

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента кандидата технических наук, доцента **Бобрук Елены Владимировны** на диссертационную работу Ван Яньху на тему «Развитие технологических основ термической обработки заготовок из сплавов системы Cu-Al, полученных методом проволоочно-дугового аддитивного производства», представленную на соискание ученой степени кандидата технических по специальности 2.6.1. – **Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов**

### **Актуальность темы диссертационного исследования**

Среди существующих технологий аддитивного производства объемных металлических изделий процесс холодного переноса металла на основе проволоочно-дугового аддитивного производства представляет интерес в связи с тем, что это относительно новая малоизвестная технология, отличающаяся большими возможностями - не требует существенного вложения тепловой энергии, и соответственно, имеет низкую себестоимость. Однако, обладающая недостатком — явлением разбрызгивания, что делает невозможным использования при производстве крупногабаритных деталей. Преодоление явления разбрызгивания и улучшение свойств медных сплавов является актуальной проблемой, которую необходимо решить в аддитивном производстве. Это обуславливает актуальность проведения научных исследований на примере медных сплавов системы Cu-Al, полученных методом холодного переноса металла и последующей термической обработки.

### **Структура и содержание диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, шести глав, изложена на 123 странице машинописного текста, содержит 56 рисунков, 8 таблиц, имеется 7 приложения, библиографический список содержит 132 источник.

**Во введении** кратко обоснована актуальность разработки нового материала, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, соответствие диссертации специальности.

**В первой главе** представлен анализ современного состояния исследований медных сплавов системы Cu-Al, а именно анализ интерметаллидных соединений, структурные дефекты, методы изготовления и исследования характеристик сплава. В частности, изучение свойств аддитивно изготовленных сплавов системы Cu-Al. Проведенный анализ позволил соискателю определить и научно обосновать цель работы и задачи исследования.

**Во второй главе** представлен материал, методы и оборудование для исследований. Изложены основы модернизированного метода проволоочно-дугового аддитивного производства. Сделан обоснованный выбор используемых материалов (сплав Cu-Al, сплав Cu-Al-Si, сплав Cu-Al-Si-Mg). Приведены методики исследования микроструктуры и механических свойств.

**В третьей главе** проанализирован аддитивно изготовленный сплав Cu-Al как в исходном состоянии, так и после гомогенизационного отжига, выполнен анализ полученной структуры и фазового состава методами оптической, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии с целью выявления деформационных изменений при квазистатическом нагружении. Было установлено, что с помощью аддитивной технологии, использующей сварочную дугу и холодный перенос металла можно получать медно-алюминиевые сплавы заданного химического состава и максимальной плотности. Улучшенные и более однородные свойства материала обеспечиваются за счет термической обработки.

**В четвертой главе** рассмотрено влияние химического состава на структуру и свойства сплава системы Cu-Al-Si, полученного проволоочно-дуговым аддитивным производством. Выполненные исследования установили, что добавление кремния и марганца позволили обнаружить четкое различие в распределении элементов в пограничном слое и центральной зоне осажденного слоя. Пограничный слой характеризуется высокой концентрацией легирующего элемента Si. Марганец и кремний образуют многоэлементные интерметаллидные включения различных форм и размеров в центральной зоне осажденного слоя. Определено, что добавка Si улучшает свойства сплавов Cu-Al.

**В пятой главе** исследованы характерные особенности добавляемых микроэлементов (кремний и магний) и основных элементов, а также интерметаллидных соединений в центральной части слоя и на его границах; представлены свойства сплавов Cu-Al-Si-Mn; проанализирован эффект добавления магния на микроструктуру и механические свойства сплавов Cu-Al-

Si-Mg; рассмотрено влияние термообработки на микроструктуру и механические свойства сплавов Cu-Al-Si-Mg. Установлено, что добавление кремния (1,2%) и магния (0,5%) в исследуемый материал улучшает механические свойства сплава Cu-Al. Исследовано влияние термической обработки на упрочнение твердого раствора.

**В шестой главе** описано использование полученных результатов исследований в Jinghe Zhizao Technology Co., Ltd. Предприятие будет осуществлять подготовку деталей из сплава Cu-Al по результатам исследований, а ожидаемый экономический эффект составляет 1 млн. руб в год.

