



Научная статья
2.6.17 - Материаловедение (технические науки)
УДК 669.7

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.037

EDN: OBHEAJ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ COCRFEXMN(40-X)Ni

Сергей Валерьевич Коновалов ¹,
Владислав Константинович Дробышев ²,
Ирина Алексеевна Панченко ³,
Алина Александровна Семилетова ⁴, Сичжан Чэнь ⁵

^{1, 2, 3, 4} Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

¹ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

² drobyshev_v.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1532-9226>,

³ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4863-0000>,

⁴ semiletovaa723@gmail.com,

⁵ Университет Вэньчжоу, Вэньчжоу, Китай

⁵ chenxizhang@wzu.edu.cn

Аннотация. Представлены результаты дюрометрических и трибологических исследований высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) системы CoCrFeMnNi, полученных вакуумно-индукционной плавкой, в зависимости от изменения содержания Fe и содержания Mn. Оценивается влияние процентного содержания Fe и Mn на твердость, микротвердость, нанотвердость, модуль Юнга и трибологию ВЭС системы CoCrFeMnNi. Исследование механических свойств, проводилось при комнатной температуре. ВЭС Co₂₀Cr₂₀Fe₀₅Mn₃₅Ni₂₀ продемонстрировал самую высокую твердость и микротвердость (118 HB и 184 HV), в то время как ВЭС Co₂₀Cr₂₀Fe₁₅Mn₂₅Ni₂₀ имел самое низкое значение твердости, микротвердости (98 HB и 127 HV). Эта значительная разница может быть отнесена к твердым фазам, состоящим из Mn и Ni. Результаты экспериментов на износостойкость продемонстрировали, что сплав Co₂₀Cr₂₀Fe₁₀Mn₃₀Ni₂₀ имеет наиболее повышенные механические свойства с износостойкостью $\Delta l = 2,09 \cdot 10^{-5}$ з/об. Это представляет собой значительное увеличение в 4 раза по сравнению со сплавом Co₂₀Cr₂₀Fe₀₅Mn₃₅Ni₂₀.

Ключевые слова: трибологические испытания, дюрометрические испытания, микротвердость, нанотвердость, модуль Юнга.

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

Для цитирования: Исследование механических свойств сплавов системы COCRFEXMN(40-X)Ni / С. В. Коновалов [и др.]. // Ползуновский вестник. 2025. № 4, С. 218–223. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.037. EDN: <https://elibrary.ru/OBHEAJ>.

Original article

STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF ALLOYS OF COCRFEFEXMN(40-X)Ni SYSTEM

Sergey V. Konovalov ¹, Vladislav K. Drobyshev ², Irina A. Panchenko ³,
Alina A. Semiletova ⁴, Xizhang Chen ⁵

^{1, 2, 3, 4} Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

¹ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

² drobyshev_v.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1532-9226>,

³ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4863-0000>,

⁴ semiletovaa723@gmail.com,

⁵ Wenzhou University, Wenzhou, China

⁵ chenxizhang@wzu.edu.cn

Abstract. The results of durometric and tribological studies of high-entropy alloys (HEA) of the CoCrFeMnNi system obtained by vacuum induction melting, depending on changes in the Fe and Mn contents, are presented. The influence of the percentage of Fe and Mn on hardness, microhardness, nanohardness, Young's modulus and tribology of the HEAs of the CoCrFeMnNi system is estimated. The study of mechanical properties was carried out at room

© Коновалов С. В., Дробышев В. К., Панченко И. А., Семилетова А. А., 2025

temperature. Co₂₀Cr₂₀Fe₀₅Mn₃₅Ni₂₀ demonstrated the highest hardness and microhardness (118 HB and 184 HV), while Co₂₀Cr₂₀Fe₁₅Mn₂₅Ni₂₀ had the lowest hardness and microhardness (98 HB and 127 HV). This significant difference can be attributed to the solid phases consisting of Mn and Ni. The results of wear resistance experiments have shown that the alloy Co₂₀Cr₂₀Fe₁₀Mn₃₀Ni₂₀ has the highest mechanical properties with wear resistance $\Delta n = 2.09 \cdot 10^{-5}$ g/vol. This represents a significant 4-fold increase compared to Co₂₀Cr₂₀Fe₀₅Mn₃₅Ni₂₀.

