

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 669
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-138-145



ЭВОЛЮЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СРЕДНЕЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ CoCrNbMnNi

Коновалов С.В.¹, Дробышев В.К.¹, Панченко И.А.¹, Воробьев С.В.¹, Yu J.²

¹Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

²Weihai Liyu Industrial Co., Ltd, China

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Разработка новых конструкционных материалов с оптимальным балансом прочности и пластичности является ключевой задачей современного материаловедения. Среднеэнтروпийные сплавы системы Co-Cr-Ni представляют значительный интерес, однако их свойства могут быть повышены за счет микролегирования элементами, вызывающими значительные атомные искажения кристаллической решетки, такими как ниобий и марганец. Понимание влияния таких добавок на структуру и механическое поведение является актуальной научной задачей. **Цель работы.** Изучение возможностей управления механическими свойствами среднеэнтропийных сплавов системы Co-Cr-Ni путем контролируемого легирования малыми добавками ниобия и марганца (2–6 ат.%). **Используемые методы.** Четыре сплава системы Nb-Mn-Ni-Co-Cr были получены методом вакуумного литья с последующим переплавом для гомогенизации. Механические характеристики исследовались методами одноосного растяжения при комнатной температуре, микро- и наноиндентирования (согласно ISO 14577) для определения твердости и модуля упругости. Фрактографический анализ поверхностей излома проводился с использованием сканирующей электронной микроскопии. **Новизна.** Впервые систематически изучено влияние комбинированного легирования ниобием и марганцем на комплекс механических свойств среднеэнтропийных сплавов на основе Co-Cr-Ni. Установлены корреляции между элементным составом, твердостью, пределом прочности и характером разрушения. **Результат.** Установлено, что добавка ниобия приводит к твердорастворному упрочнению за счет атомных искажений решетки. Наибольшие значения микротвердости (140,7 HV), нанотвердости (2,29 ГПа) и модуля Юнга (156 ГПа) зафиксированы для состава Nb₂Mn₂Ni₃₀Co₄₀Cr₂₀. Максимальный предел прочности (641 МПа) при относительно низкой твердости продемонстрировал сплав Nb₂Mn₂Ni₃₀Co₄₀Cr₂₀, что указывает на достижение благоприятного сочетания прочности и пластичности. Фрактографический анализ подтвердил преимущественно вязкий характер разрушения. **Практическая значимость.** Полученные результаты демонстрируют, что контролируемое легирование ниобием и марганцем является эффективным инструментом для управления балансом прочность-пластичность в среднеэнтропийных сплавах, что открывает перспективы для создания новых конструкционных материалов с заданными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: среднеэнтропийный сплав системы Co-Cr-Ni-Mn-Nb, микроструктура, нанотвердость, одноосное растяжение

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

© Коновалов С.В., Дробышев В.К., Панченко И.А., Воробьев С.В., Yu J., 2026

Для цитирования

Эволюция механических свойств среднеэнтропийных сплавов системы CoCrNbMnNi / Коновалов С.В., Дробышев В.К., Панченко И.А., Воробьев С.В., Yu J. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 138-145. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-138-145>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

EVOLUTION OF MECHANICAL PROPERTIES OF MEDIUM-ENTROPY ALLOYS OF THE COCRNBMNNI SYSTEM

Konovalov S.V.¹, Drobyshev V.K.¹, Panchenko I.A.¹, Vorobyov S.V.¹, Yu J.²

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

²Weihai Liyu Industrial Co., Ltd, China

Abstract. Problem Statement (Relevance). The development of new structural materials with an optimal balance of strength and ductility is one of the key challenges of modern materials science. Medium-entropy alloys of the Co-Cr-Ni system are of considerable interest; however, their properties can be further enhanced through microalloying with elements causing significant atomic lattice distortions, such as niobium and manganese. Understanding the influence of such additives on the structure and mechanical behavior is an important scientific task. **Objectives.** The research is aimed at investigating the possibility of controlling the mechanical properties of medium-entropy alloys of the Co-Cr-Ni system through controlled alloying with small additions of niobium and manganese (2–6 at.%). **Methods Applied.** Four alloys of the Nb-Mn-Ni-Co-Cr system have been obtained by vacuum casting followed by remelting for homogenization. Mechanical properties have been studied using uniaxial tensile testing at room temperature, as well as micro- and nanoindentation techniques (according to ISO 14577) to determine hardness and elastic modulus. Fractographic analysis of fracture surfaces has been carried out using scanning electron microscopy. **Originality.** For the first time, the effect of combined alloying with niobium and manganese on the complex mechanical properties of Co-Cr-Ni-based medium-entropy alloys has been systematically studied. Correlations between elemental composition, hardness, tensile strength, and fracture behavior have been established. **Result.** It has been found that the addition of niobium leads to solid-solution strengthening due to atomic lattice distortions. The highest values of microhardness (140.7 HV), nanohardness (2.29 GPa), and Young's modulus (156 GPa) have been obtained for the Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀ composition. The maximum ultimate tensile strength (641 MPa) at relatively low hardness has been demonstrated by the Nb₂Mn₂Ni₃₀Co₄₀Cr₂₆ alloy, indicating a favorable combination of strength and ductility. Fractographic analysis has confirmed a predominantly ductile fracture mechanism. **Practical Relevance.** The obtained results demonstrate that controlled alloying with niobium and manganese is an effective approach for tailoring the strength-ductility balance in medium-entropy alloys, opening prospects for the development of new structural materials with targeted performance characteristics.

