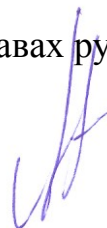


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



ХРИСТОЛЮБОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**СОЗДАНИЕ НОВЫХ КОМПОЗИТНЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ БРОНЗ,
АРМИРОВАННЫХ СТАЛЬНЫМИ ДЕНДРИТАМИ**

2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена на кафедре технологических машин и технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Потехин Борис Алексеевич

Официальные оппоненты: **Кузнецов Виктор Павлович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, профессор кафедры термообработки и физики металлов;

Гузанов Борис Николаевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный профессионально-педагогический университет», г. Екатеринбург, заведующий кафедрой инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии, института инженерно-педагогического образования;

Смолин Игорь Юрьевич, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, заведующий лабораторией нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем.

Защита состоится «02» декабря 2021 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.6.01.04 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=2863>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Селиванова Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Анализ, выполненный Международными комитетами по трибологии показал, что потери ресурса оборудования, транспортных средств, во многом определяются трением и износом соответствующих узлов, механизмов, машин. Большой процент аварийных ремонтов тепловозов на всех железных дорогах России, например, обусловлен именно низкой долговечностью подшипников скольжения.

Широко распространенный антифрикционный сплав для подшипников скольжения – оловянная бронза. Несмотря на хорошие трибологические свойства, она имеет ряд недостатков (низкая пластичность, усталостная прочность, склонность к ликвации при литье) и уже не может в полной мере соответствовать растущим требованиям к узлам трения (скорость, нагрузка, КПД, износ и т.д.). Основная причина выше обозначенных недостатков – наличие хрупких интерметаллидов Cu_31Sn_8 в бронзе БрО10, отрицательно влияющих на механические и технологические свойства. Улучшение морфологии твердых включений в антифрикционных сплавах должно способствовать повышению пластичности, усталостной прочности сплава с сохранением высокого уровня служебных свойств.

В связи с этим создание композитных бронз, армированных стальными дендритами, которые заменяют хрупкие интерметаллиды в качестве опорной поверхности, представляет собой актуальную задачу.

Степень разработанности темы

В последнее время проводится активная работа по изысканию сплавов и покрытий, обладающих улучшенными механическими, технологическими и трибологическими свойствами. Об этом говорит широкий «ассортимент» новых антифрикционных сплавов и покрытий, подтвержденных патентами. Разработка, исследование и изготовление антифрикционных сплавов является весьма трудоемкой задачей. Большинство современных антифрикционных материалов получают методами порошковой металлургии и плазменным напылением – это порошковые сплавы на основе меди, железа, алюминия. Изменение свойств таких материалов достигается различными технологическими параметрами процесса изготовления. Порошковые, пористые материалы, как антифрикционные покрытия, обладают хорошими трибологическими свойствами, однако имеют своеобразные, зачастую неудовлетворительные механические свойства в отличие от литых (монокристаллических).

Литые медно-железные сплавы, армированные железными дендритами, известны и используются как кондуктивные сплавы. В данном случае железо формирует дендриты, упрочняющие эти сплавы, что придает им повышенную прочность и уменьшает смятие электродов, например, при точечной сварке, повышает долговечность токопроводящих контактов. Что касается литых антифрикционных бронз, армированных стальными дендритами с целью придания им особо высоких трибологических свойств, то информации о таких разработках в открытом доступе не существует, что подтвердил анализ, проведенный патентным отделом УГЛТУ.

Целью работы является создание композитных бронз на Cu-Fe-Ni основе, армированной стальными дендритами из сталей разных классов, обладающих повышенными механическими, технологическими и трибологическими свойствами.

В работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Исследовать возможности улучшения морфологии интерметаллидов $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ в бронзе БрО10 путем легирования её Ni, Co для повышения технологических свойств;
2. Определить концентрацию легирующих элементов: Fe, Ni, Al, Cr и др., обеспечивающих формирование дендритов из сталей разных классов (мартенситный, аустенитный), аустенитных нержавеющей;
3. Оценить влияние термической обработки, степени легирования Ni, Co, 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.

Научная новизна работы:

1. Разработаны бронзы, армированные дендритами, близкими по химическому составу к мартенситно-стареющим (H23Ю1), аустенитным (H29X9Ю1) и аустенитным нержавеющей (X17H17C3) сталям, представляющие собой композитные бронзы антифрикционного назначения;
2. Установлена роль диспергирования структуры экспериментальных композитных бронз (вакуумным литьем, переплавом) в формировании механических и трибологических свойств;
3. Показана целесообразность армирования композитных бронз дендритами, имеющими химический состав схожий с составом аустенитных нержавеющей сталей, для обеспечения наиболее высокой износостойкости.

Теоретическая и практическая значимость работы

Впервые обосновано легирование антифрикционных бронз, обеспечивающее формирование дендритов из мартенситно-стареющих и аустенитных нержавеющей сталей, обладающих повышенными трибологическими свойствами.

По комплексу механических, технологических и служебных свойств композитные бронзы БрЖНА 12-7-1 (дендриты – H23Ю1) и БрЖНХК 12-7-5-1 (дендриты – X17H17C3) превосходят по своим свойствам «классическую» антифрикционную бронзу БрО10.

Особенно эффективно применение композитных бронз для наплавки, напыления, при которых формируется ультрадисперсная объемная сетка дендритов, обеспечивающая в 5-10 раз более высокую износостойкость, чем у бронзы БрО10.

