

**О Т З Ы В**  
**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

Диссертационная работа А.С. Христолюбова посвящена созданию композитных бронз на Cu-Fe-Ni основе, армированной стальными дендритами из сталей разных классов, обладающих повышенными механическими, технологическими и трибологическими свойствами. При этом автором решен комплекс важных задач, обеспечивающий достижение поставленной в диссертационном исследовании цели, обосновано легирование антифрикционных бронз, обеспечивающее формирование дендритов из мартенситно-стареющих и аустенитных нержавеющих сталей, обладающих повышенными трибологическими свойствами и подтверждена высокая эффективность нового подхода к формированию износостойкой опорной поверхности при трении.

Выбранная тема диссертации является актуальной, поскольку работа связана с поиском и созданием принципиально новых антифрикционных сплавов на медной основе и покрытий из них, обладающих улучшенными механическими, технологическими и служебными свойствами по сравнению с известными антифрикционными сплавами и покрытиями.

Работа выполнена в рамках госбюджетных тем Минобрнауки РФ и хоздоговорных тем с промышленными предприятиями.

Анализ публикаций диссертанта показал, что основные результаты диссертационной работы опубликованы в 19 печатных работах в российских научных журналах, материалах международных и всероссийских конференций, в том числе в 3 статьях в журнале «Вопросы материаловедения», по одной статье в журналах «Metal Science and Heat Treatment» (перевод российского журнала «Металловедение и термическая обработка металлов») «Physics of Metals and Metallography» (перевод российского журнала «Физика металлов и металловедение»), «Russian Journal of Non-Ferrous Metals» (перевод российских журналов «Известия вузов. Цветная металлургия» и «Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия») и по одной

статье в сборниках материалов конференций «Proceedings of the Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions International Multi-conference for Engineering, Education and Technology» и «Lecture Notes in Mechanical Engineering», входящих в **Перечень ВАК**, по результатам работы получен **один патент** Российской Федерации.

Материалы диссертационной работы прошли апробацию на 13 научных конференциях различного уровня (международных, всероссийских и региональных) в Сантьяго (Чили), Боготе (Колумбия), Шеффилде (Великобритания), Варне (Болгария), Баяи-Бланке (Аргентина), Монтеро-Бес (Ямайка), Нижнем Новгороде, Нижнем Тагиле, Екатеринбурге, Тольятти, Магнитогорске.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, двух приложений и имеет общий объем 157 страниц. Список литературы содержит 131 источник. В приложениях приведены Акты внедрения результатов работы.

**Во введении** сформулированы цель, задачи исследования, определена новизна и изложены научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен литературный обзор, в котором рассмотрены основные элементы теории трения, требования, предъявляемые к материалам, входящих в узел трения. Описаны различные методы определения трибологических характеристик, применяемые для физического моделирования режимов работы конкретных узлов трения. При этом обосновано применение однотипного стенда для сравнительной оценки трибологических свойств антифрикционных материалов. Проведен анализ основных используемых в настоящее время антифрикционных материалов с выявлением их достоинств и недостатков. Основное внимание удалено оловянной бронзе БрО10, так как именно с её трибологическими и механическими свойствами строится сравнение принципиально новых антифрикционных бронз, изучаемых в работе. Особый акцент в обзоре сделан на морфологию твердых включений в антифрикционных сплавах, например, интерметаллидов в бронзе БрО10. Отмечено, что изменение их формы с остроугольной на «глобулярную» способствует увеличению пластичности, усталостной прочности сплава с сохранением высоких трибологических свойств. В диссертации описаны патентные исследования перспективных антифрикционных сплавов и покрытий. Значительную часть новых материалов получают методами порошковой металлургии, они обладают хорошими

трибологическими свойствами, но зачастую неудовлетворительными механическими свойствами. Анализ патентного исследования показал, что созданию литых антифрикционных сплавов уделяется необоснованно мало внимания.

