
Научная статья

УДК 669.017.13

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-3-13

ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТНО-ДЕФОРМАЦИОННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ИЗНАШИВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ ЛИТЫХ ЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ НА БАЗЕ СИСТЕМЫ Ni–Co–Cr

Г.С. Севальнев¹, И.И. Власов¹, В.С. Климов¹, Д.Ю. Нефедкин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Проведены исследования триботехнических характеристик при контактно-деформационном воздействии в условиях сухого трения скольжения энтропийных сплавов системы легирования Ni–Co–Cr. По результатам исследований установлено, что твердость эквимассового сплава на 10 % больше эквиатомного, а применение дополнительного легирования увеличивает твердость эквиатомного сплава на 20–45 %. Износостойкость сплавов незначительно зависит от твердости и в большей степени от упрочнения из-за накопления подповерхностных дефектов.

Ключевые слова: энтропийные сплавы, легирование, структура, твердость, износостойкость, контактная деформация

Для цитирования: Севальнев Г.С., Власов И.И., Климов В.С., Нефедкин Д.Ю. Оценка сопротивления контактно-деформационному воздействию при интенсивном изнашивании поверхности литых энтропийных сплавов на базе системы Ni–Co–Cr // Труды ВИАМ. 2024. № 11 (141). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-3-13.

Scientific article

EVALUATION OF RESISTANCE TO CONTACT-DEFORMATION IMPACT DURING INTENSIVE WEAR OF THE SURFACE OF CAST ENTROPY ALLOYS BASED ON THE Ni–Co–Cr SYSTEM

G.S. Sevalnev¹, I.I. Vlasov¹, V.S. Klimov¹, D.Yu. Nefedkin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The tribological characteristics of entropy alloys based on the Ni–Co–Cr alloying system under contact-deformation impact under dry sliding friction conditions were studied. The results of the studies showed that the hardness of the equimass alloy is 10 % greater than equiatomic alloy, and the use of additional alloying increases the hardness of the equiatomic alloy by 20–45 %. The wear resistance of the alloys depends slightly on the hardness and, to a greater extent, on hardening due to the accumulation of subsurface defects.

Keywords: entropy alloys, alloying, structure, hardness, wear resistance, contact deformation

For citation: Sevalnev G.S., Vlasov I.I., Klimov V.S., Nefedkin D.Yu. Evaluation of resistance to contact-deformation impact during intensive wear of the surface of cast entropy alloys based on the Ni–Co–Cr system. *Trudy VIAM*, 2024, no. 11 (141), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-3-13.

Введение

В различных отраслях тяжелой промышленности, в частности в авиационной и космической, используются сплавы, разработанные для конкретных условий эксплуатации [1–3]. Основным принципом создания сплавов под определенную задачу является выбор материала основы (матрицы), обладающего требуемым комплексом характеристик, усиление или модификация которого впоследствии производится путем введения легирующих элементов. Данный принцип позволяет успешно создавать сплавы с уникальными свойствами, однако обеспечение термодинамического равновесия ограничивает предел растворимости легирующих компонентов в матрице. Это в свою очередь усложняет процесс получения наилучшего комплекса тех или иных характеристик.

Перспективное научно-техническое направление современного материаловедения – создание высокоэнтропийных сплавов, которые за счет взаимного равномерного (в равных долях) смешения компонентов системы могут обеспечить более высокий уровень свойств, чем сплавы с одним матричным компонентом [4–10].

Зарубежные исследователи, работающие в данном направлении, нередко показывают превосходство средне- и высокоэнтропийных сплавов над современными конструкционными сплавами на железной, никелевой, титановой и других основах по жаропрочности, удельной прочности и износостойкости. В работах [11–13] на примере сплава GRX-810 показано, что за счет формирования высокой энтропии смешения в сплаве реализуется более высокая прочность при повышенных температурах, а также длительная прочность (в сравнении с современными жаропрочными никелевыми сплавами). Аналогично жаропрочности, удельная прочность при высоком показателе пластичности, реализуемая в высокоэнтропийных сплавах, превосходит удельную прочность комплексно-легированных сталей с метастабильной аустенитной структурой, упрочнение которых происходит за счет TRIP- и TWIP-эффектов [14–17]. Данные эффекты подробно рассмотрены в работах [14, 15].

В настоящее время наиболее изучены энтропийные сплавы на основе переходных элементов с незавершенной 3d-орбиталью ввиду высокой степени энтропии формируемой системы [18–20]. В свою очередь, увеличение степени энтропии системы за счет смешения компонентов позволяет обеспечить более высокий уровень эксплуатационных характеристик, включающих механические, физические и триботехнические свойства, а также коррозионную стойкость.

