



Обзорная статья

УДК 536.425:539.25

DOI 10.17073/0368-0797-2021-4-249-258



ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ СПЛАВЫ: СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЕ

К. А. Осинцев^{1,2}, В. Е. Громов¹, С. В. Коновалов^{1,2},
Ю. Ф. Иванов³, И. А. Панченко¹

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

² Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское ш. 34)

³ Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический 2/3)

Аннотация. Выполнен краткий обзор публикаций зарубежных исследователей по изучению структуры, фазового состава и свойств пяти-компонентных высокоэнтروпийных сплавов (ВЭС) в разных структурных состояниях в широком диапазоне температур за последние два десятилетия. Высокоэнтропийные сплавы привлекают внимание ученых уникальными и необычными свойствами. Отмечены трудности проведения сравнительного анализа и обобщения данных из-за различных методов получения ВЭС, режимов механических испытаний на одноосное сжатие и растяжение, размеров и формы образцов, видов термических обработок, фазового состава (ОЦК и ГЦК решетки). Отмечено, что ВЭС с ОЦК решеткой обладают преимущественно высокой прочностью и низкой пластичностью, а ВЭС с ГЦК решеткой – низкой прочностью и повышенной пластичностью. Показано, что значительное повышение свойств ВЭС FeMnCoCrNi с ГЦК решеткой может быть достигнуто легированием бором и оптимизацией параметров термомеханической обработки при легировании углеродом в количестве 1 % (ат.). Проанализированные в температурном интервале $-196 \div 800$ °С деформационные кривые свидетельствуют о росте предела текучести с уменьшением размера зерна от 150 до 5 мкм. При снижении температуры предел текучести и относительное удлинение возрастают. Эффект влияния скорости деформации на механические свойства заключается в росте предела прочности и текучести, наиболее заметно проявляется при больших скоростях $10^{-2} \div 10^3$ с⁻¹. Отмечены особенности деформационного поведения ВЭС в моно- и поликристаллическом состояниях. Комплекс высоких эксплуатационных свойств ВЭС обеспечивает возможность их применения в различных отраслях промышленности. Отмечены перспективы использования энергетических обработок для модифицирования поверхностных слоев и дальнейшего повышения свойств ВЭС.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, структура, механические свойства, дислокации, двойникование

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00452).

Для цитирования: Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 249–258.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>

Review

HIGH-ENTROPY ALLOYS: STRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES, DEFORMATION MECHANISMS AND APPLICATION

K. A. Osintsev^{1,2}, V. E. Gromov¹, S. V. Konovalov^{1,2},
Yu. F. Ivanov³, I. A. Panchenko¹

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

² Samara National Research University (34 Moskovskoe Route, Samara 443086, Russian Federation)

³ Institute of High Current Electronics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634021, Russian Federation)

Abstract. The article considers a brief review of the foreign publications on the study of the structure, phase composition and properties of five-component high-entropy alloys (HEAs) in different structural states in a wide temperature range over the past two decades. HEAs attract the attention of scientists with their unique and unusual properties. The difficulties of comparative analysis and generalization of data are noted due to different methods of obtaining HEAs, modes of mechanical tests for uniaxial compression and tension, sizes and shapes of the samples, types of thermal treatments, and phase composition (bcc and fcc crystal lattices). It is noted that the HEA with a bcc lattice has mainly high strength and low plasticity, and the HEA

with a fcc lattice has low strength and increased plasticity. A significant increase in the properties of the FeMnCoCrNi HEA with a fcc lattice can be achieved by alloying with boron and optimizing the parameters of thermal mechanical treatment at alloying with carbon in the amount of 1 % (at.). The deformation curves analyzed in the temperature range $-196 \div 800$ °C indicate an increase in the yield strength with a decrease in the grain size from 150 to 5 microns. As the temperature decreases, the yield strength and elongation increase. The effect of deformation rate on the mechanical properties is an increase in the ultimate strength and yield strength, which is most noticeable at high rates of $10^{-2} \div 10^3$ s⁻¹. The features of HEAs deformation behavior in the mono- and poly-crystalline states are noted. The complex of high operational properties of HEAs makes it possible to use them in various industries. There are good prospects of using energy treatment to modify the surface layers and further improve HEAs properties.

Keywords: high-entropy alloy (HEA), structure, mechanical properties, dislocations, twinning

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

For citation: Osintsev K.A., Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. High-entropy alloys: Structure, mechanical properties, deformation mechanisms and application. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 249–258. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>

ВВЕДЕНИЕ

Одной из фундаментальных и практически важных задач физики конденсированного состояния и физического материаловедения является разработка физических основ создания новых металлических материалов и технологий их получения с комплексом необходимых физико-механических и эксплуатационных характеристик. В самом конце XX века появились первые работы по созданию и комплексному исследованию новых, так называемых высокоэнтропийных полиметаллических сплавов (ВЭС), включающих до 5–6 основных элементов, каждый в большой концентрации (например, от 5 до 35 %). В качестве первых кандидатов в такие материалы были выбраны сплавы систем AlCoCrCuFeNi, CoCrCuFeNiTi и другие. Данные материалы наряду с характеристиками, типичными для металлических сплавов, обладают уникальными и необычными свойствами, присущими, например, металлокерамикам: высокой твердостью и стойкостью по отношению к температурному разупрочнению, дисперсионным твердением, положительным температурным коэффициентом упрочнения, высокими прочностными характеристиками при повышенных температурах, высокими износостойкостью и коррозионной стойкостью, рядом других характеристик. Главная особенность ВЭС заключается в формировании однофазного стабильного термодинамически устойчивого и высокопрочного твердого раствора замещения преимущественно с ГЦК или ОЦК решеткой [1]. Стабилизация твердого раствора и предотвращение образования интерметаллических фаз при кристаллизации обеспечиваются высокой энтропией смешения компонентов ($S_{mix} > 1,61R$, где R – универсальная газовая постоянная) в исходном (шихта) и жидком (расплав) состояниях. Максимальное значение энтропии достигается при эквимолярном соотношении элементов. За последние годы опубликованы (в основном в зарубежной литературе) несколько обзоров [1–6], которые отражают авторский взгляд на наиболее интересные свойства ВЭС. В этих работах описана термодинамика ВЭС, рассмотрены результаты моделирования их структуры, обсуждены новые варианты методов получения многокомпонентных сплавов.

Уже первые исследования выявили существенные различия в структуре разных высокоэнтропийных сплавов. Были обнаружены высокоэнтропийные сплавы на основе твердого раствора [7, 8], смеси интерметаллидных фаз [9, 10], аморфной фазы [11, 12], а также сплавы с более сложной многофазной структурой [4–13].