Экспериментально подтверждена высокая эффективность нового подхода к формированию износостойкой опорной поверхности при трении – твердые оксидные пленки, не склонные к адгезионному взаимодействию с соответствующими контртелами.

Методология и методы исследования

Работа выполнена на современном оборудовании. Для оценки микроструктуры использовались микроскопы ПОЛАМ Р-312, Neophot 32, Carl Zeiss AxioObserver Alm, растровые электронные микроскопы Carl Zeiss EVO50 (при увеличениях до 10000 крат), Jeol LSM 6490-LV. Механические свойства определены на измерительном комплексе Instron 3382, микротвердомерах PMT-3М и 402MVD. Для определения массопереноса использованы растровые электронные микроскопы с приставками для микроанализа: Oxford Inca Dry Coll (разрешение 133 эВ, с площади диаметром ≤ 3 мкм), EDS X-Act (Oxford Instruments. Si-drift детектор 10 мм², анализ элементов В – U, разрешение по Mn K α = 133 эВ). Для подготовки объектов исследования использовали вакуумное литье, наплавку, вакуумное травление, разнообразные виды термической обработки в печах SNOL 8,2/1100; SNOL 7,2/1300.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новые композитные антифрикционные бронзы, в которых опорная поверхность при трении скольжении (правило Шарпи) заменена стальными дендритами из мартенситно-стареющих, аустенитных и аустенитных нержавеющей сталей, армирующих Cu-матрицу, что принципиально улучшает комплекс служебных, механических и технологических свойств.
2. Закономерности формирования структуры, трибологических и механических свойств композитных бронз в зависимости от их базового (Fe, Ni) и дополнительного (Al, Co, Cr, Si) легирования; режимов термической обработки и способов производства.
3. Роль диспергирования структуры экспериментальных композитных бронз (вакуумным литьем, наплавкой) в формировании механических, технологических и служебных свойств.
4. Высокие трибологические свойства бронз с аустенитными нержавеющей дендритами обеспечиваются самовосстанавливающимися нано-пленками твердых окислов типа (Fe,Cr)₃O₂, не склонных к адгезионному взаимодействию в условиях трения со смазкой.

Степень достоверности результатов подтверждается использованием современных и стандартизованных методов исследования, аттестованных приборов и аппаратуры, воспроизводимостью результатов и их проверкой независимыми исследованиями в лабораториях: УрФУ, Новосибирского государственного технического университета, ЦЗЛ Уралмашзавода.

Апробация результатов работы

Основные результаты и положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на XLVII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (г. Нижний Новгород, 2008); Seminario de Jóvenes Científicos Rusos “La Ingeniería y Tecnológicas Rusas: Perspectivas de Desarrollo” (Santiago, Chile, 2010); CIM 2011 – VI Congreso Internacional del Materiales (Bogotá, Colombia, 2011); НТК «Наука – образование – производство: Опыт и перспектива развития» (г. Нижний Тагил, 2011); X Всероссийская НТК «Проблемы и достижения автотранспортного комплекса» (г. Екатеринбург, 2012); IX международная НТК «Лесные технопарки – дорожная карта инновационного лесного комплекса: социально-экономические и экологические

проблемы лесного комплекса» (г. Екатеринбург, 2013); X International scientific and practical conference «Modern european» (Sheffield, UK, 2014); форум «Сварка и диагностика» (г. Екатеринбург, 2016); XXIV International scientific conference Trans & Motauto 16 (Varna, Bulgaria, 2016); LIX Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (г. Тольятти, 2017); VII International conference on science and technology of composite materials (COMAT 2018) (Bahia Blanca, Argentina, 2018); XXIV Уральская школа металлургов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (г. Магнитогорск, 2018); 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, LACCEI 2019, Montego Bay-Jamaica, 2019.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 19 научных трудов, в том числе 8 статей в рецензируемых научных журналах из списка ВАК РФ, из которых 5 проиндексированы в базе Scopus и Web of Science, и 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы из 131 источника. Работа изложена на 157 страницах, содержит 62 рисунка, 41 таблицу и 2 приложения.

Личный вклад автора заключается в изготовлении экспериментальных антифрикционных бронз как объектов исследования, планировании и проведении исследований всего спектра необходимых свойств в кооперации с коллегами других НИИ и предприятий, непосредственном участии автора в обработке, анализе полученных результатов, формулировании итогов и выводов по работе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования. Представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В **первой главе** рассмотрено современное представление о трении, проведен анализ основных антифрикционных материалов и технологий изготовления подшипников скольжения. Особое внимание уделено антифрикционным бронзам, их структуре, достоинствам и недостаткам при использовании их в узлах трения-скольжения. Представлены сведения о патентных исследованиях перспективных антифрикционных материалах. Рассмотрены особенности формирования структуры и фазового состава Cu-Fe-Ni сплавов. На основании проведенного анализа поставлена цель и сформулированы задачи исследования.

Во **второй главе** описаны способы получения материалов и методы исследования.

Для исследования были изготовлены восемь оловосодержащих бронз: бронзу БрО10 легировали никелем в количестве от 2 до 15 % и кобальтом - от 3 до 10 %. Бронза БрО10 являлась прототипом, с которым проводили сравнение экспериментальных бронз.

Слитки экспериментальных композитных без оловянных бронз, диаметром 65 мм и высотой 120 мм (вес около 2 кг), были изготовлены методом сплавления чистых шихтовых материалов в плавильной печи Таммана в алундовых тиглях в восстановительной атмосфере окиси углерода и индукционной печи. Химический состав экспериментальных композитных бронз представлен в таблице 1.