Предположительно особенности формирования структуры энтропийных сплавов системы Ni–Co–Cr позволяют использовать их для изготовления различных узлов агрегатов и хранилищ, посредством которых может проводиться транспортировка коррозионно-агрессивных веществ. Однако, помимо этого, в составе транспортируемых материалов также могут присутствовать и абразивные частицы, которые в свою очередь при перемещении приводят к интенсивному изнашиванию металлических поверхностей. Низкая стойкость материалов к контактно-деформационному воздействию при интенсивном изнашивании может приводить к ускоренному выходу из строя узлов агрегатов и снижению ресурса всего изделия.

Сплавы на никелевой основе в большинстве случаев обладают достаточно низкой износостойкостью ввиду объемного упрочнения без значительного искажения кристаллической решетки и формирования низких показателей твердости. Энтропийные сплавы системы Ni–Co–Cr также обладают низкими показателями твердости, однако за счет эквивалентного соотношения компонентов в кристаллической решетке могут обеспечивать высокую степень деформационного упрочнения. Ранее в работах [17, 21–23] показано, что сплавы на основе железа, обладающие высокой степенью деформационного упрочнения, могут эффективно работать в условиях интенсивного изнашивания контактных поверхностей при реализации сухого трения скольжения.

В рамках данной работы оценено сопротивление контактно-деформационному воздействию при интенсивном изнашивании поверхности литейного энтропийного сплава системы Ni–Co–Cr путем исследования триботехнических характеристик при испытаниях в условиях сухого трения скольжения.

Материалы и методы

Для исследований использовали энтропийные сплавы системы Ni–Co–Cr в литом состоянии следующих композиций с содержанием базовых компонентов, %:

Эквивалентное соотношение

1 33Ni–33Co–33Cr

Эквивалентное соотношение

2 Ni₃₃Co₃₃Cr₃₃
 3 NiCoCrWNbAlTiReC
 4 NiCoCrWNbAlTiTaC (1 % Ta)
 5 То же (1,5 % Ta)
 6 То же (3 % Ta)

Содержание легирующих элементов в сплавах NiCoCrWNbAlTiReC и NiCoCrWNbAlTiTaC составляет ~ (5–7) %.

Слитки массой 1 кг из энтропийных сплавов получали вакуумно-индукционной выплавкой с разливом в подогретый до 200 °С тигель для исключения образования металлургических дефектов.

Металлографический анализ структур энтропийных сплавов после выплавки проводили методами световой микроскопии на оптическом конфокальном инвертированном микроскопе при увеличении ×100.

Твердость HV₁ перед трибологическими испытаниями и после них измеряли в соответствии с ГОСТ 2999–75 по методу Виккерса при нагрузке 1 кг (10 Н). Степень упрочнения дорожки скольжения после испытаний на изнашивание оценивали по коэффициенту $k = HV'_1 / HV_1$, где HV'₁ – твердость дорожки скольжения после испытаний; HV₁ – твердость образца до испытаний.

Исследования триботехнических характеристик проводили в условиях сухого трения скольжения с использованием трибометра по схеме «шарик–диск» при линейной скорости перемещения образца относительно контртела ~0,15 м/с и нагрузке 10 Н. Путь трения при испытании составил 500 м. Контртелом являлся шарик Ø6 мм из Al₂O₃. Для оценки пути трения до приработки L_{пр} использовали график кинетики изменения коэффициента сухого трения скольжения при фрикционном взаимодействии образца и контртела. Интенсивность изнашивания W (мм³/(Н·м)) рассчитывали по формуле [23]

$$W = \frac{ls}{PL},$$

где l , s – длина окружности (мм) и площадь поперечного сечения дорожки износа, мм²; P – нагрузка, Н; L – путь трения, м.

Износ объема поверхности контртела $\Delta V_{\text{шар}}$ рассчитывали по формуле

$$\Delta V_{\text{шар}} = \pi h^2 \left(r - \frac{1}{3} h \right),$$

где $h = r - \left(r^2 - \left[\frac{d}{2} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$, d – диаметр пятна износа, мм; r – радиус шарика, мм; h – толщина изношенного сегмента, мм.

Фрактографический анализ дорожек износа проводили с применением настольного сканирующего электронного микроскопа при ускоряющем напряжении 5 кВ. Формирование изображения проводили с применением обратноотраженных электронов.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

В результате анализа научно-технической литературы установлено, что высокоэнтропийные сплавы за счет энтропии смешения могут обеспечивать высокий уровень характеристик в литом состоянии. В связи с этим для оценки сопротивления контактно-деформационному воздействию исследования и испытания образцов проводили в литом состоянии без применения дополнительных обработок.

Микроструктуры всех исследуемых энтропийных сплавов системы Ni–Co–Cr представляют собой разнотельные дендритные структуры (рис. 1). Значительных отличий в формируемых структурах в литом состоянии у исследуемых сплавов не наблюдается.