На базе литературного обзора автором обоснована перспективность разработки антифрикционного сплава на медно-железной основе, в котором функцию опорной поверхности при трении скольжения выполняют железные дендриты. Важной особенностью такого подхода является возможность с помощью легирования изменять химический состав дендритов, получая его близким к мартенситным, мартенситно-стареющим, аустенитным и аустенитным нержавеющим сталим.

**Во второй главе** представлены исследуемые материалы и методы их получения: литьем, наплавкой, переплавом (всего исследовано 16 бронз). В работе используются традиционные методы исследования: оптическая и электронная микроскопия, термическая обработка, механические и микродюрометрические исследования. Общий и локальный химический анализ выполнен на растровом электронном микроскопе Jeol JSM 6490-LV с приставкой для микроанализа Oxford Inca DryCool при этом средний состав дендрита и матрицы определялся с максимально возможной площади фазы.

**Третья глава** посвящена изучению возможности изменения интерметаллидной фазы бронзы БрО10 с остроугольной на глобулярную путем легирования никелем и кобальтом. При этом выявлено, что легирование Бронзы БрО10 никелем от 5 до 15% не позволило как-либо повлиять на морфологию интерметаллидной фазы. Изменения произошли только в химическом составе и твердости. Легирование бронзы БрО10 кобальтом выявило образование дополнительных фаз, имеющих более благоприятную морфологию, чем интерметаллид Cu<sub>3</sub>Sn, однако это принципиально не повлияло на деформируемость этих экспериментальных составов. Комплексное легирование бронзы БрО10 кобальтом и никелем сделало эту бронзу деформируемой, при растяжении или сжатии бронзы БрОКоН 10-8-2 допустимая деформация без разрушения составила 47%, в отличии от бронзы БрО10 – 8%. Однако, трибологические свойства этой бронзы оказались ниже, чем бронзы БрО10, что не позволило использовать легирование для улучшения всего комплекса свойств БрО10.

**В четвертой главе** рассмотрена возможность замены хрупких интерметаллидных включений, характерных для бронзы БрО10, выполняющих функцию опорной поверхности при трении скольжения, на пластичные дендриты, армирующие бронзу. Эта глава является наиболее важной в диссертации. В качестве

основы для создания пластичной опорной поверхности выбрана мартенситно-стареющая сталь, армирующая медную матрицу. Состав такой композитной бронзы – БрЖНА 12-7-1, при этом дендриты соответствует стали Н23Ю1, а матрица – бронза БрЖНА 6-6-1. Рассмотрены морфологические особенности структуры этой бронзы (см. рис. 4.4, стр. 76). Особый интерес вызывает строение дендритов в этом классе бронз, они содержат до 15 % меди в виде обособленных пластин толщиной менее 1 мкм, глобулярных медных включений и оболочковые структуры (см. рисунки 4.9, 4.13). Дендриты упрочняются дисперсионным твердением, особенно при дополнительном легировании бронзы кобальтом (таблица 4.5, стр. 78; табл. 4.8, стр. 84; рис. 4.19, стр. 98). Таким образом, твердость опорной поверхности – дендрита, можно изменять в широких пределах, также как и весь комплекс механических свойств. При этом трибологические свойства композитных бронз в состоянии литья сравнимы или лучше, чем у классической бронзы БрО10 (см. рис. 4.21, табл. 4.15, стр. 100), а пластические свойства – на много выше (см. табл. 5.9, стр. 134). Показана возможность изменять в широком диапазоне количество дендритов, которое пропорционально суммарному содержанию Fe, Ni, Co (см. рис. 4.16, стр. 96).

