

В результате проведённых механических испытаний установлено, что оптимизация параметров подготовки смеси и режимов СЛС позволяет существенно повысить прочностные свойства сплава Al15Sn5Pb, делая его перспективным материалом для применения в условиях высоких нагрузок и трения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда [грант № 24-79-10099], <https://ias.rscf.ru/user/doc/a.w.p.2024.98.legacy/182272>.

Список использованных источников:

1. Confalonieri C. Al-Sn Miscibility Gap Alloy produced by Power Bed Laser Melting for application as Phase Change Material / C. Confalonieri, E. Gariboldi // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – Vol. 881. – article number 160596. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.160596.
2. Selective Laser Melting of Aluminum and Its Alloys / Z. Wang, R. Ummethala, N. Singh [and et.] // Materials. – 2020. – Vol. 13. – article number 4564. – DOI: 10.3390/ma13204564.
3. Influence of laser power during laser powder bed fusion on the structure and properties of Al-40Sn alloy prepared from a mixture of elemental powders / N.M. Rusin, K.O. Akimov, A.L. Skorentsev, A.I. Dmitriev // Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – Vol. 1013. – article number 178647. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.178648.
4. A Review of the Vaporization Behavior of Some Metal Elements in the LPBF Process / G. Shi, R. Zhang, Y. Cao, G. Yang // Micromachines. – 2024. – Vol. 15. – article number 846. – DOI: 10.3390/mi15070846.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ

*Е.Г. Григорьева, ст. преподаватель
Юргинский технологический институт (филиал)
Национального исследовательского Томского политехнического университета
652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26
E-mail: Sedasch@tpu.ru*

Аннотация: В данной статье рассматриваются высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), обсуждаются особенности их микроструктуры, включая возможность формирования однородных нанозерен, а также влияние технологии производства на их характеристики. Основное внимание уделяется инновационным методам, включая порошковую металлургию и аддитивные технологии. Особое внимание уделяется актуальным тенденциям в прогнозировании фазообразования с использованием машинного обучения, что открывает новые горизонты для разработки и оптимизации состава ВЭС.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, микроструктура, порошковая металлургия, аддитивные технологии, механические свойства, термостойкость, коррозионная стойкость, биомедицина, фазообразование, машинное обучение.

Abstract: This paper explores high-entropy alloys, highlighting the unique aspects of their microstructures, such as the potential for creating uniform nano-grains. It also examines how production technologies impact their properties. The discussion emphasizes cutting-edge techniques, including powder metallurgy and additive manufacturing. Additionally, it focuses on contemporary trends in utilizing machine learning to predict phase formation, which paves the way for advancements and optimization in the composition of wind farms.

Keywords: high-entropy alloys, microstructure, powder metallurgy, additive technologies, mechanical properties, heat resistance, corrosion resistance, biomedicine, phase formation, machine learning.

В последние годы наблюдается рост интереса к разработке и производству ВЭС, что обусловлено стремлением к созданию новых материалов с заданными свойствами.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) представляют собой инновационные материалы, которые находят применение в различных областях благодаря своим уникальным свойствам. Эти сплавы состоят из нескольких металлов в равных или почти равных пропорциях, что придает им высокую энтропию смешивания и, как следствие, уникальные физические и механические характеристики. [1].

Сплавы с алюминием занимают особое место среди ВЭСов, так как такие составы обладают относительно низкими значениями удельного веса, что расширяет возможности их практического применения в промышленности.

Некоторые свойства ВЭСов:

- высокая прочность и твердость;
- высокая стойкость к истиранию;
- высокая термостойкость;
- высокое удельное сопротивление;

– устойчивость к высокотемпературному окислению и высокотемпературному размягчению.

Пример состава высокоэнтروпийного сплава: алюминий ($35,67 \pm 1,34 \%$), никель ($33,79 \pm 0,46 \%$), железо ($17,28 \pm 1,83 \%$), хром ($8,28 \pm 0,15 \%$), кобальт ($4,99 \pm 0,09 \%$).