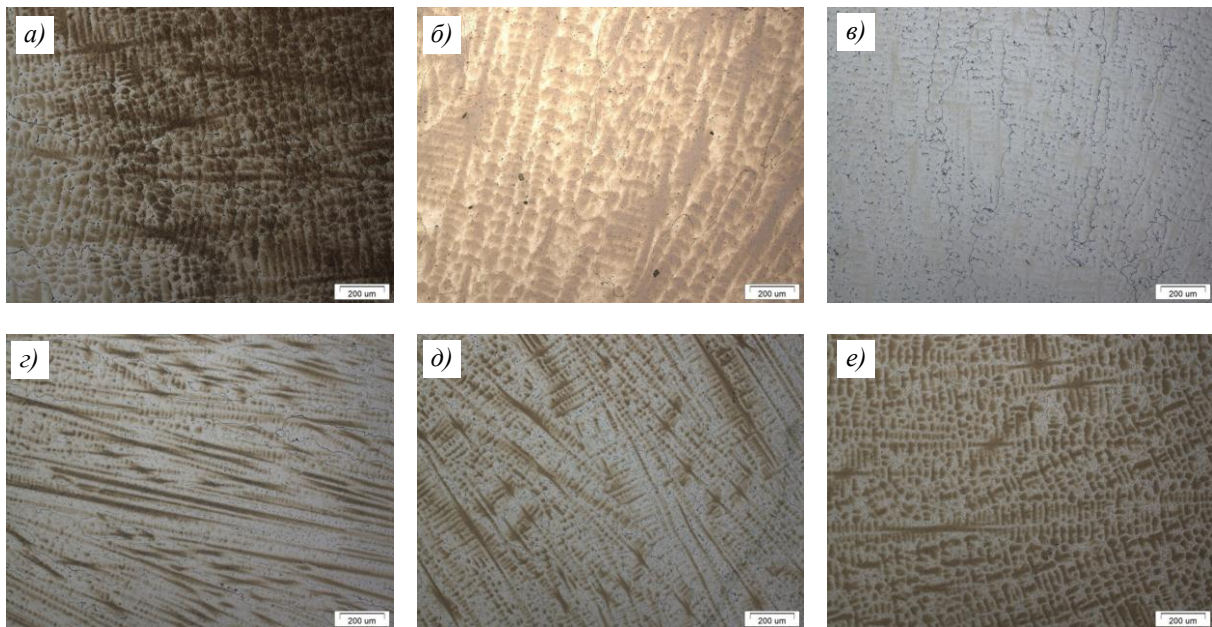


Рис. 1. Микроструктуры ($\times 100$) энтропийных сплавов 1–6 (a–e) после литья

Перед испытаниями на изнашивание проведены измерения твердости образцов (рис. 2), по результатам которых установлено, что энтропийный сплав в эквимассовом состоянии 1 имеет твердость на 10 % больше по сравнению с эквиатомным сплавом 2. Введение дополнительных легирующих элементов в эквиатомное соотношение позволило увеличить твердость сплавов NiCoCrWNbAlTiReC (3) и NiCoCrWNbAlTiTaC (4–6) на 20–45 % по сравнению с эквиатомным сплавом Ni₃₃Co₃₃Cr₃₃.

В качестве контртела для проведения испытаний на изнашивание использовали шарик из Al₂O₃ с целью более качественной оценки контактно-деформационного воздействия и исключения адгезии образца и контртела в процессе фрикционного взаимодействия. Кинетика изменения коэффициента трения при фрикционном взаимодействии образца и контртела и полученные результаты по формируемой интенсивности изнашивания в процессе сухого трения скольжения представлены на рис. 3 и 4.

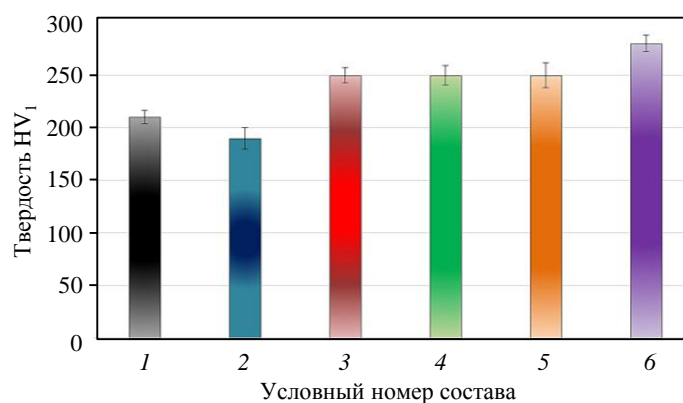


Рис. 2. Твердость энтропийных сплавов системы Ni–Co–Cr в литом состоянии

По результатам анализа изменения коэффициента трения в процессе испытаний (рис. 3, *а, б*) установлено, что все составы обладают достаточно стабильными средними коэффициентами трения, значения которых колеблются от 0,47 до 0,56 (рис. 3, *в*). Перераспределение компонентов и формирование эквиатомного сплава приводит к уменьшению пути трения до приработки на 33 % относительно эквимассового состава, а увеличение легирующих компонентов в составе приводит к его возрастанию. При этом наименьший путь трения до приработки формируется у сплава NiCoCrWNbAlTiReC.

