

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Хорошко Екатерины Сергеевны «Особенности формирования структуры бронз систем Cu-Al, Cu-Si-Mn и Cu-Al-Si при электронно-лучевом аддитивном производстве», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

Актуальность диссертационной работы

Диссертационная работа, выполненная Хорошко Екатериной Сергеевной, посвящена установлению закономерностей формирования структуры медных сплавов систем Cu-Al, Cu-Si-Mn и Cu-Al-Si, полученных методом электронно-лучевого аддитивного производства. Аддитивные технологии изготовления различных изделий активно внедряются во многие отрасли промышленности и являются одним из ключевых направлений развития производства. Актуальность разработки данных технологий обусловлена возможностью с их помощью сокращать время выпуска готовой продукции, оптимизации затрат на производство изделий, а также возможностью изготовления изделий с улучшенными свойствами и сложных конструкций. Внедрение методик аддитивного производства требует отработки технологических режимов изготовления изделий под каждую сферу применения в отдельности. Несмотря на быстрое развитие аддитивных технологий, на сегодняшний день отсутствует обобщенная информация о выборе технологических режимов для различных конструкционных материалов и сплавов. Рассмотренные в работе медные сплавы, благодаря своей высокой коррозионной стойкости и износостойкости, широко применяются в промышленности. Применение аддитивных методов производства изделий из данных сплавов позволит сократить материалоемкость продукции и потребление энергоресурсов при производстве по сравнению с традиционными методами, что обуславливает актуальность проведенных исследований по изучению свойств материалов, изготовленных с использованием аддитивных технологий.

Общая характеристика и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка литературы из 144 источника, также приложения. Работа изложена на 160 страницах, в том числе 149 рисунка и 29 таблиц.

Во **введении** дается краткое обоснование выбора темы диссертации, степень разработанности, формулируются цель и задачи работы, положения, выносимые на защиту. Отмечены полученные в работе новые результаты, показана их научная и



практическая значимость, достоверность и обоснованность, представлены методология и методы диссертационного исследования, апробация работы и личный вклад соискателя, описаны структура и объем диссертации.

В первом разделе приведен обзор литературных источников, посвященных рассмотрению свойств и структуры медных сплавов Cu-Al, Cu-Si-Mn и Cu-Al-Si, методам получения меди и медных сплавов с использованием технологий аддитивного производства. Рассмотрены способы управления структурным состоянием напечатанных изделий.

Во втором разделе описаны использованные в диссертационном исследовании материалы и методика электронно-лучевого аддитивного производства алюминиевых бронз и металломатричного композита на основе алюминиевой бронзы. Описаны применяемые методики исследования.

Третий раздел содержит описание результатов исследования преобразования микроструктуры сплавов систем Cu-Al и Cu-Si-Mn в зависимости от режимов тепловложения при изготовлении образцов. Исследовано влияние режимов печати и условий теплоотвода на механические характеристики изготовленных образцов. Приведены результаты механических испытаний образцов, подверженных механической и термической обработке, указывающие на эффективность данных методов для повышения механических свойств и управления структурным состоянием образцов.

В четвертом разделе представлены результаты разработки и исследования различных методов электронно-лучевого аддитивного производства медных сплавов систем Cu-Al, Cu-Si-Mn и Cu-Al-Si. Выявлено влияние деформационной обработки на структуру и механические свойства тонкостенных образцов систем Cu-Al и Cu-Si-Mn. Исследованы структура и механические свойства медных сплавов систем Cu-Al и Cu-Al-Si, напечатанных с применением мультитрассовой технологии электронно-лучевого аддитивного производства. Получены градиентные гетерогенные композиты CuAl-B₄C путем комбинирования трассовой и порошковой технологий электронно-лучевого аддитивного производства.

В пятом разделе приведено исследование эксплуатационных свойств медных сплавов, напечатанных методом электронно-лучевого аддитивного производства. Показано влияние режимов печати и последующих обработок на коррозионную стойкость и износостойкость полученных образцов бронзы БрА7.

В заключении представлены основные выводы по результатам проведенных исследований.

Достоверность и обоснованность полученных научных результатов, положений и выводов диссертации обеспечены использованием широкого комплекса современных взаимодополняющих экспериментальных методов исследования микроструктуры и механических свойств материала, а также достаточно полным анализом выявленных закономерностей.

По результатам диссертационной работы опубликовано 7 работ, из них 2 статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий из списка ВАК, 3 статьи в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Научная новизна исследования

1. Ударно-механическая обработка позволяет изменять структуру и механические свойства медных сплавов системы Cu-Al и Cu-Si-Mn, напечатанных методом электронно-лучевого аддитивного производства в процессе изготовления изделия.

