

ОТЗЫВ

официального оппонента 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» (технические науки)

Диссертационная работа Христолюбова Александра Сергеевича посвящена решению проблемы создания литых и наплавленных антифрикционных композитных бронз с уникальными технологическими и трибологическими свойствами путем определения оптимального химического состава, концентрации легирующих элементов и установления закономерностей формирования армирующей дендритной фазы.

Актуальность темы исследования

Создание современных антифрикционных бронз с повышенными механическими и трибологическими свойствами весьма актуальная задача для производства высоконагруженных подшипников скольжения, направляющих втулок и других деталей трибосопряжений.

Предложенные соискателем новые композитные антифрикционные бронзы, армированные стальными дендритами из стали мартенситного класса Н23Ю1 и аустенитной нержавеющей стали X17H17C3, формирующимися в медной матрице базовым (Fe, Ni) и дополнительным (Al, Cr, Si) легированием, обеспечивают значительное повышение износостойкости и имеют широкие перспективы применения в виде отливок и наплавок на поверхности деталей трибосопряжений.

Анализ содержания диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 131 источника. Работа изложена на 177 страницах, содержит 62 рисунка, 41 таблицу и 2 приложения.

Во введении обоснована актуальность и показана степень разработанности темы исследования. Сформулированы цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы. Представлены методология, методы исследования и положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор металлических антифрикционных материалов подшипников скольжения, приведены их триботехнические

свойства и сведения о патентных исследованиях способов изготовления, проанализированы особенности формирования структуры и свойств бронз с двух- и трехкомпонентными системами меди Cu, железа Fe и никеля Ni, а также процессы наплавки медных сплавов и высокооловянистых бронз. Обобщение анализа состояния вопроса исследований позволило сформулировать перспективное направление решения задачи создания композитных бронз, армированных стальными дендритами и обеспечивающих высокие трибологические свойства узлов трибосопряжений.

Вторая глава посвящена обоснованию выбора материалов и методов исследования. Были изготовлены отливки бронзы-прототипа БрО10 с легированием никелем в количестве от 2 до 15 % и кобальтом от 3 до 10 % и экспериментальные бронзы в виде отливок, переплава в аргоне и наплавки на сталь с различным весовым содержанием железа, никеля, алюминия, кобальта, хрома и кремния. Подробно описана методика изготовления образцов для испытаний из экспериментальных сплавов бронз. Приведены методика термической обработки образцов и методы металлографического анализа, дюрометрии, электронной микроскопии, механических испытаний, оценки адгезионной прочности и триботехнических исследований.

Третья глава посвящена изучению возможности повышения механических и трибологических свойств бронзы БрО10 за счет легирования никелем от 5 до 15 % вес. и кобальтом в количестве 10 %, а также комплексного легирования никелем и кобальтом с различным весовым содержанием. Полученные результаты исследований микроструктур экспериментальных образцов показали, что формирующиеся интерметаллиды $Cu_{31}Sn_8$, $Ni_{17}Sn_3$ и $CoCu_2Sn$ в бронзах БрО10, БрОКоН 10-8-2 и БрОКо 10-10 не позволяют существенно повысить трибологические свойства.

По комплексу трибологических свойств (коэффициент трения $f_{тр}$ и интенсивность изнашивания) все образцы уступают прототипу БрО10. Легирование позволяет повысить только деформируемость бронз. Разрушение бронзы БрО10 начинается при степени деформации 8 %. В бронзе БрОНКо 10-7-3 при 34 % появляются трещины на поверхности, а в бронзе БрОКоН 10-8-2 – при 47 %.

Сделан вывод о необходимости замены интерметаллидов, выполняющих роль опорной поверхности, на армирующие бронзу дендриты из мартенситно-стареющей стали. Показано, что для формирования таких дендритов необходимо определить соотношение легирующих элементов Fe, Ni с долегированием алюминием и другими элементами.

В четвертой главе проведены исследования микроструктуры, коэффициента трения и интенсивности изнашивания литых сплавов на медной

основе, легированных Fe, Ni, Al, Co, Si в различных весовых соотношениях. Формирование дендрита изучалось в литом состоянии и после термообработок (закалка от 950 °C и закалка от 950 °C и старение 2 часа при 450 °C) в тройном сплаве Cu + 12% Fe + 6% Ni (БрЖН 12-6). При этом весовое содержание меди в матрице составляло 84,27 %. В то же время химический состав дендрита в среднем состоял из 23,71% Cu + 59,38% Fe + 16,91% Ni.

