high-current pulsed electron beam. *Vacuum*. 2019, vol. 167, pp. 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.06.022>
  17. Konovalov S.V., Komissarova I.A., Kosinov D.A., Ivanov Yu.F., Ivanova O.V., Gromov V.E. Structure of titanium alloy, modified by electron beams and destroyed during fatigue. *Letters on Materials*. 2017, vol. 7, no. 3, pp. 266–271.  
<https://doi.org/10.22226/2410-3535-2017-3-266-271>
  18. Lyu P., Peng T., Miao Y., Liu Z., Gao Q., Zhang C., Jin Y., Guan Q., Cai J. Microstructure and properties of CoCrFeNiMo<sub>0.2</sub> high-entropy alloy enhanced by high-current pulsed electron beam. *Surface and Coatings Technology*. 2021, vol. 410, article 126911.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126911>
  19. Osintsev K., Gromov V., Ivanov Y., Konovalov S., Panchenko I., Vorobyev S. Evolution of structure in AlCoCrFeNi high-entropy alloy irradiated by a pulsed electron beam. *Metals*. 2021, vol. 11, no. 8, article 1228. <https://doi.org/10.3390/met11081228>
  20. He J.Y., Liu W.H., Wang H., Wu Y., Liu X.J., Nieh T.G., Lu Z.P. Effects of Al addition on structural evolution and tensile properties of the FeCoNiCrMn high-entropy alloy system. *Acta Materialia*. 2014, vol. 62, pp. 105–113.  
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.09.037>
  21. Stepanov N.D., Shaysultanov D.G., Salishchev G.A., Tikhonovskiy M.A., Oleynik E.E., Tortika A.S., Senkov O.N. Effect of V content on microstructure and mechanical properties of the CoCrFeMnNiV<sub>x</sub> high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015, vol. 628, pp. 170–185.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.157>
  22. Chen P., Yang C., Li S., Attallah M.M., Yan M. In-situ alloyed, oxide-dispersion-strengthened CoCrFeMnNi high entropy alloy fabricated via laser powder bed fusion. *Materials & Design*. 2020, vol. 194, article 108966. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108966>
  23. Yamanaka S., Ikeda K-i., Miura S. The effect of titanium and silicon addition on phase equilibrium and mechanical properties of CoCrFeMnNi-based high entropy alloy. *Journal of Materials Research*. 2021, vol. 36, no. 10, pp. 2056–2070.  
<https://doi.org/10.1557/s43578-021-00251-0>
  24. Xian X., Lin L., Zhong Z., Zhang C., Chen C., Song K., Cheng J., Wu Y. Precipitation and its strengthening of Cu-rich phase in CrMnFeCoNiCu<sub>x</sub> high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2018, vol. 713, pp. 134–140.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.060>
  25. Lu Y., Mazilkin A., Boll T., Stepanov N., Zhrebztov S., Salishchev G., Ódore É., Ungar T., Lavernia E., Hahn H., Ivanisenko Y.