В этой же главе рассмотрена возможность получения армирующих дендритов из мартенситной и аустенитной сталей (БрЖН 12-7, БрЖНХА 12-9-3-1). Показано, что аустенитные дендриты склонны к адгезионному взаимодействию с контролем уже при малых давлениях в зоне контакта – порядка 1 МПа. В то время как мартенситные дендриты не склонны к схватыванию (рис. 4.24, стр. 109). Особо высокими трибологическими свойствами обладают композитные бронзы БрЖНХК 12-7-5-1, армированные дендритами из аустенитных нержавеющих сталей (Х17Н17С3). Диссертант полагает, что высокие трибологические свойства этой бронзы обусловлены тем, что сопротивляется трению не собственно сталь, а твердая, самовосстанавливающаяся при трении окисная нанопленка  $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$  (см. таб. 4.21, стр. 109).

**В пятой главе** рассмотрены технологические, механические и служебные свойства исследуемых композитных бронз. Рассмотрены способы диспергирования структуры, основанные на повышенной скорости кристаллизации соответствующих бронз и последующем их охлаждении, в частности: вакуумное литье ( $V_{\text{охл}} \geq 700^\circ\text{C}/\text{сек}$ ), аргонно-дуговой переплав, наплавка (структура представлена на рис. 5.5, стр. 117, рис. 5.6, стр. 118). В данном случае, равно как и после наплавки, переплава дисперсность

дендритной составляющей повышается в 5–10 раз. Соответственно износостойкость исследованных бронз также существенно возрастает (см. табл. 5.4, стр. 121). Исследованы особенности формирования наплавленного антифрикционного слоя бронзы БрЖНА 12-7-1 на сталь и серый чугун. Показана перспективность таких наплавок ввиду отсутствия значительного перемешивания наплавляемой бронзы со сталью и чугуном. Например, с точки зрения технологичности, наплавка бронзой БрЖНА 12-7-1 на сталь может осуществляться за один проход, при этом трибологические свойства данного антифрикционного покрытия оказались значительно выше, чем у широко применяемых при наплавке бронз (см. рис. 5.14, стр. 132).

Измерены механические свойства исследуемых бронз при одноосном растяжении. Полученные результаты свидетельствуют, что с увеличением в бронзах железа, объема дендритной составляющей, возрастает предел текучести. Наилучшими пластическими свойствами обладает бронза БрЖНА 12-7-1, как в отливке, так и после термических обработок, что позволяет считать такую бронзу деформируемой (см. табл. 5.9, стр. 134). Также показано негативное влияние на пластичность даже малого количества олова (БрЖНОА 12-7-2-1), что позволило докторанту сделать вывод о том, что присутствие олова (примеси) в таких бронзах нежелательно. Механические свойства бронз в диспергированном состоянии показывают увеличение предела текучести по сравнению с соответствующими отливками.

Весьма значимым является тот факт, что разработанная в работе бронза БрЖНХК 12-7-5-1 уже используется в промышленности, в частности при серийном производстве поворотного кольца управляющей диафрагмы паровой турбины (вес 1200 кг) и под пятника электродвигателя (вес 2894 кг) (см. приложение А, стр. 154).

Анализируя выполненное исследование в целом можно отметить качественно выполненные металлографические и другие виды исследований. Созданные новые композитные антифрикционные бронзы, не имеющие аналогов, как в России, так и за рубежом, имеют высокие трибологические свойства, что подчеркивают **научную новизну и значение** выполненного исследования. Реальное применение созданной бронзы в серийном турбинном производстве определяет **практическую значимость и перспективы развития** данного направления.

**Обоснованность научных положений, сделанных выводов и рекомендаций** убедительно доказана многочисленными данными проведенных экспериментов, аккуратно и доходчиво представленными в графическом виде и в таблицах.

Использованные экспериментальные методы, приборы и аппаратура, а также совпадение результатов с независимыми исследованиями в других лабораториях позволяют считать **полученные результаты достоверными**.

Вместе с тем, не смотря на выше изложенное, по диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**, поставить **вопросы**:

1. Формулировка второго и третьего положения, выдвигаемых на защиту, не раскрывает сути этих положений, и только при прочтении самой диссертации или автореферата становится понятно, в чем конкретно заключаются выдвигаемые закономерности и роль диспергирования структуры в формировании свойств композитных бронз.

