



Оригинальная статья

УДК 536.425:539.25:669.017.15

DOI 10.17073/0368-0797-2021-10-747-754



## ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ

В. Е. Громов<sup>1</sup>, Ю. А. Шлярова<sup>1</sup>, С. В. Коновалов<sup>2</sup>,  
С. В. Воробьев<sup>1</sup>, О. А. Перегудов<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup> Омский государственный технический университет (Россия, 644050, Омск, пр. Мира, 11)

**Аннотация.** Из накопленной информации о структуре, свойствах, стабильности, методах получения высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), созданных в начале XXI века, следует, что они обладают целым комплексом полезных свойств, что предполагает их перспективное использование в разных отраслях промышленности. Выполнен краткий обзор работ последних 5 лет по анализу возможностей применения ВЭС в конкретных наукоемких отраслях. В биомедицине защитные покрытия из ВЭС (TiZrNbHfTa)N и (TiZrNbHfTa)O обладают биосовместимостью, высоким уровнем механических свойств, высокой износ- и коррозионной стойкостью в физиологических средах, отличной адгезией. Изделия из (MoTa)<sub>x</sub>NbTiZr успешно прошли клинические испытания, будучи имплантированными в живую мышечную ткань. Разработанные ВЭС на основе редкоземельных элементов и металлов группы Fe типа YbTbDyAlMe (Me = Fe, Co, Ni) обладают магнетокалорическим эффектом, имеют температуру Кюри, близкую к комнатной, и могут быть использованы в современных рефрижераторных устройствах. Изменяя стехиометрический состав ВЭС CoCrFeNiTi, легируя их и проводя термическую обработку, удастся получить магнитомягкие материалы. Приведены области применения ВЭС в качестве катализаторов окисления аммиака (PtPdRhRuCe), разложения аммиака (RuRhCoNiIr), окисления ароматических спиртов (Co<sub>0.2</sub>Ni<sub>0.2</sub>Cu<sub>0.2</sub>Mg<sub>0.2</sub>Zn<sub>0.2</sub>), электрокатализаторов выделения водорода (Ni<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Mo<sub>10</sub>Cr<sub>15</sub>Co<sub>35</sub>), реакций окисления-восстановления (AlCuNiPtMn и AlNiCuPtPdAu), окисления метанола/этанола. ВЭС могут использоваться в качестве электродов – анодов и катодов для Li-ионных и Na-ионных аккумуляторов. Синтезированный нанопористый ВЭС AlCoCrFeNi обладает высокой объемной плотностью (до 700 Ф/см<sup>3</sup>) и циклической стабильностью (>3000 циклов) и используется в суперконденсаторах. Высокоэнтропийные оксиды типа (MgNiCoCuZn)<sub>0.95</sub>Li<sub>0.05</sub>O с высокими диэлектрическими свойствами в широком частотном диапазоне могут использоваться в электронных преобразователях. Приведены примеры применения ВЭС в качестве покрытий деталей судов, эксплуатирующихся в морской воде, разнородных сварных соединений, деталей ядерных реакторов. Указаны перспективы расширения областей применения ВЭС.

**Ключевые слова:** высокоэнтропийные сплавы, применение, биомедицина, энергетика, катализаторы, магнетокалорический эффект

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 20-19-00452.

**Для цитирования:** Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Коновалов С.В., Воробьев С.В., Перегудов О.А. Применение высокоэнтропийных сплавов // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 10. С. 747–754. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-10-747-754>

Original article

## APPLICATION OF HIGH-ENTROPY ALLOYS

V. E. Gromov<sup>1</sup>, Yu. A. Shlyarova<sup>1</sup>, S. V. Konovalov<sup>2</sup>,  
S. V. Vorob'ev<sup>1</sup>, O. A. Peregudov<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup> Omsk State Technical University (11 Mira Ave., Omsk 644050, Russian Federation)

**Abstract.** From accumulated information on structure, properties, stability, and methods of manufacturing the high-entropy alloys (HEA) created early in the 21 century it follows that they possess a whole complex of useful properties that suggests their perspective application in different branches of industry. The authors have made a short review of scientific articles on analysis of possibilities of HEA application in specific science-consuming branches of the last 5 years. In biomedicine the protective coatings made of (TiZrNbHfTa)N and (TiZrNbHfTa)O HEAs possess biocompatibility, high level of mechanical properties, high wear- and corrosion resistance in physiological media, and excellent adhesion. Products made of (MoTa)<sub>x</sub>NbTiZr passed clinical tests successfully when being implanted to living muscular tissue. The developed HEAs based on rare-earth elements and metals of Fe group such as YbTbDyAlMe (Me = Fe, Co, Ni) possess magnetocaloric effect, have Curie temperature close to room one and may be used in modern refrigerator mechanisms. Changing in stoichiometric composition of CoCrFeNiTi HEAs, alloying them and performing thermal treatment, the researchers succeed in obtaining soft magnetic materials. Fields of HEA application are presented as following: catalysts

of ammonia oxidation – (PtPdRhRuCe), ammonia decomposition – (RuRhCoNiIr), oxidation of aromatic alcohols – ( $\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_{0.2}\text{Cu}_{0.2}\text{Mg}_{0.2}\text{Zn}_{0.2}$ ), electric catalysts of hydrogen extraction – ( $\text{Ni}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mo}_{10}\text{Cr}_{15}\text{Co}_{35}$ ), redox reactions (AlCuNiPtMn and AlNiCuPtPdAu), and oxidation of methanol/ethanol. HEAs can be used as electrodes – anodes and cathodes for Li-ion and Na-ion accumulators. Synthesized nanoporous HEA AlCoCrFeNi has high bulk density up to 700 F/cm<sup>3</sup> and cyclic stability (>3000 cycles) and is used in supercapacitors. High-entropy oxides such as ( $\text{MgNiCoCuZn}$ )<sub>0.95</sub>Li<sub>0.05</sub>O with high dielectric properties in a wide frequency range may be used in electronic converters. Examples of HEA application are given: as coatings of ship parts being operated in sea water, various welded joints, parts of nuclear reactors. Perspectives of widening the fields of HEA application are indicated.