Keywords: tribological tests, durometric tests, microhardness, nanohardness, Young's modulus.

Acknowledgments: The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 23-49-00015. <https://rscf.ru/project/23-49-00015/>.

For citation: Konovalov, S. V., Drobyshev, V. K., Panchenko, I. A., Semiletova, A. A. & Chen, X. (2025). Study of mechanical properties of alloys of the COCrFeXMN(40-X)NI system. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 218-223. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.04.037. EDN: <https://elibrary.ru/OBHEAJ>.

ВВЕДЕНИЕ

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) являются перспективными материалами в металлургии благодаря своим уникальным свойствам, включая исключительную прочность, ударную вязкость и устойчивость в экстремальных условиях [1]. Новый класс материалов, названный ВЭС, обладает практически безграничным количеством сплавов. К критическим эффектам данных сплавов относятся высокая термодинамическая энтропия, вялая кинематическая диффузия, высокая структурная диффузия и эффект коктейля, возникающий из-за множественных первичных элементов и их взаимодействий. Известно, что комплексное свойство металлической системы обладает ключевыми механическими свойствами для конструктивных применений. Кроме того, эти характеристики открывают лучший потенциал для разработки новых материалов из сплавов с высокой энтропией. Среди различных сплавов эквиатомный состав Co, Cr, Fe, Mn и Ni (сплав Кантора) с гранецентрированной кубической (ГЦК) фазой становится все более популярным из-за его превосходных механических свойств.

Сплавы на основе CoCrFeMnNi сохраняют прочность при температурах до 77K благодаря эффектам искажения кристаллической решетки и замедленной диффузии [2] и сохраняют структурную целостность при температурах выше 1000°C [3], что делает их пригодными для высокотемпературных компонентов газовых турбин. ВЭС системы CrFeCoNi могут заменить традиционные стали в поршнях и клапанах, снижая износ и повышая КПД двигателей, описано применение ВЭС в подшипниках для электромобилей, где снижение трения увеличивает срок службы. в машиностроении [4].

Поскольку свойства высокоэнтропийных материалов в значительной степени зависят от выбранного метода и параметров их получения, следует более детально рассмотреть особенности технологий, которые в настоящее время используются для изготовления высокоэнтропийных сплавов. Используемые в настоящее время технологии производства высокоэнтропийных сплавов можно условно разделить на синтез порошковых материалов в твердом состоянии, получение из жидкого состояния, осаждение тонких пленок и аддитивного производства.

Высокоэнтропийные порошковые сплавы можно синтезировать в твердом состоянии с использованием различных методов, таких как механическое легирование и искровое плазменное спекание. Механическое легирование можно использовать для получения компактных образцов и покрытий из высокоэнтропийных сплавов с литой дендритной структурой и твердой фазой раствора с ГЦК решеткой [5]. Методы синтеза горения, искрового плазменного спекания и реак-

тивного могут использоваться для синтеза порошков и объемов с фазами B2, ГЦК и ОЦК [6]. Искровое плазменное спекание также можно использовать для синтеза сплавов с высокой энтропией путем смешивания товарных порошков, в результате чего после гомогенизации образуется одна фаза FCC.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) нашли потенциальное применение в качестве покрытий в различных областях. Благодаря своей прочности, термической стабильности и стойкости к окислению, они оказались перспективными в качестве материалов для нанесения связующих покрытий при высоких температурах (>1100 C). Были исследованы в качестве покрытий применяемых для изолирования компонентов, частей газотурбинных двигателей, работающих при повышенной температуре (лопатки турбины, камеры сгорания, системы трубопроводов и сопловой направляющий аппарат) для обеспечения устойчивости компонентов суперсплавов к окислению и горячей коррозии [7]. Пленки, изготовленные с использованием различных технологий, таких как магнетронное распыление и лазерная наплавка, продемонстрировали превосходные свойства, включая высокую твердость, износостойкость и коррозионную стойкость [8]. ВЭС также были исследованы в качестве износостойких и коррозионностойких покрытий инструментов, пресс-форм, штампов и режущих инструментов [9]. Исключительные свойства и микроструктурные особенности ВЭС делают их перспективными кандидатами на создание покрытий нового поколения в отраслях машиностроения [10].