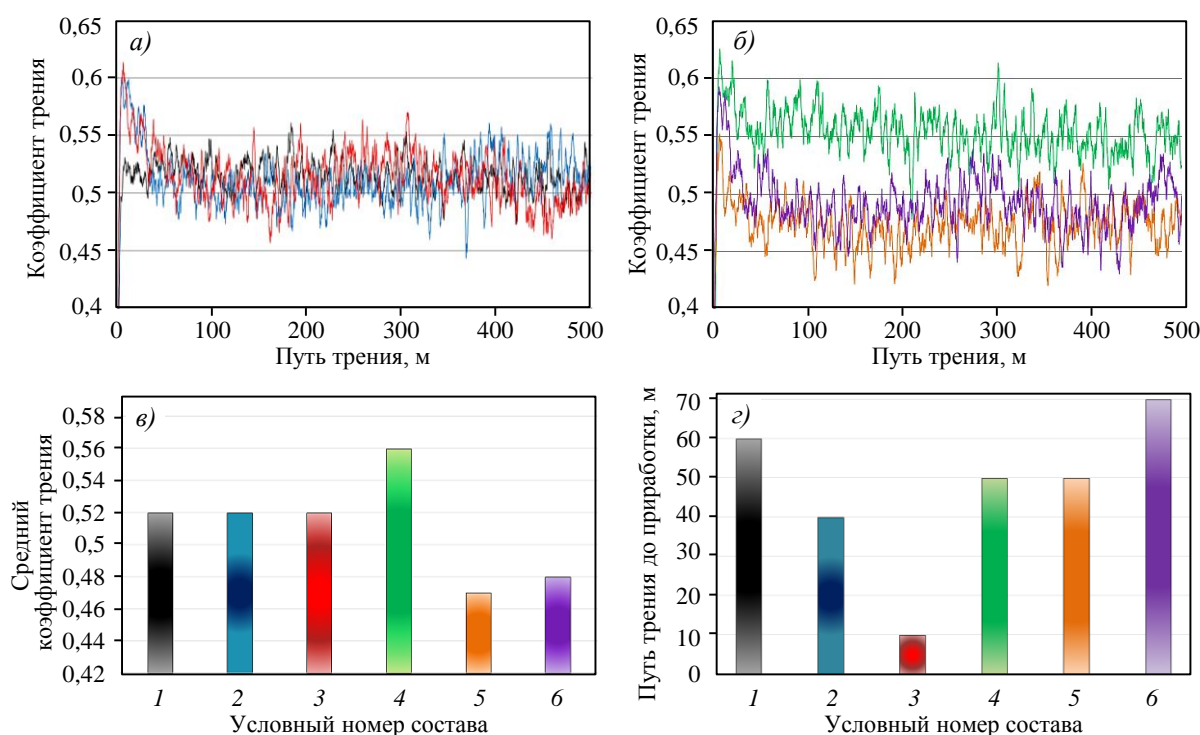


Рис. 3. Кинетика изменения коэффициента трения энтропийных сплавов 1–3 (*а*) и 4–6 (*б*), средний коэффициент трения (*в*) и путь трения до приработки (*з*) при испытании на изнашивание в условиях сухого трения скольжения

Фрактографический анализ дорожек скольжения после испытаний на изнашивание (рис. 4) позволил установить следующее:

- для образца из эквимассового сплава наблюдаются множественные деформации, микротрещины и локальные выкрашивания поверхности;
- формирование эквиатомного состояния привело к увеличению повреждаемости, микротрещин и выкрашиваний с поверхности дорожки скольжения в процессе фрикционного взаимодействия;
- упрочнение за счет легирующих элементов эквиатомного состава в сплавах 3–5 привело к упрочнению матрицы, снижению податливости пластической деформации и повреждаемости дорожки скольжения и формированию микротрещин вдоль линий скольжения;
- для сплава 6 с содержанием тантала 3 % увеличилось количество выкрашиваний поверхности, частицы с которой попадают в зону контакта и формируют абразив, что приводит к увеличению интенсивности изнашивания.

