

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 536.425:539.25:539.351

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.005

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ

Виктор Евгеньевич Громов^{1†}, Юрий Федорович Иванов², Александр Петрович Семин³,
Сергей Владимирович Боровский⁴, Елизавета Алексеевна Петрикова⁵,
Пейлей Чжан⁶, Анна Александровна Серебрякова⁷

^{1, 3, 4, 7} Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия

^{2, 5} Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия

⁶ Шанхайский университет инженерных наук, ул. Лунтэн, 333, 201620, Сунцзян, Шанхай, КНР

¹ gromov@physics.sibsiu.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

² yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

³ syomin53@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3989-7420>

⁴ sbnk@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8860-8118>

⁵ elizmarkova@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-1959-1459>

⁶ peilei@sues.edu.cn, <https://orcid.org/0000-0002-2342-5832>

⁷ aserebrakova87@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3979-7777>

Аннотация. Сформулирована одна из основных задач современного физического материаловедения по разработке и исследованию высокоэнтропийных сплавов последнего поколения. Приведен краткий обзор публикаций последних лет по перспективным направлениям создания и применения высокоэнтропийных сплавов. Выделен комплекс высоких эксплуатационных характеристик, предъявляемый к высокоэнтропийным сплавам для применения в современных наукоемких отраслях промышленности: износостойкость, прочность и ударная вязкость, химическая, радиационная и коррозионная стойкость, низкая плотность, сверхпластичность и сверхпроводимость, высокая и низкая теплопроводимость, сопротивление диффузии, низкий температурный коэффициент сопротивления, экологичность и т.п. Указаны области перспективных применений высокоэнтропийных сплавов в ядерных реакторах, аэрокосмических двигателях, газо и нефтепроводах, морских сооружениях, компьютерах и электронных устройствах. Отмечено, что многие высокоэнтропийные сплавы могут быть использованы в продукции двойного назначения. В качестве примеров рассмотрено предложение по созданию тонкопленочных высокорезистивных материалов с низким температурным коэффициентом сопротивления методом спиннингования. Получена лента из высокоэнтропийного сплава Кантора неэквивалентного состава и изучены ее свойства. Высказано и обосновано предположение о дальнейшем развитии высокоэнтропийных сплавов.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, использование, свойства, наукоемкие отрасли, спиннингование.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ проект №23-29-00145.

Для цитирования: Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Семин А.П., Боровский С.В., Петрикова Е.А., Чжан П., Серебрякова А.А. Перспективные направления создания и использования высокоэнтропийных сплавов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 3. С. 315–324. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.005.

Original article

PROMISING DIRECTIONS FOR THE CREATION AND USE OF HIGH-ENTROPY ALLOYS

Viktor E. Gromov^{1†}, Yurii F. Ivanov², Alexander P. Semin³, Sergey V. Borovsky⁴,
Elisaveta A. Petrikova⁵, Peilei Zhang⁶, Anna A. Serebryakova⁷^{1,3,4,7} Siberian State Industrial University, Kirov Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia^{2,5} Institute of High Current Electronics SB RAS, Academicheskii Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia⁶ Shanghai University of Engineering Science, 333 Longteng Rd, Songjiang, Shanghai, 201620, China¹ gromov@physics.sibsiu.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>² yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>³ syomin53@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3989-7420>⁴ sbnk@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8860-8118>⁵ elizmarkova@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-1959-1459>⁶ peilei@sues.edu.cn, <https://orcid.org/0000-0002-2342-5832>⁷ aserebrakova87@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3979-7777>

Abstract. One of the main tasks of modern physical materials science is formulated to develop and study high-entropy alloys of the latest generation. A brief review of recent publications on promising areas of creation and application of high-entropy alloys is given. A set of high performance characteristics is identified for high-entropy alloys for use in modern science-intensive industries: wear resistance, strength and impact strength, chemical, radiation and corrosion resistance, low density, superplasticity and superconductivity, high and low thermal conductivity, diffusion resistance, low temperature coefficient resistance, environmental friendliness, etc. The areas of promising applications of high-entropy alloys in nuclear reactors, aerospace engines, gas and oil pipelines, offshore structures, computers and electronic devices are indicated. It is noted that many high-entropy alloys can be used in dual-use products. As examples, a proposal for the creation of thin-film highly resistive materials with a low temperature coefficient of resistance by the spinning method is considered. A tape made of a high-entropy Kantor alloy of non-equiatomic composition has been obtained and its properties have been studied. An assumption about the further development of high-entropy alloys has been made and substantiated.

Keywords: high-entropy alloys, use, properties, science-intensive industries, spinning.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation grant project No. 23-29-00145.

For citation: Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Semin A.P., Borovsky S.V., Petrikova E.A., Zhang P., Serebryakova A.A. (2024). Promising directions for the creation and use of high-entropy alloys. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(3), 315–324. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.005.

