

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента**

**доктора технических наук, профессора Гузанова Бориса Николаевича, заведующего кафедрой инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии, института инженерно-педагогического образования ФГАОУ ВО «РГПУ» на диссертацию Христолюбова Александра Сергеевича «Создание новых композитных антифрикционных бронз, армированных стальными дендритами», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение**

В последние годы в практическом материаловедении проводится активная работа по изысканию антифрикционных сплавов и покрытий, обладающих улучшенными механическими, технологическими и трибологическими свойствами. При этом большинство современных антифрикционных материалов и покрытий получают методами порошковой металлургии и плазменным напылением. В отличие от литых антифрикционных сплавов порошковые сплавы, обладая хорошими трибологическими свойствами имеют своеобразные, зачастую неудовлетворительные механические свойства. В тоже время некоторые литые антифрикционные сплавы также имеют ряд недостатков (низкая пластичность и усталостная прочность, склонность к ликвации при литье, связанных с их структурой. Например, широко используемая бронза  $\text{BrO10}$  имеет в структуре хрупкие интерметаллидные соединения  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$  отрицательно влияющие на механические и технологические свойства. Поэтому изменение структуры и физико-механических свойств твердых включений в антифрикционных сплавах может способствовать повышению механических и технологических свойств с сохранением высокого уровня служебных свойств.

В связи с этим диссертационную работу Христолюбова Александра Сергеевича «Создание новых композитных антифрикционных бронз, армированных стальными дендритами», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение, можно считать весьма актуальной и отвечающей современным представлениям теории и практики материаловедения.

## 1. Актуальность выбранной темы

Диссертационное исследование Христюбова А.С. направлено на создание новых композитных антифрикционных бронз, структура которых состоит из медной матрицы и армирующих ее дендритов различного химического состава, что обеспечивает им специальные физико-механические и служебные свойства. Предложенные автором бронзы БрЖНА 12-7-1 (дендрит –  $\text{H23Ю1}$ ) и бронза БрЖНХК 12-7-5-1 (дендрит –  $\text{X17H17C3}$ ) имеют очень большие перспективы применения в машиностроении в качестве отливок и наплавов, а также проката и поковок для узлов трибосопряжений.

## 2. Краткое содержание диссертационного исследования

Анализ применяемых в настоящее время антифрикционных сплавов на медной основе и покрытий из них позволил выявить недостатки, связанные с их надежностью и технологичностью применения, что позволило сформулировать цель диссертационной работы – создание новых композитных антифрикционных бронз на  $\text{Cu-Fe-Ni}$  основе, армированных стальными дендритами из сталей разных классов, обладающих повышенными механическими, технологическими и трибологическими свойствами.

Для достижения поставленной цели автором были определены следующие задачи:

1. Исследовать возможности улучшения морфологии интерметаллидов  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$  в бронзе БрО10 путем легирования её  $\text{Ni}$ ,  $\text{Co}$  для повышения технологических свойств;
2. Определить концентрацию легирующих элементов:  $\text{Fe}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Cr}$  и др., обеспечивающих формирование дендритов из сталей разных классов (мартенситный, аустенитный), аустенитных нержавеющей;
3. Оценить влияние термической обработки, степени легирования  $\text{Ni}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Cr}$  на структуру композитных бронз, количество дендритов, массоперенос матрица-дендрит, интенсивность упрочнения дендритов при старении;
4. Установить влияние скорости охлаждения при кристаллизации композитных бронз (литье, переплав, наплавка, вакуумное литье) на дисперсность дендритной составляющей;
5. Определить уровень механических, технологических и трибологических свойств перспективных составов композитных бронз в зависимости от условий их производства и обработки.

В соответствии с целью и поставленными задачами автор выполнил все запланированные исследования.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и 2<sup>x</sup> приложений. Работа изложена на 157 страницах, содержит 62 рисунка, 41 таблицу. Библиография содержит 131 наименование работ отечественных и зарубежных авторов.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, показана степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования.

В первой главе рассмотрены основные понятия теории трения, выполнен обзор основных антифрикционных материалов с акцентом на антифрикционные материалы на основе меди (BrO10). Проведен патентный анализ применяемых антифрикционных материалов. Рассмотрены особенности формирования структуры и свойств медных сплавов, содержащих железо и никель. Проанализированы сварочные процессы, применяемые при наплавке на сталь высокооловянных антифрикционных бронз.

Во второй главе представлены исследуемые материалы и способы их получения. Объектами диссертационного исследования являются экспериментальные композитные бронзы на медной основе в виде отливок, наплавов на сталь и переплава с содержанием железа от 9 до 23 %, никеля от 6 до 9 %, хрома от 3 до 5 %, кобальта от 1 до 3 %, алюминия и кремния около 1%, а также отливки бронзы BrO10 с легированием никелем и кобальтом. В работе используются традиционные методы исследования, такие как оптическая и электронная микроскопия, механические и дюрометрические исследования, приведена методика термической обработки и трибологических испытаний.