- Influence of carbon on the mechanical behavior and microstructure evolution of CoCrFeMnNi processed by high pressure torsion // *Materialia*. 2021. Vol. 16. Article 101059. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101059>
26. Zhang X., Li R., Huang L., Amar A., Wu C., Le G., Liu X., Guan D., Yang G., Li J. Influence of in-situ and ex-situ precipitations on microstructure and mechanical properties of additive manufacturing CoCrFeMnNi high-entropy alloys // *Vacuum*. 2021. Vol. 187. Article 110111. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110111>
  27. Ji W., Wang W., Wang H., Zhang J., Wang Y., Zhang F., Fu Z. Alloying behavior and novel properties of CoCrFeNiMn high-entropy alloy fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering // *Intermetallics*. 2015. Vol. 56. P. 24–27. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2014.08.008>
  28. Yang T., Cai B., Shi Y., Wang M., Zhang G. Preparation of nanostructured CoCrFeMnNi high entropy alloy by hot pressing sintering gas atomized powders // *Micron*. 2021. Vol. 147. Article 103082. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2021.103082>
  29. 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>
  30. 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>
  31. Yim D., Kim W., Praveen S., Jang M.J., Bae J.W., Moon J., Kim E., Hong S.-J., Kim H.S. Shock wave compaction and sintering of mechanically alloyed CoCrFeMnNi high-entropy alloy powders // *Materials Science and Engineering: A*. 2017. Vol. 708. P. 291–300. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.09.132>
- Influence of carbon on the mechanical behavior and microstructure evolution of CoCrFeMnNi processed by high pressure torsion. *Materialia*. 2021, vol. 16, article 101059. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101059>
26. Zhang X., Li R., Huang L., Amar A., Wu C., Le G., Liu X., Guan D., Yang G., Li J. Influence of in-situ and ex-situ precipitations on microstructure and mechanical properties of additive manufacturing CoCrFeMnNi high-entropy alloys. *Vacuum*. 2021, vol. 187, article 110111. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110111>
  27. Ji W., Wang W., Wang H., Zhang J., Wang Y., Zhang F., Fu Z. Alloying behavior and novel properties of CoCrFeNiMn high-entropy alloy fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Intermetallics*. 2015, vol. 56, pp. 24–27. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2014.08.008>
  28. Yang T., Cai B., Shi Y., Wang M., Zhang G. Preparation of nanostructured CoCrFeMnNi high entropy alloy by hot pressing sintering gas atomized powders. *Micron*. 2021, vol. 147, pp. article 103082. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2021.103082>
  29. 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>
  30. 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>
  31. Yim D., Kim W., Praveen S., Jang M.J., Bae J.W., Moon J., Kim E., Hong S.-J., Kim H.S. Shock wave compaction and sintering of mechanically alloyed CoCrFeMnNi high-entropy alloy powders. *Materials Science and Engineering: A*. 2017, vol. 708, pp. 291–300. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.09.132>

#### 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, заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева; главный научный сотрудник Управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0003-4809-8660  
**E-mail:** kononov@sibsiu.ru

**Юлия Андреевна Шлярова**, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0001-5677-1427  
**E-mail:** rubannikova96@mail.ru

**Михаил Олегович Ефимов**, инженер Управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** moefimov@mail.ru

**Ирина Алексеевна Панченко**, к.т.н. заведующий лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0002-1631-9644  
**E-mail:** i.r.i.ss@yandex.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. Kononov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Metals Technology and Aviation Materials, Samara National Research University; Chief Researcher of Department of Scientific Researches, Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0003-4809-8660  
**E-mail:** kononov@sibsiu.ru

**Yuliya A. Shlyarova**, 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:** 0000-0001-5677-1427  
**E-mail:** rubannikova96@mail.ru

**Michail O. Efimov**, Engineer of Department of Scientific Research, Siberian State Industrial University  
**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

**ВКЛАД АВТОРОВ**

**CONTRIBUTION OF THE AUTHORS**

**В. Е. Громов** – формирование концепции статьи, анализ различных способов улучшения механических свойств ВЭС Cantor, написание первого варианта статьи.

**С. В. Коновалов** – анализ данных по изменению механических свойств ВЭС за счет различных методов его получения.

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

**М. О. Ефимов** – анализ работ зарубежных исследователей по влиянию температуры и микроструктуры на механические свойства ВЭС.

**И. А. Панченко** – анализ работ зарубежных исследователей по влиянию легирования на свойства ВЭС.

**V. E. Gromov** – formation of the article concept, analysis of various ways to improve the mechanical properties of Cantor HEA, writing the article first version.

**S. V. Kononov** – analysis of the data on change in mechanical properties of HEA due to various methods of its production.

**Yu. A. Shlyarova** – selection of English-language literature on possible ways to improve the mechanical properties of the Cantor HEA in recent years.

**M. O. Efimov** – analysis of the work of foreign researchers on the influence of temperature and structure on HEA mechanical properties.

**I. A. Panchenko** – analysis of the work of foreign researchers on the effect of alloying on HEA properties.

Поступила в редакцию 21.02.2022

После доработки 03.03.2022

Принята к публикации 11.03.2022

Received 21.02.2022

Revised 03.03.2022

Accepted 11.03.2022