**Keywords:** high-entropy alloys, application, biomedicine, power engineering, catalysts, magnetocaloric effect

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

**For citation:** Gromov V.E., Shlyarova Yu.A., Konovalov S.V., Vorob'ev S.V., Peregudov O.A. Application of high-entropy alloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 10, pp. 747–754. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-10-747-754>

## ВВЕДЕНИЕ

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) как класс новых материалов появились в начале XXI века. Они содержат до пяти – шести элементов в концентрации 5 – 35 % [1, 2]. Путем изменения элементного состава можно формировать высокий уровень таких полезных свойств, как высокотемпературная прочность, суперпарамагнетизм, сопротивление коррозии, высокая твердость (наряду с пластичностью и многими другими свойствами) [3 – 6]. Если учесть, что в природе около 80 металлов, из которых можно составить свыше 10<sup>7</sup> комбинаций пятиэлементных ВЭС, то набор полезных свойств таких ВЭС будет очень большим. Уникальные характеристики позволят значительно расширить области применения ВЭС [7]. Это, прежде всего, использование ВЭС для изготовления режущих инструментов, штампов, мишеней для магнетронного распыления, диффузионных барьеров в микроэлектронике, деталей оборудования ядерной энергетики, криогенной техники, аэрокосмической промышленности и т. п. [8 – 17]. Однако приведенные в этих работах результаты имеют, в лучшем случае, пятилетнюю давность. В последнее пятилетие идет еще более интенсивное накопление информации о структуре, стабильности, методах получения, перспективах практического применения ВЭС. Говорить о реальном глобальном практическом использовании ВЭС пока еще рано, но анализ последних литературных данных свидетельствует о положительной тенденции возможного применения ВЭС в различных наукоемких отраслях промышленности.

В настоящей работе выполнен краткий анализ работ отечественных и зарубежных исследований последних лет по изучению возможностей практического использования ВЭС.

## БИОМЕДИЦИНА

Одной из перспективных областей применения ВЭС, нитридных и карбидных покрытий на их основе является биомедицина [7]. Если основными требованиями к ВЭС являются биосовместимость и высокие механические свойства, то защитные покрытия должны

дополнительно обладать высокой химической стабильностью, износо- и коррозионной стойкостью в физиологических средах, сильной адгезией к осаждаемой поверхности. Подобными свойствами обладают покрытия (TiZrNbHfTa)N и (TiZrNbHfTa)O [18], которые не вызывают цитотоксических реакций на остеобластах. Исследования среднеэнтропийных сплавов TiZrNbMo с содержанием титана до 65 % позволили провести их успешные испытания [19].

Всестороннее изучение сплава (MoTa)<sub>x</sub>NbTiZr показало, что изделия из него обладают отличными пластическими, прочностными и антикоррозионными свойствами. Были проведены *in vivo* испытания (испытания внутри живого организма) изделий из этого сплава, имплантированных в мышечную ткань на четыре недели. Выявлено заметное пассивное поведение в буферном фосфатном растворе и мягкая, нетоксичная реакция мышечной ткани [20].

## ВЭС С ОСОБЫМИ МАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Варьирование легирования, стехиометрического состава (соотношение Co/Cr, Fe/Cr, Ni/Cr) и термической обработки (отжиг в течение 2 – 10 ч при 200 и 700 °C) ВЭС ( $\text{Co}_{35}\text{Cr}_5\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Ti}_{20}$ ,  $\text{Co}_{20}\text{Cr}_5\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{35}\text{Ti}_{20}$ ) позволяет разрабатывать магнитомягкие материалы на их основе [21, 22]. При этом ВЭС с ГЦК решеткой обладают высокой намагниченностью насыщения в отличие от сплавов с ОЦК решеткой [7], что обусловлено более высокой плотностью атомной упаковки и высоким содержанием ферромагнитных элементов (Fe, Co, Ni).

Особый интерес представляют ВЭС на основе редкоземельных элементов и металлов группы железа, типа YbTbDyAlMe (*Me* = Fe, Co, Ni), обладающие магнитокалорическим эффектом [23], который проявляется в реверсивном изменении температуры магнитного материала при изменении магнитного поля. На этом эффекте основано магнитное охлаждение. Для ВЭС переходных металлов типа  $\text{Mn}_x\text{Cr}_{0.3}\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_{0.5}\text{Al}_{0.3}$  ( $0,8 < x < 1,1$ ) с магнитокалорическим эффектом температура Кюри приближается к комнатной, что делает их исключительно привлекательными в современных рефрижераторных установках [24].