Введение

Одной из фундаментальных и практически ориентированных задач современного материаловедения является разработка физических основ создания новых металлических материалов и технологий их получения с комплексом необходимых физико-механических и эксплуатационных характеристик. В начале XXI века появились первые работы по созданию и комплексному исследованию новых, так называемых высокоэнтروпийных сплавов (ВЭС), включающих до 5 - 6 основных элементов, каждый в большой концентрации (например, от 5 до 35 %) [1]. Данные материалы наряду с характеристиками, типичными для металлических сплавов, обладают уникальными и необычными

свойствами, присущими, например, металлокерамике.

Многокомпонентные сплавы интересны тем, что они могут быть основой для других композиций, которые будут обладать лучшими свойствами, чем какие-то другие сплава, особенно основанные на одном элементе. В отдельную группу можно выделить металлические стекла (МС) на основе высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) из-за того, что этим материалам (МС ВЭС) присущи замечательные свойства обеих составляющих – высокая твердость и эластичность МС и высокая пластичность при растяжении ВЭС [1]. Поэтому формирование, кристаллизация и кинетика таких материалов в настоящее время является предметом пристального изучения.

Предшественниками ВЭС можно считать объемные аморфные сплавы (bulk amorphous alloys), так называемые металлические стекла [2-3]. В этих материалах также может содержаться большое число компонентов в сопоставимых концентрациях, а при кристаллизации из расплава они образуют одну фазу. Но эта фаза является аморфной и метастабильной, существующей только благодаря тому, что при быстром охлаждении атомы не успевают сформировать кристаллическую структуру и “застывают” в разупорядоченном состоянии, когда их подвижность резко снижается вследствие снижения температуры.

Вследствие различий в размерах атомов разных металлов, кристаллическая решетка ВЭС оказывается сильно искаженной, поэтому структуру таких фаз можно рассматривать как промежуточную между стабильными кристаллическими фазами с относительно небольшой равновесной концентрацией дефектов, включая примесные атомы, и метастабильными металлическими стеклами, в которых дальний порядок вовсе отсутствует. Вследствие особенностей структуры, ВЭС характеризуются малыми коэффициентами диффузии, коррозионной стойкостью, повышенной пластичностью при низких температурах и другими особыми свойствами, которые могут быть весьма полезны для многих перспективных материалов и технологий [2].

За последние два десятилетия по теме высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) опубликованы около 10000 статей (по базам Scopus и Web of science), многочисленные обзоры [4-12], монографии [13-16].

Цель настоящей работы – анализ последних публикаций и оценка наиболее перспективных направлений создания и применения ленточных стекол из ВЭС в различных наукоемких отраслях.

Результаты и их обсуждение

Как уже отмечалось в [12-14], одной из самых привлекательных особенностей ВЭС является высокая прочность и пластичность при пониженных и даже криогенных температурах. Сообщается также о высокой вязкости разрушения ВЭС при низких температурах, например, $232 \text{ МПа м}^{1/2}$ при 77 К. Совокупность этих свойств делает ВЭС весьма перспективными материалами для использования в условиях Арктики [2, 17].

Исследования магнитных свойств, проводимые для ВЭС на основе ферромагнитных металлов, показывают перспективность разработки магнитомягких материалов на их основе [2], причем магнитными свойствами можно управлять с помощью легирования, варьирования стехиометрии и отжига [18-21]. Получены парамагнитные ВЭС CuCrFeTiNi с небольшой долей ферромагнитной фазы. Значительный интерес представляют ВЭС на основе редкоземельных элементов и металла группы железа, например, GdT_bDyAlM (M = Fe, Co, Ni), в которых обнаружен магнитокалорический эффект [14].

Отмеченные выше достижения использования ВЭС не дают оснований утверждать о ближайших перспективах замены традиционных сплавов в каких-либо отраслях промышленности. Для этого необходима разработка новых составов ВЭС, исследование их свойств применительно к конкретным условиям практического применения. Выявленные за последние 2 десятилетия тенденции в этой области говорят о том, что опережающее развитие этого класса материалов будет только усиливаться. Пока же идет накопление и осмысление большого объема информации [15, 16]. Разработка составов ВЭС и их изучение должны сопровождаться созданием новых технологий и процессов получения уникальных сплавов.

Кроме многочисленных способов, приведенных в [15, 16], они должны предусматривать термомеханическую обработку, высокоскоростную кристаллизацию, сверхпластичное формование распылением, равноканальную угловую экструзию и другие виды интенсивной пластической деформации, сварку трением с перемешиванием, а также их комбинации [13]. При этом необходимо принимать во внимание технологичность процессов, доступность сырья и возможность вторичной переработки. С коммерческой и инженерной точек зрения кроме высокого уровня свойств основными соображениями должны быть стоимостные критерии готовых изделий [22].

К настоящему времени уже устоялась область свойств материалов, требующих более высоких значений. Это прежде всего [23]: износостойкость, прочность и ударная вязкость, устойчивость к высоким температурам, химическая, коррозионная, радиационная стойкость, низкая плотность, сверхпластичность и сверхэластичность, магнитные свойства, сверхпроводимость и низкий температурный коэффициент

ент сопротивления, высокая и низкая теплопроводность, сопротивление диффузии, экологичность, функциональные и биологические свойства и т.д. Совершенно очевидно, что это далеко не полный перечень. Бурное развитие наукоемких отраслей стимулирует разработку принципиально новых материалов на основе миниатюризации, многофункциональности, экологичности.