В последние два десятилетия наблюдается экспоненциальный рост количества публикаций, посвященных созданию однофазных эквиатомных пятикомпонентных ВЭС типа CrMnFeNi, AlCoCrFeNi [14], а также комплексно концентрированных сплавов (ККС). Несмотря на значительное количество работ, провести строгий, прямой сравнительный анализ структурно-фазовых состояний и механических свойств ВЭС и ККС одного состава крайне затруднительно. В работе [15] отмечено, что: «Прямое сравнение данных затруднено из-за различий в типе и концентрации основных элементов, виде термомеханической обработки, температуре и продолжительности термообработки». Проанализируем, тем не менее, последние основополагающие работы по пятикомпонентным сплавам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Механические свойства ВЭС

Свойства ВЭС определяются их структурой и элементарным составом. Так, высокоэнтропийные сплавы с ОЦК решеткой имеют преимущественно высокую прочность и низкую пластичность, тогда как у материалов с ГЦК решеткой низкая прочность и высокая пластичность. При анализе механических свойств при одноосном сжатии значения основных параметров ВЭС мало отличаются от параметров промышленных легированных сталей. Активация механизмов двойникования для сплава Al_{0.3}CoCrFeNi обеспечивает деформацию до 97 %, а прочность составляет 1378 МПа [16], а в двухфазном сплаве AlCoCrFeNi предел прочности может достигать 4390 МПа [19]. Эти значения, по мнению авторов обзора [14], могут быть явно завышены из-за особенностей установки на сжатие, формы и размеров образцов.

Автоматически переносить уникальные результаты при сжатии на данные при растяжении также не

правомерно. Причинами таких ошибок могут являться неучет наличия наноразмерных интерметаллидов и выделений, ближний порядок в однофазном ОЦК или двухфазном ГЦК + ОЦК сплавах.

В настоящей работе кратко рассмотрены наиболее интересные и любопытные результаты многочисленных исследований механических свойств ВЭС при разных температурах. В работе [7] при изучении механических свойств сплавов CrMnFeCoNi и CrFeCoNi, подвергавшихся растяжению в диапазоне температур от -196 до 1000 °С, выявлена их высокая пластичность при комнатной температуре. Так, пластичность и твердость при снижении температуры повышались, при этом предел прочности возрастал практически вдвое, а относительное удлинение до разрушения – в 1,5 раза (до 60 %).

Превосходные механические свойства высокоэнтропийного сплава AlCoCrFeNiTi при комнатной температуре описаны в работе [17]. Улучшение механических характеристик с учетом большого радиуса атома титана авторы объяснили твердорастворным упрочнением. Наилучшие механические характеристики показал сплав AlCoCrFeNiTi_{0,5}: предел текучести составляет 2,26 ГПа, прочность на разрыв – 3,14 ГПа, пластическая деформация – 23,3 %.

Детальное рассмотрение механических характеристик ВЭС при низких температурах проведено в работах [18, 19]. Сплав AlCoCrFeNi обладает превосходными механическими характеристиками как при комнатной, так и при криогенной температурах [18]. Обнаружено увеличение пределов текучести и прочности при снижении температуры от 298 до 77 К на 29,7 и 19,9 % соответственно. Согласно интерпретации авторов механические характеристики улучшаются при наличии однофазной ОЦК структуры твердого раствора.

Значения механических свойств однофазных ГЦК ВЭС близки к величинам для сплавов на основе никеля и аустенитных нержавеющей сталей с одинаковыми легирующими элементами. В работе [20] отмечается, что существенно улучшенные свойства ВЭС FeMnCoCrNi (920 МПа и 52 %) достигаются легированием бором. Это приводит к сегрегации бора на границах зерен, уменьшению размера зерен, ослаблению межфазного упрочнения. При легировании углеродом (810 МПа, 66 %) [21] в междоузлиях увеличивается энергия дефекта упаковки для этого ВЭС. Отмечено, что оптимизация параметров термомеханической обработки ВЭС CoCrFeNiMn, легированного 1 % С (ат.), существенно улучшает механические свойства. Ключевая роль при этом принадлежит интерметаллидам типа $Me_{23}C_6$. На температурной зависимости удельной прочности для ВЭС CoCrFeMnNi [22] при температуре t выше 600 °С наблюдается падение, которое может быть устранено при одновременном легировании алюминием и титаном и кратковременном отжиге. К сожалению, в литературе

имеется ограниченное число публикаций о поведении ВЭС в области низких температур, а именно для этих целей первоначально создавался сплав CrMnFeCoNi. В области низких температур он обладает повышенными прочностными и пластическими свойствами и высокой ударной вязкостью [7 – 23].

Чистые ГЦК металлы практически не имеют температурной зависимости предела текучести в интервале 77 – 500 К [24]. Для ГЦК крупнозернистых Cantor ВЭС в этом интервале температур этот параметр увеличивается до четырех раз по мере уменьшения температуры [25].

Как правило, ВЭС обладают большей прочностью, чем обычные сплавы с меньшим числом элементов [25]. Необходимо иметь в виду, что в концентрированных твердых растворах эффективный радиус составляющих элементов существенно отличается от своего значения в чистых элементах [26]. Поэтому для определения их вкладов в твердорастворное упрочнение необходимо из первых принципов вычислить энергию взаимодействия с дислокациями для индивидуального растворенного элемента. На очевидный вопрос, о каких характеристиках идет речь при составлении композиции ВЭС, можно ответить, что это несоответствие объемов легирующих элементов. Основываясь на традиционных теориях твердых растворов, легче сказать, чем сделать это. Как можно измерить объемное несоответствие? Дело в том, что в ВЭС атомы смещены в разной степени. Для монокристаллов рентгеновские дифракционные исследования позволяют количественно определить параметр атомного смещения (АДР) [26] (АДР – это сумма площадей отклонения от равновесного положения из-за тепловых колебаний (динамический беспорядок) и статистического смещения из-за размерного эффекта).

При испытаниях на растяжение монокристаллов сплава CrMnFeCoNi в зависимости от температуры испытаний (77 – 423 К) и ориентации значения критического сдвигового напряжения меняются от 53 до 172 МПа [27 – 29]. Эти величины по крайней мере на порядок выше, чем для ГЦК чистого никеля.

При анализе термоактивируемого процесса пластической деформации важный параметр – активационный объем (составляет примерно $60b^3$ при 77 К и $360b^3$ при комнатной температуре). Это несколько меньше, чем в твердых растворах ($\sim 1000b^3$) (где b – вектор Бюргерса).