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЭС В ЭНЕРГЕТИКЕ

В обзорной работе китайских исследователей [25] проанализированы теоретические и экспериментальные результаты по структуре, свойствам, способам получения ВЭС с акцентом на их использование в областях, связанных с энергетикой. Результаты обобщены в таблице. Рассмотрим некоторые основные моменты.

### Катализ

**Разложение аммиака.** По сравнению с традиционными  $\text{Co-Mo}$  и  $\text{Ru}$  катализаторами  $\text{Co}_x\text{Mo}_y\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{10}$  ( $x + y = 70$ ) и  $\text{RuRhCoNiIr}$  катализаторы обладают более чем десятикратной эффективностью. Такие выдающиеся каталитические характеристики и высокая стабильность обусловлены синергетическим эффектом ультратонкого размера частиц, однородной дисперсии, многоэлементного состава и ГЦК структуры.

**Окисление ароматических спиртов.** Мезопористый ВЭС  $\text{Co}_{0,2}\text{Ni}_{0,2}\text{Cu}_{0,2}\text{Mg}_{0,2}\text{Zn}_{0,2}\text{O}$  обеспечивает сверхвысокую каталитическую активность аэробного окисления бензилового спирта с 98 % преобразованием, достигаемым за 2 ч.

**Реакция выделения  $\text{H}_2$  (HER).** По сравнению с двухфазными катализаторами ВЭС обладают повышенным сопротивлением коррозии. Кроме приведенных в таблице следует отметить высокоэффективный высокоэнтропийный оксид  $(\text{FeMgCoNi})\text{O}_x$  ( $x \approx 1,2$ ) со сложной структурой из смеси простой кубической решетки и шпинели.

**Реакция выделения  $\text{O}_2$  (OER).** Нанопористые катализаторы из ВЭС  $\text{AlNiCoFeMe}$  ( $\text{Me} = \text{Mo}, \text{Nb}, \text{Cr}$ ), разработанные из наносплавов  $\text{NiFe}$  или  $\text{NiCoFe}$ , обладают высокой электрохимической стойкостью.

В последние годы отмечается интенсивное изучение возможностей создания электрокатализаторов из двойных и тройных сплавов без использования благородных металлов. Однако дальнейшее использование таких электрокатализаторов ограничено из-за слабой коррозионной стойкости. Авторы работы [26] получили высокоэффективный пористый ВЭС  $\text{CoCrFeNiMo}$  методом принципиально нового микроволнового спекания: избыточный потенциал достигает 220 мВ при плотности тока 10 мА/см<sup>2</sup>. Это связано с возможностью пористой структуры обеспечивать электронный перенос. Полученные методом магнетронного распыления высокоэнтропийные оксидные пленки  $(\text{FeCrCoNiAl}_{0,1})\text{O}_x$  обеспечивали избыточный потенциал 381 мВ и электролизную стабильность в течение 120 ч в щелочном растворе при плотности тока 10 мА/см<sup>2</sup> [27].

**Реакция окисления-восстановления (ORR).** Нанопористые катализаторы на основе платины ( $\text{AlCuNiPtMn}$  и  $\text{AlNiCuPtPdAu}$ ) обладают высокотемпературной стабильностью (до 600 °С) и окислительно-восстанови-

тельной активностью, до десяти раз превышающей характеристики  $\text{Pt/C}$  катализаторов.

### Реакция окисления метанола/этанола.

Синтезированные ВЭС ( $\text{Ir}_{0,19}\text{Os}_{0,22}\text{Re}_{0,21}\text{Rh}_{0,20}\text{Ru}_{0,19}$  и  $\text{Ir}_{0,26}\text{Os}_{0,05}\text{Pt}_{0,31}\text{Rh}_{0,23}\text{Ru}_{0,15}$ ) обладают исключительной активностью и демонстрируют высокую термическую стабильность при 1500 К.

### Хранение энергии

**Электродные материалы для литий- и натрий-ионных аккумуляторов.** Для литий-ионных аккумуляторов материалы на основе высокоэнтропийных оксидов могут применяться в качестве анодов и катодов. Ячейка из анода  $(\text{Co}_{0,2}\text{Cu}_{0,2}\text{Mg}_{0,2}\text{Ni}_{0,2}\text{Zn}_{0,2})\text{O}$  и  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$  катода обеспечивала начальную емкость 446 (мА·ч)/г и 256 (мА·ч)/г после 100 циклов. Для натрий-ионных аккумуляторов отмечено 83 % сохранения емкости после 500 циклов.

**Суперконденсаторы.** Синтезированный нанопористый ВЭС  $\text{AlCoCrFeNi}$ , используемый в качестве электрода, обладает высокими емкостью (700 Ф/см<sup>3</sup>) и циклической стабильностью (>3000 циклов).

**Диэлектрические материалы.** За счет поляризации во внешнем электрическом поле высокоэнтропийные диэлектрики могут применяться в конденсаторах, мощных электронных преобразователях. Высокоэнтропийные оксиды типа  $(\text{MgNiCoCuZn})_{0,95}\text{Li}_{0,05}\text{O}$  обладают высокими диэлектрическими свойствами в широком (100 Гц – 2,3 МГц) диапазоне частот.