В ряду перспективных применений, уже сейчас требующих новых и улучшенных материалов стоят [23]: материалы для наплавки, ядерные материалы, материалы для авиа- и космических двигателей, химических трубопроводов, морских судов и сооружений, высокочастотных коммуникационных материалов и компьютеров, материалы для хранения водорода, термоэлектрические материалы и сверхпроводники, легкие транспортные материалы, электрические и магнитные материалы для прецизионных электрических и электронных устройств. В этот ряд, естественно, должны войти материалы двойного назначения.

Для детального рассмотрения этих перспективных направлений необходимо по крайней мере опыт исследовательской работы в соответствующем направлении.

В наших работах, обобщенных в монографиях [15, 16]:

1. Определены механические свойства при сжатии и растяжении ВЭС Co–Cr–Fe–Ni–Mn, полученного при разных режимах наплавочного комплекса, что позволило выявить режим, обеспечивающий наилучшее сочетание прочности и пластичности. При испытаниях на сжатие условный предел текучести составил 279 МПа, временное сопротивление разрушению 1689 МПа, относительная деформация – 54 %, а при растяжении – 279 МПа, >500 МПа и >75 %, соответственно. Параметр износа $2,9 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н·м, коэффициент трения 0,62. Поверхность разрушения носит вязкий ямочный характер излома.

2. Электронно-пучковая обработка ВЭС Co–Cr–Fe–Ni–Mn с плотностью энергии $E_S = 10$ Дж/см² сопровождается первичной рекристаллизацией с образованием зерен размером 1,5–3 мкм. При $E_S = (15–30)$ Дж/см² развивается процесс собирательной рекристаллизации, сопровождающийся ростом среднего размера зерен от 35 до 120 мкм. Образующиеся в объеме зерен ячейки высокоскоростной кристаллизации увеличиваются от 310 нм при

$E_S = 15$ Дж/см² до 800 нм при $E_S = 30$ Дж/см². Скалярная плотность дислокаций немонотонно уменьшается по мере удаления до 130 мкм от поверхности облучения, тип дислокационной субструктуры меняется от неразориентированной ячеистой до хаотической через неразориентированную ячеисто-сетчатую. Изгибные контуры экстинкции отсутствуют.

3. ЭПО сопровождается выделением наноразмерных (1–3 нм) частиц FeCr округлой формы на дислокациях. Увеличение E_S приводит при испытаниях на растяжение к снижению пластичности более, чем в 2 раза, прочности в 1,3 раза, микротвердости в 1,6 раза относительно исходного состояния. Выявлены области материала, разрушение которого произошло с образованием полосовой (пластинчатой) структуры. Площадь излома пластинчатой структуры увеличивается от 25 % при $E_S = 10$ Дж/см² до 65 % при $E_S = 30$ Дж/см², что может являться одной из причин снижения прочности и пластичности материала в облученном состоянии.

В качестве примеров использования ВЭС в виде тонких лент, фольг и пленок можно привести сплавы AlCrFeMnNi и NiCrSiAlTa (рис.1) [13, 23].



Рис.1. Рулонная фольга толщиной семьдесят микрометров из сплава $Al_5Cr_{12}Fe_{35}Mn_{28}Ni_{20}$, полученная дуговой плавкой и холодной прокаткой. Удлинение при прокатке составляет 4257 % в зависимости от заготовки с начальной толщиной около 3 мм и твердостью 147 HV [13, 23]

Fig.1. Seventy micrometer thick rolled foil made of $Al_5Cr_{12}Fe_{35}Mn_{28}Ni_{20}$ alloy, produced by arc melting and cold rolling. Rolling elongation is 4257 % depending on the workpiece with an initial thickness of about 3 mm and a hardness of 147 HV [13, 23]

На рис.1 показана фольга толщиной 70 мкм, которая была подвергнута холодной

прокатке с удлинением на 4257 % без каких-либо растрескиваний по краям [13, 23]. Кривая упрочнения при обработке показывает, что его твердость приближается к насыщению около 360 HV при большой деформации. В этом состоянии фольгу все еще можно складывать без образования трещин. Это указывает на то, что способность сплава к изгибу превосходна. Этот легко прокатываемый сплав потенциально может использоваться в качестве гибких подложек для солнечных элементов и дисплеев.

Во многих отраслях электронной промышленности одним из основных компонентов электронных схем являются тонкопленочные высокоомные Ni-Cr резисторы (рис.2), определяющим требованием к которым является низкий температурный коэффициент сопротивления.