2. На стр. 105 диссертации написано «В бронзе БрЖНХА 12-9-3-1 нами получены аустенитные дендриты с содержанием хрома до 8,5 %, дальнейшие расчеты показали, что если в бронзу при выплавке ввести 5 % Cr ..., то дендрит будет содержать до 17% Cr, что обеспечит получение аустенитно-нержавеющей стали». Но нигде в тексте не объяснено какие это были расчеты и как они проводились.

3. На графиках и в таблицах для приводимых величин не указаны интервалы ошибок или точности определения соответствующих величин, хотя про определение погрешности измерений написано в параграфе 2.8. Отсюда возникает ряд трудностей, например, связанных с оценкой необходимости довольно сложных нелинейных аппроксимаций для полученных зависимостей коэффициента трения от давления на рисунках 3.5, 4.21, 4.24 , 5.4, 5.7, 5.8, 5.14 диссертации и соответствующих рисунках 2, 7, 8, 11, 14, 16 автореферата. Этим же можно объяснить, что сумма средних значений содержания химических элементов в таблице 4.5 дала для состояния «после старения при 450°C, 2 часа (рис. 4.5, в)» 1, дендрит  $23,46+61,70+14,14+0,71=100,01\%$ . Аналогичная ситуация имеет место для химического состава дендрита в таблице 5.8.

4. Имеет место неаккуратность в формулировках подписей к рисункам. Так, подписи к рисункам 4.3, 4.5, 4.8, 4.12, 4.15 диссертации содержат слова «строение дендрита», «структура дендрита» или «микроструктура дендрита», хотя на микрофотографиях представлены структуры бронз и отмечены несколько точек в

дendритах, для которых, как становится понятно из дальнейшего текста диссертации, в последующих таблицах представлены различия в химическом составе или свойствах разных участков дендритов.

5. Имеются также замечания по оформлению. Встречаются несогласованные фразы типа «проводя визуальное сравните микроструктуры» на стр. 94, «содержание Fe уменьшается от границы к центру дендрита, а содержание Cu, Ni увеличением, соответственно» на стр. 107., «правили Шарпи» на стр.110. Подпись к рисунку 4.24 на стр. 109 содержит описание частей рисунка (а и б), а на самом рисунке этих обозначений нет, и на правом графике вертикальная ось не имеет оцифровки, так же как на рис. 5.7(б) и рисунке 8 автореферата. В списке литературы встречается полное дублирование ссылок, например [9] и [35] – одна и та же книга, и указание на разные издания одной и той же книги, например, [8] и [16], [25] и [34].

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки всей работы, не позволяют усомниться в достоверности полученных результатов. Научная новизна и практическая значимость несомненны, работа является пионерской, ни в России, ни за рубежом подобных разработок не встречается.

Оценивая содержание работы в целом, следует отметить, что данная диссертация представляет собой завершенное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Диссертация написана подробно, доходчиво, хорошо оформлена.

**Автореферат достаточно полно отражает содержание, основные идеи и выводы диссертации.**

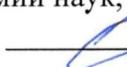
Считаю, что диссертационная работа Христолюбова Александра Сергеевича «Создание новых композитных антифрикционных бронз, армированных стальными дендритами» соответствует специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки), выполнена на высоком научном уровне и **представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно-обоснованные технические, технологические и иные решения, имеющие существенное значение для развития страны. Работа 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», и всем критериям, предъявляемым этим Положением к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Христолюбов Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.**

15.11.2021

Согласен на обработку персональных данных.

Заведующий лабораторией нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
доктор физ.-мат. наук, доцент





Смолин Игорь Юрьевич

634055, г. Томск, просп. Академический, д. 2/4,  
тел. 8(3822) 286875, e-mail: smolin@ispms.ru

Подпись Смолина И.Ю. подтверждаю  
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН  
кандидат физико-математических наук



Матолыгина Наталья Юрьевна