ВЭС системы Al – Co – Cr – Fe – Ni могут иметь различный фазовый состав в зависимости от концентрации элементов. По мере увеличения концентрации алюминия их структура трансформируется из ГЦК через смешанную ГЦК + ОЦК в ОЦК [1].

В различных промышленных секторах активно внедряются сплавы с высокой энтропией:

– биомедицина: ценит эти материалы за их совместимость с биологическими тканями, превосходную адгезию, стойкость к износу и коррозии в биологических средах, а также исключительные механические характеристики защитных покрытий;

– рефрижераторные устройства: ВЭС на основе редкоземельных обладают магнитокалорическим эффектом, имеют температуру Кюри, близкую к комнатной, и могут быть использованы в таких устройствах;

– химическое машиностроение и кораблестроение: ВЭС обладают отличной коррозионной стойкостью, что позволяет использовать их в устойчивых к коррозии химических сосудах высокого давления и высокопрочных коррозионно-стойких деталях на кораблях;

– изготовление лопаток турбины: технология производства значительно упрощается благодаря хорошей пластичности этих сплавов. Долговечная и надежная работа лопаток обеспечивается комплексом преимуществ, отличной стойкостью к износу и коррозии, способностью к быстрому упрочнению и превосходной термостойкостью;

– электронные устройства и поле связи: ВЭС обладают мягким магнетизмом и высоким удельным сопротивлением, поэтому они имеют большой потенциал применения в устройствах высокочастотной связи;

– системы хранения водорода: некоторые ВЭС, например TiZrCrMnFeNi, демонстрируют быстрое и обратимое накопление водорода при комнатной температуре с хорошей ёмкостью для коммерческого применения.

Также ВЭС могут использоваться в качестве покрытий деталей судов, эксплуатирующихся в морской воде, разнородных сварных соединений, деталей ядерных реакторов [2].

Рассмотрим существующие современные технологии, которые применяются в работе с высокоэнтропийными сплавами.

Метод циклической штамповки в замкнутом объёме. Деформация металла прессом разбивает его структуру до наноразмеров. Обработка способствует образованию однородных нанозерен, богатых хромом, молибденом и железом, и их эффективному распределению в матрице сплава.

Использование порошковых смесей недорогих металлов. Например, в составе ВЭС примерно 30 % занимает железо, что делает порошок более доступным и снижает стоимость по сравнению с материалами типа NiCr или TaN.

Применение аддитивных технологий. В частности, послойное выращивание готового изделия из исходного порошкового материала.

Использование метода магнетронного напыления. Мишени для синтеза тонких плёнок ВЭС изготавливают из смеси элементарных порошков компонентов ВЭС, консолидированных методом горячего прессования.

Исключение этапа предварительного сплавления и нанесения защитного покрытия. ВЭС сами по себе обладают высокой коррозионной стойкостью, поэтому новая технология позволяет сократить количество технологических операций и уменьшить энергозатраты [3].

Наиболее перспективной технологией является использования порошковых смесей в высокоэнтропийных сплавах, т. к. позволяет получить:

– расширение технологических возможностей. Методы порошковой металлургии позволяют производить ВЭС с широким диапазоном химических составов;

– дисперсно-упрочненных оксидами порошковых компактов. Это обеспечивает дополнительное упрочнение при повышенных температурах;

– сокращение длительности технологического цикла получения материала. Например, при получении ВЭС путём смешивания порошков компонентов исключается такая трудоёмкая операция, как механическое легирование;

– компактов высокой плотности с заданной микроструктурой. Изменение параметров процесса спекания под давлением с воздействием искровой плазмы позволяет влиять на рост зерна и протекание диффузии;

– Однофазные и однородные по химическому составу материалы. Это достигается за счёт предварительного перемешивания металлов на атомарном уровне [4].

Более подробно рассмотрим процесс спекания под давлением, т. к. это очень выгодный метод получения современных материалов с превосходными свойствами.

Спекания под давлением включает несколько этапов:

1. Приготовление компактной пудры. Порошкообразные материалы смешивают со связующими веществами для обеспечения однородности. Затем порошок прессуют желаемую форму с помощью специальных инструментов. Этот шаг нужен для достижения первоначальной формы и плотности материала перед спеканием.