При квазистатических испытаниях (10^{-1} – 10^{-5} с⁻¹) для сплава с размером зерна 35 мкм влияние скорости деформации незначительно [7] (рис. 1). В диапазоне 10^{-3} – 10^2 с⁻¹ предел текучести растет примерно на 35 % (от 484 до 650 МПа) для сплава с размером зерна 10 мкм с соответствующим увеличением предела прочности от 853 до 968 МПа. При больших скоростях деформации еще более значительны: от 325 – 360 МПа при скоростях 10^{-4} – 10^{-2} с⁻¹ до 590 – 680 МПа при скоростях 3000 – 4700 с⁻¹ [30]. Это связано с фоновым механизмом торможения [30].

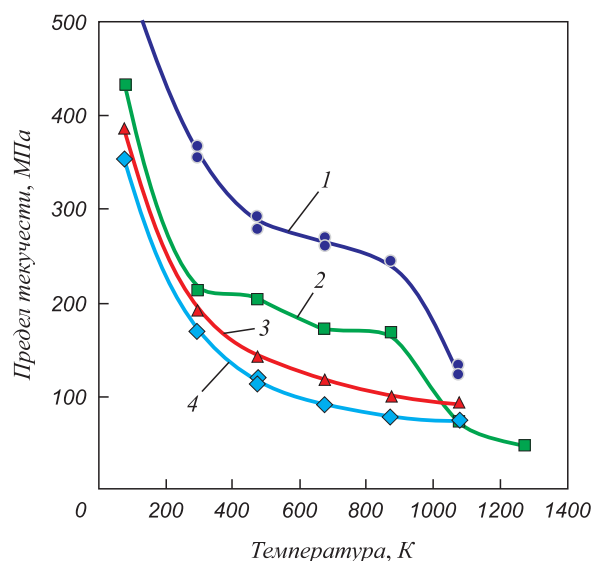


Рис. 1. Температурная зависимость предела текучести ВЭС CrMnFeCoNi для различных значений размера зерна [26, 27], мкм: 1 – 4; 2 – 35; 3 – 50; 4 – 155

Fig. 1. Temperature dependence of the yield strength of Cr MnFeCoNi HEA for different grain size values [26, 27], μm: 1 – 4; 2 – 35; 3 – 50; 4 – 155

Типичные кривые $\sigma(\epsilon)$ для ВЭС CrMnFeCoNi с размером зерна 50 мкм для разных температур приведены на рис. 2. При сжатии сплава CrMnFeCoNi с размером зерна 5 – 150 мкм напряжения течения растут с уменьшением размера за исключением высоких температур (800 °C), где сплав с зерном 5 мкм проявляет деформационное размягчение после текучести преимущественно по зернограничному деформационному механизму. Предел текучести, напряжение течения, удлинение увеличиваются при снижении температуры вплоть до температуры жидкого азота [7].

Дислокационная и двойниковая пластичность

Как и для ГЦК металлов в дислокационной субструктуре ВЭС наблюдается переход от хаоса при малых степенях деформации к клубкам и ячейкам при увеличении степени деформации (рис. 3). При этом нет различия в росте плотности дислокаций при комнатной температуре и 77 К, что соответствует температурной независимости скорости упрочнения ГЦК металлов при малых деформациях. При $\epsilon > 6\%$ начинает работать механизм двойникового, который становится преобладающим при $\epsilon > 9\%$. Двойниковый механизм пластичности способен одновременно увеличивать прочность и пластичность [31]. Аксиальные напряжения появления двойников при 77 К составляют примерно 720 МПа [32]. Общее мнение авторов: эти напряжения, в основном, не зависят от температуры.

Другим фактором, относящимся к двойникованию, является энергия дефекта упаковки: для тройного эквивалентного сплава CrCoNi на 25 % ниже, чем для

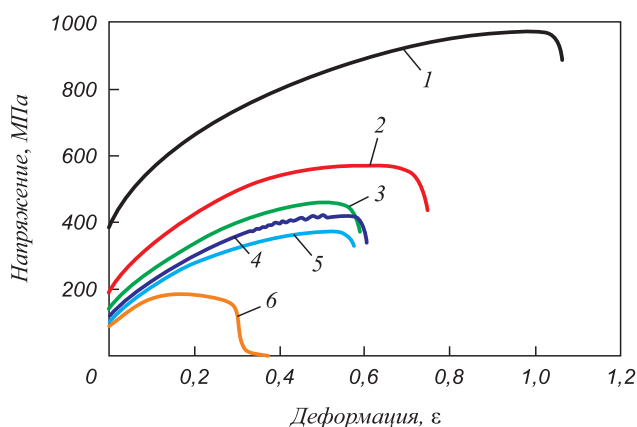


Рис. 2. Кривые напряжение – деформация для ВЭС CrMnFeCoNi при разных температурах [27], °C: 1 – -196; 2 – 20; 3 – 200; 4 – 400; 5 – 600; 6 – 800

Fig. 2. Stress-strain curves for CrMnFeCoNi HEA at different temperatures [27], °C: 1 – -196; 2 – 20; 3 – 200; 4 – 400; 5 – 600; 6 – 800

CrMnFeCoNi (22 и 30 мДж/м² соответственно) [33]. Более высокий уровень предела текучести для CrCoNi сплава позволяет достичь критического напряжения двойникового раньше по сравнению со сплавом CrMnCoNi.

Высокоэнтропийный сплав Fe₃₆Mn₂₁Cr₁₈Ni₁₅Al₁₀ в литом состоянии имеет ОЦК структуру с внедренными частицами В2 кубоидальной формы, состоящими, в основном, из алюминия и никеля. Предел текучести на сжатие и растяжение при комнатной температуре составляет 750 и 990 МПа соответственно, после 600 °C наблюдается заметное снижение до 310 и 360 МПа. При сжатии ВЭС демонстрирует заметную пластичность, начиная с комнатной температуры. При растяжении удлинение до разрушения составляет всего 2,5 %. Рост температуры приводит к умеренному увеличению пластичности при разрушении. Отжиг при 1000 °C приводит к началу образования ГЦК фазы. Микротвердость заметно снижается от 410 HV в литом состоянии до 310 HV после отжига при 1000 °C [34]. По мнению

