



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-63-71>
УДК 621.79

Поступила 26.03.2024
Received 26.03.2024

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЛИТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С. А. МАЦИНОВ, В. А. КАЛИНИЧЕНКО, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: klad@bntu.by
А. А. АНДРУШЕВИЧ, Белорусский государственный аграрно-технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 99. E-mail: andru49@mail.ru

Литейное производство представляет собой многогранную отрасль, позволяющую получать изделия практически любой конфигурации и геометрических размеров. Данные изделия могут быть представлены материалами на основе различных металлов и сплавов, биметаллов и композиционных материалов. Полученные изделия могут быть с равномерными или градиентными свойствами. Однако для получения изделия со свойствами в несколько раз отличающимися на поверхности и в объеме отливки, целесообразно нанесение покрытий со свойствами, позволяющими улучшить работу покрытия. В работе рассматривается получение литых композиционных материалов с улучшенными поверхностными свойствами. Рассмотрены различные типы покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов, керметов, полимеров, углеродных нанотрубок, способных повышать свойства литых композиционных материалов, приведены их классификация и особенности нанесения на поверхность композиционного материала. Показаны перспективы использования этих покрытий для улучшения свойств литых композиционных материалов.

Ключевые слова. Литые композиционные материалы, композиты, литые детали, поверхностные слои, высокоэнтропийные сплавы, керметы, нанотрубки, улучшение поверхностных свойств.

Для цитирования. Мацинов, С. А. Перспективы применения покрытий для улучшения поверхностных свойств литых композиционных материалов / С. А. Мацинов, В. А. Калиниченко, А. А. Андрушевич // Литье и металлургия. 2024. № 2. С. 63–71. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-63-71>.

PROSPECTS OF COATING APPLICATION FOR IMPROVING SURFACE PROPERTIES OF CAST COMPOSITE MATERIALS

S. A. MATSINOV, V. A. KALINICHENKO, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: klad@bntu.by
A. A. ANDRUSHEVICH, Belarusian State Agrarian Technical University,
Minsk, Belarus, 99, Nezavisimosti ave. E-mail: andru49@mail.ru

Foundry production is a versatile industry that allows the production of products of almost any configuration and geometric dimensions. These products can be made from materials based on various metals and alloys, bimetals, and composite materials. The obtained products can have uniform or gradient properties. However, to obtain a product with significantly different properties on the surface and in the volume from the casting, it is expedient to apply coatings with desired properties on the castings that complement the properties, allowing the improvement of coating performance. The paper focuses on the production of cast composite materials with improved surface properties. Various types of coatings based on high-entropy alloys, cermets, polymers, carbon nanotubes, capable of enhancing the properties of cast composite materials, are considered. The classification and peculiarities of applying these coatings on the surface of composite materials are presented. The prospects of using these coatings to improve the properties of cast composite materials are shown.

Keywords. Cast composite materials, composites, castings, surface layers, high-entropy alloys, cermets, nanotubes, surface property improvement.

For citation. Matsinov S. A., Kalinichenko V. A., Andrushevich A. A. Prospects of coating application for improving surface properties of cast composite materials. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 2, pp. 63–71. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-63-71>.

Современное развитие науки и техники требует постоянного создания и применения новых материалов на основе инновационных решений с уникальными свойствами, которые отсутствуют у традиционных металлов и сплавов, для получения деталей, механизмов и машин с повышенными

эксплуатационными характеристиками. В технике и быту используются естественные (природные) и искусственные (синтезированные) композиционные материалы (КМ) – композиты. Однако не все получаемые КМ должны обладать равномерными свойствами по всей толщине отливки, что, как правило, связано со спецификой их эксплуатации. В связи с этим наибольшее воздействие отрицательных факторов принимает рабочая поверхность композиционного материала, которая вступает во взаимодействие с окружающей средой или контртелом.

Для повышения функциональных свойств поверхности изделий из КМ наиболее эффективны покрытия на основе следующих материалов: высокоэнтروпийные сплавы, керметы, полимеры, углеродные нанотрубки.

Однако многие из этих материалов не обладают высокими прочностными свойствами и, как правило, наносятся на подложку тонкими слоями. В случае наличия вибрации или ударных нагрузок возможно разрушение нанесенного улучшающего покрытия. В качестве подложки целесообразно использование литых КМ с макрогетерогенной структурой: с матрицей на основе медьсодержащих сплавов, которые обладают достаточно хорошей демпфирующей способностью [1–3]. Далее будут предложены материалы покрытий, способные повысить качество поверхности макрогетерогенных композиционных материалов, изготавливаемых методами литья.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС)

Понятие о данном типе материалов ввел Йех (Yeh) в 2004 г. [4]. Это материалы, состоящие обычно от 5 до 13 элементов с примерно равными концентрациями от 5 до 35 ат. %. Однако более поздние исследования показали, что это определение можно расширить. Предполагается, что только сплавы, образующие твердый раствор с незначительным влиянием интерметаллидных фаз, следует считать настоящими высокоэнтропийными сплавами, поскольку образование упорядоченных фаз уменьшает энтропию системы [5].

Для получения высокоэнтропийных сплавов могут быть использованы различные технические решения, связанные с процессами плавления, порошковой металлургии (механического легирования порошков), сварки, спиннингования, *splat*-охлаждения, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, магнетронного распыления мишеней, наплавки порошковых смесей на металлическую основу и др.

В большинстве случаев ВЭС получают плавлением материалов с последующей их кристаллизацией [7]. Используют методы электродугового плавления в вакууме [3, 18–22], аргонодугового [23] и индукционного [24, 25] плавления, плавления в печах сопротивления.