Впервые установлено, что:

1. Для формирования упрочняемых дендритов с равномерно распределенными дисперсными включениями в междендритном пространстве предложен состав 80% Cu + 12% Fe + 7% Ni + 1% Al (бронза БрЖНА 12-7-1). В присутствии алюминия в бронзе БрЖН 12-7-1 значительно возросла микротвердость дендрита (398 HV₅₀) по сравнению с микротвердостью дендрита в бронзе БрЖН 12-6 (275 HV₅₀) вследствие образования интерметаллидов Fe₃Al.

2. После закалки микротвердость дендритов уменьшается в два раза по сравнению с литым состоянием, что объясняется растворением интерметаллидной фазы Fe₃Al. После старения также наблюдается значительное снижение микротвердости как в дендрите, так и в матрице примерно на 60 единиц HV₅₀. Сделан вывод о диффузии Ni из матрицы в дендриты в процессе кристаллизации и последующей термической обработки, что установлено и в работах других авторов.

3. Степень легирования при создании бронз типа БрЖНА и бронз с кобальтом типа БрЖНКоА влияет на формирование дендритной фазы, количество которой в значительной степени зависит от содержания железа. Исследовались бронзы легированием кобальтом: Cu + 9% Fe + 4% Ni + 1% Co + 1% Al (БрЖНКоА 9-4-1-1) и Cu + 18% Fe + 8% Ni + 2% Co + 1% Al (БрЖНКоА 18-8-2-1), а также бронзы БрЖНКоА 23-8-3-1 с аналогичной термической обработкой. Химический состав дендритов в исследованных образцах по Fe и Cu мало изменяется и составляет 58...63 % для железа. При наличии в бронзах кобальта Со содержание меди Cu в дендритах во всех образцах уменьшается на 15...20 %. Содержание Ni и Co в дендритах пропорционально их среднему количеству (рис. 4.17, 4.18).

Представлены сравнительные диаграммы изменения микротвердости дендритной фазы и матрицы для всех экспериментальных бронз (рис. 4.19, 4.20), которые позволили сделать целый ряд выводов по перспективам повышения трибологических свойств.

Введение Со интенсифицирует дисперсионное упрочнение дендритов (опорная поверхность при трении скольжения), что благоприятно влияет на повышение износостойкости.

4. Большого внимания заслуживает применение автором в качестве легирующего элемента хрома Cr. Применение Cr позволяет получить дендриты ферритного, аустенитного классов, а также аустенитные нержавеющие дендриты. Изучение химического состава, структуры и микротвердости бронзы БрЖНХА 12-9-3-1 подтвердило выдвинутые автором диссертации предположения. Показано, что состав дендрита бронзы БрЖНХК 12-7-5-1 соответствует нержавеющей стали X17H17C3.

Отмечается, что при малом контактном давлении (1,0...4,0 МПа) аустенитные дендриты бронзы БрЖНХА 12-9-3-1 адгезионно взаимодействуют с контртелом и происходит схватывание. Для повышения трибологических свойств была проведена закалка с последующей обработкой холодом, что переводит аустенит в мартенсит, при этом интенсивность изнашивания снижается в 3-4 раза по сравнению с аустенитной структурой дендрита (таблица 4.21).

Выводы по главе 4 показывают значительный научный вклад в создание для узлов трения новых композитных литых бронз, армированных нержавеющими дендритами.

Пятая глава посвящена изучению различных способов изготовления и обработки выявленных в главе 4 наиболее перспективных составов композитных бронз: литье, вакуумное литье, аргоно-дуговой переплав и наплавки на бронзовую, чугунную и стальные основы.

Проведены значительные исследования макро- и микроструктуры, химического состава и трибологических свойств бронз БрЖНА 12-7-1 и БрЖНХК 12-7-5-1, полученных вакуумным литьем и аргоно-дуговым переплавом, а также в переплавленной зоне бронз типа БрЖНКоА и в наплавках бронзы БрЖНА 12-7-1 на бронзу БрЖНОА 12-7-2-1, чугун и стальное основание. Интенсивность изнашивания бронз БрЖНА 12-7-1 и БрЖНХК 12-7-5-1, полученных вакуумным литьем и аргоно-дуговым переплавом на порядок ниже интенсивности изнашивания бронзы БрО10 (рис. 5.7, табл. 5.4).