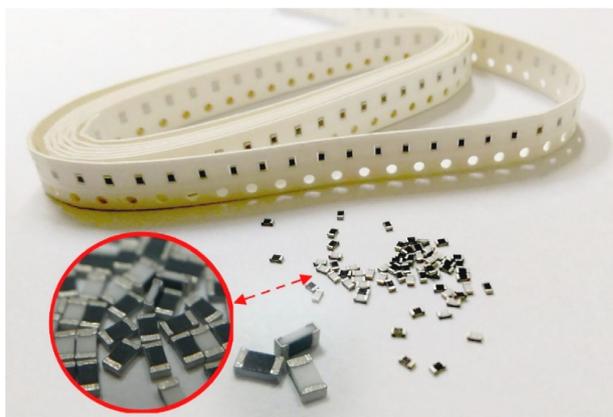


Рис.2. Тонкопленочные резисторы, изготовленные из тонкой ленты ВЭС [24]

Fig.2. Thin-film resistors made from thin VES tape [24]

В работе [24] для получения тонких пленок с высоким удельным сопротивлением и низким температурным коэффициентом сопротивления изучены: тонкопленочные резисторы Ni-Cr-Si-Al-Ta HEA, полученные путем распыления на подложку Al_2O_3 при комнатной температуре. На воздухе были проведены различные процедуры отжига при различной температуре от 250 °C до 500 °C. Они обнаружили, что напыленные пленки $Ni_{23,5}Cr_{14,6}Si_{23,6}Al_{16,8}Ta_{21,5}$ после отжига при 300 °C на воздухе показали наименьший температурный коэффициент сопротивления, 10 частей на миллион/°C, и более высокое удельное сопротивление, 2200 мкОм см.

Металлические стекла на основе ВЭС могут стать альтернативой получения и использования в различных областях тонких лент и фольг [25]. На принципиальную возможность

получения МС из ВЭС указано в появившихся в последнее время работах [26-30]. Однако, это объемные МС [31-35].

Сведения об аморфных лентах из ВЭС практически отсутствуют [25]. Обычно МС в виде лент получают методом спиннингования, известного еще с 60-х годов прошлого столетия.

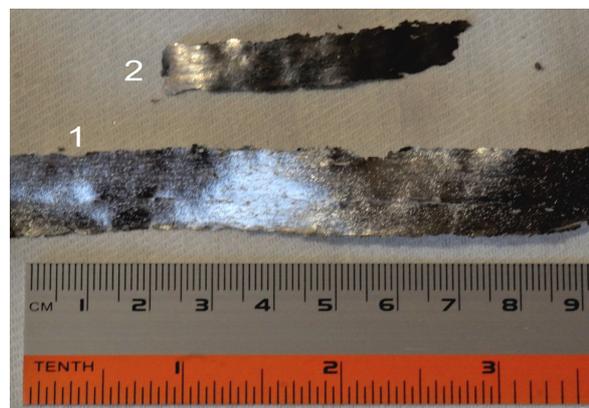


Рис.3. Лента ВЭС CoCrFeNiMn после закалки (1) и после прокатки (2)

Fig.3. WES CoCrFeNiMn strip after quenching (1) and after rolling (2)

Расплав помещается в кварцевое сопло, которое нагревается при помощи индуктора. Под воздействием небольшого избыточного давления расплав через узкое отверстие в сопле подается на быстровращающийся медный барабан-холодильник, в результате чего тонкая струя расплава переходит в твердое состояние в виде лент толщиной от 30 до 100 мкм. Барабан охлаждается проточной водой с температурой 8 °C. Специфика этого метода заключается в «резкой закалке» расплава со скоростью 10^6 град/сек [2].

Этот процесс великолепно подходит для получения длинных тонких лент практически любого состава сплавов. Скорость вращения барабана можно регулировать для получения максимальной эффективности процесса получения лент.

Для ВЭС Кантора CoCrFeNiMn и CoCrFeNiAl неэквивалентных составов, соответствующих ранее исследованным в [2, 15, 16] были получены ленты толщиной около 80 мкм. Удовлетворительное состояние лент в настоящее время было получено только для сплава Кантора, легированного алюминием.

Технические параметры разливки (спиннингования) ВЭС:

– температура расплава – 1480 °C;

- линейная скорость закалочного барабана – 32,6 м/сек;
- величина выдавливающего (избыточного) давления – 0,35-0,3 атм;
- размер сопла – 0,7×20 мм;
- зазор между соплом и барабаном – 0,27 мм.

Методами современного физического материаловедения исследованы параметры ленты ВЭС Кантора, легированного алюминием, неэквивалентного состава.

Установлено, методами микрорентгеноспектрального анализа, что исследуемый сплав имеет следующий состав (ат. %): 9,6Al–12,2Cr–

39,4Fe–12,5Co–24,3Ni–2,0Mn, т.е. может быть отнесен к ВЭС неэквивалентного состава. Микрорентгеноспектральный анализ сплава, выполненный методами «по точкам» выявил незначительное изменение состава ленты при переходе от одной области сканирования к другой (рис.4; табл.1). Анализируя результаты, представленные в таблице 1, можно отметить, что наиболее ликвидирующими элементами в исследуемой ленте являются алюминий и марганец, то есть химические элементы со сравнительно (по отношению к другим элементам сплава) низкой температурой плавления.