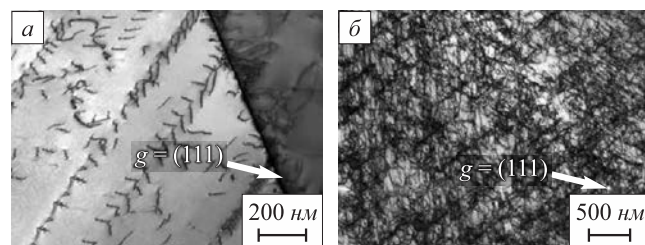


Рис. 3. Планарные дислокационные скопления на плоскости {111} ВЭС CrCoNi при разных степенях деформации: а – $\epsilon = 5\%$ при 77 К; б – $\epsilon = 22\%$ при комнатной температуре (ячеисто-сетчатая дислокационная субструктура) [40]

Fig. 3. Planar dislocation clusters on the {111} plane of CrCoNi HEA at different deformation degrees: а – $\epsilon = 5\%$ at 77 K; б – $\epsilon = 22\%$ at room temperature (cellular-mesh dislocation substructure) [40]

авторов этой работы трансформация ОЦК структуры в ГЦК связана с наличием алюминия. Эти 10 % Al меняют VEC (концентрацию валентных электронов) по сравнению со сплавами аналогичного состава на основе Co–Cr–Fe–Ni–Mn.

Монокристаллические сплавы

Многочисленные работы по ВЭС свидетельствуют об определяющей роли ориентации монокристаллов при испытаниях. При этом важно, какие точные методы определения двойникования использовались. Методы ПЭМ позволяют при $\varepsilon > 5\%$ для образцов, ориентированных для множественного скольжения, фиксировать начало двойникования. При ориентации для одиночного скольжения первоначально до 27 % основная роль принадлежит дислокационной активности. При ориентации множественного скольжения [001] двойникование вообще не наблюдалось. Известно также, что двойникование затруднено с уменьшением размера зерна [35], в монокристаллах оно реализуется при более низких напряжениях. Необходимо отметить, что дифракция обратно рассеянных электронов и другие методы уступают ПЭМ при оценке роли двойникования.

ВЭС с ОЦК и ГЦК решеткой

Снижение концентрации валентных электронов (VEC) в сплавах молибдена и ниобия уменьшает прочность на сдвиг [36], так что сплавы с низкой VEC легче деформируются и более пластичны. По сравнению с ГЦК сплавами ОЦК ВЭС сплавы меньше изучены из-за хрупкости при низких гомологических температурах. Исключение составляют сплавы NbMoTaW, VNbMoTaW, TiVZrNbHf и особенно TiZrNbHfTi [37]. После дуговой плавки и прессования (1473 К, 207 МПа, 3 ч) в нем образуется дендритная структура, которая исчезает после термомеханической обработки (холодная прокатка + рекристаллизация в течение 2 ч при 1000 °С) с образованием однородной зеренной структуры и однородного химического состава.

По сравнению с ГЦК ВЭС (например, CrMnFeCoNi) ОЦК сплав TiZrNbHfTa упрочняется меньше. Оценка параметра α в выражении $\Delta t = \alpha G b \sqrt{\rho}$ свидетельствует об определяющей роли барьера Пайерлса. Для сплава CrMnFeCoNi с ГЦК структурой основной вклад вносят дислокации «леса». Для зерен размерами 38,81 и 128 мкм предел текучести на растяжение ВЭС TiZrNbHfTa примерно одинаков – 950 МПа [38], что меньше, чем для зерен размера 22 мкм (1145 МПа) [37].

Теория и модели описания механических свойств ВЭС

Методы молекулярной динамики, используемые для описания механических свойств на основе модельных

представлений, приведены в работах [37–40]. Трудности в интерпретации пластичности ВЭС связаны с необходимостью понимания того, как движутся дислокации через композиционно разориентированные решетки. Количественный теоретический анализ механических свойств (таких, как деформационное упрочнение, пластичность, двойникование, разрушение, усталость) затруднен для ВЭС, поскольку нет еще однозначного подхода даже для разбавленных сплавов. Трудности обусловлены многокомпонентной природой состава ВЭС. В первую очередь должны быть преодолены трудности в определении роли ближнего порядка в механических свойствах ВЭС. Механизмы упрочнения Тэйлора (дислокационное взаимодействие), межфазное взаимодействие (взаимодействие дислокаций с границами зерен, двойников, частиц) изучены значительно лучше.

Области применения ВЭС

Высокоэнтропийные сплавы могут применяться, в частности, в ядерной энергетике, так как обладают высокой стойкостью к облучению [41], в качестве тугоплавких, магнитомягких материалов, а также материалов, используемых в металлообрабатывающей промышленности. В аэрокосмической промышленности могут найти применение ВЭС благодаря коррозионной стойкости, а также как материалы для хранения водорода [42, 43]. В работе [44] представлена разработанная авторами технология и описаны свойства нового класса сверхтвердых покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов. Исходным материалом для напыления служит новый класс материалов: высокоэнтропийные сплавы. Использование усовершенствованных технологических режимов вакуумно-дугового напыления позволило на базе твердорастворимых высокоэнтропийных сплавов получить сверхтвердые покрытия, обладающие термостабильностью до 1100 °С [44]. Выявлено, что высокоэнтропийные однофазные нитридные покрытия на основе пяти нитридообразующих элементов характеризуются высокими значениями твердости (50–60 ГПа) и модуля упругости (более 600 ГПа). На формирование типа решетки нитридных покрытий наибольшее влияние оказывает теплота образования и преобладание нитридов с одним типом кристаллической решетки. Установлено, что высокоэнтропийные однофазные нитридные покрытия являются достаточно термостабильными [44].

Одна из перспективных областей применения нитридных покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов – биомедицина. Защитные покрытия для биомедицинского применения должны обладать низким модулем эластичности, высокой химической стабильностью, износостойкостью и коррозионной стойкостью в физиологических средах, низким коэффициентом трения, биологической совместимостью и отличной адгезией к поверхности, на которую осаждаются защит-

ные покрытия [45]. Особо следует отметить работу [6], в которой спрогнозированы возможные области применения ВЭС в различных отраслях промышленности.

Значительного повышения характеристик поверхностных слоев металлов, сталей, легких сплавов можно достичь за счет использования внешних энергетических воздействий. Наиболее эффективными из них являются мощные электрические токи, электровзрывное легирование, обработка сильноточными низкоэнергетическими электронными пучками [46 – 48]. Такие внешние энергетические воздействия за счет модифицирования поверхностных слоев значительно повышают циклическую долговечность и износостойкость титана и титановых сплавов [48], нержавеющей сталей [49], легких сплавов [46], электроэрозионную стойкость выключателей мощных электрических цепей на основе меди [50]. Накопленные и проанализированные в представленных работах данные позволяют расширить области применения ВЭС в различных отраслях промышленности.