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

**В приложении** приведены справка о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы соискателя и акт использования результатов диссертационной работы в Jinghe Zhizao Technology Co., Ltd.

#### **Соответствие автореферата основному содержанию диссертации**

Автореферат по своей логической структуре и содержанию соответствует диссертации. Все наиболее важные данные исследования нашли свое отражение в автореферате. Оформление диссертации и автореферата выполнено в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11-2011.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации:**

Обоснованность научных положений работы подтверждается использованием при исследовании базовых законов физического материаловедения. Научные положения, выводы и рекомендации в диссертационной работе выполнены на основе экспериментальных данных, полученных с использованием современного оборудования и методик исследования. Исследование основано на экспериментальном подходе с использованием научных инструментов для теоретического анализа и проведения испытания механических свойств. Научные положения, выносимые на защиту, прошли успешную апробацию на научных конференциях российского и международного уровня, опубликованы в рецензируемых журналах. Обоснованность научных положений и сделанных выводов не вызывает сомнения.

Достоверность основных положений диссертационной работы подтверждается актом промышленного использования полученных результатов,



и ожидаемым экономическим эффектом.

### **Достоверность и новизна полученных результатов:**

Достоверность экспериментальных результатов, представленных в диссертации, обеспечена использованием современных методов исследования и оборудования. Воспроизводимость экспериментальных результатов подтверждается экспериментальными данными. Надежность полученных результатов и сделанных выводов не вызывает сомнений. Результаты работы, определяющие ее новизну, в полном объеме отражены в выводах диссертации и не вызывают сомнений.

В качестве наиболее важных научных результатов работы, определяющих ее новизну, необходимо отметить следующие:

Методами оптической, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии проведены исследования по установлению влияния Al, Si и Mg на формирование и изменение структуры, фазового состава и распределение элементов сплавов системы Cu-Al, полученных проволочно-дуговым аддитивным производством с холодным переносом металла, и после их термической обработки. Определены и проанализированы основные факторы, определяющие механическое поведение сплавов системы Cu-Al после добавления Si и Mg и их термической обработки. Показано, что повышенная прочность и твердость сплава Cu-Al объясняется измельчением зерна и образованием частиц вторых фаз между слоями наплавленного металла. Выявлены особенности распределения основных элементов (Cu, Al) и второстепенных элементов (Si, Mg) в процессе проволочно-дугового аддитивного производства.

### **Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов включает в себя следующее:**

- Получены экспериментальные данные о влиянии гомогенизационного отжига и добавления Al, Si, Mg на формирование и изменение структуры, фазового состава и особенностей распределения химических элементов сплавов системы Cu-Al, изготовленных проволочно-дуговым аддитивным производством методом холодного переноса металла. Это позволяет выявить особенности влияния легирующих элементов на свойства объемных изделий, изготовленных из сплавов системы Cu-Al.
- Практическая значимость работы заключается в апробировании

технологии по получению методом проволочно-дугового аддитивного производства объемных деталей из сплавов системы Cu-Al, обладающих повышенными механическими свойствами, и внедрении их в промышленность. Практическая значимость подтверждается, патентом на изобретение, справками и актами об использовании результатов.

### **Оценка содержания и оформления диссертации:**

Диссертация написана ясным и точным языком, с целостной структурой и разумной логикой. Корректность изложения материалов диссертации, наглядная иллюстрация полученных результатов позволяют объективно оценить содержание, выводы и значимость проведенных научных исследований.

При использовании результатов других авторов в диссертации даются необходимые ссылки. Полученные результаты и сделанные выводы соответствуют поставленным в диссертации целям и задачам. Тема диссертации и ее содержание соответствует заявленной научной специальности 2.6.1 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Основные результаты проведенных в диссертации докладывались и обсуждались на семи международных конференциях в период 2017 - 2021 г.

Основное содержание работы отражено в 14 печатных работах, 7 в базах цитирования Scopus и Web of Science, один патент на изобретение.