Одним из наиболее распространенных методов получения ВЭС является вакуумно-дуговое плавление [26]. Исходным материалом является смесь металлов чистотой более 99%. Выплавку сплавов выполняют в среде инертного газа, предотвращающего материал от окисления. С целью повышения степени однородности отливок их переплавляют несколько раз.

К часто используемым методам получения ВЭС относят также механическое сплавление чистых порошковых компонентов в планетарных шаровых мельницах [27–34]. Деформированием в высокоэнергетических шаровых мельницах смеси элементарных порошков осуществляют их взаимодействие. Особенностью, характерной для механического сплавления порошков высокопластичных материалов, является налипание их на поверхность деформирующих шаров, что в итоге отражается на качестве формируемых ВЭС. Полученные методом механического легирования порошковые материалы требуют консолидации.

Одним из наиболее эффективных подходов к выполнению этой задачи служит искровое плазменное спекание (*spark plasma sintering*) [35–38]. В ряде работ многокомпонентные высокоэнтропийные сплавы получают с использованием технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [39, 40].

Высокоэнтропийные сплавы в виде тонких пленок и многослойных покрытий получают методом магнетронного распыления [41, 42]. Тонкослойный ВЭС может быть получен путем распыления одной мишени, в состав которой входит несколько компонентов. Второй подход к решению задачи основан на одновременном магнетронном распылении нескольких мишеней [43]. Методом магнетронного распыления получают высокоэнтропийные сплавы в виде нитридов [44], карбидов [45] и других материалов. Чередую мишени разного состава, методом магнетронного распыления были сформированы также наноструктуры, состоящие из слоев ВЭС и чистых металлов [46].

Одной из разновидностей многокомпонентных сплавов, применяемых в последнее время, являются высокоэнтропийные металлические стекла [10, 47, 48]. Технологический процесс их получения основан на спиннинговании расплавов ВЭС. Полученное металлическое стекло представляет собой аморфную

ленту, охлажденную с высокой скоростью на вращающемся медном барабане. Одна из технологий ускоренной закалки ВЭС из жидкого состояния основана на использовании *splat*-охлаждения, заключающегося в столкновении капли расплава с внутренней поверхностью вращающегося с высокой скоростью медного цилиндра [49].

Слоистые композиты формируют методом диффузионной сварки алюминиевой фольги и тонких слоев высокоэнтропийных сплавов. Слитки ВЭС, полученные в вакуумно-дуговой печи, деформируют прокаткой до толщины 0,4 мм на двухвалковых станах при комнатной температуре со степенью ~ 15% за один проход [50, 51]. Слоистые заготовки сваривают диффузионным методом в два этапа. На первом этапе длительностью 2 ч температура составляла 600 °С, на втором – 950 °С.

В качестве важных показателей ВЭС отмечают их твердость, прочность, износостойкость [6–9], повышенную пластичность при низких температурах, коррозионную стойкость, термическую стабильность [10], устойчивость к ионизирующим излучениям [11, 12], которые улучшают поверхностные характеристики деталей из литых композиционных материалов.

Уникальные свойства многокомпонентных ВЭС обусловлены проявлением четырех эффектов [10, 12–17]. Один из них связан с высокой энтропией сплава, второй – с искажениями кристаллической решетки, третий – с замедленной диффузией компонентов сплава, четвертый получил название «коктейльный эффект».

Эффект высокой энтропии, от которого происходит название рассматриваемых в работе сплавов, определяется уровнем конфигурационной энтропии. В соответствии с одной из классификаций анализируемых сплавов к низкоэнтропийным относят сплавы, у которых $DS_{\max} \leq 0,69R$, где R – универсальная газовая постоянная [49]. Среднеэнтропийные сплавы описываются соотношением $0,69R \leq DS_{\max} \leq 1,61R$. К высокоэнтропийным относят сплавы с $DS_{\max} \geq 1,61R$.

Поиск составов высокоэнтропийных стабильных сплавов осложняется рядом обстоятельств [10]. Одно из них заключается в том, что применимость зависимостей, надежно описывающих условия стабильности идеальных растворов, по отношению к реальным твердым растворам неочевидна [15].

Второй из основных эффектов высокоэнтропийных сплавов – **эффект искажений кристаллической решетки**, который обусловлен различием размеров атомов, образующих многокомпонентную систему. Искажения кристаллической решетки в значительной степени определяют уровень прочностных свойств ВЭС. Степень искажений минимальна при соседстве атомов, близких по своим размерам. В сплавах, состоящих из атомов, существенно различающихся по размерам, формируются более крупные пустоты – междоузлия. В этих пустотах могут располагаться внедренные атомы, формирующие область локальных напряжений [10]. Источниками искажений являются также крупные атомы, расположенные в узлах кристаллической решетки и окруженные более мелкими атомами, положение которых также соответствует узлам решетки.

Замедленная диффузия представляет собой третий эффект, определяющий стабильность структуры и комплекс свойств высокоэнтропийных сплавов. Благоприятное влияние низкой скорости диффузии отражается в повышении термической и химической стабильности ВЭС [50, 51]. В качестве факторов, объясняющих торможение диффузионных процессов, отмечают искажения кристаллической решетки и иные особенности, характерные для ВЭС [19, 49, 52, 53]. Вскрытые в ряде работ противоречия позволяют сделать вывод, что подтверждение или опровержение эффекта замедленной диффузии в ВЭС требует дополнительных исследований [10].

Термин **«коктейльный эффект»** предполагает, что в сложной по составу системе проявляется эффект смешения, не доступный каждому из его компонентов в отдельности. По сути, этот термин является синонимом такого понятия, как синергетический эффект [10].