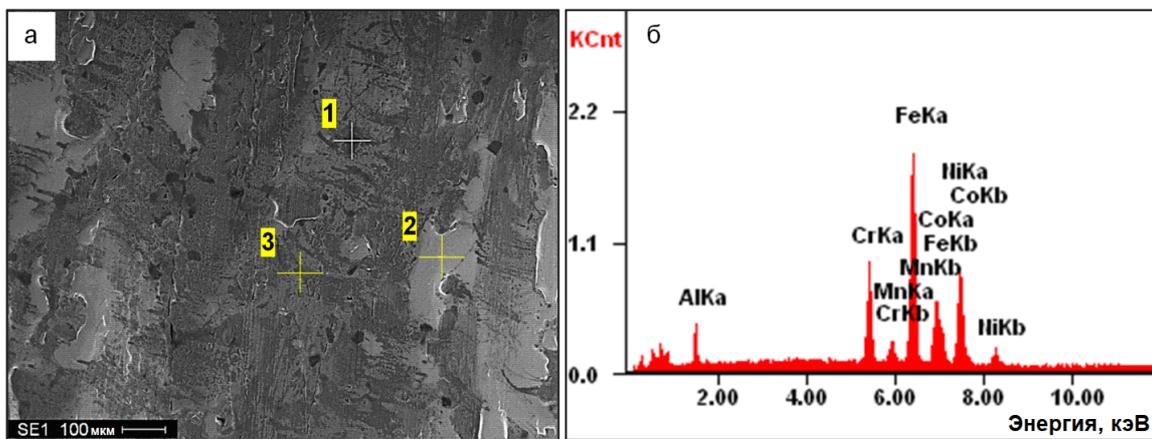


Рис.4. Электронно-микроскопическое изображение ленты ВЭС (а); б – энергетические спектры, соответствующие области, отмеченной на (а) цифрой 2

Fig.4. Electron microscopic image of the WES tape (a); b – energy spectra corresponding to the area marked in (a) with number 2

Таблица 1. Результаты микрорентгеноспектрального анализа, выполненного методом «по точкам». Области анализа 1, 2, 3 приведены на рис.4а

Table 1. Results of micro-X-ray spectral analysis performed using the «point-by-point» method. Analysis areas 1, 2, 3 are shown in Fig.4a

Элемент	область 1		область 2		область 3	
	вес. %	ат. %	вес. %	ат. %	вес. %	ат. %
Al(K _α)	06,26	12,28	04,99	09,92	05,29	10,47
Cr(K _α)	11,46	11,67	11,42	11,77	11,74	12,06
Mn(K _α)	01,67	01,61	01,90	01,86	02,01	01,96
Fe(K _α)	40,09	37,98	40,73	39,10	40,72	38,95
Co(K _α)	12,95	11,62	13,80	12,56	13,54	12,27
Ni(K _α)	27,56	24,83	27,15	24,80	26,70	24,29

Исследуемая лента является двухфазным материалом. Методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD-6000, CuK_α-излучение) выявлены твердый раствор на основе железа (ОЦК кристаллическая решетка) с параметром $a = 0,28681$ нм и соединение Co_{0,8}Cr_{0,8}Fe_{0,8}Mn_{0,8}Ni_{0,8} (ГЦК кристаллическая

решетка) с параметром $a = 0,35859$ нм. Относительное содержание фаз 82 мас. % и 18 мас. %, соответственно.

Микротвердость ленты ВЭС, определенная на приборе ПМТЗ при нагрузке на индентор 0,5 Н, составляет 367 HV.

Заключение

Выполнен краткий обзор публикаций последних лет по перспективным областям создания и применения высокоэнтропийных сплавов в различных наукоемких отраслях промышленности. Проанализирован востребованный производством комплекс высоких эксплуатационных свойств, предъявляемых для использования в аэрокосмических двигателях, ядерных реакторах, морских судах, газо- и нефтепроводах, электронных устройствах и компьютерах.

Обращено внимание на проблемы создания тонкопленочных высокорезистивных материалов с низким температурным коэффициентом сопротивления.

Предложено использовать металлические стекла на основе ВЭС для этих целей. Методом спиннингования получена лента толщиной около 80 мкм из ВЭС Кантора, неэквивалентного состава и изучены ее свойства.

