

## 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.**

Аддитивные технологии получения материалов и готовых изделий являются одним из современных направлений развития ресурсосберегающего производства. В этой связи актуальны исследования в области управления структурой и свойствами получаемых материалов за счет технологических параметров 3-d наплавки, выбора исходных наплавляемых материалов и постнаплавочной обработки. В диссертационной работе представлены экспериментально установленные режимы электронно-лучевого аддитивного производства алюминиевых бронз, в том числе мультипроволочной технологией аддитивного производства, обеспечивающие управление их структурным состоянием и улучшение механических свойств. Разработан способ механической и термической обработки медных сплавов, обеспечивающий формирование равноосной структуры и повышение механических характеристик. Представлена совокупность экспериментальных данных о влиянии режимов и способов электронно-лучевого аддитивного производства на эксплуатационные свойства напечатанных образцов.

### **Анализ содержания диссертации.**

Диссертация изложена на 160 страницах, состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 144 источника, также приложения, содержит 149 рисунка и 29 таблиц.

Во введении обоснована актуальность решаемых в диссертации задач, показана степень их разработанности в научной литературе, сформулированы цель и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту. Перечислены полученные в работе новые результаты, показана их теоретическая 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 изложены литературные данные по свойствам и структуре медных сплавов систем Cu-Al, Cu-Si-Mn и Cu-Al-Si, по существующим и применяемым в производстве методам получения меди и медных сплавов с использованием аддитивных технологий, а также применяемым методам управления структурным состоянием

ИФПМ СО РАН	
« 21. ОКТ 2022	201 г.
вх. № 211022/11	
индекс	



напечатанных изделий. На основе анализа литературных данных обоснован выбор исследуемой в диссертационной работе технологии печати и применяемых методов обработки напечатанных образцов.

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

**В третьем разделе** изучено формирование микроструктуры сплавов систем Cu-Al и Cu-Si-Mn в зависимости от режимов тепловложения. Выявлено влияние условий теплоотвода на механические характеристики изготовленных образцов. Установлена эффективность применения механической и термической обработки с целью повышения механических характеристик образцов.

**В четвертом разделе** представлены результаты исследования перспективных методов электронно-лучевого аддитивного производства медных сплавов систем Cu-Al, Cu-Si-Mn и Cu-Al-Si. Разработан метод деформационной обработки тонкостенных образцов систем Cu-Al и Cu-Si-Mn и исследовано его влияние на структуру и механические свойства. Представлены результаты исследования структура и механические свойства медных сплавов систем Cu-Al и Cu-Al-Si, напечатанных с применением мультипроволочной технологии электронно-лучевого аддитивного производства. Комбинированием проволочной и порошковой технологий электронно-лучевого аддитивного производства получены градиентные гетерогенные композиты CuAl-B<sub>4</sub>C.

**В пятом разделе** приведены исследования эксплуатационных свойств (коррозионной стойкости и износостойкости) медных сплавов, напечатанных методом электронно-лучевого аддитивного производства.

**В заключении** сформулированы выводы по результатам работы.

**В приложении** представлен акт испытания технологии печати из медных сплавов ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель».

**Обоснованность научных положений и выводов**, сформулированных в работе, подтверждается большим количеством экспериментальных данных, полученных на поверенном современном оборудовании, а также согласованностью с результатами исследований, полученными другими авторами.

**Достоверность** результатов диссертационной работы подтверждается использованием современных методов исследования и стандартных методик испытаний, их обсуждением научной общественностью на Российских и Международных научных конференциях и публикацией в научных журналах: 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** заключается в установлении влияния тепловложения при электронно-лучевом аддитивном производстве тонкостенных образцов из бронз систем Cu-Al, Cu-Si-Mn, Cu-Al-Si на их структуру и механические свойства, выявлении механизмов деформационного упрочнения полученных сплавов при ударно-механической обработке последовательно напечатанных слоев, а также роли градиентных структур в повышении износостойкости.

**Теоретическая значимость** заключается в расширении представлений о структурообразовании металлических материалов, полученных при электронно-лучевой аддитивной наплавке и термомеханической обработке, а также в установлении механизмов воздействия на структуру и свойства мультитрассоводочной подачи наплавляемых материалов и градиентной наплавки с применением порошка карбида бора.

**Практическая значимость** заключается в определении технологических параметров электронно-лучевого аддитивного производства тонкостенных образцов из бронз Cu-Al, Cu-Si-Mn, Cu-Al-Si, позволяющих регулировать их структуру и механические свойства, что по сути является основой для разработки технологии печати изделий из медных сплавов.

**Автореферат** диссертации полностью соответствует содержанию диссертации.

#### **Замечания**

1. Неудачна формулировка пунктов научной новизны, которые скорее представляют собой практическую значимость.
2. Какая толщина образцов позволяет их относить к тонкостенным? Сохранятся ли полученные закономерности формирования структуры при увеличении толщины образцов?
3. Что автор понимает под записью CuAl-B<sub>4</sub>C? Значит ли это, что основу материала составляет алюминид CuAl или это просто обозначение алюминиевой бронзы?
4. Каким образом определено содержание фаз? На рисунке 4.45 приведено процентное содержание карбида бора в напечатанных образцах, однако в тексте нет пояснения о методике расчета этих значений.
5. На рисунках 4.43, 4.44 диссертации и рисунке 11 автореферата не видно бор, углерод и алюминий. Зачем их надо было приводить?
6. В работе проведены исследования стойкости бронз к электрохимической коррозии, а в общих выводах отсутствует пункт по результатам этих испытаний.
7. В тексте диссертации встречаются ошибки, повторы слов и части предложений.

Указанные замечания имеют частный характер, не влияют на оценку работы Хорошко Е.С., которая выполнена на высоком научном уровне, содержит оригинальные и достоверные научные результаты, а также важные практические рекомендации. Следует отметить обобщение некоторых полученных результатов в виде схем, наглядно раскрывающих механизм того или иного процесса.

#### **Соответствие содержания диссертации указанной специальности**

Диссертационная работа по своим целям и задачам, содержанию, методам исследования, научной новизне, практической значимости, выводам соответствует специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» в п.2 и 3.

#### **Заключение**

По содержанию, объему проведенных исследований, новизне, научной и практической значимости полученных результатов диссертационная работа Хорошко Е.С. соответствует требованиям положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ от 24.09.2013 г., № 842, а её автор Хорошко Екатерина Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки).

#### **Официальный оппонент:**

доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории микромеханики материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, научная специальность 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение).

Пугачева Наталья Борисовна

18.10.2022 г.

620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская: 34

Подпись Н.Б. Пугачевой удостоверяю  
Ученый секретарь ИМАШ УрО РАН к.ф.- м.н.



В.В. Привалова