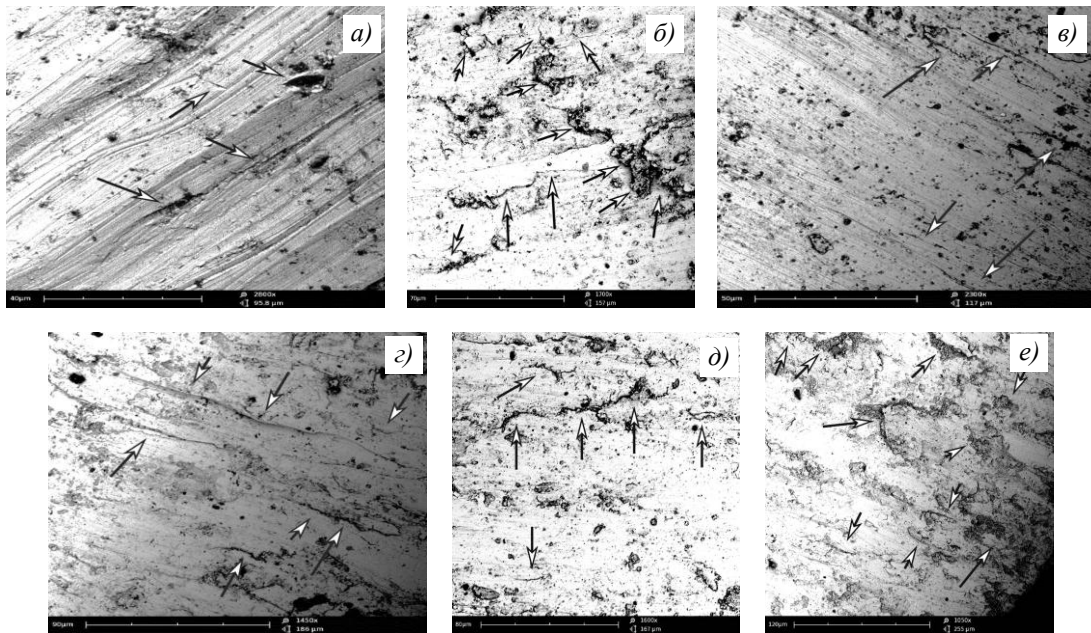


Рис. 4. Фрактография поверхности (белыми стрелками указаны дефекты) после испытаний на изнашивание в условиях сухого трения скольжения энтропийных сплавов 1–6 (а–е)

Высокая стойкость поверхности к контактной деформации может являться следствием более высокой скорости приработки и формирования наименьшего пути трения до приработки.

По полученным результатам интенсивности изнашивания образцов (рис. 5, а) видно, что основной вклад в формирование износостойкости вносит изначальная твердость образцов, однако отсутствует полная корреляция – сплавы 3–5 имеют одинаковую твердость, но разную интенсивность изнашивания, а у образца сплава 6 с увеличением твердости снижается износостойкость.

Ранее в работах [17, 23] показано, что износостойкость сплавов на основе железа с гомогенной гранцентрированной кубической структурой может зависеть от степени упрочнения при пластической деформации во время фрикционного взаимодействия образца и контртела. В связи с этим проведены исследования степени упрочнения после испытаний на изнашивание путем измерения твердости дорожки скольжения HV'_1 и соотношения с твердостью образца до испытания HV_1 . По результатам исследований установлено (рис. 5, б), что наибольшей степенью упрочнения обладает эквиатомный сплав вследствие равномерного расположения компонентов в кристаллической решетке

и высокой степени энтропии. В эквимассовом сплаве сформирована меньшая степень податливости пластической деформации, вследствие чего степень упрочнения и увеличение твердости на 52 % меньше. Данный эффект можно связать с образованием барьеров в виде интерметаллидных частиц и искажений кристаллической решетки для передвижения дислокаций. Введение легирующих элементов в эквиатомный состав также привело к значительному снижению податливости контактной деформации и степени упрочнения в ~2 раза, при этом легирование состава танталом ~3 % в большей степени привело к упрочнению твердого раствора. При анализе полученных данных методом регрессионного анализа и выявлении соотношения формируемой интенсивности изнашивания от степени упрочнения наблюдается практически линейная зависимость с высоким коэффициентом детерминации $R = 0,972$ (рис. 5, в). Исходя из этого, можно сделать вывод, что интенсивность изнашивания энтропийных сплавов данной выборки зависит от степени упрочнения, из-за чего происходят подповерхностное накопление дефектов вследствие пластической деформации, образование микротрещин и выкрашивание поверхности. Однако сплав, содержащий 3 % тантала, не подчиняется данной зависимости, что, по-видимому, связано с охрупчиванием вследствие упрочнения твердого раствора, перемещений продуктов износа в зону фрикционного контакта и активным изнашиванием поверхности.