Выводы

Последние два десятилетия характеризуются появлением значительного числа работ по созданию, изучению и использованию высокоэнтропийных сплавов, содержащих до 5 – 6 основных элементов концентрацией от 5 до 35 %. По сравнению с типичными металлическими сплавами они проявляют уникальные свойства из-за их высокой твердости, термической и коррозионной стойкости, термостойкости при повышенных температурах и других. Проведена попытка выпол-

нить краткий анализ последних публикаций зарубежных авторов по формированию структурно-фазовых состояний и свойств в основном пятикомпонентных сплавов типа AlCoCrFeNi и областей их возможного применения. Отмечено, что несмотря на значительное количество работ проведение строгого сравнительного анализа затруднено в силу ряда объективных причин. Идет накопление экспериментального материала и его осмысление. Высокоэнтропийные сплавы с ОЦК решеткой имеют, преимущественно, высокую прочность и низкую пластичность, тогда как у материалов с ГЦК решеткой низкая прочность и высокая пластичность. Показано, что существенно улучшенные свойства ГЦК ВЭС FeMnCoCrNi достигаются легированием бором. Этого же можно достичь оптимизацией параметров термомеханической обработки при введении 1 % С (ат.). Анализ кривых деформации свидетельствует о росте предела текучести и относительного удлинения при понижении температуры до температуры жидкого азота.

Для ВЭС с ГЦК структурой при степени деформации $\varepsilon > 6\%$ наряду с дислокационным начинает работать механизм двойникования. При испытаниях монокристаллических ВЭС определяющая роль принадлежит ориентации. Фиксировать при множественном и одиночном скольжении начало двойникования лучше всего методами ПЭМ.

В зависимости от комплекса свойств ВЭС указаны области их применения. Сверхтвердые покрытия на основе ВЭС обладают термостабильностью. Показаны возможные перспективные области использования внешних энергетических воздействий для модифицирования поверхностных слоев ВЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Yeh J.W., Chen S.K., Lin S.J., Gan J.Y., Chin T.S., Shun T.T., Tsau C.H., Chang S.Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes // *Advanced Engineering Materials*. 2004. Vol. 6. No. 5. P. 299–303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
2. Zhang Y., Yang X., Liaw P.K. Alloy design and properties optimization of high-entropy alloys // *JOM*. 2012. Vol. 64. No. 7. P. 830–838. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0366-5>
3. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys // *Annales de Chimie. Science des Materiaux*. 2006. Vol. 31. No. 6. P. 633–648. <https://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648>
4. Yeh J.W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys // *JOM*. 2013. Vol. 65. No. 12. P. 1759–1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>
5. Zhang L.S., Ma G.-L., Fu L.-C., Tian J.-Y. Recent progress in high-entropy alloys // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 631–632. P. 227–232. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.631-632.227>
6. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys // *Progress in Materials Science*. 2014. Vol. 61. P. 1–93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
7. Gali A., George E.P. Tensile properties of high- and medium-entropy alloys // *Intermetallics*. 2013. Vol. 39. P. 74–78. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.03.018>

1. Yeh J.W., Chen S.K., Lin S.J., Gan J.Y., Chin T.S., Shun T.T., Tsau C.H., Chang S.Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*. 2004, vol. 6, no. 5, pp. 299–303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
2. Zhang Y., Yang X., Liaw P.K. Alloy design and properties optimization of high-entropy alloys. *JOM*. 2012, vol. 64, no. 7, pp. 830–838. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0366-5>
3. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie. Science des Materiaux*. 2006, vol. 31, no. 6, pp. 633–648. <https://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648>
4. Yeh J.W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *JOM*. 2013, vol. 65, no. 12, pp. 1759–1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>
5. Zhang L.S., Ma G.-L., Fu L.-C., Tian J.-Y. Recent progress in high-entropy alloys. *Advanced Materials Research*. 2013, vol. 631–632, pp. 227–232. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.631-632.227>
6. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 2014, vol. 61, pp. 1–93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
7. Gali A., George E.P. Tensile properties of high- and medium-entropy alloys. *Intermetallics*. 2013, vol. 39, pp. 74–78. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.03.018>