Керметы

Керметы стали известны после Второй мировой войны, когда появилась необходимость разработки высокотемпературных и стойких к высоким нагрузкам материалов.

Керметы – это керамико-металлические материалы, получаемые путем спекания металлических и керамических порошков. Керамические материалы наряду с высокой твердостью, как правило, имеют повышенную хрупкость, низкое сопротивление изгибу и ударным нагрузкам. Ликвидировать многие из этих недостатков позволяет сочетание керамических материалов с металлической связкой.

Керамико-металлические композиционные материалы изготавливают методами порошковой металлургии из железа, ванадия, молибдена, вольфрама, кобальта, меди и других металлов, тугоплавких

оксидов, а также карбидов, боридов, нитридов и силицидов металлов [52]. Керметы обладают высокими прочностными свойствами, химической стойкостью, высокой тепло- и электропроводностью. Они нашли применение в машиностроении для изготовления режущего инструмента, электрических скользящих контактов, подшипников скольжения, в авиационной и космической технике для изготовления камер сгорания ракет и авиационных двигателей и т.д.

Полимеры

Современная концепция полимеров, как ковалентно связанных макромолекулярных структур, была предложена в 1920 г. Германом Штаудингером [21]. Полимеры – вещества, состоящие из «мономерных звеньев», соединенных в длинные макромолекулы химическими связями.

Полимерами могут быть неорганические и органические, аморфные и кристаллические вещества. Полимер является высокомолекулярным соединением: количество мономерных звеньев в полимере (степень полимеризации) должно быть достаточно велико (в другом случае соединение будет называться олигомером).

Во многих случаях количество звеньев может считаться достаточным, чтобы отнести молекулу к полимерам, если при добавлении очередного мономерного звена молекулярные свойства не изменяются. Как правило, полимеры – вещества с молекулярной массой от нескольких тысяч до нескольких миллионов [53].

Преимущества полимерных материалов и изделий:

- неограниченная сырьевая база для их производства, постоянно пополняемая за счет синтеза новых полимеров с заранее заданными свойствами;
- невысокая полимероемкость, т.е. невысокий расход смол на единицу готовой продукции;
- простота переработки полимерных материалов в изделия любого (даже весьма сложного) профиля с образованием минимума отходов;
- способность полимеров образовывать тонкие прочные пленки;
- широкие технологические возможности получения материалов и изделий с заданными характеристиками, отвечающими функциональным, эксплуатационным, эстетическим и экономическим требованиям;
- ценный комплекс свойств: сочетание легкости и прочности, водо-, паро- и газонепроницаемость, химическая стойкость, электроизоляционные и диэлектрические свойства, эластичность, неподверженность коррозии и др.;
- способность принимать любую окраску и фактуру.

Полимеры и материалы на их основе имеют ряд недостатков. К ним относятся: недостаточная долговечность, старение, чувствительность к ультрафиолетовому излучению (материал становится жестким, хрупким, растрескивается), низкая тепло- и морозостойкость, малая жесткость и поверхностная твердость, ползучесть, горение, способность накапливать статическое электричество.

Полимерные материалы характеризуются такими важными триботехническими свойствами, как низкий коэффициент трения, способность работать без смазочного материала, малый удельный вес, достаточная прочность, высокая химическая стойкость к агрессивным средам. Эти материалы хорошо выдерживают возникающие при трении температуры и способны работать в условиях крайне низких температур.

Нанотрубки

Нанотрубки – топологические формы наночастиц в виде пологого наностержня. Фуллерен (C_{60}) был открыт группой ученых: Смолли, Крото и Кёрла в 1985 г. [54], за что в 1996 г. эти исследователи были удостоены Нобелевской премии по химии.

Углеродные нанотрубки – своеобразные цилиндрические молекулы диаметром примерно половины нанометра и длиной до нескольких микрометров, состоящие из одних лишь атомов углерода. Что касается углеродных нанотрубок, то здесь нельзя назвать точную дату их открытия. Хотя общеизвестным является факт наблюдения структуры таких многослойных нанотрубок Иидзимой в 1991 г. [55].

Электрическая проводимость углеродных нанотрубок гораздо выше, чем у меди и серебра. К тому же, на расстоянии нескольких микрометров наблюдается баллистическая проводимость. С другой стороны, углеродные нанотрубки – это замечательный полупроводниковый материал, который по своим характеристикам может сравниться с кремнием. С использованием однослойных углеродных нанотрубок можно получить транзисторы, в которых подвижность носителей заряда значительно превышает подвижность в традиционных кремниевых транзисторах. Кроме того, однослойные нанотрубки позволяют

получить транзисторы на гибких и прозрачных подложках. Однослойные углеродные нанотрубки обладают замечательными тепловыми свойствами, лучшими, чем у алмаза: тепловая проводимость в трубках примерно в 2 раза выше.

Термическая устойчивость углеродных нанотрубок довольно высока: можно, не боясь разрушить их, нагревать до 1500 °С, в то время как их основной конкурент, органические проводники – начинают разрушаться уже при температуре около 150 °С. Углеродные нанотрубки очень легкий материал. Они обладают высокой удельной прочностью – в 25 раз выше, чем у высокопрочной стали. Это чуть ли не единственный материал, из которого можно было бы создать космический лифт, связав вращающийся на геостационарной орбите спутник с Землей, в виде троса, на котором можно было бы поднимать грузы в космос. Добавки углеродных нанотрубок в полимеры позволяют получить композиты, в которых изменяются механические свойства, получаются очень прочные композиционные материалы, в которых варьируется и электрическая проводимость. Если материал покрыть слоем углеродных нанотрубок, то можно получить слой, который будет защищать и экранировать материал от электромагнитных волн.