Впервые установлено, что при содержании железа во всех экспериментальных бронзах менее 12 % полноценные дендриты не формируются и служебные свойства неудовлетворительные. Для сохранения высоких трибологических свойств переплавляемые и наплавляемые композитные бронзы должны содержать не менее 12 % Fe. Наивысшей износостойкостью обладает бронза БрЖНХК 12-7-5-1, которая армирована аустенитными нержавеющими дендритами и может быть рекомендована в виде наплавки и плазменного напыления.

Выявлено, что при наплавке бронзы БрЖНА 12-7-1 на стальную основу формируются две переходные зоны: первая – толщиной 20...25 мкм состоит из

твердого раствора 88% Fe и 12% Ni; вторая – толщиной 100...150 мкм включает дендриты с высоким (до 75%) содержанием железа; третья – зона основной наплавки. Наплавка бронзой БрЖНА 12-7-1 на сталь технологична и требуемый химический состав антифрикционного слоя формируется уже при однослоиной наплавке.

Из представленных результатов механических испытаний композитных бронз наилучшим комплексом механических свойств обладает композитная бронза, армированная мартенситно-стареющими дендритами БрЖНА 12-7-1 (табл. 5.9).

Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Научная новизна исследования состоит в установлении новых знаний о закономерностях формирования дендритных фаз в медном сплаве на основе базового (Fe, Ni), дополнительного (Al, Co, Cr, Si) легирования и термической обработки при создании композитных антифрикционных бронз с высокими трибологическими и служебными свойствами в виде отливок и наплавок.

Впервые показана возможность управления химическим составом, диспергированием структуры и упрочнением стальной дендритной фазы при создании композитных бронз.

Соискателем выдвинуты и обоснованы следующие основные положения научного исследования:

1. Комплексное легирование бронзы-прототипа БрОН никелем от 5 до 15 % и кобальтом до 10 % повышает деформируемость и снижает трибологические свойства композита.

Установлено, что при комплексном легировании бронзы БрО10 формируются интерметаллиды $Ni_{17}Sn_3$ и $CoCu_2Sn$, что не позволяет существенно повысить трибологические свойства. Легирование позволяет повысить только деформируемость. Разрушение бронзы БрО10 начинается при степени деформации 10 %. В бронзе БрОНКо 10-7-3 трещины на поверхности появляются при деформации 34 %, а в бронзе БрОКоН 10-8-2 при 47 %.

2. Формирование в медной матрице фаз стальных дендритов, обеспечивающих высокие антифрикционные и износостойкие свойства новых композитных бронз (правило Шарпи) за счет базового (Fe, Ni) и дополнительного (Al, Co, Cr, Si) легирования и термической обработки.

Рассмотрено влияние Fe, Ni, Co, Al и Cr на формирование дендритов в медной матрице из мартенситных, мартенситно-стареющих, аустенитных и аустенитных нержавеющих дендритов. На базе глубоких исследования предложены новые композитные бронзы БрЖНА 12-7-1, армированные

дендритами из мартенситно-стареющей стали и БрЖНХК 12-7-5-1, армированные аустенитными нержавеющими дендритами обладающие особо высоким комплексом механических технологических и служебных свойств.

3. Диспергирование структуры композитных бронз методами вакуумного литья, аргоно-дугового переплава и наплавок способствует снижению износа в узлах трения скольжения.

Методами структурно-фазового анализа и трибологических исследований коэффициента трения и интенсивности изнашивания доказано, что предложенные методы диспергирования структуры перспективных бронз БрЖНА 12-7-1 и БрЖНХК 12-7-5-1 в 5...10 раз снижают интенсивность изнашивания по сравнению с интенсивностью изнашивания отливки и не влияют на коэффициент трения.

Достоверность результатов и выводов

Степень достоверности результатов работы обеспечивается большим объемом и воспроизводимостью результатов экспериментальных исследований, сопоставлением их между собой и с известными литературными данными, использованием современных методов исследования и аттестованных средств измерений. Выводы по главам и в заключении четко сформулированы и следуют из результатов работы.

Апробация результатов исследования

Основное содержание работы представлено в 19 научных публикациях, из них 8 статей опубликовано в изданиях из списка ВАК, 5 статей – в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, получен 1 патент РФ на полезную модель.

Основные результаты и положения были доложены и обсуждены на 13 российских и международных конференциях в зарубежных странах.

