

2. Руководство по курсовому проектированию металлорежущих инструментов: учеб. пособие / под общ. ред. Г.Н. Кирсанова – М.: Машиностроение, 1986. – 288 с: ил.
3. Грановский Г.И. Фасонные резцы / Г.И. Грановский, К.П. Панченко. – М.: «Машиностроение», 1975. – 309 с.
4. Дарманчев С.К. Фасонные резцы / С.К. Дарманчев. – Л.: Машиностроение, 1968. – 168 с.
5. Косилова А.Г. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т / А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 2, – 96 с.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Н.А. Сапрыкина^а, к.т.н., доц., А.А. Сапрыкин, к.т.н., доц.

Юргинский технологический институт (филиал)

Национального исследовательского Томского политехнического университета

652055, Кемеровская область, г. Юрга, ул. Ленинградская, 26

E-mail: ^а saprikina@tpu.ru

Аннотация: В статье рассмотрены существующие составы и способы получения высокоэнтروпийных сплавов. Описаны проблемы и перспективы получения сплава методом селективного плавления из порошков Co, Cr, Fe, Mo, Ni и Cu.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление (СЛП); высокоэнтропийный сплав; аддитивное производство; суперсплав, научная проблема.

Abstract The article discusses the existing compositions and methods for obtaining high-entropy alloys. The problems and prospects of obtaining an alloy by selective melting from Co, Cr, Fe, Mo, Ni and Cu powders are described.

Keywords selective laser melting (SLP); high-entropy alloy; additive manufacturing; superalloy, scientific problem.

Несмотря на интенсивное развитие аддитивных технологий, позволяющих воспроизвести трехмерный объект сложной геометрической формы из металлических порошковых материалов, на сегодня проблема изготовления деталей сложных геометрических форм из жаропрочных сплавов с высокой точностью и требуемыми механическими свойствами, практически не решена. В современном машиностроении жаропрочные мультикомпонентные кобальтовые сплавы применяется для изготовления лопаток, сопел, завехрителей, колец и прочих элементов турбин и двигателей внутреннего сгорания. Традиционные методы формообразования не обеспечивают в полной мере эксплуатационные и технологические характеристики перечисленных изделий машиностроительной отрасли. Сплавы с высокой энтропией демонстрируют отличные свойства и могут быть одним из видов превосходных высокотемпературных материалов с различными свойствами.

В настоящее время, жаропрочные сплавы получают на алюминиевой, титановой, железной, медной, кобальтовой и никелевой основах. Температура плавления у сплавов на кобальтовой основе более высокая, по этой причине они имеют повышенные характеристики длительной прочности. В этой связи жаропрочные сплавы на основе кобальта могут работать при более высоких температурах, по сравнению со сплавами на основе никеля и железа. Сплавы на основе кобальта, хрома и молибдена обладают уникальными свойствами, применяемыми для работы в агрессивных средах и при высоких температурах. Высокое содержание хрома повышает сопротивление горячей коррозии. Добавление молибдена улучшает коррозионную стойкость и прочность. Хорошо развиты металлургические методы получения таких сплавов. Для улучшения механических свойств применяют термомеханические методы измельчения зерна. Производство деталей из жаропрочного сплава основано на механической обработке, прежде всего, токарно-фрезерной обработке и обработке давлением. Как результат до половины и более дорогостоящих сплавов уходит в стружку и отправляется на передел. Современные тенденции в развитии аддитивных технологий направлены на внедрение новых материалов и улучшение физико-механических характеристик получаемых изделий, а также на сокращение материалов, затрачиваемых на формирование изделия. В последние годы в аддитивных технологиях находят применение металлические порошки, включая чистое железо, нержавеющую сталь, инструментальную сталь, титановые сплавы, кобальт-хромовые сплавы, суперсплавы на основе никеля, сплавы на основе меди, алюминия и др [1]. Деталь, изготовленная методом послойного лазерного плавления, состоит из отвержденных дорожек и объединенных слоев. В процессе локального плавления металлического порошка лучом лазера, быстрого затвердевания и охлаждения затрудняется диффузионное движение атомов металла и легирующих элементов, что тормозит рост зерен и сегрегацию элементов, значительно повышает прочность материала.