Выводы

Приведенные примеры не исчерпывают всевозможные области эффективного применения покрытий, способных повысить качество поверхности макрорегетерогенных литых композиционных материалов, однако свидетельствуют о больших перспективах использования этих материалов при изготовлении различных деталей современной техники.

Наиболее эффективным и технически целесообразным на основании проведенного аналитического обзора является использование в качестве материалов таких покрытий высокоэнтропийных сплавов, получаемых в промышленности самыми разнообразными способами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрушевич, А. А. Литейная технология изготовления деталей сельскохозяйственной техники из композиционных материалов / А. А. Андрушевич, В. А. Калиниченко // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 7–8 июня 2018 г. – Минск: БГАТУ, 2018. – С. 225–228.
2. Особенности получения медно-чугунных композитов с использованием литейных технологий / А. С. Калиниченко [и др.] // *Металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2017. – Вып. 38. – С. 101–105.
3. Андрушевич, А. А. Особенности получения композиционных материалов с матрицей на основе меди / А. А. Андрушевич, В. А. Калиниченко // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 6–7 июня 2019 г. – Минск: БГАТУ. – 2019. – С. 151–156.
4. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes / J.W. Yeh [et al.]. – *Advanced Engineering Materials*. – 2004. – Vol. 6, iss. 5. – P. 299–303.
5. Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys / F. Otto [et al.] // *Acta Materialia*. – 2013. – Vol. 61, iss. 7. – P. 2628–2638.
6. Влияние микроструктуры на механические свойства при растяжении высокоэнтропийного сплава AlCoCrCuFeNi / А. В. Кузнецов [и др.] // *Научные ведомости Белгородского гос. ун-та. Математика. Физика*. – 2012. – № 11. – С. 191–205.
7. Ивченко, М. В. Структура, фазовые превращения и свойства высокоэнтропийных металлических сплавов на основе AlCrCoNiCu: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / М. В. Ивченко. – Екатеринбург, 2015. – 167 с.
8. Влияние содержания никеля на износостойкость литого высокоэнтропийного сплава VCrMnFeCoNi_x / М. В. Карпец [и др.] // *Современная электрометаллургия*. – 2015. – № 1. – С. 56–60.
9. Рогачев, А. С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов / А. С. Рогачев // *Физика металлов и металловедение*. – 2020. – Т. 121, № 8. – С. 807–841.
10. Башев, В. Ф. Структура и свойства высокоэнтропийного сплава CoCrCuFeNiSn_x / В. Ф. Башев, А. И. Кушнерев // *Физика металлов и металловедение*. – 2014. – Т. 115, № 7. – С. 737–741.
11. Yeh, J.-W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys / J.-W. Yeh // *JOM*. – 2013. – Vol. 65, iss. 12. – P. 1759–1771.
12. Microstructures and properties of high-entropy alloys / Y. Zhang [et al.] // *Progress in Materials Science*. – 2014. – Vol. 61. – P. 1–93.
13. Cantor, B. Multicomponent and high entropy alloys / B. Cantor // *Entropy*. – 2014. – Vol. 16, iss. 9. – P. 4749–4768.
14. Miracle, D. B. A critical review of high entropy alloys and related concepts / D. B. Miracle, O. N. Senkov // *Acta Materialia*. – 2017. – Vol. 122. – P. 448–511.
15. High-entropy alloys: fundamentals and applications / M. C. Gao [et al.] // *Cham: Springer International Publishing*. – 2016. – 524 p.
16. Zhang, W. Science and technology in high-entropy alloys / W. Zhang, P. K. Liaw, Y. Zhang // *Science China Materials*. – 2018. – Vol. 61, iss. 1. – P. 2–22.
17. High-entropy alloys – a new era of exploitation / J.-W. Yeh [et al.] // *Materials Science Forum*. – 2007. – Vol. 560. – P. 1–9.
18. Formation of simple crystal structures in Cu-CoNi-Cr-Al-Fe-Ti-V alloys with multiprincipal metallic elements / J.-W. Yeh [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions: A*. – 2004. – Vol. 35. – P. 2533–2536.
19. Mechanical properties, microstructure and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy after severe plastic deformation / B. Schuh [et al.] // *Acta Materialia*. – 2015. – Vol. 96. – P. 258–268.