В третьей главе изучена возможность повышения механических и трибологических свойств бронзы BrO10 легированием никелем и кобальтом. Автором показано, что при легировании только никелем или кобальтом в структуре таких сплавов остаются фазы аналогичные по форме фазам в бронзе BrO10, что не позволяет считать такие бронзы деформируемыми. Использование комплексного легирования никелем и кобальтом позволило повысить деформируемость экспериментальных бронз, так разрушение бронзы BrONCo 10-7-3 начинается при степени деформации 43 %, бронзы BrOKoH 10-8-2 при 47 %, для бронзы BrO10 при 8%. Выявлено, что трибологические свойства (коэффициент трения, интенсивность изнашивания) экспериментальных бронз уступают прототипу – BrO10. На основании полученных экспериментальных результатов сделан вывод, что комплексным легированием бронзы BrO10 не удастся добиться улучшения комплекса механических и трибологических свойств. В связи с чем автором

сделан вывод о необходимости замены интерметаллидов на дендриты, например, из мартенситно-стареющей стали, что позволит управлять механическими, технологическими и служебными свойствами таких бронз.

Четвертая глава посвящена исследованию микроструктуры сплавов на медной основе при легировании в различных сочетаниях основными (Fe, Ni) и дополнительными (Cr, Co, Al, Si) элементами. Показано, что степень легирования основными элементами пропорционально влияет на количество дендритной фазы, армирующей медную матрицу, при этом химический состав дендритов по железу изменяется незначительно и составляет 58-63% наличие остальных элементов пропорциональна их содержанию в шихте. Упрочняемые старением дендриты, состава мартенситно-стареющей стали Н23Ю1 были получены в сплаве  $\text{Cu}+12\%\text{Fe}+7\%\text{Ni}+1\%\text{Al}$ , дополнительное легирование кобальтом в количестве от 1 до 3% интенсифицирует процесс дисперсионного упрочнения дендритов, при этом твердость дендритов может регулироваться термообработкой в широких пределах. Рассмотрено строение дендритов в этом типе экспериментальных бронз, высокое содержание меди в дендритах объясняется наличием в них пластинчатых, глобулярных медных включений. Отмечено, что трибологические свойства таких композитных бронз в отливке лучше, чем у бронзы БрО10, но при использовании упрочняющих термических обработок трибологические свойства бронз, дополнительно легированных кобальтом, заметно снижаются.

Особого внимания заслуживает применение хрома от 3 до 5%, в качестве легирующего элемента и дополнительных добавок алюминия и кремния до 1%. Их введение в бронзу  $\text{Cu}+12\%\text{Fe}+7\%\text{Ni}$  позволяет получить дендриты близкие по составу к аустенитным (Н29Х9Ю) и аустенитным нержавеющей дендритам (Х17Н17С3). Трибологические свойства этих бронз в отливке значительно разнятся. Для бронзы, армированной аустенитными дендритами выявлен высокий уровень коэффициента трения и интенсивности изнашивания, в то время как для бронзы, армированной аустенитными нержавеющей дендритами самый низкий уровень коэффициента трения и интенсивности изнашивания из всех рассматриваемых экспериментальных композитных бронз. Такую разницу в трибологических свойствах автор связывает с наличием прочной окисной пленки, образующейся на поверхности дендрита бронзы БрЖНХК 12-7-5-1 не склонной к адгезионным взаимодействиям с контртелом.

В пятой главе были изучены механические, технологические свойства бронз, изготовленных с использованием технологии быстрой кристаллизации (вакуумное литье, агроно-дуговой переплав, наплавка на бронзовое, чугунное и стальное основание). При использовании таких методов изготовления значительно возрастает дисперсность дендритной составляющей, при этом интенсивность изнашивания композитных бронз в таком состоянии в 5-10 раз

ниже, чем у соответствующих отливок. Установлено минимально необходимое содержание железа (12%) в наплавляемых и переплавляемых бронзах для сохранения необходимого уровня трибологических свойств. Рассмотрены особенности наплавки композитной бронзы БрЖНА 12-7-1 на чугунное и стальное основания. Требуемый химический состав антифрикционного слоя при наплавке композитной бронзы на сталь формируется уже при однослойной наплавке, при этом трибологические свойства такого покрытия выше, чем у широко применяемых для наплавки бронз.

Из представленных в главе механических свойств экспериментальных композитных бронз автор выделяет бронзу БрЖНА 12-7-1, как обладающую лучшим комплексом пластических и прочностных свойств. Показано негативное влияние даже малого количества олова в бронзах на их пластические свойства.

### **3. Научная новизна и теоретическая значимость**

Диссертационная работа Христолюбова А.С. представляет собой интересное, законченное и достаточно ценное по своей научной и теоретической значимости исследование. Автором впервые была показана возможность формирования дендритных фаз различного химического состава при легировании Fe, Ni, Cr, Co, Al, Si в медном сплаве антифрикционного назначения. Установлено влияние структуры, термической обработки для антифрикционных композитных бронз с высокими служебными свойствами. Большой интерес представляет предложенная автором композитная бронза БрЖНХК 12-7-5-1 армированная дендритами, имеющими состав схожий с составом аустенитной нержавеющей стали для обеспечения высокой износостойкости.