Методы осаждения тонкопленочных покрытий позволяют изготавливать жаропрочные покрытия на основе сплавов с высокой энтропией для нанесения термостойких покрытий [11]. Данные методы генерируют поток материала, который воздействует на подложку, создавая условия для изготовления нанокристаллических аморфных покрытий со сверхвысокой твердостью. В работе, было рассмотрено использование композиций ZrB₂—MoSi₂—SiC в качестве материалов для покрытия для защиты элементов аэрокосмической техники от окисления.

Так среди различных сплавов эквиатомный состав Co, Cr, Fe, Mn и Ni (сплав с высокой энтропией Кантора) с гранецентрированной кубической фазой становится все более популярным благодаря своим превосходным механическим свойствам [12]. Использование эквиатомного сплава CoCrFeMnNi может значительно увеличить срок службы и долговечность оборудования благодаря его исключительной прочности, пластичности и вязкости разрушения [13]. Был разработан ряд близких или неэквивалентных высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), которые оказались прочнее и пластичнее своих предшественников. По сравнению с высокоэнтропийными сплавами широко ис-

пользуемые конструкционные материалы, такие как стали, никелевые и другие сплавы, как известно, оказывают негативное влияние на коррозионные и механические свойства материала. Поэтому традиционные технологии плавки часто оказываются непригодными. Вакуумная индукционная плавка, вакуумно-дуговой переплав и электрошлаковая плавка являются основными технологиями, используемыми для получения высокоэнтропийных сплавов. Среди них процесс вакуумно-индукционной плавки (ВИП) позволяет точно контролировать состав и чистоту сплавов, что имеет решающее значение для уникальных свойств ВЭС. В следующем абзаце будут приведены ключевые преимущества метода ВИП в изготовлении высокоэнтропийных сплавов.

Технология ВИП работает в условиях высокого вакуума, что значительно снижает загрязнение реактивными газами, что необходимо для производства чистых и бездефектных сплавов. Возможность испарения нескольких легирующих элементов и контролируемой их конденсации обеспечивает точный состав, что приводит к желаемым механическим и термическим свойствам материала. Метод вакуумной индукционной плавки облегчает получение более однородных сыпучих материалов по сравнению с традиционными методами дуговой плавки, которые часто требуют нескольких этапов переплавки для достижения однородного распределения элементов. Процесс быстрого затвердевания, свойственный ВИП способствует образованию фаз твердого раствора, в результате чего образуются отдельные микроstructures, повышающие механическую прочность и коррозионную стойкость материала [14]. Технология ВИП может работать с элементами с высокой температурой плавления, что делает пригодным для сложных теплообменников, например, для высокотемпературных применений.

Представленные авторами работы по высокоэнтропийным сплавам акцентируют внимание на изучении влияния одного компонента при пропорциональном изменении содержания остальных компонентов, но для дальнейшего поиска сплавов с новыми свойствами необходимо расширять область исследования до одновременного влияния двух и более компонентов.

В данной работе использован метод вакуумно-индукционного изготовления сплавов системы CoCrFeMn(40-x)Ni ($x = 5, 10, 15, 25, 30$) с целью изучения микроstructures, структурно-фазовых свойств, дюрометрических (нано-, микро-, твердость), трибологических свойств пяти неэквивалентных сплавов и выявления закономерностей изменения механических свойств в зависимости от содержания Fe и Mn.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения исследований структуры и механических свойств было изготовлено 6 литых образцов в вакуумной индукционной печи ВИП-010 в корундовом тигле емкостью 10 кг. Исходными материалами для изготовления образцов являлись порошки чистых металлов (99,99 ат. %): Co, Cr, Fe, Mn, Ni.

Из полученного слитка вырезались образцы на электроэрозионном станке струйного типа ДК7732 М11 для проведения дальнейших исследований. Для получения качественной поверхности микрошлифа для СЭМ и РФА исследований, при шлифовании последовательно переходили от одной шкурки к другой с непрерывно уменьшающимися размерами абразивных частиц и дальнейшей полировкой образца с использованием специального сукна и пасты. Для выявления

микроstructures образцов системы CoCrFeMnNi проводилось травление в реактиве, состоящем из HNO_3 и HCl в соотношении 1:3, время травления составило 30 с. Испытания на растяжение проводили на плоских пропорциональных образцах в виде двухсторонних лопаток с размером, в соответствии с ГОСТ 1497-84.