Keywords: medium-entropy alloy of the Co-Cr-Ni-Mn-Nb system, microstructure, nanohardness, uniaxial tension

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

For citation

Konovalov S.V., Drobyshev V.K., Panchenko I.A., Vorobyov S.V., Yu J. Evolution of Mechanical Properties of Medium-Entropy Alloys of the CoCrNbMnNi System. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 138-145. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-138-145>

Введение

В последние годы среднеэнтروпийные сплавы (СЭС) на основе системы Co-Cr-Ni привлекают значительное внимание благодаря их уникальному сочетанию высокой прочности, пластичности и устойчивости к коррозии, что делает их перспективными материалами для различных инженерных применений [1-3]. Одним из ключевых направлений исследований является модификация структуры и механических свойств этих сплавов путем введения легирующих элементов в небольших концентрациях [4-6]. Добавки таких элементов, как ниобий (Nb) и марганец (Mn), даже в малых количествах (до 6 ат.%) способны влиять на фазовый состав, размер зерна, механизмы упрочнения и, как следствие, на прочностно-пластические характеристики Co-Cr-Ni-сплавов. Введение легирующих элементов

может приводить к формированию дисперсных упрочняющих фаз, изменению характера границ зерен, а также к активации различных механизмов упрочнения, включая твердо-растворное, зернограничное и упрочнение за счет выделения вторичных фаз [7-9]. При этом важно отметить, что оптимальный эффект достигается при контролируемом содержании легирующих элементов, поскольку их избыток может привести к хрупкости или снижению пластичности [10-12]. В работе [13] исследуется добавление ниобия (14–18 мас. %) в сплав системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni, где показано, что ниобий способствует формированию твердого раствора на основе ГЦК-решетки, а также карбидов ниобия и марганца, что приводит к увеличению прочности и износостойкости, однако избыток ниобия вызывает неравномерное распределение фаз и снижение свойств. В следующем исследовании [14], посвященном сплавам Co-Cr-Fe-Ni с

различным содержанием Nb (до 0,74 атомных долей), установлено, что небольшие добавки ниобия приводят к образованию упрочняющих фаз (например, Laves-фазы и ϵ -фазы), что значительно повышает твёрдость и предел прочности при растяжении, однако при избытке ниобия наблюдается хрупкость из-за избытка интерметаллидных фаз.

Современные исследования подтверждают, что добавление легирующих элементов в сплавы на основе CoCrNi (или близких к ним систем) даже в небольших количествах может изменить механические свойства за счёт образования вторичных фаз, однако избыток процентного содержания легирующих элементов приводит к ухудшению пластичности и равномерности структуры. Для детального изучения изменения прочности, микротвёрдости, нанотвёрдости и модуля Юнга было выбрано четыре среднеэнтропийных сплава: 1) Nb₂Mn₂Ni₃₀Co₄₀Cr₂₆; 2) Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀; 3) Nb₂Mn₄Ni₃₄Co₄₀Cr₂₀; 4) Nb₂Mn₄Ni₄₀Co₄₀Cr₁₄. А также для изучения влияния малых добавок Nb и Mn на механические свойства сплавов системы Co-Cr-Ni.

Материалы и методы исследования

Начальный этап работы заключался в отборе перспективных композиций для исследования. В результате была идентифицирована 31 перспективная композиция, соответствующая трем из четырех термодинамических критериев для образования однофазной структуры в равновесных условиях. Для детального изучения были выбраны четыре среднеэнтропийных сплава: 1) Nb₂Mn₂Ni₃₀Co₄₀Cr₂₆; 2) Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀; 3) Nb₂Mn₄Ni₃₄Co₄₀Cr₂₀; 4) Nb₂Mn₄Ni₄₀Co₄₀Cr₁₄. Среди них композиция Co₄₀Cr₁₂Nb₂Mn₆Ni₄₀ продемонстрировала наибольший расчетный предел текучести, составляющий 321 МПа при комнатной температуре, что было обусловлено оптимальным содержанием марганца (6 ат. %), атомный объем которого (12,6 Å³) превышает таковой у других элементов системы. Расчеты также свидетельствовали о высокой температурной стабильности данного сплава.