Список литературы

1. Chen Y., Dai Z.-W., Jiang J.-Z. High entropy metallic glasses: Glass formation, crystallization and properties // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. 158852.
2. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // *Физика металлов и металловедение*. 2020. Т. 121, № 8. С. 807–841.
3. Khan M.M., Nemati A., Rahman Z.U., Shah U.H., Asgar H. et al. Recent advancements in bulk metallic glasses and their applications: a review // *Critical Rev. Solid State Mater. Sci.* 2018. V. 43, N 3. P. 233–268.
4. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A. et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys // *Progress in Mater. Sci.* 2014. V. 61. P. 1–93.
5. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys // *Entropy*. 2014. V. 16. P. 4749–4768.
6. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Mater.* 2017. V. 122. P. 448–511.
7. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys *Science China Materials*. 2018. V. 61, N 1. P. 2–22.
8. Горбань В.Ф., Крапивка Н.А., Фирстов С.А. Высокоэнтропийные сплавы-электронная концентрация-фазовый состав-параметр решетки-свойства // *ФММ*. 2017. Т. 118, № 10. С. 1017–1029.
9. Ивченко М.В., Пушин В.Г., Wanderka N. Высокоэнтропийные эквивалентные сплавы AlCrFeCoNiCu: гипотезы и экспериментальные факты // *ЖТФ*. 2014. Т. 84. С. 57–69.
10. Yeh J.-W. Physical metallurgy of high-entropy alloys // *JOM*. 2015. V. 67, N 10. P. 2254–2261.
11. Tsai M.-H., Yeh J.-W. High-entropy alloys: a critical review // *Mater. Res. Lett.* 2014. V. 2:3, N 3. P. 107–123.
12. Alaneme K.K., Bodunrin M.O., Oke S.R. Processing, alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties of high entropy alloys: a review // *J. Mater. Res. Technol.* 2016. V. 5, N 4. P. 384–393.
13. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. High-Entropy Alloys. Second edition. Amsterdam: Elsevier, 2019. 374 p.
14. Zhang Y. High-Entropy Materials. A brief introduction. Singapore: Springer Nature, 2019. 159 p.
15. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and properties of High entropy alloys. *Advanced structure materials*. Springer, 2021. V. 107. 110 p.
16. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Shlyarova Yu.A., Panchenko I.A. High entropy alloys: Structure and properties. *RuScience*. Moscow, 2022. 202 p.
17. Jo Y.H., Doh K.-Y., Kim D.G., Lee K., Kim D.W. et al. Cryogenic-temperature fracture toughness analysis of non-equiatom V₁₀Cr₁₀Fe₄₅Co₂₀Ni₁₅ high-entropy alloy // *J. Alloys Compnd*. 2019. V. 809. P. 1–9.
18. Zhao R.-F., Ren B., Zhang G.-P., Liu Z.-X., Cai B. et al. CoCr_xCuFeMnNi high-entropy alloy powders with superior soft magnetic properties // *J. Magn. Mater.* 2019. V. 491. P. 1–8.
19. Tian F., Zhao H., Wang Y., Chen N. Investigating effect of ordering on magnetic-elastic property of FeNiCoCr medium-entropy alloy // *Scripta Mater.* 2019. V. 166. P. 164–167.
20. Zuo T., Gao M.C., Ouyang L., Yang X., Cheng Y. et al. Tailoring magnetic behavior of CoFeMnNiX (X 1/4 Al, Cr, Ga, and Sn) high entropy alloys by metal doping // *Acta Mater.* 2017. V. 130. P. 10–18.
21. Mishra R.K., Shahi R. A systematic approach for enhancing magnetic properties of CoCrFeNiTi-based high entropy alloys via stoichiometric variation and annealing // *J. Alloys Compnd*. 2020. V. 821. 153534.

22. Kalpajians S., Schmid S. Manufacturing Engineering and technology. 7th edition Publisher: Pearson Publications, Singapore, 2013. 1216 p.
23. Yeh J.W. Recent progress in high entropy alloys // *European Journal of Control*. 2006. V. 31, N 6. P. 633–648.
24. Lin R.Ch., Lee T.H., Wu D.H., Li Y.Ch. Study of thin film resistors prepared using NiCr-SiLeTa High entropy alloys // *Advanced in material science and engineering*. 2015. V. 2. P. 1–7.
25. Chen Y. High metallic glasses: glass formation crystallization and properties // *J. Alloys and Compounds*. 2021. V. 866. 158852.
26. Zhang M., Gong P., Li N., Zheng G., Deng L. et al. Oxidation behavior of a Ti₁₆Zr₁₆Hf₁₆Cu₁₆Ni₁₆Be₁₆ high-entropy bulk metallic glass // *Materials Letters*. 2019. V. 234. P. 135–138.
27. Gong P., Li F., Deng L., Wang X., Jin J. Research on nano-scratching behavior of TiZrHfBeCu(Ni) high entropy bulk metallic glasses // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. V. 817. 153240.
28. Zhang L.T., Duan Y.J., Wada T. et al. Dynamic mechanical relaxation behavior of Zr₃₅Hf_{17.5}Ti_{5.5}Al_{12.5}Co_{7.5}Ni₁₂Cu₁₀ high entropy bulk metallic glass // *Journal of Materials Science & Technology*. 2021. V. 83. 248–255.
29. Li M., Guan H., Yang S., Ma X., Li Q. et al. Minor Cr alloyed Fe–Co–Ni–P–B high entropy bulk metallic glass with excellent mechanical properties // *Materials Science and Engineering: A*. 2021. V. 805. 140542.
30. Li N., Shixing W., Ouyang D., Jianji Z., Liu L. et al. Fe-based metallic glass reinforced Fe-CoCrNiMn high entropy alloy through selective laser melting // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. V. 822. 153695.
31. Pang C.M., Yuan C.C., Chen L., Xu H., Guo K. et al. Effect of Yttrium addition on magnetocaloric properties of Gd-Co-Al-Ho high entropy metallic glasses // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2020. V. 549. 120354.
32. Zhao Y., Zhao P., Li W., Kou S., Jiang J. et al. The microalloying effect of Ce on the mechanical properties of medium entropy bulk metallic glass composites // *Crystals*. 2019. V. 9, N 9. 483.
33. Yang Y., Liu C.T. Size effect on stability of shear-band propagation in bulk metallic glasses: an overview // *Journal of Materials Science*. 2012. V. 47, N 1. P. 55–67.
34. Rashidi R., Malekan M., Gholamipour R. Crystallization kinetics of Cu₄₇Zr₄₇Al₆ and (Cu₄₇Zr₄₇Al₆)₉₉Sn₁ bulk metallic glasses // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018. V. 498. P. 272–280.
35. Shao L., Xue L., Wang Q., Ma K., Huang J. et al. Effects of Si addition on glass-forming ability and crystallization behavior of DyCoAl bulk metallic glass // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. V. 874. 159964.