Деформацию осуществляли путем одноосного растяжения 5 образцов на установке UBRAMAX PM BC-50-A-1-02-II при скорости испытаний 2 мм/мин. Структуру и элементный состав образцов изучали методами сканирующей электронной микроскопии (прибор «KYKY EM-6900», оснащенный энергодисперсионным анализатором Oxford Xplore) с ускоряющим напряжением 30 кВ, током накала 2,16 А и током эмиссии $150 \cdot 10^{-6}$ А. Элементный состав осуществлялся методом микрорентгеноспектрального анализа с использованием энергодисперсионной спектрометрии. Для рентгеноструктурного анализа использовался рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-6000; съемка происходила в медном отфильтрованном излучении $\text{Cu-K}\alpha 1$. Для анализа фазового состава использовали базы данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4.

Были вырезаны образцы размером $20 \cdot 30 \cdot 30$ мм для проведения исследований по износостойкости. При испытании на износостойкость использовали метод потери массы образца, который основывается на изменении веса образца при испытании диск – колодка. Параметры проведения испытания составили: нагрузка 100 Н, частота 20 об/мин., нагружение образцов производилось с помощью пружинного механизма, частота вращения измерялась с помощью тахогенератора на валу двигателя, а число оборотов с помощью бесконтактного датчика. В ходе испытания, образец взаимодействовал с колодкой.

Для дюрометрического анализа (твердометрия) поверхности полученного образца использовали твердомер ТК-2М по методу Роквеллу.

Измерение микротвердости исследуемых образцов проводилось с использованием микротвердомера HVS-1000 по Микро-Виккерсу ГОСТ 9450-76 путём вдавливания алмазной пирамидки. Испытательная нагрузка – 1 кг, длительность нагрузки 10 сек.

Нанотвердость и модуль упругости были определены методом наноиндентирования при комнатной температуре на приборе НаноСкан-4D в соответствии с ГОСТ Р 8.748-2011 (ISO 14577-1:2015). В качестве индентора использовалась алмазная трехгранная пирамида Берковича с углом при вершине 140° и радиусом закругления острия ~50 нм. Пиковая нагрузка составляла 200 мН. Время нагружения, разгружения и поддержания максимальной нагрузки было 10 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе проведенного рентгенофазового анализа образцов ВЭС, можно отметить, что все образцы сплавов с высокой энтропией демонстрируют одну графитированную кубическую (ГЦК) фазу, что подтверждается отчетливыми дифракционными пиками для кристаллографических плоскостей (111), (200) и (220). Дифракционная картина показывает только пики ГЦК фазы, что указывает на то, что ГЦК фаза остается стабильной в процессе плавления. С уменьшением содержания Mn с 35 до 10 ат. % и одновременным увеличением Fe с 5 до 30 ат. %, наблюдается линейное увеличение параметра кристаллической решетки от $3,50 \text{ \AA}$ до $3,62 \text{ \AA}$. Было отмечено, что среднее значение кристаллической решетки пяти высоко-

энтропийных сплавов составляет 3,59 Å.

Для изучения изменения микроструктуры и фазового состава в зависимости от изменения содержания Mn и Fe было выбрано 2 образца Co₂₀Cr₂₀Fe₃₀Mn₁₀Ni₂₀ и Co₂₀Cr₂₀Fe₁₀Mn₃₀Ni₂₀. Высокоэнтропийный сплав Co₂₀Cr₂₀Fe₃₀Mn₁₀Ni₂₀ состоит из твердого раствора с дендритной структурой, где дендритные ветви классифицируются как дендриты первого, второго и третьего порядка. В сплаве присутствуют области, где происходит вторичное осаждение, с более высокой концентрацией тугоплавких элементов. Стоит отметить, что эти сферические наномасштабные выделения неравномерно распределены по всей матрице. Существуют определенные взаимосвязанные области с более высокой концентрацией данных осадений. При анализе электронно-микроскопических изображений отмечено, что в матрице присутствует небольшое количество пор, и образуется немного выделений, которые в основном распределены по границам зерен. Однако в некоторых областях образовалась непрерывная однофазная структура без вторичных выделений. Вторичные выделения, образовавшиеся в сплаве, в основном состояли из марганца, никеля и кобальта. Тогда как матрица обогащена повышенным содержанием хрома и железа. Из литературных источников в эквивалентном сплаве Кантора (Co₂₀Cr₂₀Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀) выявленные дендриты обогащены Cr, Fe и Co, а междендритные области обогащены Ni и Mn. Литература предполагает, что дендритная структура присуща многим высокоэнтропийным сплавам.