8. 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>
9. Jiang L., Lu Y., Dong Y., Wang T., Cao Z., Li T. Annealing effects on the microstructure and properties of bulk high-entropy CoCrFeNiTi_{0.5} alloy casting ingot // *Intermetallics*. 2014. Vol. 44. P. 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.08.016>
10. Shun T.-T., Chang L.-Y., Shiu M.-H. Microstructure and mechanical properties of multiprincipal component CoCrFeNiMo_x alloys // *Materials Characterization*. 2012. Vol. 70. P. 63–67. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.05.005>
11. Senkov O.N., Miracle D.B. A topological model for metallic glass formation // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2003. Vol. 317. No. 1–2. P. 34–39. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(02\)01980-4](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(02)01980-4)
12. Takeuchi A., Chen N., Wada T., Yokoyama Y., Kato H., Inoue A., Yeh J.W. Pd₂₀Pt₂₀Cu₂₀Ni₂₀P₂₀ high-entropy alloy as a bulk metallic glass in the centimeter // *Intermetallics*. 2011. Vol. 19. No. 10. P. 1546–1554. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.05.030>
13. Singh S., Wanderka N., Murty B.S., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2011. Vol. 59. No. 1. P. 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.09.023>
14. George E.P., Curtin W.A., Tasan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // *Acta Materialia*. 2020. Vol. 188. P. 435–474. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>
15. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 122. P. 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
16. Raghavan R., Kirchlechner C., Jaya B.N., Feuerbacher M., Dehm G. Mechanical size effects in a single crystalline equiatomic FeCrCoMnNi high entropy alloy // *Scripta Materialia*. 2017. Vol. 129. P. 52–55. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.10.026>
17. Zhou Y.J., Zhang Y., Wang Y.L., Chen G.L. Solid solution alloys of AlCoCrFeNiTi_x with excellent room-temperature mechanical properties // *AIP Applied Physics Letters*. 2007. Vol. 90. Article 181904. <https://doi.org/10.1063/1.2734517>
18. Qiao J.W., Ma S.G., Huang E.W., Chuang C.P., Liaw, P.K., Zhang Y. Microstructural characteristics and mechanical behaviors of AlCoCrFeNi high-entropy alloys at ambient and cryogenic temperature // *Materials Science Forum*. 2011. Vol. 688. P. 419–425. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.688.419>
19. 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>
20. Seol J.B., Bae J.W., Li Z., Han J.Ch., Kim J.G., Raabe D., Kim H.S. Boron doped ultrastrong and ductile high-entropy alloys // *Acta Materialia*. 2018. Vol. 151. P. 366–376. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.04.004>
21. Slone C.E., Chakraborty S., Miao J., George E.P., Mills M.J., Niezgoda S.R. Influence of deformation induced nanoscale twinning and FCC-HCP transformation on hardening and texture development in medium-entropy CrCoNi alloy // *Acta Materialia*. 2018. Vol. 158. P. 38–52. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.07.028>
22. Wu Z., Bei H., Pharr G.M., George E.P. Temperature dependence of the mechanical properties of equiatomic solid solution alloys with face-centered cubic crystal structures // *Acta Materialia*. 2014. Vol. 81. P. 428–441. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.08.026>
23. Otto F., Dlouhy A., Somsen C., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. No. 15. P. 5743–5755. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018>
24. Wigley D.A. Mechanical properties of materials at low temperatures // *Cryogenics*. 1968. Vol. 8. No. 1. P. 3–12. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(68\)80042-6](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(68)80042-6)
8. 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>
9. Jiang L., Lu Y., Dong Y., Wang T., Cao Z., Li T. Annealing effects on the microstructure and properties of bulk high-entropy CoCrFeNiTi_{0.5} alloy casting ingot. *Intermetallics*. 2014, vol. 44, pp. 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.08.016>
10. Shun T.-T., Chang L.-Y., Shiu M.-H. Microstructure and mechanical properties of multiprincipal component CoCrFeNiMo_x alloys. *Materials Characterization*. 2012, vol. 70, pp. 63–67. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.05.005>
11. Senkov O.N., Miracle D.B. A topological model for metallic glass formation. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2003, vol. 317, no. 1–2, pp. 34–39. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(02\)01980-4](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(02)01980-4)
12. Takeuchi A., Chen N., Wada T., Yokoyama Y., Kato H., Inoue A., Yeh J.W. Pd₂₀Pt₂₀Cu₂₀Ni₂₀P₂₀ high-entropy alloy as a bulk metallic glass in the centimeter. *Intermetallics*. 2011, vol. 19, no. 10, pp. 1546–1554. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.05.030>
13. Singh S., Wanderka N., Murty B.S., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2011, vol. 59, no. 1, pp. 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.09.023>
14. George E.P., Curtin W.A., Tasan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia*. 2020, vol. 188, pp. 435–474. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>
15. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017, vol. 122, pp. 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
16. Raghavan R., Kirchlechner C., Jaya B.N., Feuerbacher M., Dehm G. Mechanical size effects in a single crystalline equiatomic FeCrCoMnNi high entropy alloy. *Scripta Materialia*. 2017, vol. 129, pp. 52–55. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.10.026>
17. Zhou Y.J., Zhang Y., Wang Y.L., Chen G.L. Solid solution alloys of AlCoCrFeNiTi_x with excellent room-temperature mechanical properties. *AIP Applied Physics Letters*. 2007, vol. 90, article 181904. <https://doi.org/10.1063/1.2734517>
18. Qiao J.W., Ma S.G., Huang E.W., Chuang C.P., Liaw, P.K., Zhang Y. Microstructural characteristics and mechanical behaviors of AlCoCrFeNi high-entropy alloys at ambient and cryogenic temperature. *Materials Science Forum*. 2011, vol. 688, pp. 419–425. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.688.419>
19. 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>
20. Seol J.B., Bae J.W., Li Z., Han J.Ch., Kim J.G., Raabe D., Kim H.S. Boron doped ultrastrong and ductile high-entropy alloys. *Acta Materialia*. 2018, vol. 151, pp. 366–376. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.04.004>
21. Slone C.E., Chakraborty S., Miao J., George E.P., Mills M.J., Niezgoda S.R. Influence of deformation induced nanoscale twinning and FCC-HCP transformation on hardening and texture development in medium-entropy CrCoNi alloy. *Acta Materialia*. 2018, vol. 158, pp. 38–52. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.07.028>
22. Wu Z., Bei H., Pharr G.M., George E.P. Temperature dependence of the mechanical properties of equiatomic solid solution alloys with face-centered cubic crystal structures. *Acta Materialia*. 2014, vol. 81, pp. 428–441. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.08.026>
23. Otto F., Dlouhy A., Somsen C., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2013, vol. 61, no. 15, pp. 5743–5755. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018>
24. Wingley D.A. Mechanical properties of materials at low temperatures. *Cryogenics*. 1968, vol. 8, no. 1, pp. 3–12. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(68\)80042-6](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(68)80042-6)