Таблица 1.

Химический состав экспериментальных композитных бронз, вес. %

№ п/п	Маркировка бронзы	Fe	Ni	Al	Co	Cr	Si
1	БрЖН 12-6	12,2	5,9	-	-	-	-
2	БрЖНА 12-7-1	12,9	6,0	1,0	-	-	-
3	БрЖНКоА 9-4-1-1	8,6	3,9	0,8	1,1	-	-
4	БрЖНКоА 18-8-2-1	17,2	7,7	1,0	2,0	-	-
5	БрЖНКоА 23-8-3-1	22,9	8,2	1,0	2,8	-	-
6	БрЖНХК 12-7-5-1	13,4	7,5	-	-	4,0	1,2
7	БрЖНХА 12-9-3-1	13,1	9,7	1,1	-	2,3	-

Бронзы БрЖНА 12-7-1 и БрЖНХК 12-7-5-1 были изготовлены вакуумным литьем в кварцевые кристаллизаторы диаметрами 3 и 7 мм.

Кроме отливок, часть образцов из экспериментальных сплавов, БрЖНКоА 9-4-1-1, БрЖНКоА 18-8-2-1, БрЖНКоА 23-8-3-1, была изготовлена методом переплава. Из слитков изготавливали заготовки, затем поверхность переплавляли в аргоне вольфрамовым электродом Ø 3 мм при токе 300 А, 45 В горелкой модели АГНИ-17, на глубину до 2,5 мм.

Наплавку антифрикционного слоя бронзы БрЖНА 12-7-1 на сталь проводили в полуавтоматическом режиме в защитной атмосфере аргона при токе 120 А, 20 В. Использовалась порошковая проволока диаметром 1,2 мм, либо присадочный материал из БрЖНА 12-7-1 в виде прутка диаметром 3 мм.

Термическую обработку образцов проводили в печах SNOL 8.2/1100. Режимы термообработки определялись задачами исследования и включали закалку от температур в интервале 780 ÷ 950 °С, с выдержкой при этой температуре от 30 минут до 4 часов, с охлаждением в воде. Далее проводили отпуск (старение) в температурных интервалах 400 ÷ 500 °С и выдержке при этой температуре 2-4 часа с охлаждением в печи.

Металлографический анализ осуществлялся на оптическом микроскопе Neophot 32. Исследования структуры, общий и локальный химический анализы выполнены на растровом электронном микроскопе Jeol JSM 6490-LV с приставкой для микроанализа OxfordIncaDryCool (разрешение 133 эВ). Общий химический анализ определяли на площадках в 1-3 мм², как среднее значение трех или более измерений. Средний состав дендрита, матрицы определялся с максимальной возможной площади фазы, а неоднородность дендрита, матрицы определялись с участков Ø 3мкм.

МикродюрOMETрические исследования структурных составляющих литых и термически обработанных сплавов проводили на приборах ПМТ-3М и 402MVD по ГОСТ 9450-60 при нагрузке 0,5Н.

Механические характеристики сплавов определяли при растяжении стандартных пятикратных образцов (тип III, ГОСТ 1497-84) с диаметром рабочей части 5 мм при комнатной температуре на испытательном комплексе Instron 3382.

Коэффициент трения определяли на специальной установке, смонтированной на базе станка с ЧПУ. Испытание проводили по схеме диск – пальчиковые образцы с непрерывной компьютерной фиксацией параметров испытаний: момент трения, давление, скорость скольжения. В каждом эксперименте использовались по три образца размером 6х6х12 мм; контртело – диск из стали ШХ15 (45 HRC). Испытания на трение включали следующие этапы: этап 1 - приработка образцов и контртела (скорость скольжения - 3,3 м/с, общее время приработки для каждого материала составляло не менее 8 часов, при котором удельное давление P в зоне трения ступенчато повышали от 0,5 МПа до 2,5 МПа) и этап 2 - основные испытания, где удельное давление в зоне трения при скорости скольжения 3,3 м/с ступенчато повышали от 0,5 МПа до 5 МПа с шагом 0,5 МПа. В ходе испытаний постоянно контролировали момент трения (угол закручивания диска с контртелом), через который определяли коэффициент трения. Интенсивность изнашивания определяли по методу отпечатков при давлении 1 МПа и скорости скольжения 3,3 м/с на пути трения равным 100 км.

Третья глава посвящена изучению возможности изменения морфологии интерметаллидной фазы бронзы БрО10 (рисунок 1, а) с «остроугольной» на глобулярную путем легирования Ni и Co с целью повышения механических и технологических свойств этой бронзы.