Одной из перспективных областей применения ВЭС является судостроительная отрасль [28]. Клапаны, насосы, валы, винты и другие механизмы, эксплуатирующиеся в морской воде, подвержены коррозии и износу. В качестве защитных покрытий используются полимерные и керамические материалы, которые не лишены недостатков, в частности, керамические покрытия хрупкие, а полимерные имеют нестабильные размеры. Разработанное и апробированное покрытие из ВЭС  $\text{AlCrFeNiW}_{0,2}\text{Ti}_{0,5}$  обладает высокой твердостью (~692 HV) и повышенными трибологическими свойствами [28]. Перспективы применения в аэрокосмической отрасли имеют ВЭС  $\text{AlCoCrFeNiCu}$  и  $\text{AlCoCrFeNiTi}$ , обладающие повышенными трибологическими свойствами при высоких температурах [29].

В широкий диапазон областей использования ВЭС попадает и сварочное производство. В современных ядерных реакторах имеется значительное количество сварных соединений из разнородных материалов. К ним предъявляются высокие требования высокотемпературной (до 1025 К) структурной стабильности, антикоррозионных и механических свойств. По мнению авторов работы [30] решение проблемы возможно при использовании соединений из ВЭС Cantor ( $\text{CoCrFeMnNi}$ ) и дуплексной нержавеющей стали, полученных лазерной сваркой. Предприняты попытки создания высокоэнтро-

Области применения ВЭС в энергетике [25]

Scopes of HEA application in power engineering [25]

Применение	Состав	Структура
Окисление аммиака	PtPdRhRuCe, PtCoNiFeCuAu, PtPdCoNiCuAu, PtPdCoNiFeCuAuSn	ГЦК
Разложение аммиака	$\text{Co}_x\text{Mo}_y\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{10}$ ( $x + y = 70$ )	ГЦК
Реакция выделения $\text{H}_2$ (HER)	CoFeLaNiPt	ГЦК
	PtAuPdRhRu	ГЦК
	IrPdPtRhRu	ГЦК
	AlMoCuPdAu	ГЦК
	FeCoPdIrPt	ГЦК
	$\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{35}\text{Ni}_{20}\text{Mo}_{10}$	ГЦК
	$(\text{FeMnCoNi})_x\text{O}$	Кубическая + шпинель
Реакция выделения $\text{O}_2$ (OER)	$(\text{CrMnFeCoNi})_x\text{P}$	Гексагональная
	CrMnFeCoNi	ГЦК
	AlMoCuPdAu	ГЦК
	CoFeLaNiPt	ГЦК
	AlMoCoIrMo	ГЦК
	$(\text{FeMnCoNi})\text{O}_x$ ( $x \sim 1,2$ )	Кубическая + шпинель
	$\text{FeMnCoNi} + (\text{FeMnCoNi})\text{O}_x$	ГЦК
	$(\text{CrMnFeCoNi})_x\text{P}$	Гексагональная
	$\text{K}(\text{MgMnFeCoNi})\text{F}_3$ , $\text{K}(\text{MgMnCoNiZn})\text{F}_3$	Перовскит
Реакция окисления-восстановления (ORR)	CrMnFeCoNiNb, CrMnFeCoNiMo	ГЦК
	AlNiCuPtPdAu	ГЦК
	AlCuNiPtMn	ГЦК
Реакция окисления метанола	$\text{Ir}_{0,19}\text{Os}_{0,22}\text{Re}_{0,21}\text{Rh}_{0,20}\text{Ru}_{0,19}$	ГПУ
	AlMoCuPdAu	ГЦК
Реакция окисления этанола	RuRhPdOsIrPt	ГЦК
Окисление воды	$(\text{Co,Cu,Fe,Mn,Ni})_3\text{O}_4$	Шпинель
Окисление ароматических спиртов	$(\text{Mg}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Ni}_{0,2}\text{Cu}_{0,2}\text{Zn}_{0,2})\text{O}$	Кубическая
Литий-ионный аккумулятор	$(\text{Co}_{0,2}\text{Cu}_{0,2}\text{Mg}_{0,2}\text{Ni}_{0,2}\text{Zn}_{0,2})\text{O}$	Кубическая
	$(\text{MgCoNiZn})_{1-x}\text{Li}_x\text{O}$ ( $x = 0,05; 0,15; 0,25; 0,35$ )	Кубическая
	$(\text{Mg}_{0,2}\text{Ti}_{0,2}\text{Zn}_{0,2}\text{Cu}_{0,2}\text{Fe}_{0,2})_3\text{O}_4$	Шпинель
	$(\text{Mg, Ti, Zn, Cu, Fe})_3\text{O}_4$	Шпинель
	$[(\text{Bi, Na})_{1/5}(\text{La, Li})_{1/5}(\text{Ce, K})_{1/5}\text{Ca}_{1/5}\text{Sr}_{1/5}]\text{TiO}_3$	Перовскит
Натрий-ионный аккумулятор	$\text{NaNi}_{0,12}\text{Cu}_{0,12}\text{Mg}_{0,12}\text{Fe}_{0,15}\text{Co}_{0,15}\text{Mn}_{0,1}\text{Ti}_{0,1}\text{Sn}_{0,1}\text{Sb}_{0,04}\text{O}_2$	ОЗ
Суперконденсаторы	FeNiCoMnMg	ГЦК
	AlCoCrFeNi	ГЦК
	$(\text{TiNbTaZrHf})\text{C}$	ГЦК
	$(\text{CrMoVZrNb})\text{N}$	ГЦК
Сильный диэлектрик	$(\text{Mg,Co,Ni,Cu,Zn})_{1-x}\text{Li}_x\text{O}$	Кубическая



пийных тугоплавких сверхпроводников [31, 32], сверхпроводников на основе редкоземельных элементов [33]. Другие области возможного использования ВЭС обобщены в монографиях и обзорах [2, 23, 34 – 36]. Есть основания считать, что области применения ВЭС будут расширяться по мере разработки и создания новых составов и изучения их свойств.