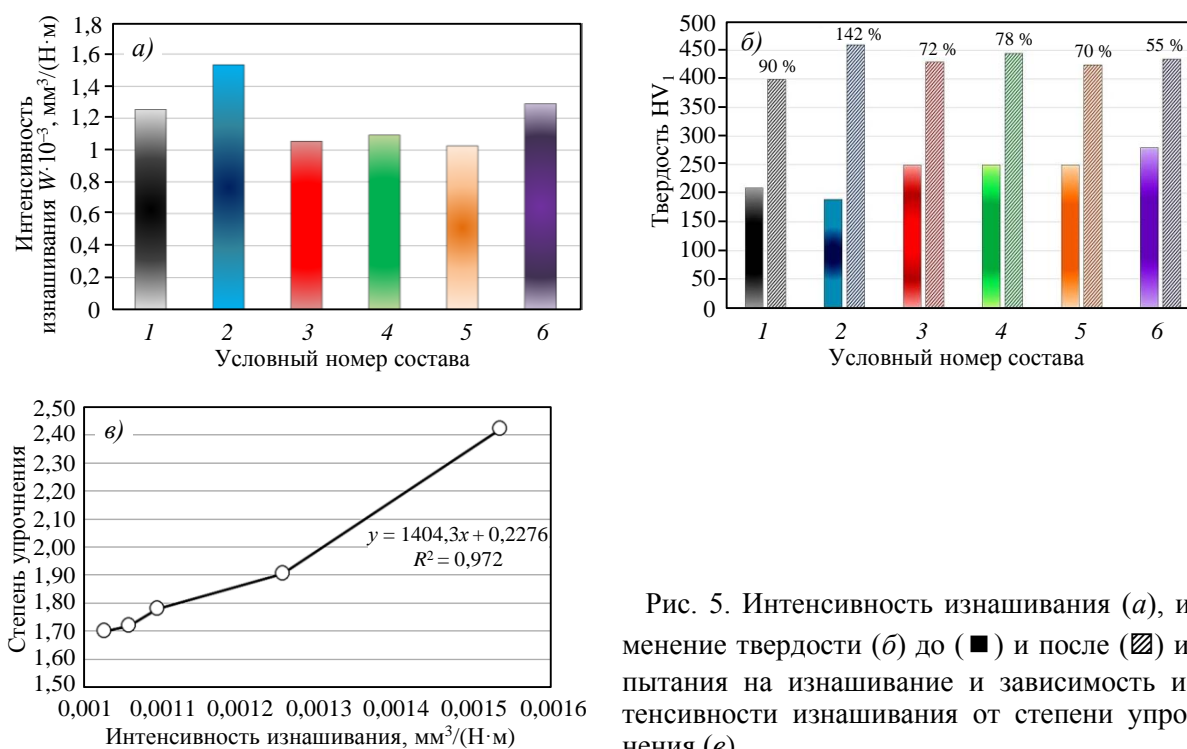


Рис. 5. Интенсивность изнашивания (а), изменение твердости (б) до (■) и после (▨) испытания на изнашивание и зависимость интенсивности изнашивания от степени упрочнения (в)

В целом анализ результатов, по сравнению с другими сплавами, показывает, что энтропийные сплавы системы Ni–Co–Cr в литом состоянии обладают достаточно низкой износостойкостью и сопротивлением контактно-деформационным нагрузкам. В процессе триботехнического нагружения в условиях сухого трения скольжения на поверхности образцов формируются микротрещины и выкрашивания.

В связи с высокой степенью упрочнения при механическом воздействии, для повышения сопротивления контактно-деформационному воздействию и обеспечения более высокого комплекса триботехнических характеристик могут применяться методы горячей и холодной деформации, а также термической обработки, в связи с чем необходимо проводить дополнительные исследования в данном направлении.

Заключения

Развитие современного материаловедения связано с поиском новых материалов, методов их модификации и упрочнения, а также с анализом поведения материалов в различных условиях внешнего воздействия.

Одни из перспективных материалов – высокоэнтروпийные сплавы, в которых соотношение компонентов смешения равномерно, за счет чего реализуется уникальный комплекс их физико-механических характеристик.

В рамках исследований по оценке сопротивления контактно-деформационному воздействию в условиях интенсивного изнашивания поверхности установлено следующее:

– твердость эквимассового сплава на 10 % больше по сравнению с эквиатомным; введение дополнительных легирующих элементов приводит к увеличению твердости эквиатомного сплава на 20–45 %;

– во всех сплавах при фрикционном взаимодействии с контртелом из Al_2O_3 реализуется достаточно стабильный коэффициент трения, среднее значение которого колеблется от 0,47 до 0,56; наименьшим путем до приработки обладает сплав NiCoCrWNbAlTiReC;

– интенсивность изнашивания энтروпийных сплавов в меньшей степени зависит от формируемой твердости и в большей – от степени упрочнения при контактом взаимодействии: чем больше степень упрочнения, тем выше интенсивность изнашивания из-за накопленных подповерхностных дефектов и образования микротрещин и выкрашиваний. Однако для сплава с содержанием тантала 3 % данная зависимость не реализуется из-за возможного охрупчивания его поверхности вследствие упрочнения твердого раствора.