Слитки были изготовлены методом литья в вакуумной печи в форме усеченного конуса (диаметры оснований 50 и 5 мм, высота 15 мм). Синтез элементов проводили в медных водоохлаждаемых тиглях с использованием шихты из чистых металлов (Nb, Mn, Co, Ni, Cr). Для минимизации окисления атмосферу в камере дважды заменяли аргоном. Плавление осуществляли вольфрамовым электродом при параметрах тока 200–500 А и напряжения до 20 В. Протокол синтеза включал два вакуумных цикла: первый состоял из двукратной плавки с переворотом слитка, а второй — из четырехкратной. После начальных плавок для удаления образовавшегося черного нагара выполняли кратковременную продувку воздухом с последующей очисткой камеры и поверхностей слитков спиртом. Для обеспечения гомогенности расплава перед вторым циклом слиток устанавливали вертикально, а первую плавку в данном цикле проводили с полным перетеканием материала в горизонтальное положение. Охлаждение после каждой плавки длилось не менее 1 часа в атмосфере аргона.

Для проведения комплекса испытаний на растяжение, микро-, нанотвёрдости, модуля упругости из полученных слитков методом электроэрозивной резки (станок М7732) были изготовлены образцы. Механические испытания на одноосное растяжение проводили на образцах прямоугольного сечения с рабочей длиной 20 мм, шириной 9,8 мм и толщиной 3,2 мм. Испытания выполняли на универсальной разрывной машине SUBRAMAX PMBC – 50 – А – 1 – 024 в условиях комнатной температуры при постоянной скорости нагружения 0,5 мм/мин до момента разрушения.

Исследования нанотвёрдости и модуля Юнга, а также измерения микротвёрдости проводили на приборе «Наноскан-4D». Для этого готовились полированные шлифы размером 1×1 см. Нанотвёрдость и модуль упругости определяли в соответствии со стандартом ISO 14577 с использованием алмазной трехгранной пирамиды Берковича при нагрузке 100 мН. Для получения среднего значения на каждом образце выполняли 10 индентирований, расстояние между отпечатками (40 мкм) исключало взаимное влияние зон пластической деформации. Измерение микротвёрдости проводили на том же приборе, но с увеличенной нагрузкой на индентор 1 Н (100 г).

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты измерений микротвёрдости и модуля Юнга сплавов Nb₂Mn₂Ni₃₀Co₄₀Cr₂₆, Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀, Nb₂Mn₄Ni₃₄Co₄₀Cr₂₀ и Nb₂Mn₄Ni₄₀Co₄₀Cr₁₄ (рис. 1, а) демонстрируют отчётливую зависимость механических свойств от химического состава. Наибольшие значения микротвёрдости и модуля Юнга наблюдаются для сплавов Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀ и Nb₂Mn₄Ni₃₄Co₄₀Cr₂₀, тогда как для Nb₂Mn₂Ni₃₀Co₄₀Cr₂₆ отмечается их снижение. Все исследованные материалы характеризуются однофазной структурой с гранцентрированной кубической (ГЦК) решёткой, что указывает на отсутствие вторичных фаз и позволяет связать различия свойств с изменением степени твердорастворного упрочнения и локальных искажений кристаллической решётки. Подобные закономерности хорошо согласуются с данными по средне- и высокоэнтропийным сплавам системы Co-Cr-Ni [15-17], где изменение химического состава при сохранении ГЦК-структуры приводит к значительному изменению механических свойств за счёт искажений решётки и вариаций плотности дефектов.

Ниобий, несмотря на низкую концентрацию, оказывает выраженное твердорастворное упрочнение, обусловленное атомной несообразностью и локальными искажениями решётки. Присутствие Nb, создающего сильные искажения в ГЦК-решётке, вероятно, определяет максимум микротвёрдости и модуля Юнга у сплавов Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀ и Nb₂Mn₄Ni₃₄Co₄₀Cr₂₀.

В системах Co-Cr-Ni повышение содержания Mn стабилизирует ГЦК-решётку [18-20], однако при этом усиливает деформационное упрочнение, связанное с дислокационным и двойниковым механизмами. В исследуемых сплавах увеличение доли Mn приводит к росту твёрдости и модуля упругости. Различия между микротвёрдостью и модулем Юнга могут быть

связаны с неоднородностью распределения Nb и Mn. Микротвёрдость отражает сопротивление пластической деформации, тогда как модуль Юнга зависит от характера межатомных связей и упругих искажений решётки. Незначительное снижение модуля может указывать на повышенную плотность дефектов или наличие микропор.