## Выводы

Выполнен краткий обзор работ отечественных и зарубежных исследователей за последние пять лет

по применению высокоэнтروпийных сплавов в различных наукоемких отраслях. Среди перспективных областей применения приведены: биомедицина; создание материалов с особыми магнитными свойствами, в том числе обладающих магнитокалорическим эффектом; судостроение; аэрокосмическая отрасль; сварочное производство; создание сверхпроводников. Подробно проанализированы приложения ВЭС в отраслях, связанных с энергетикой. Сделан прогноз расширения областей использования ВЭС по мере создания новых составов сплавов и исследования их свойств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. 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. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
2. Высокоэнтропийные сплавы / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, К.А. Осинцев, Ю.А. Рубанникова, О.А. Перегудов, А.П. Семин. Новокузнецк: Полиграфист, 2021. 179 с.
3. Huang Y.S., Chen L., Lui H.W., Cai M.H., Yeh J.W. Microstructure, hardness, resistivity and thermal stability of sputtered oxide films of AlCoCrCu<sub>0.5</sub>NiFe high-entropy alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2007. Vol. 457. No. 1–2. P. 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.001>
4. Tung C.C., Yeh J.W., Shun T.T., Chen S.K., Huang Y.S., Chen H.C. On the elemental effect of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy system // *Materials Letters*. 2007. Vol. 61. No. 1. P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.03.140>
5. Zhou Y.J., Zhang Y., Kim T.N., Chen G.L. Microstructure characterizations and strengthening mechanism of multi-principal component AlCoCrFeNiTi<sub>0.5</sub> solid solution alloy with excellent mechanical properties // *Materials Letters*. 2008. Vol. 62. No. 17–18. P. 2673–2676. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.01.011>
6. Chang H.W., Huang P.K., Yeh J.W., Davison A., Tsau C.H., Yang C.C. Influence of substrate bias, deposition temperature and post-deposition annealing on the structure and properties of multi-principal-component (AlCrMoSiTi)N coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2008. Vol. 202. No. 14. P. 3360–3366. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.12.014>
7. Погребняк А.Д., Багдасарян А.А., Якущенко И.В., Береснев В.М. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и нитридных покрытий на их основе // *Успехи химии*. 2014. Т. 83. № 11. P. 1027–1061. <https://doi.org/10.1070/RCR4407>
8. Huang P.K., Yeh J.W., Shun T.T., Chen S.K. Multi-Principal-Element Alloys with Improved Oxidation and Wear Resistance for Thermal Spray Coating // *Advanced Engineering Materials*. 2004. Vol. 6. No. 1–2. P. 74–78. <https://doi.org/10.1002/adem.200300507>
9. Hsu C.Y., Yeh J.W., Chen S.K., Shun T.T. Wear resistance and high-temperature compression strength of FCC CuCoNiCrAl<sub>0.5</sub>Fe alloy with boron addition // *Metallurgical and Material Transaction: A*. 2004. Vol. 35. P. 1465–1469. <https://doi.org/10.1007/s11661-004-0254-x>
10. Tsai M.H., Yeh J.W., Gan J.Y. Diffusion barrier properties of AlMoNbSiTaTiVZr high-entropy alloy layer between copper and silicon // *Thin Solid Films*. 2008. Vol. 516. No. 16. P. 5527–5530. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.07.109>
11. Zhu G., Liu Y., Ye J. Early high-temperature oxidation behaviour of Ti(C, N)-based cermets with multi-component AlCoCrFeNi high-entropy alloy binder // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2014. Vol. 44. P. 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2014.01.005>
1. 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. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
2. Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Rubannikova Yu.A., Peregudov O.A., Semin A.P. *High-Entropy Alloys*. Novokuznetsk: Poligrafist, 2021, 179 p. (In Russ.).
3. Huang Y.S., Chen L., Lui H.W., Cai M.H., Yeh J.W. Microstructure, hardness, resistivity and thermal stability of sputtered oxide films of AlCoCrCu<sub>0.5</sub>NiFe high-entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2007, vol. 457, no. 1–2, pp. 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.001>
4. Tung C.C., Yeh J.W., Shun T.T., Chen S.K., Huang Y.S., Chen H.C. On the elemental effect of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy system. *Materials Letters*. 2007, vol. 61, no. 1, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.03.140>
5. Zhou Y.J., Zhang Y., Kim T.N., Chen G.L. Microstructure characterizations and strengthening mechanism of multi-principal component AlCoCrFeNiTi<sub>0.5</sub> solid solution alloy with excellent mechanical properties. *Materials Letters*. 2008, vol. 62, no. 17–18, pp. 2673–2676. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.01.011>
6. Chang H.W., Huang P.K., Yeh J.W., Davison A., Tsau C.H., Yang C.C. Influence of substrate bias, deposition temperature and post-deposition annealing on the structure and properties of multi-principal-component (AlCrMoSiTi)N coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2008, vol. 202, no. 14, pp. 3360–3366. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.12.014>
7. Pogrebnyak A.D., Bagdasaryan A.A., Yakushchenko I.V., Beresnev V.M. The structure and properties of high-entropy alloys and nitride coatings based on them. *Russian Chemical Reviews*. 2014, vol. 83, no. 11, pp. 1027–1061. (In Russ.). <https://doi.org/10.1070/RCR4407>
8. Huang P.K., Yeh J.W., Shun T.T., Chen S.K. Multi-principal-element alloys with improved oxidation and wear resistance for thermal spray coating. *Advanced Engineering Materials*. 2004, vol. 6, no. 1–2, pp. 74–78. <https://doi.org/10.1002/adem.200300507>
9. Hsu C.Y., Yeh J.W., Chen S.K., Shun T.T. Wear resistance and high-temperature compression strength of FCC CuCoNiCrAl<sub>0.5</sub>Fe alloy with boron addition. *Metallurgical and Material Transaction: A*. 2004, vol. 35, pp. 1465–1469. <https://doi.org/10.1007/s11661-004-0254-x>
10. Tsai M.H., Yeh J.W., Gan J.Y. Diffusion barrier properties of AlMoNbSiTaTiVZr high-entropy alloy layer between copper and silicon. *Thin Solid Films*. 2008, vol. 516, no. 16, pp. 5527–5530. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.07.109>
11. Zhu G., Liu Y., Ye J. Early high-temperature oxidation behaviour of Ti(C, N)-based cermets with multi-component AlCoCrFeNi high-entropy alloy binder. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2014, vol. 44, pp. 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2014.01.005>

12. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications // *Science*. 2014. Vol. 345. No. 6201. P. 1153–1158. <https://doi.org/10.1126/science.1254581>
13. Xia S.Q., Yang X., Yang T.F., Liu S., Zhang Y. Irradiation resistance in  $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$  high entropy alloys // *JOM*. 2015. Vol. 67. P. 2340–2344. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1568-4>
14. Chuang M.-H., Tsai M.-H., Wang W.-R., Lin S.-J., Yeh J.-W. Microstructure and wear behavior of  $\text{Al}_x\text{Co}_{1.5}\text{CrFeNi}_{1.5}\text{Ti}_y$  high-entropy alloys // *Acta Materialia*. 2011. Vol. 59. No. 16. P. 6308–6317. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.06.041>
15. Senkov O.N., Wilks G.B., Miracle D.B., Chuang C.P., Liaw P.K. Refractory high-entropy alloys // *Intermetallics*. 2010. Vol. 18. No. 9. P. 1758–1765. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2010.05.014>
16. Zou Y., Maiti S., Steurer W., Spolenak R. Size-dependent plasticity in an  $\text{Nb}_{25}\text{Mo}_{25}\text{Ta}_{25}\text{W}_{25}$  refractory high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2014. Vol. 65. P. 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.11.049>
17. Maiti S., Steurer W. Structural-disorder and its effect on mechanical properties in single-phase  $\text{TaNbHfZr}$  high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 106. P. 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.018>
18. Braic V., Balaceanu M., Braic M., Vladescu A., Panseri S., Russo A. Characterization of multi-principal-element ( $\text{TiZrNbHfTa}$ )N and ( $\text{TiZrNbHfTa}$ )C coatings for biomedical applications // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2012. Vol. 10. P. 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.02.020>
19. Wong K.-K., Hsu H.-C., Wu S.-C., Ho W.-F. Structure and properties of Ti-rich Ti–Zr–Nb–Mo medium-entropy alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 868. Article 159137. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159137>
20. Akmal M., Hussain A., Afzal M., Lee Y.I., Ryu H.J. Systematic study of ( $\text{MoTa}$ ) $_x\text{NbTiZr}$  medium- and high-entropy alloys for biomedical implants- In vivo biocompatibility examination // *Journal of Materials Science and Technology*. 2021. Vol. 78. P. 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.10.049>
21. Zuo T., Gao M.C., Ouyang L., Yang X., Cheng Y., Feng R., Chen S., Liaw P.K., Hawk J.A., Zhang Y. Tailoring magnetic behavior of  $\text{CoFeMnNiX}$  ( $X = \text{Al, Cr, Ga, and Sn}$ ) high entropy alloys by metal doping // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 130. P. 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.03.013>
22. Mishra R.K., Shahi R. A systematic approach for enhancing magnetic properties of  $\text{CoCrFeNiTi}$ -based high entropy alloys via stoichiometric variation and annealing // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 851. Article 153534. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153534>
23. Zhang Y. *High-Entropy Materials. A brief introduction*. Singapore: Springer Nature, 2019. 159 p.
24. Dong Z., Huang S., Ström V., Chai G., Varga L.K., Eriksson O., Vitos L.  $\text{Mn}_x\text{Cr}_{0.3}\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_{0.5}\text{Al}_{0.3}$  high entropy alloys for magnetocaloric refrigeration near room temperature // *Journal of Materials Science and Technology*. 2021. Vol. 79. P. 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.10.071>
25. Fu M., Ma X., Zhao K., Li X., Su D. High-entropy materials for energy-related applications // *Science*. 2021. Vol. 24. No. 3. Article 102177. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102177>
26. Tang J., Xu J.L., Ye Z.G., Li X.B., Luo J.M. Microwave sintered porous  $\text{CoCrFeNiMo}$  high entropy alloy as an efficient electrocatalyst for alkaline oxygen evolution reaction // *Journal of Materials Science and Technology*. 2021. Vol. 79. P. 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.10.079>
27. Zhao S., Wu H., Yin R., Wang X., Zhong H., Fu Q., Wan W., Cheng T., Shi Y., Cai G., Jiang C., Ren F. Preparation and electrocatalytic properties of ( $\text{FeCrCoNiAl}_{0.1}$ ) $\text{O}_x$  high-entropy oxide and  $\text{NiCo}-(\text{FeCrCoNiAl}_{0.1})\text{O}_x$  heterojunction films // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 868. Article 159108. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159108>
12. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*. 2014, vol. 345, no. 6201, pp. 1153–1158. <https://doi.org/10.1126/science.1254581>
13. Xia S.Q., Yang X., Yang T.F., Liu S., Zhang Y. Irradiation resistance in  $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$  high entropy alloys. *JOM*. 2015, vol. 67, pp. 2340–2344. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1568-4>
14. Chuang M.-H., Tsai M.-H., Wang W.-R., Lin S.-J., Yeh J.-W. Microstructure and wear behavior of  $\text{Al}_x\text{Co}_{1.5}\text{CrFeNi}_{1.5}\text{Ti}_y$  high-entropy alloys. *Acta Materialia*. 2011, vol. 59, no. 16, pp. 6308–6317. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.06.041>
15. Senkov O.N., Wilks G.B., Miracle D.B., Chuang C.P., Liaw P.K. Refractory high-entropy alloys. *Intermetallics*. 2010, vol. 18, no. 9, pp. 1758–1765. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2010.05.014>
16. Zou Y., Maiti S., Steurer W., Spolenak R. Size-dependent plasticity in an  $\text{Nb}_{25}\text{Mo}_{25}\text{Ta}_{25}\text{W}_{25}$  refractory high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2014, vol. 65, pp. 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.11.049>
17. Maiti S., Steurer W. Structural-disorder and its effect on mechanical properties in single-phase  $\text{TaNbHfZr}$  high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2016, vol. 106, pp. 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.018>
18. Braic V., Balaceanu M., Braic M., Vladescu A., Panseri S., Russo A. Characterization of multi-principal-element ( $\text{TiZrNbHfTa}$ )N and ( $\text{TiZrNbHfTa}$ )C coatings for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2012, vol. 10, pp. 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.02.020>
19. Wong K.-K., Hsu H.-C., Wu S.-C., Ho W.-F. Structure and properties of Ti-rich Ti–Zr–Nb–Mo medium-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021, vol. 868, article 159137. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159137>
20. Akmal M., Hussain A., Afzal M., Lee Y.I., Ryu H.J. Systematic study of ( $\text{MoTa}$ ) $_x\text{NbTiZr}$  medium- and high-entropy alloys for biomedical implants – In vivo biocompatibility examination. *Journal of Materials Science and Technology*. 2021, vol. 78, pp. 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.10.049>
21. Zuo T., Gao M.C., Ouyang L., Yang X., Cheng Y., Feng R., Chen S., Liaw P.K., Hawk J.A., Zhang Y. Tailoring magnetic behavior of  $\text{CoFeMnNiX}$  ( $X = \text{Al, Cr, Ga, and Sn}$ ) high entropy alloys by metal doping. *Acta Materialia*. 2017, vol. 130, pp. 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.03.013>
22. Mishra R.K., Shahi R. A systematic approach for enhancing magnetic properties of  $\text{CoCrFeNiTi}$ -based high entropy alloys via stoichiometric variation and annealing. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020, vol. 851, article 153534. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153534>
23. Zhang Y. *High-Entropy Materials. A brief introduction*. Singapore: Springer Nature, 2019, 159 p.
24. Dong Z., Huang S., Ström V., Chai G., Varga L.K., Eriksson O., Vitos L.  $\text{Mn}_x\text{Cr}_{0.3}\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_{0.5}\text{Al}_{0.3}$  high entropy alloys for magnetocaloric refrigeration near room temperature. *Journal of Materials Science and Technology*. 2021, vol. 79, pp. 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.10.071>
25. Fu M., Ma X., Zhao K., Li X., Su D. High-entropy materials for energy-related applications. *Science*. 2021, vol. 24, no. 3, article 102177. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102177>
26. Tang J., Xu J.L., Ye Z.G., Li X.B., Luo J.M. Microwave sintered porous  $\text{CoCrFeNiMo}$  high entropy alloy as an efficient electrocatalyst for alkaline oxygen evolution reaction. *Journal of Materials Science and Technology*. 2021, vol. 79, pp. 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.10.079>
27. Zhao S., Wu H., Yin R., Wang X., Zhong H., Fu Q., Wan W., Cheng T., Shi Y., Cai G., Jiang C., Ren F. Preparation and electrocatalytic properties of ( $\text{FeCrCoNiAl}_{0.1}$ ) $\text{O}_x$  high-entropy oxide and  $\text{NiCo}-(\text{FeCrCoNiAl}_{0.1})\text{O}_x$  heterojunction films. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021, vol. 868, article 159108. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159108>