### **4. Практическая значимость и рекомендации по использованию**

Практическая значимость заключается в том, что по комплексу служебных, технологических и механических свойств композитные бронзы БрЖНА 12-7-1 и БрЖНХК 12-7-5-1 превосходят по своим свойствам классическую бронзу БрО10 и широко применяемые для наплавки бронзы БрКМц 3-1, БрА8. Промышленное применение бронзы БрЖНХК 12-7-5-1, подтвержденное соответствующим актом полностью доказывает это утверждение.

## **5. Степень достоверности и конкретное участие автора в получении результатов**

Степень достоверности подтверждается использованием в совокупности современных методов металлографического исследования и аттестованных приборов, воспроизводимостью результатов большого объема исследований и их проверкой независимыми лабораториями.

Личный вклад диссертанта в работе очевиден и сомнения не вызывает. Автором лично были изготовлены экспериментальные антифрикционные бронзы как объекты исследования, при его непосредственном участии были проведены исследования всего спектра необходимых для исследования свойств.

## **6. Полнота изложения материалов в печати**

Автореферат диссертации с необходимой полнотой раскрывает её содержание, публикации соответствуют выбранной теме исследования и отражают основное содержание работы. Положения и выводы диссертации прошли апробацию на международных и российских конференциях, опубликовано 19 печатных работ, в том числе 8 статей, рекомендованных ВАК РФ, из которых 5 проиндексированы в базе Scopus и WebofScience, получен патент РФ на полезную модель.

## **7. Оценка содержания диссертации, замечания**

В целом диссертационная работа Христолюбова А.С. представляет собой интересное и ценное по своей научной и практической значимости исследование. Работа выполнена последовательно и подчинена единой цели. диссертация изложена логично, грамотно и аргументировано.

Вместе с тем нельзя не отметить, что в данном исследовании есть недостатки и спорные моменты. В качестве основных замечаний и возражений по работе можно выделить следующие:

1. В связи с чем автор употребляет термин стальные дендриты на основе Fe + л.э. (Ni, Co, Cr, Al), когда под сталью понимается сплав на основе системы Fe-C? Откуда в рассматриваемых многофазных системах на основе меди берется углерод? Если углерод попадает в расплав при разложении окиси углерода в процессе плавки, то это надо доказать.

2. Наличие фазовых превращений в дендритах бронзы БрЖ12Н7А1 необходимо подтверждать экспериментально фазовым рентгеноструктурным анализом, иначе утверждение образования интерметаллидов в процессе кристаллизации выглядит весьма предположительно и это может быть, например, FeAl, как более устойчивое химическое соединение (дис., стр. 78).

3. Диффузия атомов обычно направлена на уменьшение концентрации, а не наоборот. Поэтому утверждение о диффузии Fe и Ni из матрицы к осям дендритов при термообработке весьма сомнительно (стр. 10 авт., рис. 3, табл. 3). По-видимому, формирование обнаруженной «оболочки» на поверхности дендрита с повышенным содержанием по Fe и Ni происходит по другому механизму.

4. В соответствии с правилами классификации и маркировки цветных сплавов в литейных бронзах за буквосочетанием Бр следуют поочередно без пробелов и черточек символ легирующего элемента и сразу за ним целое или дробное число, указывающее концентрацию его в массовых процентах. У автора приведена маркировка деформируемых бронз (см. стр. 7 автореф.).

5. Весьма спорно утверждение автора, что морфологию твердых включений в сплавах можно улучшать с целью повышения свойств сплавов. По-видимому следует говорить об изменении морфологии за счет каких-то внешних воздействий.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки, в целом, весьма интересного исследования и носят, в большей степени, дискуссионный характер.

## **8. Научный уровень диссертации**

Диссертант обладает широким научно-техническим кругозором, продемонстрировал самостоятельность суждений и умозаключений. Отмеченные замечания и недостатки носят дискуссионный характер и не снижают положительную оценку представленной Христолюбовым А.С. диссертационной работы.

Диссертация представляется мне законченным комплексным исследованием, а полученные научные и практические результаты имеют существенное значение для материаловедения.

## **9. Соответствие специальности**

Содержание диссертационного исследования полностью соответствует специальности 2.6.17. Материаловедение.

## **10. Соответствие диссертации требованиям Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ»**

Рецензируемая диссертация Христолюбова Александра Сергеевича «Создание новых композитных антифрикционных бронз, армированных

стальными дендритами» является законченной научно-исследовательской работой, соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, определенным п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», а ее автор, Христоролюбов Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 Материаловедение (технические науки).

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой инжиниринга  
и профессионального обучения в  
машиностроении и металлургии  
Федерального государственного  
Автономного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Российский государственный  
профессионально-педагогический  
университет»,  
доктор технических наук, профессор



Борис Николаевич Гузанов

620012, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11  
ФГАОУ ВО «РГППУ»  
телефон: 8 (912) 631-72-69  
E-mail: guzanov\_bn@mail.ru

Подпись Б.Н. Гузанова ЗАВЕРЯЮ  
Ученый секретарь Ученого совета  
Университета  
15.11.2021 г.



Ожиганова Мария Владимировна