Информация об авторах

В. Е. Громов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

Ю. Ф. Иванов – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН.

А. П. Семин – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией Сибирского государственного индустриального университета.

С. В. Боровский – соискатель кафедры инженерных конструкций, строительных технологий и материалов Сибирского государственного индустриального университета.

Е. А. Петрикова – младший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники Института сильноточной электроники СО РАН.

П. Чжан – доктор, профессор Школы материаловедения и инженерии Шанхайского совместного инновационного центра передовых лазерных производственных технологий.

А. А. Серебрякова – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

References

1. Chen, Y., Dai, Z.-W. & Jiang, J.-Z. (2021). High entropy metallic glasses: Glass formation, crystallization and properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 158852.
2. Rogachev, A. S. (2020). Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов. *Fizika metallov i metallovedeniye*, 121(8), 807–841. (In Russ.).
3. Khan, M. M., Nemati, A., Rahman, Z. U., Shah, U. H. & Asgar, H. et al. (2018). Recent advancements in bulk metallic glasses and their ap-

- lications: a review. *Critical Rev. Solid State Mater. Sci.*, 43(3), 233–268.
4. Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C. & Dahmen, K. A. et al. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Mater. Sci.*, 61, 1–93.
 5. Cantor, B. (2014). Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*, 16, 4749–4768.
 6. Miracle, D. B. & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Mater.*, 122, 448–511.
 7. Zhang, W., Liaw, P. K. & Zhang, Y. (2018). Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*, 61(1), 2–22.
 8. Gorban', V. F., Krapivka, N. A. & Firstov, S. A. (2017). Vysokoentropiynnye splavy-elektronnaya konsentratsiya-fazovyy sostav-parametr reshetki-svoystva. *FMM*, 118(10), 1017–1029. (In Russ.).
 9. Ivchenko, M. V., Pushin, V. G. & Wanderka, N. (2014). Vysokoentropiynnye ekvatomnyye splavy AlCrFeCoNiCu: gipotezy i eksperimental'nyye fakty. *ZHTF*, 84, 57–69. (In Russ.).
 10. Yeh, J.-W. (2015). Physical metallurgy of high-entropy alloys. *JOM*, 67(10), 2254–2261.
 11. Tsai, M.-H. & Yeh, J.-W. (2014). High-entropy alloys: a critical review. *Mater. Res. Lett.*, 2:3(3), 107–123.
 12. Alaneme, K. K., Bodunrin, M. O. & Oke, S. R. (2016). Processing, alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties of high entropy alloys: a review. *J. Mater. Res. Technol.*, 5(4), 384–393.
 13. Murty, B. S., Yeh, J. W., Ranganathan S. & Bhattacharjee, P. P. (2019). High-Entropy Alloys. Second edition. Amsterdam: Elsevier, P. 374.
 14. Zhang, Y. (2019). High-Entropy Materials. A brief introduction. Singapore: Springer Nature. P. 159.
 15. Gromov, V. E., Konovalov, S. V., Ivanov, Yu. F. & Osintsev, K. A. (2021). Structure and properties of High entropy alloys. *Advanced structure materials*. Springer. V. 107. P. 110.
 16. Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Osintsev, K. A., Shlyarova, Yu. A. & Panchenko, I. A. (2022). High entropy alloys: Structure and properties. RuScience. Moscow. P. 202.
 17. Jo, Y. H., Doh, K.-Y., Kim, D. G., Lee, K. & Kim, D. W. et al. (2019). Cryogenic-temperature fracture toughness analysis of non-equiatomic $V_{10}Cr_{10}Fe_{45}Co_{20}Ni_{15}$ high-entropy alloy. *J. Alloys Compnd.*, 809, 1–9.
 18. Zhao, R.-F., Ren, B., Zhang, G.-P., Liu, Z.-X. & Cai, B. et al. (2019). $CoCr_xCuFeMnNi$ high-entropy alloy powders with superior soft magnetic properties. *J. Magn. Magn. Mater.*, 491, 1–8.
 19. Tian, F., Zhao, H., Wang, Y. & Chen, N. (2019). Investigating effect of ordering on magnetic-elastic property of FeNiCoCr medium-entropy alloy. *Scripta Mater.*, 166, 164–167.
 20. Zuo, T., Gao, M. C., Ouyang, L., Yang, X. & Cheng, Y. et al. (2017). Tailoring magnetic behavior of $CoFeMnNiX$ (X 1/4 Al, Cr, Ga, and Sn) high entropy alloys by metal doping. *Acta Mater.*, 130, 10–18.