20. **Надутов, В. М.** Влияние алюминия на тонкую структуру и распределение химических элементов в высокоэнтропийных сплавах $\text{Al}_x\text{FeNiCoCuCr}$ / В. М. Надутов, С. Ю. Макаренко, П. Ю. Волосевич // *Физика металлов и металловедение.* – 2015. – Т. 116, № 5. – С. 467–472.
21. The microstructure and mechanical properties of novel Al-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys with trimodal distributions of coherent B2 precipitates / L. J. Zhang [et al.] // *Materials Science and Engineering: A.* – 2019. – Vol. 757. – P. 160–171.
22. Особенности фазообразования и формирования структуры в высокоэнтропийных сплавах системы AlCrFeCoNiCu_x ($x = 0; 0.5; 1.0; 2.0; 3.0$) / Н. А. Крапивка [и др.] // *Физика металлов и металловедение.* – 2015. – Т. 116, № 5. – С. 496–504.
23. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys / B. Cantor [et al.] // *Materials Science and Engineering: A.* – 2004. – Vol. 375–377. – P. 213–218.
24. Regulating the strength and ductility of a cold rolled FeCrCoMnNi high-entropy alloy via annealing treatment / J. Gu [et al.] // *Materials Science and Engineering: A.* – 2019. – Vol. 755. – P. 289–294.
25. Microstructure and elevated temperature properties of a refractory TaNbHfZrTi alloy / O. N. Senkov [et al.] // *Journal of Materials Science.* – 2012. – Vol. 47. – P. 4062–4074.
26. **Трофименко, Н. Н.** Проблемы создания и перспективы использования жаропрочных высокоэнтропийных сплавов / Н. Н. Трофименко, И. Ю. Ефимочкин, А. Н. Большакова // *Авиационные материалы и технологии.* – 2018. – № 5. – С. 3–8.
27. Nanocrystalline CoCrFeNiCuAl high-entropy solid solution synthesized by mechanical alloying / K. B. Zhang [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2009. – Vol. 485, iss. 1–2. – P. L31–L34.
28. Alloying behavior, microstructure and mechanical properties in a FeNiCrCo $_0.3$ Al $_{0.7}$ high entropy alloy / W. P. Chen [et al.] // *Materials and Design.* – 2013. – Vol. 51. – P. 854–860.
29. Alloying behavior and novel properties of CoCrFeNiMn high-entropy alloy fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering / W. Ji [et al.] // *Intermetallics.* – 2015. – Vol. 56. – P. 24–27.
30. Microstructure and mechanical properties of Ni $_{1.5}$ Co $_{1.5}$ CrFeTi $_{0.5}$ high entropy alloy fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering / I. Moravcik [et al.] // *Materials and Design.* – 2017. – Vol. 119. – P. 141–150.
31. Механическое сплавление с частичной аморфизацией многокомпонентной порошковой смеси Fe-Cr-Co-Ni-Mn и ее электроскоростное плазменное спекание для получения компактного высокоэнтропийного материала / Н. А. Кочетов [и др.] // *Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* – 2018. – № 2. – С. 35–42.
32. Properties of high-strength ultrafine-grained CoCrFeNiMn high-entropy alloy prepared by short-term mechanical alloying and spark plasma sintering / F. Prusa [et al.] // *Materials Science and Engineering: A.* – 2018. – Vol. 734. – P. 341–352.
33. Effects of milling time, sintering temperature, Al content on the chemical nature, microhardness and microstructure of mechanically synthesized FeCoNiCrMn high entropy alloy / M. D. Alcalá [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2018. – Vol. 749. – P. 834–843.
34. TiZrNiCuAl and TiNbNiCuAl alloys by thermal explosion and high-energy ball milling / S. G. Vadchenko [et al.] // *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis.* – 2019. – Vol. 28, iss. 2. – P. 137–142.
35. **Рогачев, А. С.** Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику / А. С. Рогачев, А. С. Мукасян. – М.: Физмаглит, 2012. – 398 с.
36. СВС-металлургия литых высокоэнтропийных сплавов на основе переходных металлов / В. Н. Санин [и др.] // *Доклады НАН Беларуси.* – 2016. – Т. 470, № 4. – С. 421–426.
37. Mechanical properties, deformation behaviors and interface adhesion of $(\text{AlCrTaTiZr})\text{N}_x$ multi-component coatings / S. Y. Chang [et al.] // *Surface and Coatings Technology.* – 2010. – Vol. 204, iss. 20. – P. 3307–3314.
38. Effects of substrate bias on the structure and mechanical properties of $(\text{Al}_{1.5}\text{CrNb}_{0.5}\text{Si}_{0.5}\text{Ti})\text{N}_x$ coatings / W. J. Shen [et al.] // *Thin Solid Films.* – 2012. – Vol. 520. – P. 6183–6188.
39. **Dolique, V.** High-entropy alloys deposited by magnetron sputtering / V. Dolique, A. L. Thomann, P. Brault // *IEEE Transactions on Plasma Science.* – 2011. – Vol. 39, iss. 11. – P. 2478–2479.
40. Influence of substrate bias, deposition temperature and post-deposition annealing on the structure and properties of multi-principal-component $(\text{AlCrMoSiTi})\text{N}$ coatings / H. W. Chang [et al.] // *Surface and Coatings Technology.* – 2008. – Vol. 202. – P. 3360–3366.
41. Nanostructured multi-element $(\text{TiZrNbHfTa})\text{C}$ hard coatings / V. Braic [et al.] // *Surface and Coatings Technology.* – 2012. – Vol. 211. – P. 117–121.
42. High strength dual-phase high entropy alloys with a tunable monolayer thickness / Z. H. Cao [et al.] // *Scripta Materialia.* – 2019. – Vol. 173. – P. 149–153.
43. Soft magnetic Fe $_{26.7}$ Co $_{26.7}$ Ni $_{26.6}$ Si $_9$ B $_{11}$ high entropy metallic glass with good bending ductility / R. Wei [et al.] // *Materials Letters.* – 2017. – Vol. 197. – P. 87–89.
44. Strong metallic glass: TiZrHfCuNiBe high entropy alloy / Y. Tong [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2020. – Vol. 820. – Art. 153119.
45. **Башев, В. Ф.** Структура и свойства литых и жидкозакаленных высокоэнтропийных сплавов системы Al–Cu–Fe–Ni–Si / В. Ф. Башев, А. И. Кушнерев // *Физика металлов и металловедение.* – 2017. – Т. 118, № 1. – С. 42–50.
46. Структура и механические свойства жаропрочного композита на основе высокоэнтропийного сплава / С. А. Фирстов [и др.] // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2015. – Т. 81, № 6. – С. 28–33.
47. Структура и свойства слоистого композита из высокоэнтропийного сплава с карбидным и интерметаллидным упрочнением / С. А. Фирстов [и др.] // *Изв. Российской академии наук. Сер. физ.* – 2015. – Т. 79, № 9. – С. 1267–1275.
48. **Yeh, J. W.** Recent progress in high-entropy alloys / J. W. Yeh // *Annales de Chimie-Science des Materiaux.* – 2006. – Vol. 31. – P. 633–648.
49. On the superior hot hardness and softening resistance of AlCoCr $_x$ FeMo $_0.5$ Ni high-entropy alloys / C.-Y. Hsu [et al.] // *Materials Science and Engineering: A.* – 2011. – Vol. 528. – P. 3581–3588.
50. **Shun, T.-T.** Formation of ordered/disordered nanoparticles in FCC high entropy alloys / T.-T. Shun, C.-H. Hung, C.-F. Lee // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2010. – Vol. 493. – P. 105–109.