Измерения наномеханических свойств сплавов системы NbMnNiCoCr (рис. 1, б) показали, что изменение содержания Mn, Ni и Cr оказывает влияние на нанотвёрдость и модуль Юнга. Как видно из графика, нанотвёрдость сплавов изменяется в диапазоне 2,04–2,29 ГПа, достигая максимума у состава Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀, в то время как модуль Юнга варьируется от 61 до 156 ГПа. Сравнение с результатами микротвёрдости (HV) показывает схожие тенденции. Значения микротвёрдости изменяются от 76,6 до 140,7 HV, и максимум также наблюдается у сплава Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀, что подтверждает влияние твердо-растворного упрочнения как основного механизма повышения прочности в данной системе. Различия между нанотвёрдостью и микротвёрдостью связаны с размером отпечатка: при наноиндентировании измеряется локальное сопротивление деформации вблизи поверхности, тогда как микротвёрдость определяет усреднённый отклик макроскопического объёма, включая влияние границ зёрен и возможных микродефектов.

При сопоставлении с результатами испытаний на растяжение (рис. 2) наблюдается, что тенденции изменения нанотвёрдости и модуля Юнга частично коррелируют с поведением предела прочности. Наибольший предел прочности (641 МПа) зафиксирован у сплава Nb₂Mn₂Ni₃₀Co₄₀Cr₂₆, обладающего сравнительно низкой микротвёрдостью и нанотвёрдостью. Это может быть связано с высокой пластичностью и равномерной деформацией без раннего локализованного разрушения. Напротив, сплав Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀ демонстрирует высокие значения H и HV, но меньший предел прочности 533 МПа, что может указывать на локализацию деформации и ограниченную способность к упрочнению при растяжении. Между наномеханическими свойствами и пределом прочности прослеживается обратная зависимость, отражающая компромисс между твёрдостью и пластичностью материала.

Для углубленного понимания механизмов, обусловивших такой компромисс свойств, был выбран сплав Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀, поскольку его сочетание повышенной микро- и нанотвёрдости со сравнительно низкой прочностью на растяжение предполагает нетривиальный характер разрушения. Анализ поверхности излома сплава Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀ после одноосного растяжения показал, что разрушение носит преимущественно вязкий характер (рис. 3).

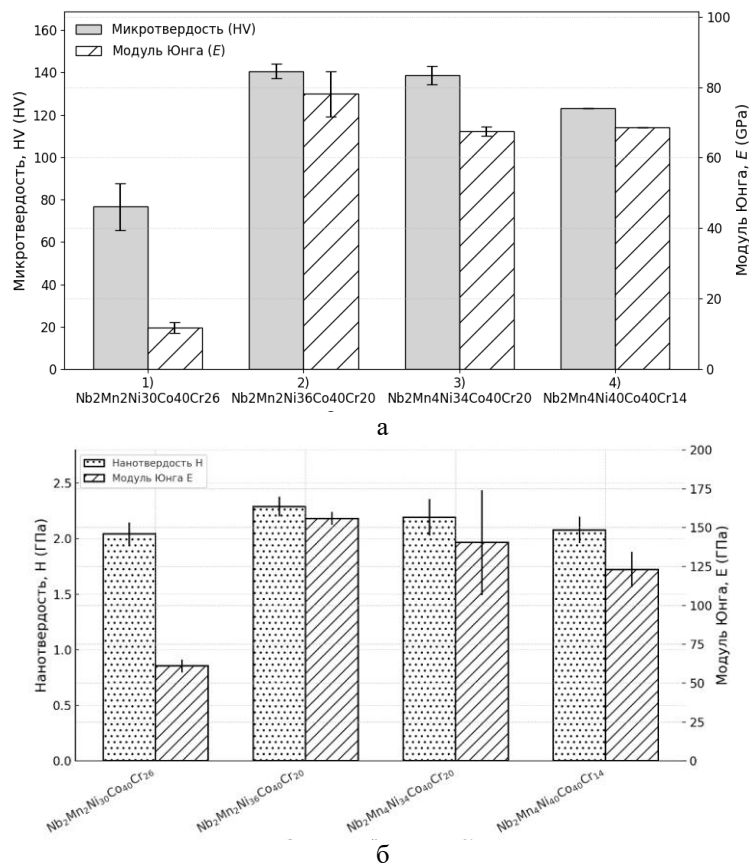


Рис. 1. Механические свойства спреднеэнтروпийных сплавов: а – микротвёрдость и модуль Юнга; б – нанотвёрдость и модуль Юнга

Fig. 1. Mechanical properties of medium-entropy alloys: а is microhardness and Young's modulus б is nanohardness and Young's modulus