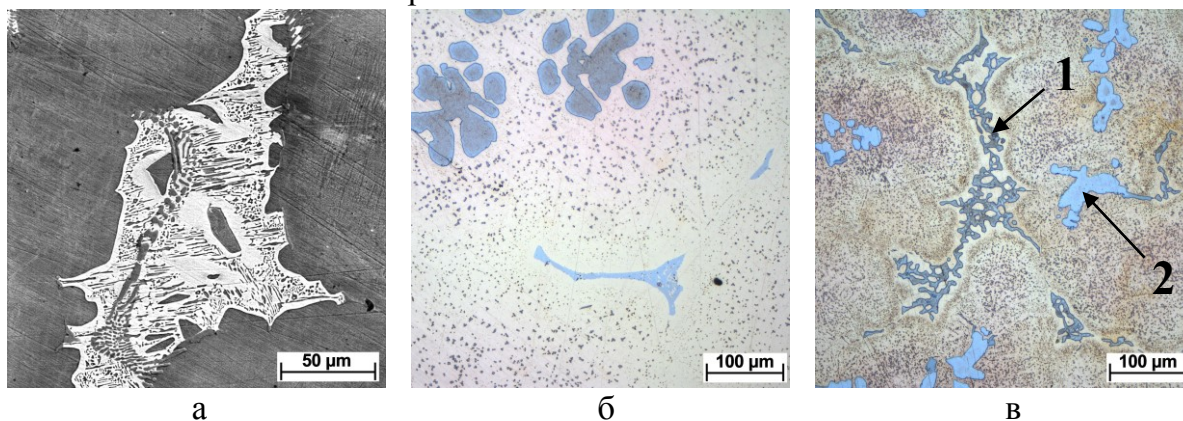


Рисунок 1 – Микроструктура бронз: а – БрО10; б – БрОКо 10-10; в – БрОКоН 10-8-2

В выплавленных сплавах, с содержанием никеля от 5 до 15 вес. % (БрОН 10-5; БрОН 10-10; БрОН 10-15), не произошло морфологических изменений интерметаллидной фазы типа Cu_3Sn в бронзе БрО10, то есть, глобулизировать фазу не удалось. При легировании бронзы БрО10 кобальтом в количестве 10% (бронза БрОКо 10-10) появляется дополнительная фаза $\varepsilon(Co)$, в которой растворено до 10% Cu. Такая форма фазы перспективна для повышения деформируемости сплава в целом, но при этом сохранились включения (интерметаллид $Cu_{31}Sn_8$), характерные для стандартной бронзы БрО10 (рисунок 1, б).

Комплексное легирование бронзы БрО10 никелем в количестве 7% и кобальтом в количестве 3% (бронза БрОНКо 10-7-3) привело к образованию фазы, характерной для

бронз типа БрОН. Присутствие кобальта, распределенного как в интерметаллидах, так и в матрице привело к увеличению микротвердости структурных составляющих, по сравнению со сплавами БрОН.

Легирование бронзы БрО10 кобальтом и никелем в количестве соответственно 8% и 2%, (бронза БрОКоН 10-8-2), привело к образованию следующих фаз: матрица (твердый раствор замещения Sn и Ni в Cu), темно-серая составляющая – 1 (мех. смесь $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ с $\text{Ni}_{17}\text{Sn}_3$ и CoCu_2Sn), светло-синяя составляющая – 2 (мех. смесь Co и т.р. Cu-Ni), одна из которой «округлой формы» (рисунок 1, в).

Особое внимание уделяли степени деформации, при которой начинается зарождение трещин в структуре (матрице) и степени деформации, при которой трещины появляются на поверхности. Установлено, что трещина на поверхности образца бронзы БрОНКо 10-7-3 появляется при его деформации 34 %, а для бронзы БрОКоН 10-8-2 при 47% до начала разрушения, в то время как для БрО10 разрушение начинается уже при 8%.

По комплексу трибологических свойств (коэффициент трения – $f_{\text{тр}}$, интенсивность изнашивания – I) все экспериментальные бронзы уступают прототипу – бронзе БрО10 (рисунок 2 и таблица 2).

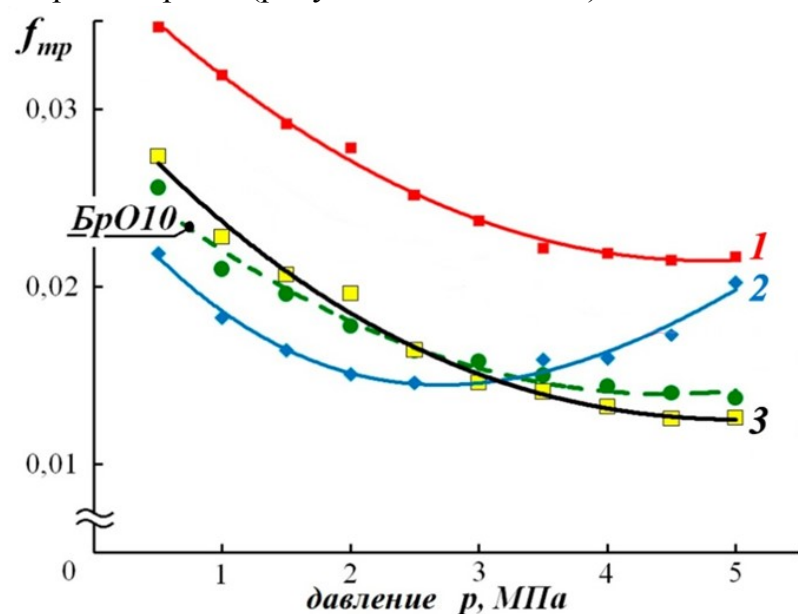


Таблица 2

Интенсивность изнашивания I
экспериментальных бронз

№	Бронзы	I , мкм/км
-	БрО10	0,025
1	БрОН 10-10	0,024
2	БрОНКо 10-7-3	0,100
3	БрОКоН 10-8-2	0,051

Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения от давления и интенсивность изнашивания экспериментальных бронз:
1 – БрОН 10-10; 2 – БрОНКо 10-7-3; 3 – БрОКоН 10-8-2

Полученные экспериментальные результаты показывают, что интерметаллиды типа $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$, всегда снижают деформируемость бронзы, комплексное легирование позволяет повысить ее деформируемость, но трибологические свойства таких бронз остаются ниже, чем БрО10. В связи с этим поставлена задача заменить эти интерметаллиды, выполняющие роль опорной поверхности при трении-скольжении, на дендриты, армирующие бронзу, из мартенситно-стареющей стали, например, что позволит управлять механическими, технологическими и служебными свойствами таких композитных бронз.