25. Yeh J.W. Physical metallurgy of high-entropy alloys // *JOM*. 2015. Vol. 67. No. 10. P. 2254–226. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1583-5>
26. Okamoto N.L., Fujimoto S., Kambara Y., Kawamura M., Zhenghao M.T.C., Matsunoshita H., Tanaka K., Inui H., George E.P. Size effect, critical resolved shear stress, stacking fault energy, and solid solution strengthening in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. Article 35863. <https://doi.org/10.1038/srep35863>
27. Patriarca L., Ojha A., Sehitoğlu H., Chumlyakov Y.I. Slip nucleation in single crystal FeNiCoCrMn high entropy alloy // *Scripta Materialia*. 2016. Vol. 112. P. 54–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.09.009>
28. Kireeva I.V., Chumlyakov Yu.I., Pobedennaya Z.V., Kuksgausen I.V., Karaman I. Orientation dependence of twinning in single crystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2017. Vol. 705. P. 176–181. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.065>
29. Wu Z., Gao Y.F., Bei H. Single crystal plastic behavior of a single-phase, face-center-cubic-structured, equiatomic FeNiCrCo alloy // *Scripta Materialia*. 2015. Vol. 109. P. 108–112. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.07.031>
30. Park J.M., Moon J., Bae J.W., Jang M.J., Park J., Lee S., Kim H.S. Strain rate effects of dynamic compressive deformation on mechanical properties and microstructure of CoCrFeMnNi high-entropy alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 719. P. 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.02.031>
31. Zhang Z., Sheng H., Wang Z., Gludovatz B., Zhang Z., George E.P., Yu Q., Mao S.X., Ritchie R.O. Dislocation mechanisms and 3D twin architectures generate exceptional strength-ductility-toughness combination in CrCoNi medium-entropy alloy // *Nature Communications*. 2017. Vol. 8. No. 1. Article 14390. <https://doi.org/10.1038/ncomms14390>
32. Laplanche G., Kostka A., Horst O.M., Eggeler G., George E.P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 118. P. 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.038>
33. Varvenne C., Luque A., Curtin W.A. Theory of strengthening in fcc high entropy alloys // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 118. P. 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.040>
34. Shaysultanov D.G., Salishchev G.A., Ivanisenko Yu.V., Zhrebtsov S.V., Tikhonovsky M.A., Stepanov N.D. Novel Fe₃₆Mn₂₁Cr₁₈Ni₁₅Al₁₀ high entropy alloy with bcc/B2 dual-phase structure // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 705. P. 756–763. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.211>
35. Meyers M.A., Vöhringer O., Lubarda V.A. The onset of twinning in metals: A constitutive description // *Acta Materialia*. 2001. Vol. 49. No. 19. P. 4025–4039. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00300-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00300-7)
36. Zhu Y.T., Liao X.Z., Wu X.L. Deformation twinning in nanocrystalline materials // *Progress in Materials Science*. 2012. Vol. 57. No. 1. P. 1–62. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.05.001>
37. Senkov O.N., Semiatin S.L. Microstructure and properties of a refractory high-entropy alloy after cold working // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 649. P. 1110–1123. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.07.209>
38. Juan Chien-Chang, Tseng Ko-Kai, Hsu Wei-Lin, Tsai Ming-Hung, Tsai Che-Wei, Lin Chun-Ming, Chen Swe-Kai, Lin Su-Jien, Yeh Jien-Wei. Solution strengthening of ductile refractory HfMo_xNbTaTiZr high-entropy alloys // *Materials Letters*. 2016. Vol. 175. P. 284–287. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.03.133>
39. Zamora R.J., Uberuaga B.P., Perez D., Voter A.F. The modern temperature-accelerated dynamics approach // *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. 2016. Vol. 7. P. 87–110. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-080615-033608>
40. Perez D., Uberuaga B.P., Voter A.F. The parallel replica dynamics method – coming of age // *Computational Materials Science*. 2015. Vol. 100. Part B. P. 90–103. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.12.011>
25. Yeh J.W. Physical metallurgy of high-entropy alloys. *JOM*. 2015, vol. 67, no. 10, pp. 2254–226. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1583-5>
26. Okamoto N.L., Fujimoto S., Kambara Y., Kawamura M., Zhenghao M.T.C., Matsunoshita H., Tanaka K., Inui H., George E.P. Size effect, critical resolved shear stress, stacking fault energy, and solid solution strengthening in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Scientific Reports*. 2016, vol. 6, article 35863. <https://doi.org/10.1038/srep35863>
27. Patriarca L., Ojha A., Sehitoğlu H., Chumlyakov Y.I. Slip nucleation in single crystal FeNiCoCrMn high entropy alloy. *Scripta Materialia*. 2016, vol. 112, pp. 54–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.09.009>
28. Kireeva I.V., Chumlyakov Yu.I., Pobedennaya Z.V., Kuksgausen I.V., Karaman I. Orientation dependence of twinning in single crystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2017, vol. 705, pp. 176–181. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.065>
29. Wu Z., Gao Y.F., Bei H. Single crystal plastic behavior of a single-phase, face-center-cubic-structured, equiatomic FeNiCrCo alloy. *Scripta Materialia*. 2015, vol. 109, pp. 108–112. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.07.031>
30. Park J.M., Moon J., Bae J.W., Jang M.J., Park J., Lee S., Kim H.S. Strain rate effects of dynamic compressive deformation on mechanical properties and microstructure of CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2018, vol. 719, pp. 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.02.031>
31. Zhang Z., Sheng H., Wang Z., Gludovatz B., Zhang Z., George E.P., Yu Q., Mao S.X., Ritchie R.O. Dislocation mechanisms and 3D twin architectures generate exceptional strength-ductility-toughness combination in CrCoNi medium-entropy alloy. *Nature Communications*. 2017, vol. 8, no. 1, article 14390. <https://doi.org/10.1038/ncomms14390>
32. Laplanche G., Kostka A., Horst O.M., Eggeler G., George E.P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2016, vol. 118, pp. 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.038>
33. Varvenne C., Luque A., Curtin W.A. Theory of strengthening in fcc high entropy alloys. *Acta Materialia*. 2016, vol. 118, pp. 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.040>
34. Shaysultanov D.G., Salishchev G.A., Ivanisenko Yu.V., Zhrebtsov S.V., Tikhonovsky M.A., Stepanov N.D. Novel Fe₃₆Mn₂₁Cr₁₈Ni₁₅Al₁₀ high entropy alloy with bcc/B2 dual-phase structure. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017, vol. 705, pp. 756–763. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.211>
35. Meyers M.A., Vöhringer O., Lubarda V.A. The onset of twinning in metals: A constitutive description. *Acta Materialia*. 2001, vol. 49, no. 19, pp. 4025–4039. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00300-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00300-7)
36. Zhu Y.T., Liao X.Z., Wu X.L. Deformation twinning in nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*. 2012, vol. 57, no. 1, pp. 1–62. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.05.001>
37. Senkov O.N., Semiatin S.L. Microstructure and properties of a refractory high-entropy alloy after cold working. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015, vol. 649, pp. 1110–1123. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.07.209>
38. Juan Chien-Chang, Tseng Ko-Kai, Hsu Wei-Lin, Tsai Ming-Hung, Tsai Che-Wei, Lin Chun-Ming, Chen Swe-Kai, Lin Su-Jien, Yeh Jien-Wei. Solution strengthening of ductile refractory HfMo_xNbTaTiZr high-entropy alloys. *Materials Letters*. 2016, vol. 175, pp. 284–287. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.03.133>
39. Zamora R.J., Uberuaga B.P., Perez D., Voter A.F. The modern temperature-accelerated dynamics approach. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. 2016, vol. 7, pp. 87–110. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-080615-033608>
40. Perez D., Uberuaga B.P., Voter A.F. The parallel replica dynamics method – coming of age. *Computational Materials Science*. 2015, vol. 100, part B, pp. 90–103. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.12.011>