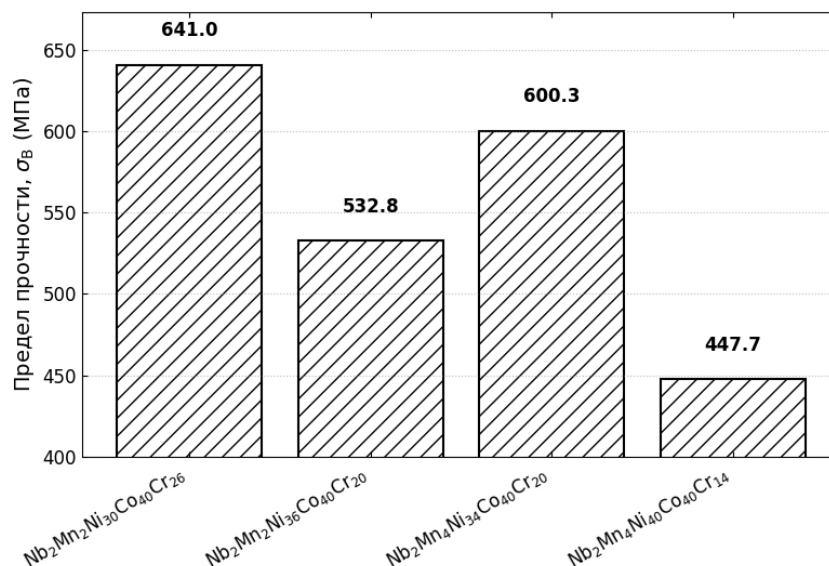


Рис. 2. Результаты растяжения сплавов системы NbMnNiCoCr
 Fig. 2. Tensile test results of NbMnNiCoCr system alloys

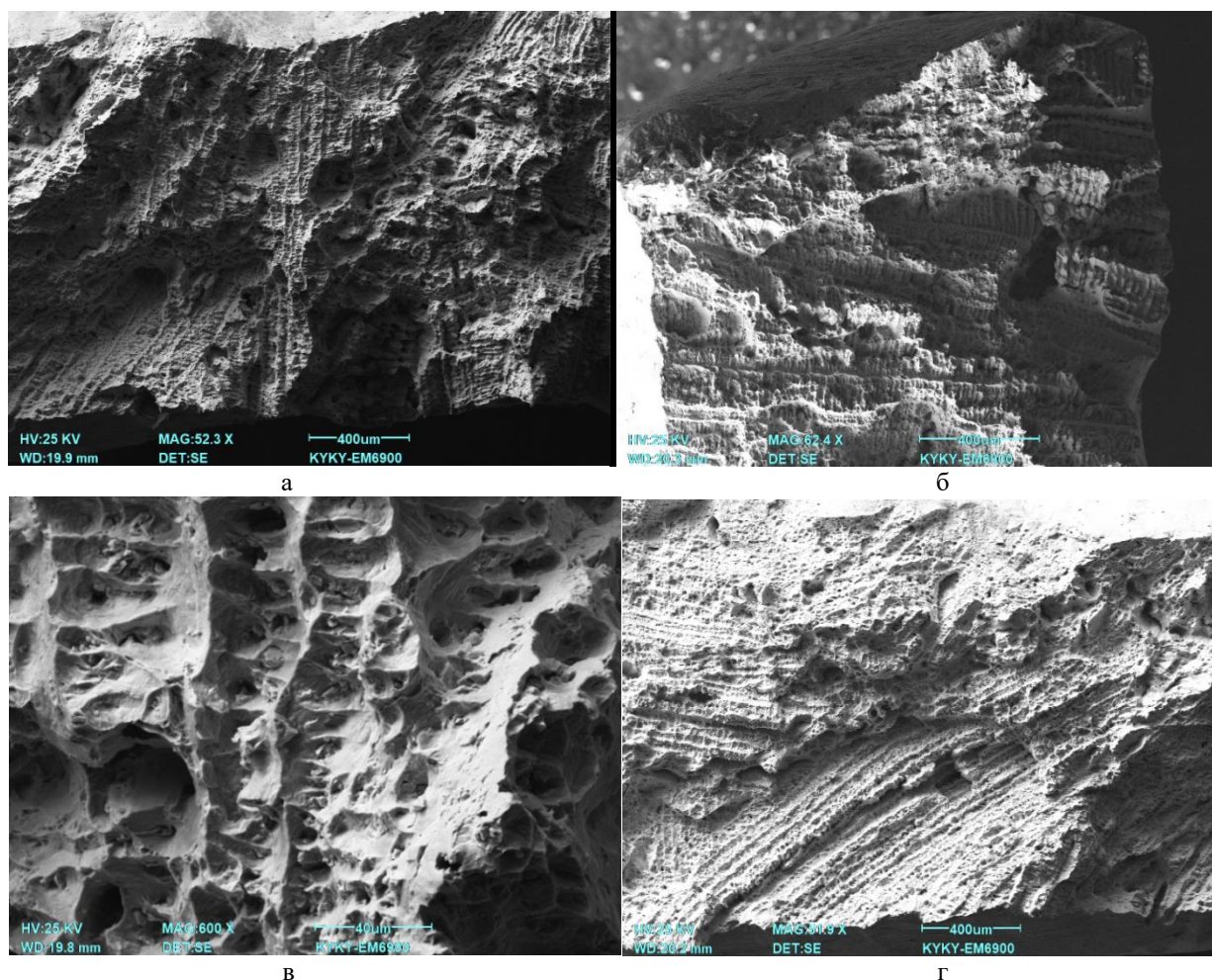


Рис. 3. Растяжение и исследование излома сплава Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀: а-г – поверхность излома, содержащая микропоры и ямки разрушения
 Fig. 3. Tensile testing and fracture study of the Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀ alloy: а-г are fracture surface containing micropores and dimples