В четвертой главе исследованы сплавы на медной основе, легированные Fe, Ni, Al, Co, Cr, Si. Учитывая ограниченную растворимость этих элементов (кроме Ni) в меди, при определенном уровне легирования идет формирование дендритной армирующей сетки из сталей разных классов (мартенситно-стареющих, аустенитных) и аустенитной нержавеющей стали, свойствами которых, в отличие от интерметаллидных соединений, можно управлять термическими обработками. Такая дендритная сетка (см. рисунок 3, а) выполняет функцию опорной поверхности при трении - правило Шарпи, для антифрикционных сплавов.

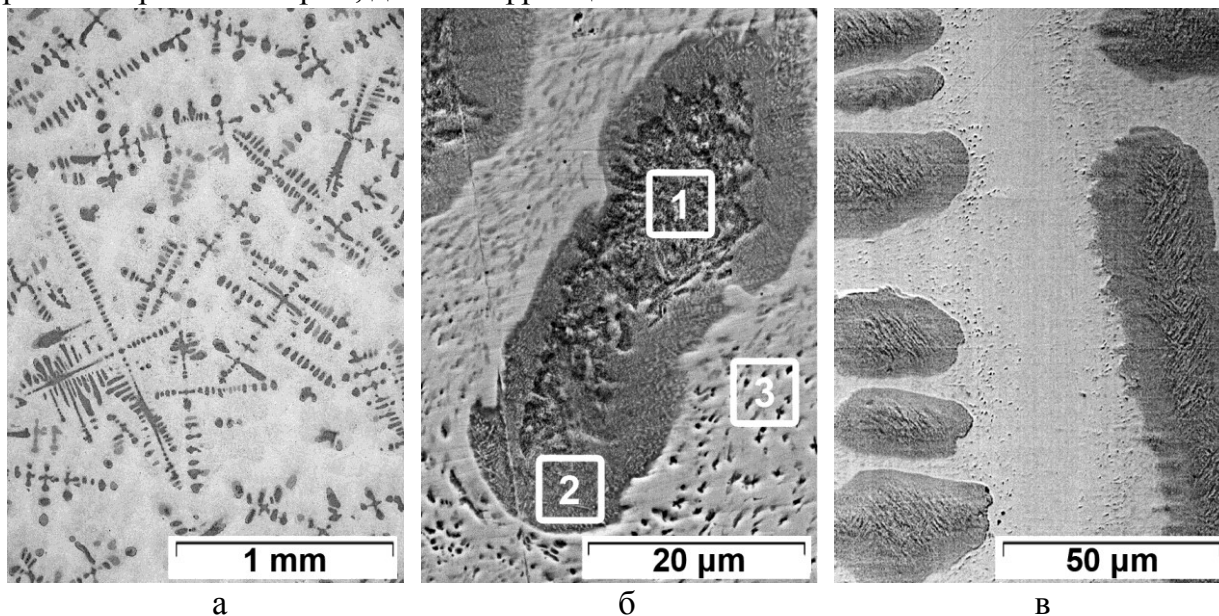


Рисунок 3 – Структура композитной бронзы БрЖНА 12-7-1:

а – дендритная сетка; б – микроструктура дендрита; в – междендритное пространство после закалки от 950 °С, 1 час

При охлаждении расплава бронзы БрЖНА 12-7-1 (базовый вариант) ниже ликвидуса (≈ 1250 °С) вследствие ограниченной (≤ 12 %) растворимости Fe в Cu начинается формирование Fe-Ni дендритов, которое на 95% завершается по достижении температуры солидуса (≈ 1100 °С), см. рисунок 3, а.

При дальнейшем охлаждении уже в твердом состоянии (растворимость Fe в Cu составляет менее 1,5 % при 1000 °С, например) Fe и Ni диффундируют и «осаждаются» на поверхности дендритов, формируя «оболочки» (рисунок 3, б), которые отличаются повышенным содержанием Ni периферийной части дендрита (таблица 3, позиции 1, 2).

Таблица 3

Химический состав структурных составляющих бронзы БрЖНА 12-7-1, отливка

Зоны химического анализа на рисунке 3 б		Среднее содержание хим. элемента, % вес.				HV ^{0,05}
		Fe	Ni	Al	Cu	
1	дендрит	59,4	13,8	0,47	26,3	398
2	дендрит	57,5	16,7	0,63	25,2	-
3	матрица	6,9	6,2	0,98	85,9	169

Центральная часть дендритов представляет собой сталь H23Ю1 мартенситного класса, а периферийная часть дендрита – сталь H27Ю1. Эти дендриты при наличии Al

представляют собой мартенситно-стареющую сталь, упрочняемую дисперсионным твердением.