Опубликованные работы в достаточной степени отражают содержащиеся в диссертации научные результаты.

### **Замечания по диссертационной работе:**

1. Известно, что температура плавления алюминия значительно ниже температуры плавления меди. В тексте диссертации и автореферата нет никакого упоминания о температуре и времени воздействия на проволоки, а также о том, каким образом контролировалась температура проволочно-дугового аддитивного процесса методом холодного переноса металла? Отмечалось ли во время проволочно-дугового аддитивного процесса выгорание алюминия?

2. В третьей главе из описания материала, полученного в результате

реализации проволочно-дугового аддитивного процесса, остается неясным представляет он собой слоистый двухфазный материал, образованные отдельно медью и алюминием или удастся получить сплав типа твердого раствора на основе меди (алюминиевую бронзу), где алюминий выступает в роли легирующего элемента?

3. В работе изучаются фазовые изменения в сплавах Cu-Al, в результате гомогенизационного отжига. Однако все ограничивается феноменологическим описанием. Количественные данные об этих изменениях не приводятся. Например, в главе 3, просто приводится констатация, о том, что в результате гомогенизационного отжига количество фазы  $\text{CuAl}_2$  уменьшается, а интерметаллидные частицы фазы  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  вовсе отсутствуют. Также в диссертационной работе не даны объяснения, с чем связаны наблюдаемые фазовые изменения в материалах исследования после гомогенизации.

4. В диссертационной работе автор использует только один режим гомогенизационного отжига (отжиг при температуре 800°C, 2 часа) для всех материалов исследования, полученных проволочно-дуговым аддитивным процессом. Критерии выбора именно такого режима требуют пояснения.

5. В описании исходного литого состояния к рисунку 3.6 автором используется термин «зерно». По тексту работы встречаются фразы «крупные кристаллы распадаются на субзерна» и т.п. По каким критериям микроструктура сплавов в исходном, фактически литом состоянии, считается зеренной?

6. В описании полученного сплава системы Cu-Al не хватает данных о толщине сформированного слоя, как влияет толщина слоя на механические свойства исследуемых сплавов? В главах 4 и 5 приведены значения механических свойств, но не приведен вид кривых растяжения.

7. В разделе практическая значимость работы автор пишет, что «Практическая значимость работы заключается в апробировании технологии по получению методом проволочно-дугового аддитивного производства объемных деталей из сплавов системы Cu-Al, обладающих повышенными механическими свойствами, и внедрении их в промышленность». Однако нигде не указано, по сравнению с чем достигнутый уровень свойств является повышенным? В диссертации не хватает информации о механических свойствах алюминиевых бронз (сплавов Cu-Al) тех же или близких композиций, используемым в данной



работе, полученных традиционными методами литья и подвергнутых схожей по назначению термической обработке (гомогенизации).

## Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным

**«Положение о присуждении ученых степеней»:**

Диссертация Ван Яньху на соискание ученой степени кандидата технических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи получения сплавов на основе меди путем разработки новой технологии двухпроводочного аддитивного производства с холодным переносом металла, которое имеет практическое значение для эффективной разработки сплавов системы Cu-Al. Решенные в диссертации задачи имеют существенное значение для развития материаловедения легких материалов, конкурентоспособных на мировом рынке.

Отмеченные замечания носят частный характер, не отражаются на значимости полученных и выводов, и защищаемых положений, а также не влияют на общую положительную оценку диссертации Ван Яньху. Диссертация Ван Яньху на тему «Развитие технологических основ термической обработки заготовок из сплавов системы Cu-Al, полученных методом проволочно-дугового аддитивного производства» по критериям актуальности, научной новизны, практической значимости, обоснованности и достоверности выводов соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней». Диссертант Ван Яньху заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент:

канд. техн. наук, доцент

Бобрук Елена Владимировна,

доцент кафедры материаловедения и физики металлов,

ФГБОУ ВО Уфимский государственный авиационный технический университет

Кандидатская диссертация защищена по специальности

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов

Адрес места основной работы: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д.12

Рабочий телефон: +79083502178

Адрес эл. почты: e-bobruk@yandex.ru

13.05.2022