2. Нагрев и консолидация. Уплотнённый порошок нагревают до температуры чуть ниже точки плавления. Эта температура тщательно контролируется, чтобы активировать процесс спекания, не вызывая полного плавления. Во время нагрева связующее вещество (часто воск или полимер) испаряется или сгорает, в результате чего первичные частицы начинают плавиться на своих поверхностях.

3. Применение внешнего давления. В процессе нагрева к материалу прикладывают внешнее давление. Оно способствует уменьшению пористости и ускорению уплотнения. Давление можно прикладывать различными способами, например, с помощью механических прессов или гидравлических систем [5].

4. Слияние частиц и уплотнение. По мере повышения температуры частицы начинают сливаться на своих поверхностях – процесс, известный как твердофазное спекание. Этот процесс можно ещё больше ускорить за счёт присутствия жидкой фазы, известной как жидкофазное спекание (LPS).

5. Охлаждение и затвердевание. После завершения процесса спекания материал постепенно охлаждают до комнатной температуры. Скорость охлаждения тщательно контролируется, чтобы предотвратить тепловой удар, который мог бы привести к разрушению материала.

6. Последующая обработка. Материал подвергается процессам последующей обработки, таким как механическая обработка или отделка поверхности, для достижения окончательных желаемых свойств и размеров.

Спекание под давлением часто проводят в вакууме или инертной атмосфере, чтобы предотвратить окисление и загрязнение материала [5].

Разработкой новых типов высокоэнтروпийных сплавов занимаются для создания материалов с улучшенными механическими свойствами, такими как высокая твёрдость, износостойкость, высокотемпературная прочность, коррозионная стойкость, хорошая низкотемпературная пластичность и сверхпластичные свойства

Разработка новых типов ВЭСов включает несколько этапов:

1. Подбор элементов. При этом используется параметрический подход, который включает химические и топологические параметры. Основным химическим параметром является энтальпия смешения элементов, основным топологическим параметром – атомный радиус.

2. Прогнозирование фазообразования. Для этого широко используются химические и топологические параметры.

3. Контроль структуры и микроструктуры. Основная задача разработки ВЭСов – достичь взаимосвязи состав-структура-микроструктура-свойство, точно контролируя электронную и кристаллическую структуру, а также микроструктуру.

4. Синтез наноразмерных ВЭСов. Это перспективное направление, которое позволяет расширить области применения ВЭСов, связанные с энергетикой (катализ, хранение энергии и другие).

Микроструктура высокоэнтропийных сплавов влияет на их свойства следующим образом:

Искажение кристаллической решётки. Возникает из-за разности размеров атомов, входящих в кристаллическую решётку мультикомпонентного твёрдого раствора. Искажения решётки в значительной степени определяют уровень прочностных свойств ВЭС.

Замедленная диффузия возникает из-за неоднородности атомов, которые обладают различной потенциальной энергией. Низкая скорость диффузии способствует повышению термической и химической стабильности ВЭС [6].

Формирование фаз зависит от состава, методов получения и обработки сплава, что может привести к образованию как упорядоченных, так и неупорядоченных фаз. На свойства конечного сплава влияют как атомы отдельных элементов, так и образующиеся фазы, что называется эффектом перемешивания [7].

Влияние решётки. ВЭС с ОЦК-решёткой имеют преимущественно высокую прочность и низкую пластичность, тогда как у материалов с ГЦК-решёткой низкая прочность и высокая пластичность.

Таким образом, характеристики ВЭС определяются их структурными особенностями и элементарным составом.

Один из новых методов прогнозирования фазообразования в высокоэнтропийных сплавах – использование машинного обучения.

Авторы работ [8] использовали набор данных из 544 конфигураций высокоэнтропийных сплавов для прогнозирования фаз. Для дополнения существующих данных применяли генеративную состязательную сеть (GAN).

Результаты исследования показали, что средняя точность модели при использовании десяти случайных начальных значений составила 94,77 %. Проверка на независимом наборе данных подтвердила надёжность модели и её применимость в реальном мире, обеспечив 100 %-ную точность прогнозирования.