51. On the elemental effect of AlCoCrCuFeNi hightentropy alloy system / C. C. Tung [et al.] // *Materials Letters*.– 2007.– Vol. 61, iss. 1.– P. 1–5.
52. Roiter, Y. AFM Single Molecule Experiments at the Solid-Liquid Interface: In Situ Conformation of Adsorbed Flexible Polyelectrolyte Chains / Y. Roiter, S. Minko // *Journal of the American Chemical Society*.– 2005.– Vol. 127, iss. 45.– P. 15688–15689.
53. Михайлов, Ю. А. Термостойкие полимеры и полимерные материалы / Ю. А. Михайлов.– СПб: Профессия, 2006.– 295 с.
54. C60: Buckminsterfullerene / H. W. Kroto [et al.] // *Nature*.– 1985.– Vol. 318.– P. 162–163.
55. Iijima, S. Helical microtubules of graphitic carbon / S. Iijima // *Nature*.– 1991.– Vol. 354.– P. 56.

REFERENCES

1. Andrushevich A.A., Kalinichenko V.A. Litejnaya tekhnologiya izgotovleniya detalej sel'skohozyajstvennoj tekhniki iz kompozicionnyh materialov [Foundry technology for manufacturing parts of agricultural machinery from composite materials]. *Sovremennye problemy osvoeniya novoj tekhniki, tekhnologij, organizacii tekhnicheskogo servisa v APK: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Minsk, 7–8 iyunya 2018 g. = Modern problems of mastering new equipment, technologies, organizing technical services in the agro-industrial complex: materials of the International scientific-technical conf. Minsk, June 7–8, 2018*. Minsk, BGATU Publ., 2018, pp. 225–228.
2. Kalinichenko A.S., Sluckij A.G., Shejnert V.A., Kalinichenko V.A., Kiselev S.V. Osobennosti polucheniya mednochugunnych kompozitov s ispol'zovaniem litejnyh tekhnologij [Features of producing copper-cast iron composites using foundry technologies]. *Metallurgiya: Resp. mezhdved. sb. nauch. tr. = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific works*. Minsk, BNTU Publ., 2017, vol. 38, pp. 101–105.
3. Andrushevich A.A., Kalinichenko V.A. Osobennosti polucheniya kompozicionnyh materialov s matricej na osnove medi [Features of obtaining composite materials with a copper-based matrix]. *Sovremennye problemy osvoeniya novoj tekhniki, tekhnologij, organizacii tekhnicheskogo servisa v APK: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Minsk, 6–7 iyunya 2019 g. = Modern problems of mastering new equipment, technologies, organizing technical services in the agro-industrial complex: materials of the International scientific-technical conf. Minsk, June 6–7, 2019*. Minsk, BGATU Publ., 2019, pp. 151–156.
4. Yeh.-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, iss. 5, pp. 299–303.
5. Otto F., Yang Y., Bei H., George E. P. Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, iss. 7, pp. 2628–2638.
6. Kuznetsov A. V., Salishchev G. A., Senkov O. N., Stepanov N. D., Shaysultanov D. G. Vliyanie mikrostruktury na mekhanicheskie svoystva pri rastyazhenii vysokoentropijnogo splava AlCoCrCuFeNi [Microstructure influence on tensile mechanical properties of an aluocrcufeni high-entropy alloy]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Fizika = Scientific bulletins of Belgorod State University. Mathematics. Physics*, 2012, iss. 11, pp. 191–205.
7. Ivchenko M. V. *Struktura, fazovye prevrashcheniya i svoystva vysokoentropijnyh metallicheskih splavov na osnove AlCrCoNiCu: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Structure, phase transformations and properties of high-entropy metal alloys based on AlCrCoNiCu: dis. cand. physics and mathematics sciences]. Ekaterinburg, 2015, 167 p.
8. Karpec M. V., Gorban' V. F., Myslivchenko O. M., Marchenko S. V., Krapivka M. O. Vliyanie sodержaniya Ni na iznosostojkost' litogo vysokoentropijnogo splava VCrMnFeCoNi_x [The influence of Ni content on the wear resistance of cast high-entropy alloy VCrMnFeCoNi_x]. *Sovremennaya elektrometallurgiya = Modern electrometallurgy*, 2015, iss. 1, pp. 56–60.
9. Rogachev A. S. *Struktura, stabil'nost' i svoystva vysokoentropijnyh splavov* [Structure, stability, and properties of high-entropy alloys]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 2020, vol. 121, iss. 8, pp. 733–764.
10. Bashev V. F., Kushnerev A. I. *Struktura i svoystva vysokoentropijnogo splava CoCrCuFeNiSn_x* [Structure and properties of high-entropy alloy CoCrCuFeNiSn_x]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of metals and metallurgy*, 2014, vol. 115, iss. 7, pp. 737–741.
11. Yeh J.-W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *JOM*, 2013, vol. 65, iss. 12, pp. 1759–1771.
12. 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.
13. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*, 2014, vol. 16, iss. 9, pp. 4749–4768.
14. Miracle D. B., Senkov O. N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 2017, vol. 122, pp. 448–511.
15. Gao M. C., Yeh J.-W., Liaw P. K., Zhang Y. (ed.) *High-entropy alloys: fundamentals and applications*. Cham: Springer International Publishing, 2016, 524 p.
16. Zhang W., Liaw P. K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*, 2018, vol. 61, iss. 1, pp. 2–22.
17. Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S.-K. High-entropy alloys – a new era of exploitation. *Materials Science Forum*, 2007, vol. 560, pp. 1–9.
18. Yeh J.-W., Chen S.-K., Gan J.-Y., Lin S.-J., Chin T.-S., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. Formation of simple crystal structures in Cu-CoNi-Cr-Al-Fe-Ti-V alloys with multiprincipal metallic elements. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2004, vol. 35, pp. 2533–2536.
19. Schuh B., Mendez-Martin F., Völker B., George E. P., Clemens H., Pippan R., Hohenwarter A. Mechanical properties, microstructure and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy after severe plastic deformation. *Acta Materialia*, 2015, vol. 96, pp. 258–268.
20. Nadutov V. M., Makarenko S. Yu., Volosevich P. Yu. Vliyanie alyuminiya na tonkuyu strukturu i raspredelenie himicheskikh elementov v vysokoentropijnyh splavah Al_xFeNiCoCuCr [The influence of aluminum on the fine structure and distribution of chemical elements in high-entropy alloys Al_xFeNiCoCuCr]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of metals and metallurgy*, 2015, vol. 116, iss. 5, pp. 467–472.