Матрица, в отливке, представляет собой бронзу БрЖНА 7-6-1 с распределенными в ней стальными Fe-Ni дисперсными включениями. После закалки от 950 °С химический состав матрицы изменяется и представляет бронзу БрЖНА 3-3-1. Твердость матрицы снижается с 169 HV^{0,05} (см. таблицу 3, позиция 3) до 104 HV^{0,05} вследствие растворения дисперсных включений (рисунок 3, в), последующее старение при 450 °С, 2 часа не влияет на твердость и химический состав матрицы.

При содержании основных легирующих элементов в интервалах Fe: 9-23%; Ni: 4-8%; Co: 1-3%; Al: 1% в Cu-матрице формируется дендритная сетка, идентичная для всех экспериментальных бронз, а площадь дендритов определяется степенью легирования и пропорциональна содержанию в них Fe, Ni и Co. Площадь дендритов для бронз: БрЖНКоА 9-4-1-1 (11 %), БрЖНА 12-7-1 (14 %), БрЖНКоА 18-8-2-1 (18 %), БрЖНКоА 23-8-3-1 (23 %).

Дендриты экспериментальных бронз состоят из железной (стальной) части, близкой по химическому составу к мартенситно-стареющим сталям, и обособленных включений меди (см. рисунок 4 и таблицу 4).

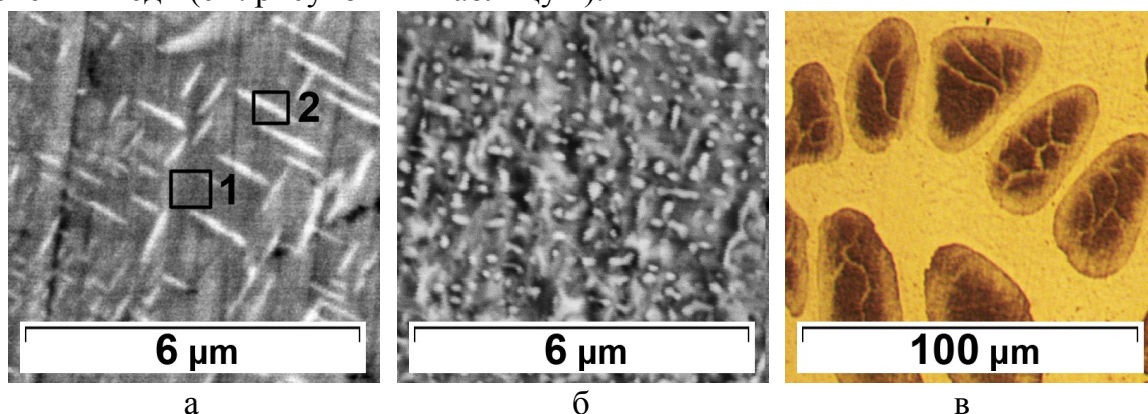


Рисунок 4 – Строение дендрита в бронзе БрЖНКоА 9-4-1-1: а – отливка, б – после закалки и старения при 450 °С, 2 часа; в – оболочковое строение дендрита бронзы БрЖНКоА 23-8-3-1

При нагреве отливки бронзы БрЖНКоА 23-8-3-1 до 950 °С и выдержке ее в течении 4х часов, эти дисперсные включения, обогащенные медью «объединяются», формируя оболочковую структуру (рисунок 4, в), «разбивая» дендриты на зерна (субзерна).

Таблица 4

Локальный химический анализ дендрита бронзы БрЖНКоА 9-4-1-1

Зона анализа на рисунке 4 а	Среднее содержание хим. элемента, % вес.				
	Cu	Fe	Ni	Co	Al
1	15,1	62,6	14,3	7,20	0,87
2	34,7	44,4	14,9	5,07	0,96

Размер пластинчатых зон в плоскости шлифа (рис. 4, а), обогащенных медью (таблица 4, позиция 2), имеет длину 1 мкм и 0,2 мкм в поперечнике, а после тепловых обработок пластинчатые зоны трансформируются в сферы диаметром $\geq 0,2$ мкм.

Локальный химический анализ дендрита подтверждает, что светлые пластинчатые включения в основном состоят из Cu как в литом состоянии, так и после тепловых обработок (таблица 4, позиции 2).

Содержание Fe в дендритах мало зависит от степени легирования этим компонентом бронзы. Напротив, содержание Ni и Co в дендритах пропорционально их содержанию в бронзах (рисунок 5).

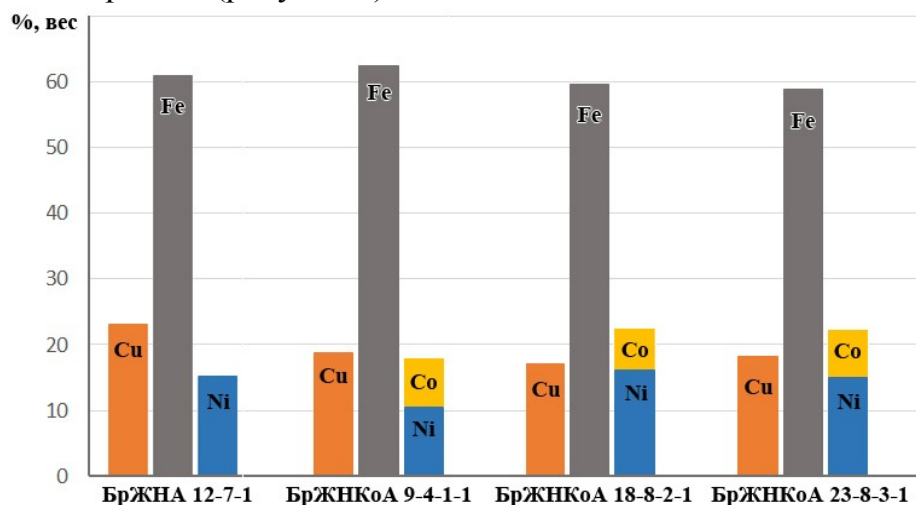


Рисунок 5 – Химический состав дендрита в бронзах (отливка)

Состав железной части дендрита соответствует сталям, для: БрЖНКоА 9-4-2-1 – Н14К9Ю1; БрЖНКоА 18-8-2-1 – Н17К8Ю1; БрЖНКоА 23-8-3-1 – Н16К9Ю1.