28. Liang H., Qiao D., Miao J., Cao Z., Jiang H., Wang T. Anomalous microstructure and tribological evaluation of AlCrFeNiW<sub>0.2</sub>Ti<sub>0.5</sub> high-entropy alloy coating manufactured by laser cladding in seawater // *Journal of Materials Science and Technology*. 2021. Vol. 85. P. 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.12.050>
29. Dada M., Popoola P., Mathe N., Pityana S., Adeosun S., Aramide O. The comparative study of the microstructural and corrosion behaviour of laser-deposited high entropy alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 866. Article 158777. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158777>
30. Adomako N.K., Shin G., Park N., Park K., Kim J.H. Laser dissimilar welding of CoCrFeMnNi-high entropy alloy and duplex stainless steel // *Journal of Materials Science and Technology*. 2021. Vol. 85. P. 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.02.003>
31. Marik S., Varghese M., Sajilesh K.P., Singh D., Singh R.P. Superconductivity in equimolar Nb–Re–Hf–Zr–Ti high entropy alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 769. P. 1059–1063. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.039>
32. Marik S., Motla K., Varghese M., Sajilesh K.P., Singh D., Breard Y., Boullay P., Singh R.P. Superconductivity in a new hexagonal high-entropy alloy // *Physical Review Materials*. 2019. Vol. 3. No. 6. Article 060602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.060602>
33. Sogabe R., Goto Y., Mizuguchi Y. Superconductivity in EO<sub>0.5</sub>F<sub>0.5</sub>BiS<sub>2</sub> with high-entropy-alloy-type blocking layers // *Applied Physics Express*. 2018. Vol. 11. Article 053102. <https://doi.org/10.7567/APEX.11.053102>
34. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтروпийных сплавов // *Физика металлов и металловедение*. 2020. Т. 121. № 8. Р. 807–841. <https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>
35. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. *High-Entropy Alloys*. 2<sup>nd</sup> edition. Amsterdam: Elsevier, 2019. 374 p.
36. Громов В.Е., Рубанникова Ю.А., Коновалов С.В., Осинцев К.А., Воробьев С.В. Формирование улучшенных механических свойств высокоэнтропийного сплава Cantor // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021. Т. 64. № 8. С. 599–605. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-599-605>
28. Liang H., Qiao D., Miao J., Cao Z., Jiang H., Wang T. Anomalous microstructure and tribological evaluation of AlCrFeNiW<sub>0.2</sub>Ti<sub>0.5</sub> high-entropy alloy coating manufactured by laser cladding in seawater. *Journal of Materials Science and Technology*. 2021, vol. 85, pp. 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.12.050>
29. Dada M., Popoola P., Mathe N., Pityana S., Adeosun S., Aramide O. The comparative study of the microstructural and corrosion behaviour of laser-deposited high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021, vol. 866, article 158777. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158777>
30. Adomako N.K., Shin G., Park N., Park K., Kim J.H. Laser dissimilar welding of CoCrFeMnNi-high entropy alloy and duplex stainless steel. *Journal of Materials Science and Technology*. 2021, vol. 85, pp. 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.02.003>
31. Marik S., Varghese M., Sajilesh K.P., Singh D., Singh R.P. Superconductivity in equimolar Nb–Re–Hf–Zr–Ti high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018, vol. 769, pp. 1059–1063. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.039>
32. Marik S., Motla K., Varghese M., Sajilesh K.P., Singh D., Breard Y., Boullay P., Singh R.P. Superconductivity in a new hexagonal high-entropy alloy. *Physical Review Materials*. 2019, vol. 3, no. 6, article 060602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.060602>
33. Sogabe R., Goto Y., Mizuguchi Y. Superconductivity in EO<sub>0.5</sub>F<sub>0.5</sub>BiS<sub>2</sub> with high-entropy-alloy-type blocking layers. *Applied Physics Express*. 2018, vol. 11, article 053102. <https://doi.org/10.7567/APEX.11.053102>
34. Rogachev A.S. Structure, stability and properties of high-entropy alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 2020, vol. 121, no. 8, pp. 733–764. <https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>
35. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. *High-Entropy Alloys*. Second edition. Amsterdam: Elsevier, 2019, 374 p.
36. Gromov V.E., Rubannikova Yu.A., Kononov S.V., Osintsev K.A., Vorob'ev S.V. Generation of increased mechanical properties of Cantor high-entropy alloy. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 599–605. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-599-605>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Виктор Евгеньевич Громов**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0002-5147-5343  
**E-mail:** gromov@physics.sibsiu.ru