По сравнению с другими металлическими сплавами, энтропийные сплавы системы Ni–Co–Cr в литом состоянии обладают низкой износостойкостью в условиях контактно-деформационного нагружения.

Высокая степень деформационного упрочнения в процессе триботехнического нагружения позволяет сделать вывод, что повышение износостойкости энтропийных сплавов возможно путем применения методов горячей и холодной пластической деформации, а также последующей термической обработки.

Работы (исследования) выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-11-2021-085 от 22.12.2021).

Список источников

1. Севальнев Г.С. Бериллийсодержащие стали – перспективный материал с высоким уровнем физико-механических свойств // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
2. Капланский Ю.Ю., Мазалов П.Б. Мировые тенденции развития тугоплавких высокоэнтропийных сплавов для теплонагруженных узлов аэрокосмической техники (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-30-42.
3. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Мин П.Г., Вадеев В.Е., Крамер В.В. Исследование и разработка технологических параметров плавки в вакууме коррозионностойких жаропрочных никелевых сплавов // *Металлург*. 2021. № 2. С. 62–67.

4. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Проблемы создания и перспективы использования жаропрочных высокоэнтропийных сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
5. Singh S., Wanderka N., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi highentropy alloy // *Acta Materialia*. 2011. Vol. 59. P. 182–190. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.09.023.
6. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Осин И.В., Дворецков Р.М. Исследование возможности получения высокоэнтропийного сплава VNbMoTaW путем смешивания элементарных порошков с дальнейшим компактированием методом гибридного искрового плазменного спекания // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 12–20. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-12-20.
7. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2004. Vol. 375–377. P. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
8. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys // *Entropy*. 2014. Vol. 16. No. 9. P. 4749–4768.
9. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J. et al. Nanostructured highentropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes // *Advanced Engineering Materials*. 2004. Vol. 6. P. 299–303. DOI: 10.1002/adem.200300567.
10. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys // *Annales de Chimie-Science des Materiaux*. 2006. Vol. 31. P. 633–648. DOI: 10.3166/acsm.31.633-648.
11. Smith T. GRX-810: NASA High Temperature Alloy Development for Additive Manufacturing // Lawrence Livermore National Lab Seminar. 2022. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220013032> (дата обращения: 25.07.2024).
12. Smith T. High Temperature Alloy Development for AM–GRX-810 // *Bridging the Gap Webinar: Emerging Additive Manufacturing Materials*. 2023. URL: ntrs.nasa.gov/citations/20230010486 (дата обращения: 25.07.2024).
13. NASA’s New Material Built to Withstand Extreme Conditions. URL: <https://www.nasa.gov/aeronautics/nasas-new-material-built-to-withstand-extreme-conditions/> (дата обращения: 25.07.2024).
14. Soleimani M., Kalhor A., Mirzadeh H. Transformation-induced plasticity (TRIP) in advanced steels: a review // *Materials Science and Engineering: A*. 2020. Vol. 795. P. 140023.
15. De Cooman B.C., Estrin Y., Kim S.K. Twinning-induced plasticity (TWIP) steels // *Acta Materialia*. 2018. Vol. 142. P. 283–362.
16. Лукин Е.И., Ашмарин А.А., Банных И.О. и др. Исследование влияния величины обжатия при холодной прокатке на фазовый состав, текстуру и остаточные напряжения в стали 20X15АНЗМД2 // *Металлы*. 2023. № 6. С. 26–34. DOI: 10.31857/S0869573323060046.
17. Севальнев Г.С., Громов В.И., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г. Контактная выносливость азотистых аустенито-мартенситных сталей с различным механизмом упрочнения // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.
18. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 122. P. 448–511. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.08.081.
19. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys // *Nature Reviews Materials*. 2019. Vol. 4. P. 515–534. DOI: 10.1038/s41578-019-0121-4.
20. Zhang Y., Zhou Y.J., Lin J.P. et al. Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys // *Advanced Engineering Materials*. 2018. Vol. 10 (6). P. 534–538. DOI: 10.1002/adem.200700240.
21. Moghaddam P.V., Hardell J., Vuorinen E., Prakash B. The role of retained austenite in dry rolling/sliding wear of nanostructured carbide-free bainitic steels // *Wear*. 2019. Vol. 428. P. 193–204.
22. Harzallah R., Mouftiez A., Felder E. et al. Rolling contact fatigue of Hadfield steel X120Mn12 // *Wear*. 2010. Vol. 269. No. 9-10. P. 647–654.