Для кобальтсодержащих бронз типа БрЖНКоА химический состав матрицы пропорционален содержанию в них основных легирующих элементов Fe, Ni.

Микротвердость дендритов в исследованных бронзах после закалки от 950 °С снижается, а с увеличением содержания кобальта в составе дендрита уменьшает влияние закалки на твердость этих дендритов. Последующее старение при 450 °С в течении 2 часов приводит к повышению твердости дендритов, особенно в кобальтсодержащих бронзах типа БрЖНКоА (таблица 5).

Таблица 5

Микротвердость матрицы (М) и дендритов (Д) экспериментальных бронз после термических обработок

№	Бронза	отливка			закалка		закалка+старение		
		М	Д	ΔHV	М	Д	М	Д	ΔHV
1	БрО10	176	401 *	225	-	-	-	-	-
2	БрЖНКоА 9-4-1-1	147	368	221	117	282	114	491	377
3	БрЖНКоА 18-8-2-1	146	367	221	127	332	120	498	378
4	БрЖНКоА 23-8-3-1	153	372	219	145	371	129	511	382
5	БрЖНА 12-7-1	169	398	229	104	201	109	338	229

Примечание: * Твердость интерметаллида Cu₃₁Sn₈ в бронзе БрО10

В экспериментальных бронзах, например, БрЖНКоА 9-4-1-1, с увеличением температуры старения происходит увеличение твердости дендритов и наибольшая твердость дендритов (500 HV^{0,05}) достигается старением при 400 °С, при этом, повышение температуры старения более 500 °С приводит к уменьшению твердости - эффект перестаривания мартенситно-стареющих сталей (рисунок 6).

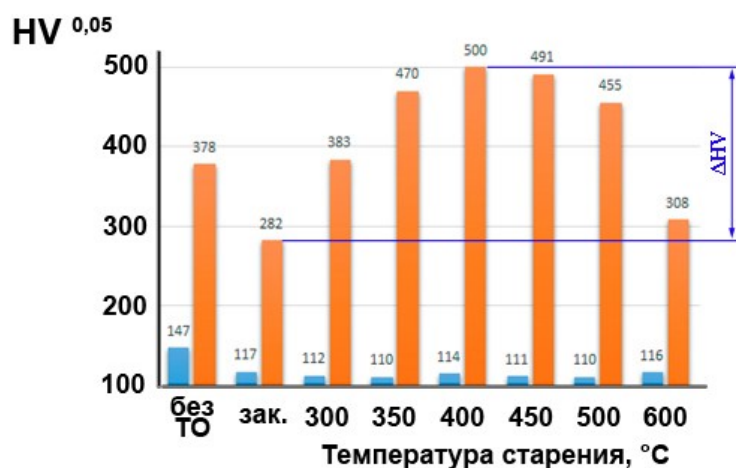


Рисунок 6 – Влияние температуры старения на микротвердость структурных составляющих (матрица - ■; дендрит - ■) литой бронзы БрЖНКоА 9-4-1-1 после закалки её от 950 °С, 1 час в воде.

Микротвердость матрицы после закалки снижается во всех бронзах вследствие растворения упрочняющих матрицу дисперсных включений. Более активное разупрочнение наблюдается в бронзе БрЖНА 12-7-1, где процесс растворения дисперсных включений в матрице и изменение ее химического состава идет более активно, чем в бронзах типа БрЖНКоА. Менее подвержена разупрочнению матрица бронзы БрЖНКоА 23-8-3-1, в которой высока первоначальная плотность дисперсных включений в матрице (литое состояние), а химический состав матрицы после закалки практически не изменяется. Последующее старение при температуре 450 °С в течении 2 часов не оказывает влияния на твердость матрицы бронз.

В литом состоянии, без термической обработки отливки, для композитных бронз коэффициент трения и интенсивность изнашивания равны или ниже, чем у бронзы БрО10 (рисунок 7, а и таблица 6).