При изучении микроструктуры и фазовых свойств высокоэнтропийного сплава Co₂₀Cr₂₀Fe₁₀Mn₃₀Ni₂₀ с использованием оптической и сканирующей электронной микроскопии, было обнаружено большее количество дендритных фаз. Присутствие междендритной фазы становилось более выраженным с увеличением процентного содержания Mn. Это связано с вытеснением атомов из пересыщенной дендритной решетки твердого раствора, что высвобождает энергию искажения и обеспечивает равномерную диффузию в междендритном пространстве. В результате интерметаллидные фазы увеличивались за счет потребления фаз твердого раствора. В высокоэнтропийном сплаве Co₂₀Cr₂₀Fe₁₀Mn₃₀Ni₂₀ наблюдалось незначительное количество пористости и обнаруженные вторичные выделения вдоль границ зерен сплава имели неравномерную форму. Микрорентгеноспектральный анализ этих выделений в характеристическом рентгеновском излучении методом энергодисперсионной спектроскопии продемонстрировал, что они в основном состоят из Mn, Co и Ni. Оставшаяся сплошная фаза сплава преимущественно состоит из Fe и Cr.

Для оценки распределения элементов высокоэнтропийных сплавов полученных, методом вакуумной индукционной плавки (ВИП) в различных образцах был проведен микроанализ элементного состава. Результаты указали на образование оксидов и карбидов Cr. Неравномерное распределение Cr относительно часто встречается в сплавах, полученных методом литья. При литье Cr способствует формированию богатых хромом карбидов, приводящих к сегрегации состава и стабильности данных карбидов, зависит от содержания углерода. Остальные элементы, Co и Fe, распределены квазиоднородно и могут образовывать карбиды. Результаты элементного картирования Mn и Ni продемонстрировали их неоднородное

распределение в темно-серых областях сплава, содержащих повышенное содержание Mn.

В таблице 1 продемонстрированы усредненные значения микротвердости и твердости для различных неэквивалентных составов высокоэнтропийных сплавов. Было обнаружено, что твердые фазы, состоящие из Mn и Ni, в первую очередь ответственны за высокую твердость, что приводит к резкому увеличению значений твердости по всей толщине образца. Высокоэнтропийный сплав Co₂₀Cr₂₀Fe₀₅Mn₃₅Ni₂₀ продемонстрировал самую высокую микротвердость 184 HV и твердость 118 HB. Сплавы Co₂₀Cr₂₀Fe₂₅Mn₁₅Ni₂₀ и Co₂₀Cr₂₀Fe₁₅Mn₂₅Ni₂₀ имели самое низкое значение микротвердости и твердости 117 и 127 HV, 103 и 98 HB соответственно. Более высокие значения микротвердости в высокопрочном сплаве Co₂₀Cr₂₀Fe₁₀Mn₃₀Ni₂₀ можно объяснить тем, что в микроструктуре сплава преобладает твердый раствор с ГЦК-решеткой, что приводит к упрочнению материала.