Научная и практическая значимость работы

Впервые обоснованы принципы легирования медной матрицы при создании антифрикционных композитных бронз, обеспечивающие формирование дендритной фазы из мартенситно-стареющих и аустенитных нержавеющих сталей, которые могут служить основой дальнейших фундаментальных и прикладных исследований в материаловедении, трибологии и триботехнике.

Созданные композитные бронзы типа БрЖНА 12-7-1 (дендриты Н23Ю1) и БрЖНХК 12-7-5-1 (дендриты Х17Н17С3) по комплексу трибологических и механических свойств превосходят «классическую» антифрикционную бронзу

БрО10 и могут найти широкое применение для подшипников скольжения и других изделий трибосопряжений, а бронза БрЖНХК 12-7-5-1 уже применяется при газотермическом напылении на крупногабаритные изделия турбин, выпускаемых АО «Уральский турбинный завод», г. Екатеринбург (приложение А).

Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации

В целом содержание автореферата соответствует представленным в диссертации результатам исследований.

Соответствие содержания диссертации указанной специальности

По содержанию диссертационное исследование соответствует формуле и областям исследований паспорта научной специальности 2.6.17 (05.16.09) «Материаловедение» (технические науки):

п. 1 в части экспериментальных исследований фундаментальных связей состава и структуры материалов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности материалов и изделий;

п. 2 – установление закономерностей физико-химических и физико-механических процессов, происходящих на границах разделов в гетерогенных структурах;

п. 3 – разработка научных основ выбора материалов с заданными свойствами применительно к конкретным условиям изготовления и эксплуатации изделий и конструкций.

Замечания по диссертационной работе

1. Содержание Главы 1 «Обзор литературных источников» больше соответствует учебному изданию и имеет чрезмерное количество разделов. Внимания заслуживает только раздел 1.6, в котором проанализированы диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа (Fe-Cu, Fe-Ni и Fe-Cu-Ni) из работ О.А. Банных, М. Хансена, Р.П. Эллиота, Н. Ohtani и др. Анализ базовых знаний и научных подходов для создания новых композиционных бронз, армированных стальными дендритами, представлен далее в главах. Так, в главе 4 приводятся ссылки на работы Б.И. Шаповал, Ю.С. Авраамова, Л.А. Древаль, К.И. Ткаченко и патент А.П. Савицкого и Е.Н. Коростылевой, которые служат основой для создания стальных дендритов в системах Cu-Fe и Cu-Ni. Было бы правомерно все литературные источники перевести в обзор не рассосредотачивая их по главам.

2. Недостаточно обоснован подход к выбору весового содержания легирующих элементов. Возможно, для этого следовало бы применить методы планирования эксперимента и другие подходы.

3. Не представлено доказательств для выдвинутого положения о появлении самовосстанавливающихся нано-пленок твердых окислов типа $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{O}_2$, не склонных к адгезионному взаимодействию в условиях трения со смазкой.

4. На диаграммах и в таблицах с данными микротвердости $\text{HV}_{0,05}$ в диссертации и автореферате не приведены среднеквадратичные отклонения (СКО) погрешности измерений.

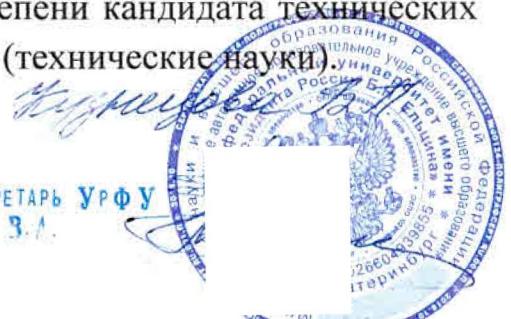
Однако сделанные замечания носят частный характер и не меняют общую положительную оценку диссертации.

Заключение

По актуальности, научной новизне, объему полученных результатов и практическому значению диссертационная работа «Создание новых композитных антифрикционных бронз, армированных стальными дендритами» отвечает 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, Христолюбов Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 Материаловедение (технические науки).

ПОДПИСЬ
ЗАВЕРЯЮ.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ УРФУ
МОРОЗОВА З.А.



Кузнецов Виктор Павлович

09 ноября 2021 г

Официальный оппонент:
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры термообработки
и физики металлов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19
тел.: 8 982 422 1777; email: wpkuzn@mail.ru