Это позволяет получить уникальные микроструктурные особенности, свойственные только данному методу. Перспективным направлением является создание высокоэнтропийных сплавов. Интерес вызывают высокоэнтропийные сплавы на основе переходных тугоплавких металлов, таких как Ti, V, Cr, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta и W. Легкие металлы, такие как Ti, V и Cr, выбираются для уменьшения плотности, а тугоплавкие, такие как Nb, Ta и W, отвечают, прежде всего, за прочностные характеристики всего материала. В настоящее время большинство компонентов высокоэнтропийных сплавов изготавливают вакуумно-дуговым переплавом, литьем и другими традиционными методами [2, 3]. Все существующие исследования проведены на образцах, полученных методом селективного лазерного плавления из порошка высокоэнтропийного сплава. В [4] рассмотрены высокоэнтропийные сплавы, полученные методом вакуумно-дуговой плавки, системы $\text{CoCrCu}_x\text{FeMoNi}$ с различным содержанием Cu ($x=0,1-1,0$ в мольном соотношении). В данной работе исследованные системы были приготовлены для изучения формирования микроструктуры в состоянии затвердевания. Показано, что прочность сплава вначале повышается с увеличением Cu, а затем снижается. Наибольшая прочность достигается у сплава $\text{CoCrCu}_{0,1}\text{FeMoNi}$. В [5] исследовано влияние добавки Cu на фазовый переход и механические свойства высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNiCu_x , полученного методом вакуумного дугового плавления. Показано, что прочность и микротвердость сплава CrMnFeCoNiCu_x возрастают с увеличением содержания Cu за счет положительного влияния выделения медь-обогащенной фазы, которая препятствует движению дислокаций при деформации. В статье [6] рассмотрено получение эвтектического высокоэнтропийного сплава $\text{AlCoCrFeNi}_{2.1}$ технологией селективного лазерного плавления и изучено влияние скорости сканирования на его плотность, микроструктуру и механические свойства. Максимальная относительная плотность СЛП $\text{AlCoCrFeNi}_{2.1}$ может достигать 99,7 %. Порошок сплава $\text{AlCoCrFeNi}_{2.1}$ подготовлен методом аэрации в качестве сырья для СЛП с размером частиц 15–53 мкм. В [7] слитки сплава номинального состава $(\text{FeCoNiCrMn})(100-x)\text{Al}_x$ ($x=0, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16$ и 20 ат. %) были синтезированы методом вакуумно-дуговой плавки смеси чистых металлов (чистота >99 мас.%) в атмосфере высокочистого аргона с Ti-геттером. В работе [8] представлен краткий обзор результатов исследования высокоэнтропийных сплавов в новой лаборатории ИМЕТ УрО РАН в 2019 г. Изучены две группы сплавов: ВЭС типа AlNbTiVZr , содержащие легкоплавкий алюминий, и ВЭС типа $(\text{Ti},\text{V})\text{ZrNbHf}(\text{Ta},\text{W})$, содержащие исключительно тугоплавкие переходные металлы.

В России, в СТАНКИНе, Назаровым А.П. [9] разработан технологический процесс изготовления сложнопрофильных деталей из жаропрочного кобальтового сплава методом селективного лазерного плавления. Определены связи между параметрами селективного лазерного плавления, структурой и фазовым составом жаропрочного кобальтового сплава. Масштабные исследования в области селективного лазерного плавления из CoCrMo -сплава проводятся в Масачусетском технологическом институте (Бостон, США) [10]. В России селективным лазерным спеканием (плавлением) изделий занимается коллектив профессора Шишковского И.В. (Самарский филиал ФИАН) [10, 11] совместно с Национальной инженерной школой Сент-Этьен (Франция) [13] и «Лаборатория инновационных аддитивных технологий» МГТУ «СТАНКИН» [14, 15]. Оборудование для изготовления изделий из порошков тугоплавких материалов выпускают несколько компаний в мире. Компания Concept Laser GmbH (ФРГ) выпускает установки Mlab cusing и R Mlab cusing, которые могут работать с титановыми сплавами, порошком титана и кобальт-хромовыми порошками. Компания SLM Solutions GmbH (ФРГ) выпускает установки SLM® 500 HL которые имеют возможность работать с титановыми и кобальт-хромовыми сплавами.

Микроструктура высокоэнтропийного сплава, полученного из порошков Co, Cr, Fe, Mo, Ni и Cu в процессе лазерного плавления довольно сильно отличается от структуры сплава, полученного традиционными методами. Как известно, Co существует в двух кристаллических модификациях: эпсилон-фаза с гексагональной плотноупакованной решеткой или низкотемпературная фаза, и гамма-фаза с кубической гранецентрированной решеткой, высокотемпературная фаза. Значение твердости сплава напрямую зависит от количества низкотемпературной фазы. В процессе локального плавления металлического порошка лучом лазера, быстрого затвердевания и охлаждения из-за высокой теплопроводности металлического сплава можно достичь увеличения содержания в сплаве высокотемпературной фазы, что способствует повышению твердости и износостойкости детали. Cr, Mo и Fe имеют кубическую объемно-центрированную решетку, Ni и Cu кубическую гранецентрированную. Подобно обычным сплавам, кристаллическое строение, микроструктура и механические свойства тесно связаны с составом высокоэнтропийного сплава. Учитывая, что прочность высокоэнтропийного сплава в основном зависит от твердорастворного упрочнения, в высокоэнтропийные сплавы обычно добавляют элементы с большой разницей атомных радиусов. В тоже время образование твердых фаз является более эффективным для повышения прочности. Включение Cu в состав играет ключевую роль в формировании комплекса уникальных физико-механических свойств получаемого сплава.