Таблица 1 – Диапазон значений твердости и микротвердости ВЭС

Table 1 – Range of hardness and microhardness values of HEAs

Сплав	Твёрдость, HB	Микротвёрдость, HV
Co ₂₀ Cr ₂₀ Fe ₃₀ Mn ₁₀ Ni ₂₀	110-112	151 ± 3
Co ₂₀ Cr ₂₀ Fe ₂₅ Mn ₁₅ Ni ₂₀	103-109	117 ± 6
Co ₂₀ Cr ₂₀ Fe ₁₅ Mn ₂₅ Ni ₂₀	98-101	127 ± 4
Co ₂₀ Cr ₂₀ Fe ₁₀ Mn ₃₀ Ni ₂₀	109-112	134 ± 6
Co ₂₀ Cr ₂₀ Fe ₀₅ Mn ₃₅ Ni ₂₀	116-118	184 ± 14

Результаты, приведенные в таблице 2, демонстрируют, что Co₂₀Cr₂₀Fe₁₀Mn₃₀Ni₂₀ имеет повышенную износостойкость (2,09·10⁻⁵), что в 4 раза превосходит параметр износа состава с содержанием Co₂₀Cr₂₀Fe₅Mn₃₅Ni₂₀ (8,81·10⁻⁵). Это может свидетельствовать о том, что состав Co₂₀Cr₂₀Fe₅Mn₃₅Ni₂₀ имел низкую вязкость матрицы, в результате чего испытание на износостойкость осуществлялось по схеме выкрашивания высокопрочных частиц металлических соединений из матрицы. Тем самым в матрице образовывались дополнительные трещины, способствующие дополнительному износу матрицы. Таким образом, в данном случае, определяющим является не твердость, а структурная составляющая матрицы.

Таблица 2 – Результаты износостойкости ВЭС системы CoCrFeMnNi

Table 2 – Wear resistance results of the CoCrFeMnNi system HEAs

Сплав	Разница между до и после, г	Износостойкость Δm, г/оборот
Co ₂₀ Cr ₂₀ Fe ₃₀ Mn ₁₀ Ni ₂₀	0,1852	3,86·10 ⁻⁵
Co ₂₀ Cr ₂₀ Fe ₂₅ Mn ₁₅ Ni ₂₀	0,2057	4,27·10 ⁻⁵
Co ₂₀ Cr ₂₀ Fe ₁₅ Mn ₂₅ Ni ₂₀	0,1561	3,26·10 ⁻⁵
Co ₂₀ Cr ₂₀ Fe ₁₀ Mn ₃₀ Ni ₂₀	0,10004	2,09·10 ⁻⁵
Co ₂₀ Cr ₂₀ Fe ₅ Mn ₃₅ Ni ₂₀	0,4235	8,81·10 ⁻⁵

Значения нанотвердости и модуля Юнга, полученные с помощью инструментального индентирования (таблица 3) не отражают линейной зависимости увеличения содержания железа или марганца на повышение механических свойств. Наибольшие значения нанотвердости наблюдаются в сплавах с содержанием железа 5,15,30 ат. % и марганца 35, 25 и 10 ат.

%, в то время как в сплаве с содержанием Fe 10 ат. % и Mn 25 ат. % наблюдается наибольшее значение модуля Юнга 194.10 ± 2.86 ГПа, свидетельствующем о том, что данный сплав имеет потенциально повышенные механические свойства при растяжении. Тем самым, наиболее высокие значения нанотвердости продемонстрировали сплавы $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{5}\text{Mn}_{35}\text{Ni}_{20}$ и $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_{20}$, что может быть обусловлено как повышением концентрации содержания марганца до 35 ат. %, для сплава $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{5}\text{Mn}_{35}\text{Ni}_{20}$, так и наличием упрочняющих фаз, образовавшихся в процессе затвердевания сплава $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_{20}$.

Таблица 3 – Результаты измерения нанотвердости и модуля Юнга

Table 3 – Results of nanoindentation and Young's modulus measurements

Сплав	Нанотвердость, ГПа	Модуль Юнга, ГПа
$\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{30}\text{Mn}_{10}\text{Ni}_{20}$	1.59 ± 0.32	148.5 ± 7
$\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{25}\text{Mn}_{15}\text{Ni}_{20}$	1.24 ± 0.06	141.01 ± 1.35
$\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{15}\text{Mn}_{25}\text{Ni}_{20}$	1.83 ± 0.115	139.7 ± 12.08
$\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_{20}$	1.34 ± 0.04	94.10 ± 2.86
$\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{5}\text{Mn}_{35}\text{Ni}_{20}$	1.94 ± 0.12	148.09 ± 9.98

Испытания на растяжение были проведены для оценки способности высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) сопротивляться упругой деформации, пластической деформации и разрушению под действием внешних сил. Анализ механических свойств показал, что предел прочности сплавов системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni варьируется в среднем от 420 МПа до 495 МПа, причем наибольший предел текучести (495 МПа) наблюдается для сплава с составом близким к эквивалентному $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{15}\text{Mn}_{25}\text{Ni}_{20}$. Что касается условного предела текучести, то максимальное значение условного предела текучести (243 МПа) наблюдается для сплава $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{15}\text{Mn}_{25}\text{Ni}_{20}$.