Макроскопический анализ демонстрирует неоднородную, волокнистую поверхность, что является классическим признаком пластичности. Однако наряду с этим присутствуют признаки квазихрупкого/сдвигового разрушения в виде выраженных параллельных гребнеобразных узоров, исходящих от концентраторов напряжений. Это свидетельствует о смешанном режиме разрушения, при котором трещина распространялась не только путем слияния микропор, но и через зоны локализованного сдвига. Микроскопический анализ подтверждает доминирование вязкого механизма через наличие классического ямочного рельефа. Большинство ямок имеют вытянутую эллипсоидную форму, ориентированную по направлению максимальных касательных напряжений, что указывает на активное участие сдвиговых деформаций. В то же время более изометричные ямки в центральной части ассоциируются с нормальными отрывными напряжениями. Типичный диаметр ямок составляет 5–10 мкм, а включения, служащие очагами их зарождения, имеют размер менее 2 мкм (см. таблицу). Таким образом, излом характеризуется смешанным вязко-кварзихрупким режимом, инициированным у концентраторов напряжений и распространяющимся путем слияния микропор.

Таблица. Сводная таблица оценочного количества и размера микроструктурных особенностей
Table. Summary table of estimated number and size of microstructural features

Характеристика	Доля от общего количества (N)	Размер, мкм	Визуальная оценка
Ямки/ углубления	78%	5–10	Эллипсоидной формы, ориентированные вдоль направления сдвига
Поры / Микропустоты	19%	10–20	Углубления, являющиеся центрами слияния микропор
Включения	3%	< 2	Небольшие частицы

Заключение

1. Установлено, что в сплавах системы Nb-Mn-Ni-Co-Cr добавление ниобия приводит к выраженному твердорастворному упрочнению за счёт атомных искажений кристаллической решётки. Наибольшие значения микротвёрдости и модуля Юнга зафиксированы для состава Nb₂Mn₂Ni₁₃₆Co₄₀Cr₂₀, что указывает на оптимальное сочетание степени искажения решётки. Снижение данных характеристик при дальнейшем изменении содержания Mn и Cr обусловлено ослаблением твердорастворного эффекта и возможной локальной неоднородностью распределения элементов. В целом легирование Nb и Mn позволяет эффективно регулировать уровень твёрдости.

2. Излом сплавов при одноосном растяжении характеризуется следующими ключевыми чертами. Высокоэнергетический вязкий излом, подтверждаемый обширным ямочным рельефом. Вязкий механизм, а также смешанный вязко-кварзихрупкий/сдвиговый, где макроскопические линейные узоры указывают на направленное развитие трещины, возможно, через зоны локализованного сдвига. Разрушение зарождается в зонах концентраторов напряжений и распространяется путем активного слияния микропор, которые деформируются в направлении сдвига. Размер ямок составил 5–10 мкм, а более крупные поры/микропустоты имели размер 10–20 мкм. Включения, служащие очагами зарождения, имеют размер менее 2 мкм.

Список источников

- Yen, J., & Hsueh, C. (2025). Effects of Ti and Mo Additions on Microstructures and Mechanical Properties of CoCrNi Medium Entropy Alloys. *Materials Science and Engineering: A*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147943>.
- Chen, P., Chen, P., You, J., & Hsueh, C. (2025). Exploring effects of molybdenum and titanium contents on microstructure and mechanical properties of CoCrNi medium entropy alloy films. *Surface and Coatings Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131587>.
- Chang, W., & Hsueh, C. (2023). Strengthening of CoCrNi medium entropy alloy with Ti additions. *Intermetallics*. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2023.108072>.
- Lee, D., Agustianingrum, M., Park, N., & Tsuji, N. (2019). Synergistic effect by Al addition in improving mechanical performance of CoCrNi medium-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.005>.
- Chang, R., Fang, W., Bai, X., Xia, C., Zhang, X., Yu, H., Liu, B., & Yin, F. (2019). Effects of tungsten additions on the microstructure and mechanical properties of CoCrNi medium entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.235>.
- Lin, Y., Lu, Y., & Hsueh, C. (2023). Strengthening of CoCrNi medium entropy alloy with gadolinium additions. *Vacuum*. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111969>.
- Malladi, S., Riabov, D., Guo, S., & Nyborg, L. (2024). Additive Manufacturing of Interstitial Nitrogen-Strengthened CoCrNi Medium Entropy Alloy. *Advanced Engineering Materials*, 26. <https://doi.org/10.1002/adem.202401182>.
- Bi, X., Li, R., Yuan, Z., Cheng, J., Guan, D., & Zhang, P. (2024). Laser-directed energy deposition of a high performance additively manufactured (CoCrNi)₉₄(TiAl)₆ medium-entropy alloy with a novel core-shell structured strengthening phase. *Additive Manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.103971>.
- Chung, S., Lee, T., Jeong, W., Kong, B., & Ryu, H. (2023). Additive Manufacturing of Oxide Dispersion-Strengthened CoCrNi Medium-Entropy Alloy by in situ Oxide Synthesis. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171340>.
- Lin, Y., & Hsueh, C. (2024). Mitigation of strength-ductility trade-off of CoCrNi medium entropy alloys with heterogenous structure by controlled Gd addition and an-