41. Egami T., Guo W., Rack P.D., Nagase T. Irradiation resistance of multicomponent alloys // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2014. Vol. 45. P. 180–183. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1994-2>
42. Kuncel I., Polanski M., Bystrzycki J. Structure and hydrogen storage properties of a high entropy ZrTiVCrFeNi alloy synthesized using Laser Engineered Net Shaping (LENS) // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38. No. 27. P. 12180–12189. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.071>
43. Kao Y.F., Chen S.K., Sheu J.H., Lin J.T., Lin W.E., Yeh J.W., Lin S.J., Lion T.H., Wang C.W. Hydrogen storage properties of multi-principal-component CoFeMnTi(x)V(y)Zr(z) alloys // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010. Vol. 35. No. 17. P. 9046–9059. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.012>
44. Firstov S.A., Gorban' V.F., Danilenko N.I., Karpets M.V., Andreiev A.A., Makarenko E.S. Thermal stability of superhard nitride coatings from high-entropy multicomponent Ti–V–Zr–Nb–Hf alloy // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2014. Vol. 52. P. 560–566. <https://doi.org/10.1007/s11106-014-9560-z>
45. Pogrebnjak 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. P. 1027–1061. <https://doi.org/10.1070/RCR4407>
46. Zaguliaev D., Gromov V., Rubannikova Y., Konovalov S., Ivanov Y., Romanov D., Semin A. Structure and phase states modification of AL-11SI-2CU alloy processed by ion-plasma jet and pulsed electron beam // *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 383. Article 125246. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125246>
47. Zhang C., Lv P., Xia H., Yang Z., Konovalov S., Chen X., Guan Q. The microstructure and properties of nanostructured Cr–Al alloying layer fabricated by high-current pulsed electron beam // *Vacuum*. 2019. Vol. 167. P. 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.06.022>
48. Konovalov S.V., Komissarova I.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kosinov D.E. Structural and phase changes under electropulse treatment of fatigue-loaded titanium alloy VT1-0 // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8. No. 1. P. 1300–1307. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.09.008>
49. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V., Panchenko I. Fatigue-induced evolution of AISI 310S steel microstructure after electron beam treatment // *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 20. Article 4567. <https://doi.org/10.3390/ma13204567>
50. Romanov D., Moskovskii S., Konovalov S., Sosnin K., Gromov V., Ivanov Y. Improvement of copper alloy properties in electro-explosive spraying of ZnO–Ag coatings resistant to electrical erosion // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8. No. 6. P. 5515–5523. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.019>
41. Egami T., Guo W., Rack P.D., Nagase T. Irradiation resistance of multicomponent alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2014, vol. 45, pp. 180–183. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1994-2>
42. Kuncel I., Polanski M., Bystrzycki J. Structure and hydrogen storage properties of a high entropy ZrTiVCrFeNi alloy synthesized using Laser Engineered Net Shaping (LENS). *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013, vol. 38, no. 27, pp. 12180–12189. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.071>
43. Kao Y.F., Chen S.K., Sheu J.H., Lin J.T., Lin W.E., Yeh J.W., Lin S.J., Lion T.H., Wang C.W. Hydrogen storage properties of multi-principal-component CoFeMnTi(x)V(y)Zr(z) alloys. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010, vol. 35, no. 17, pp. 9046–9059. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.012>
44. Firstov S.A., Gorban' V.F., Danilenko N.I., Karpets M.V., Andreiev A.A., Makarenko E.S. Thermal stability of superhard nitride coatings from high-entropy multicomponent Ti–V–Zr–Nb–Hf alloy. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2014, vol. 52, pp. 560–566. <https://doi.org/10.1007/s11106-014-9560-z>
45. Pogrebnjak 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, pp. 1027–1061. <https://doi.org/10.1070/RCR4407>
46. Zaguliaev D., Gromov V., Rubannikova Y., Konovalov S., Ivanov Y., Romanov D., Semin A. Structure and phase states modification of AL-11SI-2CU alloy processed by ion-plasma jet and pulsed electron beam. *Surface and Coatings Technology*. 2020, vol. 383, article 125246. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125246>
47. Zhang C., Lv P., Xia H., Yang Z., Konovalov S., Chen X., Guan Q. The microstructure and properties of nanostructured Cr–Al alloying layer fabricated by high-current pulsed electron beam. *Vacuum*. 2019, vol. 167, pp. 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.06.022>
48. Konovalov S.V., Komissarova I.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kosinov D.E. Structural and phase changes under electropulse treatment of fatigue-loaded titanium alloy VT1-0. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019, vol. 8, no. 1, pp. 1300–1307. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.09.008>
49. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V., Panchenko I. Fatigue-induced evolution of AISI 310S steel microstructure after electron beam treatment. *Materials*. 2020, vol. 13, no. 20, article 4567. <https://doi.org/10.3390/ma13204567>
50. Romanov D., Moskovskii S., Konovalov S., Sosnin K., Gromov V., Ivanov Y. Improvement of copper alloy properties in electro-explosive spraying of ZnO–Ag coatings resistant to electrical erosion. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019, vol. 8, no. 6, pp. 5515–5523. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.019>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кирилл Александрович Осинцев, аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Сибирский государственный индустриальный университет, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева **ORCID: 0000-0003-1150-6747**
E-mail: osincev.ka@ssau.ru

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

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

Kirill A. Osintsev, Postgraduate of the Chair of Metals Technology and Aviation Materials, Siberian State Industrial University, Samara National Research University **ORCID: 0000-0003-1150-6747**
E-mail: osincev.ka@ssau.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

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

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, Сибирский государственный индустриальный университет, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН
ORCID: 0000-0003-0271-5504
E-mail: yufi55@mail.ru

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Siberian State Industrial University; Chief Researcher, Institute of High Current, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0003-0271-5504
E-mail: yufi55@mail.ru

Ирина Алексеевна Панченко, к.т.н., доцент кафедры менеджмента качества и инноваций, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: i.ri.ss@yandex.ru

Ирина Алексеевна Панченко, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Quality Management and Innovation, Siberian State Industrial University
E-mail: i.ri.ss@yandex.ru

ВКЛАД АВТОРОВ:

К. А. Осинцев – проведение анализа источников информации по теме применения высокоэнтропийных сплавов. Редактирование финальной версии обзора.
В. Е. Громов – формирование концепции обзора. Анализ источников информации по теме монокристаллических высокоэнтропийных сплавов. Написание введения и выводов. Редактирование финальной версии обзора.
С. В. Коновалов – определение целей и задач обзора. Подбор и анализ источников информации по теме высокоэнтропийных сплавов с ОЦК и ГЦК кристаллическими решетками. Редактирование финальной версии обзора.
Ю. Ф. Иванов – подбор и анализ источников информации по теме механических свойств высокоэнтропийных сплавов, а также теории и модели описания механических свойств высокоэнтропийных сплавов. Редактирование финальной версии обзора.
И. А. Панченко – подбор и анализ источников информации по дислокационной и двойниковой пластичности высокоэнтропийных сплавов. Редактирование финальной версии обзора.

Поступила в редакцию 24.08.2020
 После доработки 20.09.2020
 Принята к публикации 11.12.2020

Received 24.08.2020
 Revised 20.09.2020
 Accepted 11.12.2020