Фрактография поверхности излома сплавов системы CoCrFeMnNi после испытаний на растяжение демонстрировала сочетание высокопластичных и менее пластичных фаз. В матрице сплавов наблюдались ямки, характерные для вязкого разрушения, и гладкие участки, свойственные хрупкому разрушению. Когда трещина достигала фазы, содержащей Mn, она, как правило, обходила её из-за энергии распространения, достаточной для возникновения хрупкого склола. Кроме того, трещины объединялись с микротрещинами вблизи межфазных границ, что приводило к расслоению. Так же был отмечен четкий слой расслоения и наличие микропор, пустот в материале. Вязкая структура разрушения на краю образца имела глобулярную морфологию. Кроме того, значительная разница в пластичности между твердыми фазами (содержащими Mn и Ni) и мягкими фазами вызывало концентрацию напряжений на слабых межфазных границах, что приводило к зарождению и росту микропор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании изучены микроструктура и механические свойства высокоэнтропийных сплавов $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{30}\text{Mn}_{10}\text{Ni}_{20}$, $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{25}\text{Mn}_{15}\text{Ni}_{20}$, $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{15}\text{Mn}_{25}\text{Ni}_{20}$, $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_{20}$, $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{5}\text{Mn}_{35}\text{Ni}_{20}$. Во всех ВЭС наблюдалось равномерное распределение выделений как в дендритных, так и в междендритных областях. Матрица сплавов преимущественно состояла из Co, Fe и Cr. Дендритные области первого и второго порядка формировались в основном из Mn и

Ni. Микроструктура сплава $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{30}\text{Mn}_{10}\text{Ni}_{20}$ отличается более плотными и однородными дендритными и междендритными областями по сравнению с другими высокоэнтропийными сплавами.

У высокопрочного сплава $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{05}\text{Mn}_{35}\text{Ni}_{20}$ повышенные значения твердости, микротвердости, нанотвердости обусловлены упрочнением твердым раствором, упрочнением второй фазой за счет интерметаллидов, а также искажением кристаллической решетки, вызванным дислокационными дефектами. Повышенная износостойкость сплава $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_{20}$ обеспечивается вязкой матрицей и упрочняющими фазами, которые поддерживают равномерное истирание материала.