- nealing. *Materials Science and Engineering: A*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146630>.
11. An, N., Sun, Y., Gao, L., Wu, Y., Xue, J., Li, Z., & Hui, X. (2022). Long-term structural stability and excellent mechanical properties of CoCrNi system medium entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165206>.
 12. Guo, L., Lu, Y., & Hsueh, C. (2023). Effects of Erbium Addition on Microstructure and Mechanical Properties of CoCrNi Medium Entropy Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08317-2>.
 13. Kvon, S., Issagulov, A., Kulikov, V., & Arinova, S. (2024). Niobium's Effect on the Properties of a Quasi-High-Entropy Alloy of the CoCrFeMnNi System. *Metals*. <https://doi.org/10.3390/met14050564>.
 14. Sunkari, U., Reddy, S., Athira, K., Chatterjee, S., & Bhattacharjee, P. (2020). Effect of niobium alloying on the microstructure, phase stability and mechanical properties of CoCrFeNi₂.1Nb_x high entropy alloys: Experimentation and thermodynamic modeling. *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 793, 139897. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139897>.
 15. Konovalov S.V., Drobyshev V. K., Panchenko I.A., Li H. Structure and mechanical properties of high-entropy alloys of the CoCrZrMnNi system with different Zr and Mn contents produced by vacuum-induction melting // *Frontier Materials & Technologies*, 2025, vol. 1, pp. 21-34. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2025-1-71-2>
 16. Hua, D., Zhou, Q., Shi, Y., Li, S., Hua, K., Wang, H., Li, S., & Liu, W. (2023). Revealing the deformation mechanisms of <110> symmetric tilt grain boundaries in CoCrNi medium-entropy alloy. *International Journal of Plasticity*. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2023.103832>.
 17. Wang, R., Hu, L., Geng, P., Zhang, W., & Du, C. (2025). Deformation and strengthening mechanism of non-equiatomic CoCrNi medium entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147864>.
 18. Panchenko I. A., Drobyshev V. K., Konovalov S., Bessonov D. A. Structural Change in Co–Cr–Fe–Mn–Ni Alloys upon Variation in Mn and Fe Concentrations // *Technical Physics Letters*. 2024. <https://doi.org/10.1134/S1063785024700391>
 19. He, J., Wu, N., Wang, C., Wu, Z., Li, Y., & Luo, F. (2023). Multi-stage strain-hardening and nano-twinning strengthening Co₄₀Cr₂₂Ni₁₅Fe₁₄Mo₄Si₃Mn₂ multi-principal element alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.216>.
 20. Drobyshev V.K., Konovalov S.V., Panchenko I.A. Microstructural and fractographic analysis of non-equiatomic alloy of Co-Cr-Fe-Mn-Ni system // *Non-Ferrous Metals*. 2024, no. 2, pp. 63-68. <https://doi.org/10.17580/nfm.2024.02.10>
 - mechanical properties of CoCrNi medium entropy alloy films. *Surface and Coatings Technology*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131587>.
 3. Chang W., Hsueh C. Strengthening of CoCrNi medium entropy alloy with Ti additions. *Intermetallics*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2023.108072>.
 4. Lee D., Agustianingrum M., Park N., Tsuji N. Synergistic effect by Al addition in improving mechanical performance of CoCrNi medium-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.005>.
 5. Chang R., Fang W., Bai X., Xia, C., Zhang X., Yu H., Liu B., Yin F. Effects of tungsten additions on the microstructure and mechanical properties of CoCrNi medium entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.235>.
 6. Lin Y., Lu Y., Hsueh C. Strengthening of CoCrNi medium entropy alloy with gadolinium additions. *Vacuum*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111969>.
 7. Malladi S., Riabov D., Guo S., Nyborg L. Additive Manufacturing of Interstitial Nitrogen-Strengthened CoCrNi Medium Entropy Alloy. *Advanced Engineering Materials*. 2024. 26. <https://doi.org/10.1002/adem.202401182>.
 8. Bi X., Li R., Yuan Z., Cheng J., Guan D., Zhang, P. Laser-directed energy deposition of a high performance additively manufactured (CoCrNi)₉₄(TiAl)₆ medium-entropy alloy with a novel core-shell structured strengthening phase. *Additive Manufacturing*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.103971>.
 9. Chung S., Lee T., Jeong W., Kong B., Ryu H. Additive Manufacturing of Oxide Dispersion-Strengthened CoCrNi Medium-Entropy Alloy by in situ Oxide Synthesis. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171340>.
 10. Lin Y., Hsueh C. Mitigation of strength-ductility trade-off of CoCrNi medium entropy alloys with heterogenous structure by controlled Gd addition and annealing. *Materials Science and Engineering: A*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146630>.
 11. An N., Sun Y., Gao L., Wu Y., Xue J., Li Z., Hui X. Long-term structural stability and excellent mechanical properties of CoCrNi system medium entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165206>.
 12. Guo L., Lu Y., Hsueh C. Effects of Erbium Addition on Microstructure and Mechanical Properties of CoCrNi Medium Entropy Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08317-2>.
 13. Kvon S., Issagulov A., Kulikov V., Arinova S. Niobium's Effect on the Properties of a Quasi-High-Entropy Alloy of the CoCrFeMnNi System. *Metals*. 2024. <https://doi.org/10.3390/met14050564>.
 14. Sunkari U., Reddy S., Athira K., Chatterjee S., Bhattacharjee P. Effect of niobium alloying on the microstructure, phase stability and mechanical properties of CoCrFeNi₂.1Nb_x high entropy alloys: Experimentation and thermodynamic modeling. *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2020. 793, 139897. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139897>.
 15. Konovalov S.V., Drobyshev V.K., Panchenko I.A., Li H. Structure and mechanical properties of high-entropy alloys