 21. Mishra, R. K. & Shahi, R. (2020). A systematic approach for enhancing magnetic properties of CoCrFeNiTi-based high entropy alloys via stoichiometric variation and annealing. *J. Alloys Compnd.*, 821, 153534.
 22. Kalpajians, S. & Schmid, S. (2013). Manufacturing Engineering and technology. 7th edition Publisher: Pearson Publications, Singapore. P. 1216.
 23. Yeh, J. W. (2006). Recent progress in high entropy alloys. *European Journal of Control*, 31(6), 633–648.
 24. Lin, R. Ch., Lee, T. H., Wu, D. H. & Li, Y. Ch., (2015). Study of thin film resistors prepared using NiCrSiLeTa High entropy alloys. *Advanced in material science and engineering*, 2, 1–7.
 25. Chen, Y. (2021). High metallic glasses: glass formation crystallization and properties. *J. Alloys and Compounds*, 866, 158852.
 26. Zhang, M., Gong, P., Li, N., Zheng, G. & Deng, L. et al. (2019). Oxidation behavior of a $Ti_{16.7}Zr_{16.7}Hf_{16.7}Cu_{16.7}Ni_{16.7}Be_{16.7}$ high-entropy bulk metallic glass. *Materials Letters*, 234, 135–138.
 27. Gong, P., Li, F., Deng, L., Wang, X. & Jin, J. (2020). Research on nano-scratching behavior of $TiZrHfBeCu(Ni)$ high entropy bulk metallic glasses. *Journal of Alloys and Compounds*, 817, 153240.
 28. Zhang, L. T., Duan, Y. J. & Wada, T. et al. (2021). Dynamic mechanical relaxation behavior of $Zr_{35}Hf_{17.5}Ti_{5.5}Al_{12.5}Co_{7.5}Ni_{12}Cu_{10}$ high entropy bulk metallic glass. *Journal of Materials Science & Technology*, 83, 248–255.
 29. Li, M., Guan, H., Yang, S., Ma, X. & Li, Q. et al. (2021). Minor Cr alloyed Fe–Co–Ni–P–B high entropy bulk metallic glass with excellent mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 805, 140542.
 30. Li, N., Shixing, W., Ouyang, D., Jianji, Z. & Liu, L. et al. (2020). Fe-based metallic glass re-

inforced FeCoCrNiMn high entropy alloy through selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 822, 153695.

31. Pang, C. M., Yuan, C. C., Chen, L., Xu, H. & Guo, K. et al. (2020). Effect of Yttrium addition on magnetocaloric properties of Gd-Co-Al-Ho high entropy metallic glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 549, 120354.

32. Zhao, Y., Zhao, P., Li, W., Kou, S. & Jiang, J. et al. (2019). The microalloying effect of Ce on the mechanical properties of medium entropy bulk metallic glass composites. *Crystals*, 9(9), 483.

33. Yang, Y. & Liu, C. T. (2012). Size effect on stability of shear-band propagation in bulk metallic glasses: an overview. *Journal of Materials Science*, 47(1), 55–67.

34. Rashidi, R., Malekan, M. & Gholamipour, R. (2018). Crystallization kinetics of Cu₄₇Zr₄₇Al₆ and (Cu₄₇Zr₄₇Al₆)₉₉Sn₁ bulk metallic glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 498, 272–280.

35. Shao, L., Xue, L., Wang, Q., Ma, K. & Huang, J. et al. (2021). Effects of Si addition on glass-forming ability and crystallization behavior of DyCoAl bulk metallic glass. *Journal of Alloys and Compounds*, 874, 159964.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 08.07.2024; одобрена после рецензирования 16.08.2024; принята к публикации 26.08.2024.

The article was received by the editorial board on 08 July 24; approved after reviewing 16 Aug. 24; accepted for publication 26 Aug. 24.

Information about the authors

V. E. Gromov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.

Yu. F. Ivanov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute of High Current Electronics SB RAS.

A. P. Semin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Laboratory, Siberian State Industrial University.

S. V. Borovsky – Applicant for the Department of Engineering Structures, Construction Technologies and Materials, Siberian State Industrial University.

E. A. Petrikova – Junior Researcher, Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics SB RAS.

P. Zhang – Doctor, Professor, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Joint Innovation Center for Advanced Laser Manufacturing Technology.

A. A. Serebryakova – Graduate Student of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.