Более высокие значения предела прочности при растяжении (UTS) у сплава $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{15}\text{Mn}_{25}\text{Ni}_{20}$ могут быть связаны с меньшим количеством дефектов и наличием упрочняющих фаз, способствующих пластичности. Однако из-за значительной разницы в пластичности между твердыми фазами (содержащими Mn и Ni) и мягкими фазами возникает концентрация напряжений на слабых межфазных границах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Miracle D. B. High-entropy alloys: a critical review // *Materials Research Letters*. 2017. Vol. 5, No. 1. P. 1–19.
- Xi R., Li Y. Recent advances in the performance and mechanisms of high-entropy alloys under low- and high-temperature conditions // *Coatings*. 2025. Vol. 15, No. 1. P. 92. DOI: 10.3390/coatings15010092.
- Ouyang G., et al. Design of refractory multi-principal-element alloys for high-temperature applications // *npj Computational Materials*. 2023. Vol. 9, No. 1. P. 141.
- Kovalenko E., Krasanov I., Valdaytseva E., Stankevich S., Klimova-Korsmik O., Gushchina M. Microstructure and mechanical properties of high-entropy alloy FeCoNiCr(X) produced by laser directed energy deposition process: effect of compositional changes // *Superalloys*. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 26. DOI: 10.3390/met15010026.
- Razumov N., Makhmutov T., Popovich A. Synthesis and properties of high-entropy CoCrFeNiMnWx alloys // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 24, Pp. 9216–9224.
- K., V., Kuskov A.A., Nepapushev S.A., Aydinyan D.G., Shaysultanov N., Stepanov Kh.T., Nazaretyan S., Kharatyan E., Zakharova E.D., Moskovskikh D.S., Belov D. M., Combustion synthesis and reactive spark plasma sintering of non-equiatomic CoAl-based high entropy intermetallics // *Materials*, 2023, Vol. 16, No. 4, Pp. 1490–1490.
- Ren Z.-L., Zhu S., Wang X., Zhao Y., Han G., Zhou K., Wang W., Tian G. Preparation and microstructure of multi-component high entropy alloy powders fabricated by gas atomization method // *Superalloys*, 2023, Vol. 13, No. 2, Pp. 432–432.
- Brancati E. A novel and sustainable method to develop non-equiatomic CoCrFeNiMox high entropy alloys via spark plasma sintering using commercial commodity powders and evaluation of its mechanical behaviour // *Materials Science and Engineering A: Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2023, Vol. 878, Pp. 145207–145207.
- A novel and sustainable method to develop non-equiatomic CoCrFeNiMox high entropy alloys via spark plasma sintering using commercial commodity powders and evaluation of its mechanical behaviour // *null* (2023). DOI:10.48550/arxiv.2305.17407.
- H., Shahbazi H., Vakili H.B., Nair Rakesh C., Liberati A., Colonel Moreau R., Santana Lima R. High Entropy Alloy (HEA) bond coats for thermal barrier coatings (TBCs)—a review // *Thermal Spray* (2023). DOI:10.31399/asm.cp.itsc2023p0659.
- Cui K., Tong Zhang High-entropy alloy films // *Coatings* (2023). Vol. 13, No. 3, Pp. 635–635.
- Bhaskaran R., Nair R., Supekar Raunak Morteza Javid Wan Dong Wang Yu Zou Andre McDonald Javad Mostaghimi Pantcho Stoyanov High-entropy alloy coatings deposited by thermal spraying: a review of strengthening mechanisms, performance

assessments and perspectives on future applications // *Superalloys* (2023). Vol.13, No.3, Pp.579–579.

13. Girzhon V.V.Yemelianchenko V.V.Smolyakov O.I.High entropy coating from AlCo-CrCuFeNi alloy obtained by laser alloying // *Acta Metallurgica Slovaca* (2023). Vol .29 , No .1 , Pp .44–49.

14. Applications of high-entropy materials (2023). Pp .225–244.DOI:10 .1002/9783527837205.ch8.

15.Wan T.Huang Z.Cheng Z.Zhu M.Zhu W.et al.The effect of chromium content on the corrosion behavior of ultrafine-grained CrxMnFeCoNi high-entropy alloys in sulfuric acid solution // *Microstructures* (2023). Vol.(3), Article number: 2023014.

16. Liu Y.Liu W.Zhou Q.-Y.Liu C.Fan T.-W.et al.An initio study of thermodynamic and fracture properties of CrFe-CoNiMnx ($0 \leq x \leq 3$) high-entropy alloys // *Journal of Materials Research and Technology* (2022). Vol.(17), Pp .498–506.

Информация об авторах

С. В. Коновалов – доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Сибирского государственного индустриального университета.

В. К. Дробышев – научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 июня 2025; одобрена после рецензирования 24 ноября 2025; принята к публикации 28 ноября 2025.

The article was received by the editorial board on 07 June 2025; approved after editing on 24 Nov 2025; accepted for publication on 28 Nov 2025.

И. А. Панченко – кандидат технических наук, заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета.

А. А. Семилетова – лаборант управление научными исследованиями Сибирского государственного индустриального университета

Сичжан Чэнь - профессор Университета Вэньжоу.

Information about the authors

S. V. Konovalov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation at Siberian State Industrial University.

V. K. Drobyshev – Researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing at Siberian State Industrial University.

I. A. Panchenko – Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing at Siberian State Industrial University.

A. A. Semiletova – Laboratory Assistant in the Research Management Department, student of group K-MEP-23 at Siberian State Industrial University.

Xizhang Chen – Professor at Wenzhou University.