Исследования показали, что добавление Cu увеличивает прочность высокоэнтروпийного сплава вследствие того, что Cu имеет большую положительную энтальпию смешения и слабые связи со многими другими металлическими элементами, что позволяет легко сегрегировать в междендритную область и образовывать фазы осаждения, богатые Cu, повышающие прочность сплава, но без потери пластичности.

При использовании метода селективного лазерного плавления для получения изделий из порошковых материалов указанных элементов имеется технологическая проблема, требующая решения. Co, Cr, Fe, Mo, Ni и Cu имеют разброс температур плавления в пределах 1100 градусов и узкий диапазон технологических режимов плавления и получения сплава из перечисленных порошков со стабильным фазовым составом и структурой.

Проблема может быть решена путем поиска необходимых режимов и параметров синтеза при воздействии лазерного луча. Решение научной проблемы, связанной с фундаментальными и прикладными основами технологии селективного лазерного плавления с использованием теоретических и экспериментальных подходов изготовления сложнопрофильных деталей с высокой прочностью из сплава, получаемого в процессе плавления смеси порошков Co, Cr, Fe, Mo, Ni и Cu является актуальной. Выполнение экспериментальных исследований, проведение численного моделирования и сопоставление полученных данных позволят углубить понимание процессов, происходящих при формировании высокоэнтропийных сплавов методом селективного лазерного плавления, а также расширят области фундаментальных основ технологии аддитивного производства.

Список использованных источников:

1. Textures formed in a CoCrMo alloy by selective laser melting / X. Zhou, K. Li, , D. Zhang [et al.] // *J. Alloys Compd.* – 2015. – 631. – P. 153–164. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.096> (дата обращения 06.04.2023).
2. Ameyama Simultaneously enhanced strength and strain hardening capacity in FeMnCoCr high-entropy alloy via harmonic structure design / G.D. Li, M.W. Liu, S.Y. Lyu [et al.] // *Scr. Mater.* – 2021. – 191. – P. 196–201.
3. Zhang Enhancement of strength-ductility trade-off in a high-entropy alloy through a heterogeneous structure. / S.W., G. Wu Q. Wang [et al.] // *Wang Acta Mater.* – 2019. – 165. – P. 444–458.
4. Microstructure and solidification behavior of multicomponent CoCrCuFeMoNi high-entropy alloys / P.H. Wu, N. Liu, W. Yang [et al.] // *Materials Science and Engineering: A.* – 2015. – Volume 642. – P. 142–149. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.061> (дата обращения 06.04.2023).
5. Precipitation and its strengthening of Cu-rich phase in CrMnFeCoNiCu high-entropy alloys / Xin Xian, Lijing Lin, Zhihong Zhong [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*, 2018. – Volume 713. – P. 134–140. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.060> (дата обращения 06.04.2023).
6. Effect of scanning speed on microstructure and mechanical properties of selective laser melting AlCoCrFeNi_{2.1} eutectic high-entropy alloy / Liwei Lan, Wenxian Wang, Zeqin Cui [et al.] // *Materials Letters.* – 2023. – Volume 330. – 33321. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133321> (дата обращения 06.04.2023).
7. Microstructural evolution of (FeCoNi)_{85.84}Al_{7.07}Ti_{7.09} high-entropy alloy fabricated by an optimized selective laser melting process / Ji Pengcheng, Wang Zhenhui, Mu Yongkun [et al.] // *Materials & Design.* – 2022. – Volume 224. – 111326. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111326> (дата обращения 06.04.2023).
8. Ремпель А.А. Высокоэнтропийные сплавы: получение, свойства, практическое применение / А.А. Ремпель, Б.Р. Гельчинский // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 2020. – Том 63. – № 3–4. – С. 248–253.
9. Solid free-form fabrication of drug delivery devices / Benjamin M. Wua, Scott W. Borlandb, Russell A. Giordanob [et al.] // *Journal of Controlled Release.* – 1996. – Volume 40. – P. 77–87.
10. Моделирование и изучение свойств градиентных фильтрующих элементов, синтезированным методом СЛС / И.И. Журавлева, Т.В. Рожченко, А.Л. Петров [и др.] // *Лазерная техника и технология.* – 2006. – С. 419–428.
11. Shishkovskii I.V. Selective laser sintering/melting of nitinol– hydroxyapatite composite for medical applications I.V. Shishkovskii, I.A. Yadroitsev // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* September. – 2011. – Volume 50. – P. 275–283.
12. Назаров А.П. Типовые образцы изделий, получаемых методом селективного лазерного спекания / А.П. Назаров, А.А. Окунькова // *Вестник Саратовского государственного технического университета.* – 2012. – № 1 (67). – Том 3. – С.76–82.