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

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

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

**Перегудов Олег Александрович**, к.т.н., помощник ректора по молодежной политике, Омский государственный технический университет  
**ORCID:** 0000-0001-5154-5498  
**E-mail:** olegomgtu@mail.ru

**Viktor E. Gromov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0002-5147-5343  
**E-mail:** gromov@physics.sibsiu.ru

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

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

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

**Oleg A. Peregudov**, Cand. Sci. (Eng.), Assistant to the Rector for Youth Policy, Omsk State Technical University  
**ORCID:** 0000-0001-5154-5498  
**E-mail:** olegomgtu@mail.ru

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Громов В.Е.** – концепция статьи, выбор областей применения высокоэнтропийных сплавов, написание первого варианта статьи.

**Шлярова Ю.А.** – подбор и анализ обзорных статей и монографий, содержащих сведения о последних применениях ВЭС в наукоемких областях.

**Коновалов С.В.** – анализ данных по применению ВЭС в биомедицине и созданию магнитных материалов.

**Воробьев С.В.** – анализ публикаций по применению ВЭС в энергетике, судостроении, сварных соединений ядерных реакторов.

**Перегудов О.А.** – анализ работ отечественных и зарубежных исследователей по проблеме применения ВЭС в энергетике, написание статьи.

Поступила в редакцию 18.05.2021

После доработки 28.05.2021

Принята к публикации 23.08.2021

Received 18.05.2021

Revised 28.05.2021

Accepted 23.08.2021