2. Применение мультипроволочной технологии электронно-лучевого аддитивного производства позволяет управлять структурно-фазовым составом изготавливаемых изделий из сплавов Cu-Al и Cu-Al-Si с различным соотношением основного материала БрА7 или БрКМц3-1 и дополнительных материалов АА1070, АК5 и АК12.

3. Комбинирование проволочно-порошковой технологии электронно-лучевого аддитивного производства позволяет изготавливать градиентные гетерогенные композиты CuAl-B₄C, градиент концентрации свойств которых зависит от диссоциации частиц карбидов, также от соотношения концентрации использованных для печати частиц Al и B₄C.

Научная значимость и практическая ценность результатов

Научная значимость заключается в том, что установленные в диссертационной работе закономерности, связанные с формированием структуры и свойств тонкостенных образцов медных сплавов, полученных методом электронно-лучевого аддитивного производства, могут быть использованы для прогнозирования структурно-фазового состояния материала изготовленного изделия. Полученные экспериментальные результаты расширяют представление и влияния применяемых методик обработки на повышение эксплуатационных свойств материала, полученного аддитивными методами производства.

Практическая ценность результатов заключается в том, что полученные экспериментальные данные о влиянии режимов электронно-лучевого аддитивного производства на структуру и механические свойства напечатанных образцов могут быть

использованы при разработке технологии печати изделий из медных сплавов с высокими эксплуатационными свойствами.

Автореферат диссертации и публикации адекватно и в полной мере отражают содержание диссертации.

Замечания:

1. В тексте диссертации не приведены сравнительные характеристики по прочности и пластичности образцов, полученных методом электронно-лучевого аддитивного производства, с бронзами, полученными традиционными методами производства.

2. В п. 4.1.4 текста диссертации указано, что одним из условий формирования полностью рекристаллизованной структуры материала при ударно-механической обработке является то, что область термического влияния от ванны расплава должна полностью перекрывать область пластической деформации материала. На рисунке 4.16 показано, что область пластической деформации больше области термического влияния.

3. Во втором разделе не описана методика подготовки подложек из стали для печати образцов. Наличие оксидных пленок и прочих загрязнений может стать причиной ухудшения качества или нестабильности печати.

4. В диссертации не приводятся пояснений по выбору режимов механической и термической обработки алюминиевой и кремниевой бронз.

5. В тексте диссертации отсутствует описание того, почему для получения бронз систем Cu-Al, Cu-Si-Mn и Cu-Al-Si выбрана технология аддитивного производства.

6. В тексте диссертации не приведены размеры заготовок сплавов Cu-Al, Cu-Si-Mn и Cu-Al-Si.

7. Чем обусловлено образование дендритной структуры в микроструктуре сплава БрКМц 3-1 с добавлением 10 вес.% АК5 стр 87.

8. В разделе практическая значимость работы автор указывает: «... Экспериментальные результаты о влиянии методов термической и механической обработки позволят получать качественные изделия с высокими механическими свойствами» однако не показывается в сравнении с какими изделиями проводилось сравнение свойств.

9. В диссертационной работе в главе 4 упоминаются частицы вторичные фазы, но в самой работе не приведен анализ формирования таких частиц.

10. В работе отсутствуют ссылки на русскоязычные публикации по получению материалов методами аддитивного производства.

Заключение

Научный уровень, решаемых задач, объем и актуальность выполненных исследований, обоснованность, вынесенных на защиту положений, достоверность и научная новизна, полученных результатов, их значимость для науки и производства позволяют считать, что диссертация Хорошко Е.С. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, связанной с установлением закономерностей формирования структуры и свойств алюминиевых бронз, полученных в условиях нестационарной металлургии методом электронно-лучевого аддитивного производства, имеющей важное значение для металловедения и термической обработки металлов и сплавов. Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям п. II.9 «Положения о присуждении ученых степеней» утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в редакции от 11.09.2021 г.), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки).

Официальный оппонент:

Проректор по научной и инновационной деятельности, профессор кафедры механики и машиностроения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», доктор технических наук, профессор,
научная специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Адрес: 654007, Кемеровская область - Кузбасс,
г.Новокузнецк, Центральный р-н, ул. Кирова, д. 42
Телефон: (3843) 46-58-83, konovalov@sibsiu.ru

Подпись С.В. Коновалова удостоверяю
Начальник отдела кадров СибГИУ



Сергей Валерьевич
Коновалов
19 октября 2022 г.

Татьяна Анатольевна
Миронова