21. Zhang L.J., Guo K., Tang H., Zhang M.D., Fan J.T., Cui P., Ma Y.M., Yu P.F., Li G. The microstructure and mechanical properties of novel Al-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys with trimodal distributions of coherent B2 precipitates. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 757, pp. 160–171.
22. Krapivka N.A., Firstov S.A., Karpec M.V., Myslivchenko A.N., Gorban' V.F. Osobennosti fazoobrazovaniya i formirovaniya struktury v vysokoentropijnyh splavah sistemy AlCrFeCoNiCu_x (x = 0; 0.5; 1.0; 2.0; 3.0) [Features of phase formation and structure formation in high-entropy alloys of the AlCrFeCoNiCu_x system (x = 0; 0.5; 1.0; 2.0; 3.0)]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of metals and metallurgy*, 2015, vol. 116, iss. 5, pp. 496–504.
23. 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.
24. Gu J., Ni S., Liu Y., Song M. Regulating the strength and ductility of a cold rolled FeCrCoMnNi high-entropy alloy via annealing treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 755, pp. 289–294.
25. Senkov O.N., Scott J.M., Senkova S.V., Meisenkothen F., Miracle D.B., Woodward C.F. Microstructure and elevated temperature properties of a refractory TaNbHfZrTi alloy. *Journal of Materials Science*, 2012, vol. 47, pp. 4062–4074.
26. Trofimenko N.N., Efimochkin I. Yu., Bol'shakova A.N. Problemy sozdaniya i perspektivy ispol'zovaniya zharoprochnyh vysokoentropijnyh splavov [Problems of creation and prospects for using heat-resistant high-entropy alloys]. *Aviacionnye materialy i tekhnologii = Aviation materials and technologies*, 2018, iss. 5, pp. 3–8.
27. Zhang K.B., Fu Z.Y., Zhang J.Y., Shi J., Wang W.M., Wang H., Wang Y.C., Zhang Q.J. Nanocrystalline CoCrFeNiCuAl high-entropy solid solution synthesized by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 485, iss. 1–2, pp. L31–L34.
28. Chen W.P., Fu Z.Q., Fang S.C., Xiao H.Q., Zhu D.Z. Alloying behavior, microstructure and mechanical properties in a FeNi-CrCo_{0.3}Al_{0.7} high entropy alloy. *Materials and Design*, 2013, vol. 51, pp. 854–860.
29. Ji W., Wang W., Wang H., Zhang J., Wang Y., Zhang F., Fu Z. Alloying behavior and novel properties of CoCrFeNiMn high-entropy alloy fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Intermetallics*, 2015, vol. 56, pp. 24–27.
30. Moravcik I., Cizek J., Zapletal J., Kvasova Z., Vesely J., Minarik P., Kitzmantel M., Neubauer E., Dlouhy I. Microstructure and mechanical properties of Ni_{1.5}Co_{1.5}CrFeTi_{0.5} high entropy alloy fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Materials and Design*, 2017, vol. 119, pp. 141–150.
31. Kochetov N.A., Rogachev A.S., Shchukin A.S., Vadchenko S.G., Kovalev I.D. Mekhanicheskoe splavlenie s chastichnoj amorfizacijej mnogokomponentnoj poroshkovoj smesi Fe-Cr-Co-Ni-Mn i ee elektroiskrovoe plazmennoe spekanie dlya polucheniya kompaktnogo vysokoentropijnogo materiala [Mechanical alloying with partial amorphization of Fe-Cr-Co-Ni-Mn multicomponent powder mixture and its spark plasma sintering for compact high-entropy material production]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya = Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 2018, iss. 2, pp. 35–42.
32. Prusa F., Senkova A., Kusera V., Capek J., Vojtech D. Properties of high-strength ultrafine-grained CoCrFeNiMn high-entropy alloy prepared by short-term mechanical alloying and spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 734, pp. 341–352.
33. Alcalá M.D., Real C., Fombella I., Trigo I., Córdoba J.M. Effects of milling time, sintering temperature, Al content on the chemical nature, microhardness and microstructure of mechanically synthesized FeCoNiCrMn high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 749, pp. 834–843.
34. Vadchenko S.G., Rogachev A.S., Kovalev D. Yu., Kovalev I.D., Mukhina N.I. TiZrNiCuAl and TiNbNiCuAl alloys by thermal explosion and high-energy ball milling. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2019, vol. 28, iss. 2, pp. 137–142.
35. Rogachev A.S., Mukas'yan A.S. *Gorenje dlya sinteza materialov: vvedenie v strukturnuyu makrokinetiku* [Combustion for materials synthesis: an introduction to structural macrokinetics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, 398 p.
36. Sanin V.N., Yuhvid V.I., Ikornikov D.M., Andreev D.E., Sachkova N.V., Alymov M.I. SVS-metallurgiya lityh vysokoentropijnyh splavov na osnove perekhodnyh metallov [SHS metallurgy of high-entropy transition metal alloys]. *Doklady Akademii nauk Belarusi = Doklady of the Academy of Sciences of Belarus*, 2016, vol. 470, iss. 2, pp. 145–149.
37. Chang S.Y., Lin S.Y., Huang Y.C., Wu S.L. Mechanical properties, deformation behaviors and interface adhesion of (AlCrTaTiZr)_{Nx} multi-component coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 204, iss. 20, pp. 3307–3314.
38. Shen W.J., Tsai M.-H., Chang Y.-S., Yeh J.-W. Effects of substrate bias on the structure and mechanical properties of (Al_{11.5}CrNb_{0.5}Si_{0.5}Ti)_{Nx} coatings. *Thin Solid Films*, 2012, vol. 520, pp. 6183–6188.
39. Dolique V., Thomann A.L., Brault P. High-entropy alloys deposited by magnetron sputtering. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, vol. 39, iss. 11, pp. 2478–2479.
40. Chang H.W., Huang P.K., Yeh J.W., Davison A., Tsau C.H., Yang C.C. Influence of substrate bias, deposition temperature and post-deposition annealing on the structure and properties of multi-principal-component (AlCrMoSiTi)N coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2008, vol. 202, pp. 3360–3366.
41. Braic V., Vladescu A., Balaceanu M., Luculescu R., Braic M. Nanostructured multi-element (TiZrNbHfTa)C hard coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 211, pp. 117–121.
42. Cao Z.H., Ma Y.J., Cai Y.P., Wang G.J., Meng X.K. High strength dual-phase high entropy alloys with a tunable monolayer thickness. *Scripta Materialia*, 2019, vol. 173, pp. 149–153.
43. Wei R., Tao J., Sun H., Chen C., Sun G.W., Li F.S. Soft magnetic Fe_{26.7}Co_{26.7}Ni_{26.6}Si₉B₁₁ high entropy metallic glass with good bending ductility. *Materials Letters*, 2017, vol. 197, pp. 87–89.
44. Tong Y., Qiao J.C., Pelletier J.M., Yao Y. Strong metallic glass: TiZrHfCuNiBe high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 820, art. 153119.
45. Bashev V.F., Kushnerov O.I. Struktura i svoystva lityh i zhidkozakalennyh vysokoentropijnyh splavov sistemy Al-Cu-Fe-Ni-Si [Structure and properties of cast and splat-quenched high-entropy Al-Cu-Fe-Ni-Si alloys]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 2017, vol. 118, iss. 1, pp. 39–47.
46. Firstov S.A., Karpov M.I., Gorban' V.F., Korzhov V.P., Krapivka N.A., Stroganova T.S. Struktura i mekhanicheskie svoystva zharoprochnogo kompozita na osnove vysokoentropijnogo splava [Structure and mechanical properties of a heat-resistant compos-

