

В диссертационный совет Д 24.2.401.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, 42.

## ОТЗЫВ

на диссертационную работу Ван Яньху: «Развитие технологических основ термической обработки заготовок из сплавов системы Cu-Al, полученных методом проволоочно-дугового аддитивного производства», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

**Актуальность и научная значимость работы.** Работа Ван Яньху посвящена исследованию влияния гомогенизационного отжига и добавления Al, Si, Mg на формирование и изменение структуры, фазового состава и особенностей распределения химических элементов сплавов системы Cu-Al, изготовленных проволоочно-дуговым аддитивным производством методом холодного переноса металла и выявлению особенностей влияния легирующих элементов на свойства объёмных изделий из сплавов. Металлические системы Cu-Al, материалы с высокой прочностью и пластичностью являются предметом пристального внимания в фундаментальных исследованиях и при использовании в промышленности. Такие сплавы являются достаточно прочными и пластичными и обладают уникальными характеристиками, например, износостойкостью, коррозионной стойкостью и хорошо известны в машиностроении. Их получают плавкой в вакууме, дуговых печах, порошковой металлургией и литьём твёрдожидких композиционных материалов. При изготовлении заготовок и деталей, эти методы имеют низкую экономическую эффективность в сравнении с перспективными технологиями аддитивного производства объёмных металлических изделий технологией холодного переноса металла (cold metal transfer – CMT) на основе проволоочно-дугового аддитивного производства (wire-arc additive manufacturing – WAAM), который не требует существенного вложения энергии, отличается низкой себестоимостью. Кроме того, в настоящее время отсутствуют данные о детальном микроструктурном анализе, распределении легирующих элементов, механических свойствах, образовании в них интерметаллических фаз. Поэтому исследования получения сплавов системы Cu-Al методом холодного переноса и их термической обработки для современной науки о материалах являются несомненно актуальными.

Исследования, выполненные Ван Яньху направлены на установление закономерностей влияния термической обработки, повышение свойств, изучения микроструктуры и фазового состава сплавов системы Cu-Al, изготовленных методом проволоочно-дугового аддитивного производства. В работе исследованы структурно-фазовые состояния, дефектная субструктура, деформационное поведение, закономерности влияния термической обработки и добавок Al, Si и Mg на свойства, микроструктуру и фазовый состав сплавов Cu-Al, Cu-Al-Si и Cu-Al-Si-Mg, полученных методом проволоочно-дугового аддитивного производства, особенности влияния термической обработки на изменение микроструктуры на разных расстояниях от основы объёмных изделий из сплавов Cu-Al, Cu-Al-Si и Cu-Al-Si-Mg, полученных послойным осаждением металла при проволоочно-дуговом аддитивном производстве.

**Научная новизна исследований и полученных результатов.** Автором работы Ван Яньху выявлены особенности распределения элементов в процессе проволоочно-дугового аддитивного производства. Установлено влияния Al, Si и Mg на формирование и изменение структуры, фазового состава и распределения элементов сплавов системы Cu-Al, полученных в результате проволоочно-дугового аддитивного производства с холодным переносом металла и после их термической обработки. Показаны основные факторы, определяющие механическое поведение сплавов системы Cu-Al при добавлении Si и Mg и их термической обработки. Установлено, что в сплаве Cu-Al после гомогенизационного отжига крупные столбчатые кристаллы сохраняются, а равноосные зёрна измельчаются, обнаружено растворение в нём фаз

$\text{CuAl}_2$  и  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  и повышение механических свойств: микротвёрдости на 15,8 %, временного сопротивления растяжению на 29,3 %, предела текучести на 16,5 %, относительного удлинения на 25 %. Показано, что при растяжении трещины появляются в столбчатых кристаллах сначала под действием внешних сил, а затем крупные кристаллы распадаются на мелкие зерна. При растяжении поверхность излома разделяется на три зоны: роста трещины, переходной, зона микротрещины. Добавление Si приводит к более равномерному распределению элементов, уменьшает локальное образование интерметаллических фаз, повышает микротвёрдость на 131,6 %, временное сопротивление при растяжении на 190,7 % и условный предел текучести на 237,9 %. Добавление Si и Mn к сплаву приводит к четкому различию в распределении элементов в пограничном слое и центральной зоне осаждённого слоя: центральная область слоя обогащается атомами Al, но содержит меньше атомов Si по сравнению с пограничным слоем. Mn и Si образуют многоэлементные включения различных форм и размеров, такие как интерметаллическая фаза  $\text{Mn}_5\text{Si}_2$ ; Al и Cu могут образовывать соединения  $\text{CuAl}_2$  или  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  в центральной зоне осаждённого слоя. Повышенная прочность и твёрдость сплава Cu-Al объясняется измельчением зерна и образованием частиц вторых фаз между слоями наплавленного металла. Показано, что добавление Si и Mg к сплавам системы Cu-Al уменьшает их пластичность, при этом разрушение сплава системы Cu-Al при пластической деформации происходит по вязкому типу, а в сплавах Cu-Al-Si-Mg – по хрупкому. Для сплава Cu-Al-Si-Mg показано, что добавление Si и Mg приводит к образованию фазы  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , повышает микротвёрдость до 145 HV; гомогенизация приводит к увеличению микротвёрдости до 12,5 %; термическая обработка позволяет увеличить содержание  $\text{Mg}_2\text{Si}$ .