References

1. Yen J., & Hsueh C. Effects of Ti and Mo Additions on Microstructures and Mechanical Properties of CoCrNi Medium Entropy Alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147943>.
2. Chen P., Chen P., You J., Hsueh C. Exploring effects of molybdenum and titanium contents on microstructure and

- of the CoCrZrMnNi system with different Zr and Mn contents produced by vacuum-induction melting. *Frontier Materials and Technologies*. 2025;1:21-34. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2025-1-71-2>
16. Hua D., Zhou Q., Shi Y., Li S., Hua K., Wang H., Li S., Liu W. Revealing the deformation mechanisms of <110> symmetric tilt grain boundaries in CoCrNi medium-entropy alloy. *International Journal of Plasticity*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2023.103832>.
 17. Wang R., Hu L., Geng P., Zhang W., Du C. Deformation and strengthening mechanism of non-equiatom CoCrNi medium entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147864>.
 18. Panchenko I. A., Drobyshev V. K., Kononov S., Besonov D. A. Structural Change in Co–Cr–Fe–Mn–Ni Alloys upon Variation in Mn and Fe Concentrations. *Technical Physics Letters*. 2024. <https://doi.org/10.1134/S1063785024700391>
 19. He J., Wu N., Wang C., Wu Z., Li Y., Luo F. Multi-stage strain-hardening and nano-twinning strengthening Co₄₀Cr₂₂Ni₁₅Fe₁₄Mo₄Si₃Mn₂ multi-principal element alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.216>.
 20. Drobyshev V.K., Kononov S.V., Panchenko I.A. Microstructural and fractographic analysis of non-equiatom alloy of Co–Cr–Fe–Mn–Ni system. *Non-Ferrous Metals*. 2024;(2): 63-68. <https://doi.org/10.17580/nfm.2024.02.10>

Поступила 28.10.2025; принята к публикации 29.01.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 28/10/2025; revised 29/01/2026; published 30/06/2026

Коновалов Сергей Валерьевич – доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: kononov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

Дробышев Владислав Константинович – аспирант кафедры обработки металлов давлением и материаловедения ЕВРАЗ ЗСМК, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: drobyshv_v.k@mail.ru. ORCID 0000-0002-1532-9226

Панченко Ирина Алексеевна – кандидат технических наук, заведующий научной лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: i.r.i.ss@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1631-9644

Воробьев Сергей Владимирович – доктор технических наук, главный научный сотрудник управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: sparrow1981@mail.ru. ORCID 0000-0003-3957-0249

Ю Ю – старший инженер, Weihai Liyu Industrial Co., Ltd, China.
ORCID 0009-0006-0004-6254

Sergey V. Kononov – DrSc (Eng.), Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: kononov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

Vladislav K. Drobyshev – Postgraduate Student of the Department of Metalworking by Pressure and Materials Science of Evraz West Siberian Metallurgical Plant, Researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: drobyshv_v.k@mail.ru. ORCID 0000-0002-1532-9226

Irina A. Panchenko – PhD (Eng.), Head of the Scientific Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: i.r.i.ss@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1631-9644

Sergey V. Vorobyov – DrSc (Eng.), Chief Researcher of the Scientific Research Department, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: sparrow1981@mail.ru. ORCID 0000-0003-3957-0249

Yu J – Senior Engineer, Weihai Liyu Industrial Co., Ltd, China.
ORCID 0009-0006-0004-6254