ite based on a high-entropy alloy]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Factory Laboratory. Diagnostics of materials*, 2015, vol. 81, iss. 6, pp. 28–33.

47. **Firstov S.A., Karpov M.I., Korzhov V.P., Gorban' V. F., Krapivka N.A., Stroganova T.S.** Struktura i svojstva sloistogo kompozita iz vysokoentropijnogo splava s karbidnym i intermetallidnym uprochneniem [Structure and properties of a layered composite made of a high-entropy alloy with carbide and intermetallic hardening]. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya fizicheskaya = News of the Russian Academy of Sciences. Physical series*, 2015, vol. 79, iss. 9, pp. 1267–1275.

48. **Yeh J.W.** Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie-Science des Materiaux*, 2006, vol. 31, pp. 633–648.

49. **Hsu C.-Y., Juan C.-C., Wang W.-R., Sheu T.-Sh., Yeh J.-W., Chen S.-K.** On the superior hot hardness and softening resistance of AlCoCrxFeMo_{0.5}Ni high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 528, pp. 3581–3588.

50. **Shun T.-T., Hung C.-H., Lee C.-F.** Formation of ordered/disordered nanoparticles in FCC high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 493, pp. 105–109.

51. **Tung C. C., J. Yeh W., Shun T. T., Chen S.-K., Huang Y.-S., Chen H.-C.** On the elemental effect of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy system. *Materials Letters*, 2007, vol. 61, iss. 1, pp. 1–5.

52. **Roiter Y., Minko S.** AFM single molecule experiments at the solid-liquid interface: in situ conformation of adsorbed flexible polyelectrolyte chains. *Journal of the American Chemical Society*, 2005, vol. 127, iss. 45, pp. 15688–15689.

53. **Mihajlov Yu.A.** *Termostojkie polimery i polimernye materialy* [Heat-resistant polymers and polymeric materials]. Saint Petersburg, Professiya Publ., 2006, 295 p.

54. **Kroto H.W., Heath J.R., O'Brien S. C., Curl R.F., Smalley R.E.** C₆₀: Buckminsterfullerene. *Nature*, 1985, vol. 318, pp. 162–163.

55. **Iijima S.** Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 1991, vol. 354, pp. 56.