23. Севальнев Г.С., Севальнева Т.Г., Колмаков А.Г. и др. Исследование триботехнических характеристик коррозионностойких сталей с различным механизмом объемного упрочнения // Труды ВИАМ. 2021. № 10 (104). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.

References

1. Sevalnev G.S. Beryllium-containing steels – perspective material with a high level of physical and mechanical properties. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
2. Kaplanskii Yu.Yu., Mazalov P.B. World trends in the development of refractory high-entropy alloys for heat-loaded units of aerospace technics (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-30-42.
3. Kablov E.N., Sidorov V.V., Min P.G., Vadeev V.E., Kramer V.V. Research and development of technological parameters for vacuum melting of corrosion-resistant heat-resistant nickel alloys. *Metallurg*, 2021, no. 2, pp. 62–67.
4. Trofimenko N.N., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N. Problems of creation and prospects for the use of heat-resistant high-entropy alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
5. Singh S., Wanderka N., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi hightentropy alloy. *Acta Materialia*, 2011, vol. 59, pp. 182–190. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.09.023.
6. Trofimenko N.N., Efimochkin I.Yu., Osin I.V., Dvoretzkov R.M. The research of the possibility of high entropy alloy VNbMoTaW production by mixing elementary powders with further hybrid spark plasma sintering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 12–20. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-12-20.
7. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 375–377, pp. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
8. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*, 2014, vol. 16, no. 9, pp. 4749–4768.
9. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J. et al. Nanostructured hightentropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 2004, vol. 6, p. 299–303. DOI: 10.1002/adem.200300567.
10. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie-Science des Materiaux*, 2006, vol. 31, pp. 633–648. DOI: 10.3166/acsm.31.633-648.
11. Smith T. *GRX-810: NASA High Temperature Alloy Development for Additive Manufacturing*. 2022. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220013032> (accessed: July 25, 2024).
12. Smith T. *High Temperature Alloy Development for AM-GRX-810*. Available at: ntrs.nasa.gov/citations/20230010486 (accessed: July 25, 2024).
13. NASA’s New Material Built to Withstand Extreme Conditions. Available at: <https://www.nasa.gov/aeronautics/nasas-new-material-built-to-withstand-extreme-conditions/> (accessed: July 25, 2024).
14. Soleimani M., Kalhor A., Mirzadeh H. Transformation-induced plasticity (TRIP) in advanced steels: a review. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 795, p. 140023.
15. De Cooman B.C., Estrin Y., Kim S.K. Twinning-induced plasticity (TWIP) steels. *Acta Materialia*, 2018, vol. 142, pp. 283–362.
16. Lukin E.I., Ashmarin A.A., Bannykh I.O. et al. Study of the influence of the reduction value during cold rolling on the phase composition, texture and residual stresses in 20Kh15AN3MD2 steel. *Metals*, 2023, no. 6, pp. 26–34. DOI: 10.31857/S0869573323060046.
17. Sevalnev G.S., Gromov V.I., Dulnev K.V., Sevalneva T.G. Contact endurance of nitrogenous austenitic-martensitic steels with different hardening mechanism. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.

18. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 2017, vol. 122, pp. 448–511. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.08.081.
19. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys. *Nature Reviews Materials*, 2019, vol. 4, pp. 515–534. DOI: 10.1038/s41578-019-0121-4.
20. Zhang Y., Zhou Y.J., Lin J.P. et al. Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys. *Advanced Engineering Materials*, 2018, vol. 10 (6), pp. 534–538. DOI: 10.1002/adem.200700240.
21. Moghaddam P.V., Hardell J., Vuorinen E., Prakash B. The role of retained austenite in dry rolling/sliding wear of nanostructured carbide-free bainitic steels. *Wear*, 2019, vol. 428, pp. 193–204.
22. Harzallah R., Mouftiez A., Felder E. et al. Rolling contact fatigue of Hadfield steel X120Mn12. *Wear*, 2010, vol. 269. No. 9-10, pp. 647–654.
23. Sevalnev G.S., Sevalneva T.G., Kolmakov A.G., Dulnev K.V., Krylov S.A. Study of the tribotechnical characteristics of corrosion-resistant steels with different mechanisms of volumetric hardening. *Trudy VIAM*, 2021, no. 10 (104), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.

Информация об авторах

Севальнев Герман Сергеевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Власов Иван Игоревич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Климов Владимир Сергеевич, инженер I категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Нефедкин Данила Юрьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

German S. Sevalnev, Head of Sector, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ivan I. Vlasov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vladimir S. Klimov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Danila Yu. Nefedkin, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 16.08.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 04.09.2024.
The article was submitted 16.08.2024; approved and accepted for publication after reviewing 04.09.2024.