**Теоретическая и практическая значимость работы.** В работе показаны результаты, которые расширяют представления в области науки о материалах ряд закономерностей. 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. Что позволяет выявить особенности влияния легирующих элементов на свойства объемных изделий, изготовленных из сплавов системы Cu-Al. Апробирована технология получения методом проволочно- дугового аддитивного производства объемных деталей из сплавов системы Cu-Al, обладающих повышенными механическими свойствами, и уже используется на производственных предприятиях КНР и РФ (практическая значимость подтверждается справками и актами об использовании результатов). Подана заявка на патент на изобретение «Вспомогательное устройство подачи проволоки для аддитивного производства методом дуговой сварки с холодным переносом металла» (заявка на патент № 2021101495). Внедрение патента предполагает новые возможности аддитивного производства крупногабаритных и сложных деталей с высокими эксплуатационными характеристиками методом проволочно-дугового аддитивного производства из сплава Cu-Al. Также результаты работы внедрены в учебный процесс Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева.

**Обоснованность и достоверность научных положений выводов. Степень достоверности и апробация результатов.** В работе корректно поставлены задачи, использованы апробированные методы, приборы и оборудование, выполнен значительный объем экспериментальных данных, которые согласуются с результатами, полученными в научных работах других исследователей.

Результаты диссертационной работы представлены в 14 публикациях: 7 статей в рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК или включённых в международные базы Scopus и Web of Science; 1 заявке на патент; 6 статьях в прочих изданиях и тезисах докладов на российских и международных конференциях.

#### **Недостатки и замечания по диссертации.**

По работе необходимо отметить некоторые недостатки, не касающиеся итоговых выводов:

1. Судя по автореферату, отсутствует чётко сформулированная научная гипотеза.
2. Не описана методология выполнения или методологическая схема научной работы.

Отмеченные недостатки ни в коей мере не снижают научной и практической значимости работы.

**Соответствие работы требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.**  
Диссертационная работа Ван Яньху «Развитие технологических основ термической обработки заготовок из сплавов системы Cu-Al, полученных методом проволочно-дугового аддитивного производства» является научной работой, содержащей обоснование цели и задач исследования, анализ научно-технической литературы по общему состоянию вопроса. Судя по автореферату, работа содержит теоретические и экспериментальные исследования в области разработки металловедения и термической обработки металлов и сплавов. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 14 публикациях: 7 статей в рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК или включённых в международные базы Scopus и Web of Science; 1 заявке на патент; 6 статьях в прочих изданиях и тезисах докладов на российских и международных конференциях. На наш взгляд, диссертационная работа Ван Яньху по своей актуальности, научной новизне, практической значимости, отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

### **Заключение.**

Считаю, что диссертационная работа Ван Яньху «Развитие технологических основ термической обработки заготовок из сплавов системы Cu-Al, полученных методом проволочно-дугового аддитивного производства» отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов по пунктам: 3) теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов; 4) теоретические и экспериментальные исследования термических, термоупругих, термопластических, термохимических, термомагнитных, радиационных, акустических и других воздействий изменения структурного состояния и свойств металлов и сплавов; 9) разработка новых принципов создания сплавов, обладающих заданным комплексом свойств, в том числе для работы в экстремальных условиях. Диссертационная работа соответствует п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013, требованиям Положений ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук, а её автор, Ван Яньху, несомненно заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института Материаловедения Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМ ДВО РАН) – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (ХФИЦ ДВО РАН).

Адрес: 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153;  
телефон: +7(4212) 22-69-56; e-mail: konevts@narod.ru

Специальность 05.02.01 – Материаловедение (Машиностроение)

Коневцов Леонид Алексеевич

23.05.2022

Согласен на обработку персональных данных  
Подпись Коневцова Л.А. удостоверяю: главный специалист  
службы кадров Института Материаловедения Дальневосточного  
отделения Российской академии наук (ИМ ДВО РАН) –  
обособленного подразделения ХФИЦ ДВО РАН

Заместитель начальника кадрово-правового отдела Волжанина

23.05.2022