Кроме того, учёные прогнозировали фазы ГЦК и ОЦК для высокоэнтропийных сплавов на основе элементного состава, достигнув максимальной точности 98 %.

Также для прогнозирования физического состояния высокоэнтропийных карбидов используют методы моделирования кристаллических решёток: метод специальных квазислучайных структур (SQS) и метод упорядоченных структурных составляющих (AFLOW).

Высокоэнтропийные сплавы демонстрируют выдающиеся механические свойства, включая высокую прочность и термостойкость, что делает их перспективными для применения в различных отраслях, таких как биомедицина и химическое машиностроение. Разработка современных методов производства и исследования в области фазообразования открывают новые горизонты для улучшения их характеристик. Успешное применение ВЭС может значительно повысить эффективность и надёжность технологий, использующих эти материалы.

Список использованных источников:

1. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов / А.С. Рогачев // Физика металлов и металловедение. – 2020. – Т. 121. – № 8. – С. 807–841.
2. Формирование улучшенных механических свойств высокоэнтропийного сплава Cantor / В.Е. Громов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 8. – С. 599–605.
3. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение / Осинцев К.А. [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 4. – С. 249–258.
4. Иванников А.Ю. Новые достижения в области порошковой металлургии высокоэнтропийных сплавов для высокотемпературных приложений. Краткий обзор / А.Ю. Иванников, В.С. Юсупов // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2024. – Т. 67. – № 5. – С. 509–519.
5. Получение тугоплавких высокоэнтропийных сплавов методом детонационного спекания / Т.Т. Zhou [et al.] // Физика горения и взрыва. – 2024. – Т. 60. – № 5. – С. 134–143.
6. Пути модифицирования свойств и применения высокоэнтропийных канторовских сплавов: 10.25712/ASTU. 1811-1416.2024. 04.002 / В.Е. Громов [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2024. – Т. 21. – № 4. – С. 422–427.
7. Оценка возможности формирования легкоплавких высокоэнтропийных сплавов / С.А. Лелюх [и др.] // Физика. Технологии. Инновации. Тезисы докладов (ФТИ-2024). – Екатеринбург, 2024. – С. 512–513.
8. Phys. Chem. Chem. Phys. – 2025. – 27. – Р. 717–729.

КОМПОЗИТНЫЙ ПОРОШОК Al-Si-Mg ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ: СВОЙСТВА, ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

*А.А. Сапрыкин, к.т.н., доц., Т.С. Гусева^а, ассистент
Юргинский технологический институт (филиал)*

*Национального исследовательского Томского политехнического университета
652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26
E-mail: ^аtsh2@tpu.ru*

Аннотация: В данной статье рассматривается композитный порошок на основе алюминия, кремния и магния (AlSiMg), используемый в технологии селективного лазерного плавления (СЛП). Обсуждаются механические свойства, коррозионная стойкость и легкость данного материала, а также его преимущества в различных отраслях, включая аэрокосмическую, автомобильную, медицинскую и электронную. Особое внимание уделяется роли каждого компонента в смеси: алюминий обеспечивает легкость и коррозионную стойкость, кремний улучшает прочность и текучесть, а магний повышает прочностные характеристики и устойчивость к агрессивным средам. Описываются ключевые этапы производства композитного порошка, включая выбор компонентов, механическую обработку, просеивание и проверку качества, что обеспечивает однородность и высокие характеристики конечного продукта. А также подчеркивается потенциал AlSiMg для аддитивного производства и необходимость дальнейших исследований для оптимизации его свойств и применения.

Ключевые слова: Селективное лазерное плавление, алюминий, порошок, Al-Si-Mg, свойства порошка, механическая обработка.

Abstract: This article discusses an aluminum, silicon and magnesium (AlSiMg) based composite powder used in selective laser melting (SLM) technology. The mechanical properties, corrosion resistance, and lightness of this material are discussed, as well as its advantages in various industries including aerospace, automotive, medical, and electronics. Particular attention is paid to the role of each component in the blend: aluminum provides lightness and corrosion resistance, silicon improves strength and flowability, and magnesium enhances strength properties and resistance to corrosive environments. Key steps in the production of composite powder are described, including component selection,