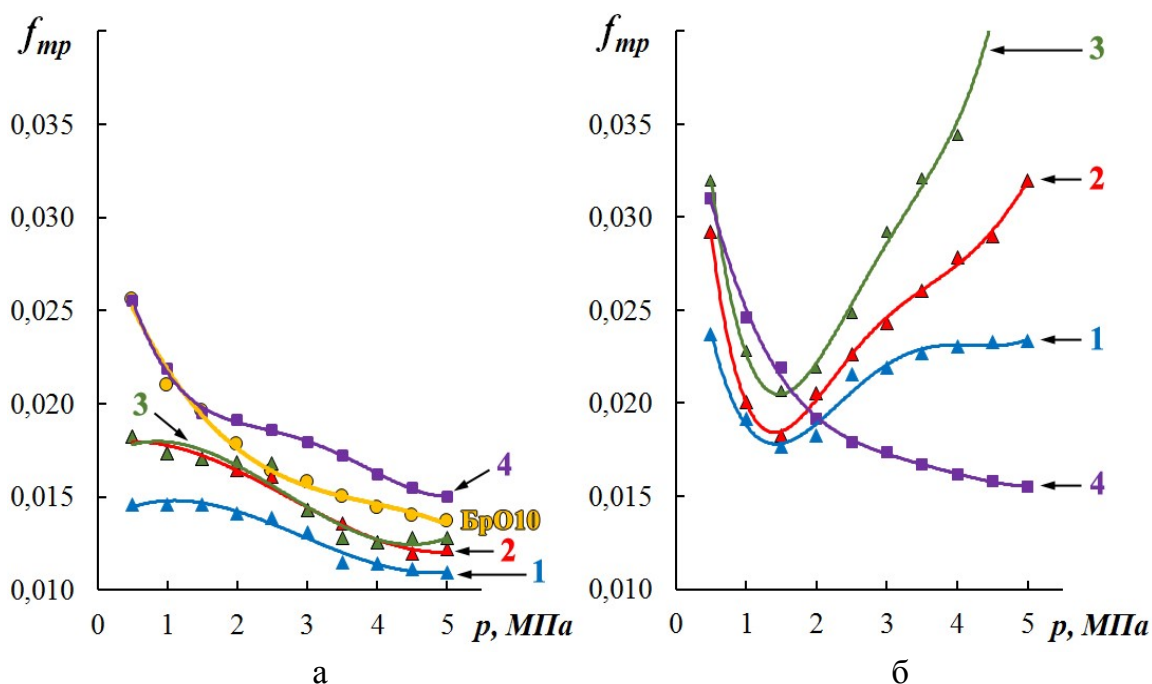


Рисунок 7 – Коэффициент трения в литом состоянии (а) и после закалки и старения (б) бронз: 1 – БрЖНКоА 9-4-1-1; 2 – БрЖНКоА 18-8-2-1; 3 – БрЖНКоА 23-8-3-1; 4 – БрЖНА 12-7-1

Увеличение твердости дендритов, после термических обработок, в кобальтсодержащих бронзах приводит к увеличению коэффициента трения и интенсивности изнашивания, то есть, повышенный градиент твердости матрица-дендрит (см. таблицу 5) снижает трибологические свойства.

Причиной этого, по нашему мнению, может быть изменение упругопластических свойств бронз вследствие повышения градиента твердости ΔHV между структурными составляющими (см. таблицу 5). Для бронзы БрЖНА 12-7-1 термическая обработка снижает твердость как матрицы, так и дендритов, но это не приводит к изменению градиента твердости между матрицей и дендритами, при этом трибологические свойства также не изменяются (см. рисунок 7 и таблицы 5, 6). Таким образом, с точки зрения трибологических свойств, эти бронзы не требуют упрочняющих термических обработок, что упрощает их рациональное применение.

Таблица 6

Интенсивность изнашивания (I) бронз в литом и состаренном состоянии в сравнении с бронзой БрО10

№	Бронзы	I , мкм/км
-	БрО10	0,025
1	БрЖНКоА 9-4-1-1 литой	0,018
	БрЖНКоА 9-4-1-1 закалка + старение	0,045
2	БрЖНКоА 18-8-2-1 литой	0,032
	БрЖНКоА 18-8-2-1 закалка + старение	0,125
3	БрЖНКоА 23-8-3-1 литой	0,013
	БрЖНКоА 23-8-3-1 закалка + старение	0,051
4	БрЖНА 12-7-1 литой	0,025
	БрЖНА 12-7-1 закалка + старение	0,026

С целью получения дендритной фазы из аустенитной и аустенитной нержавеющей сталей, в базовый вариант бронзы (БрЖНА 12-7-1) были дополнительно введены Cr в количестве 3-5% и Si в количестве 1%.

Для бронз БрЖНХА 12-9-3-1 и БрЖНХК 12-7-5-1 морфология структурных составляющих подобна бронзе БрЖНА 12-7-1 (рисунок 3, а), при этом в данных бронзах отсутствуют магнетизм, что говорит о том, что дендриты в этих сталях являются аустенитными. Химический состав структурных составляющих приведен в таблице 7.

Таблица 7

Химический состав и микротвердость фаз в бронзах БрЖНХА 12-9-3-1 и БрЖНХК 12-7-5-1

Бронза		Среднее содержание хим. элемента, % вес						$HV^{0,05}$
		Cu	Fe	Ni	Cr	Al	Si	
БрЖНХА 12-9-3-1	дендрит	14,30	53,31	22,91	8,65	0,83	-	219
	матрица	94,14	1,72	2,77	0,58	0,76	-	116
БрЖНХК 12-7-5-1	дендрит	8,13	56,73	15,98	16,58	-	2,57	189
	матрица	91,85	3,06	4,27	0,81	-	-	108

Дендриты бронзы БрЖНХА 12-9-3-1, по химическому составу, соответствуют аустенитной стали Н26Х9Ю, а для бронзы БрЖНХК 12-7-5-1 соответствует аустенитной нержавеющей стали Х17Н17С3.

Трибологические свойства бронз БрЖНХА 12-9-3-1, БрЖНХК 12-7-5-1 в сравнении с бронзой БрО10 представлен на рисунке 8, интенсивность изнашивания в таблице 8.

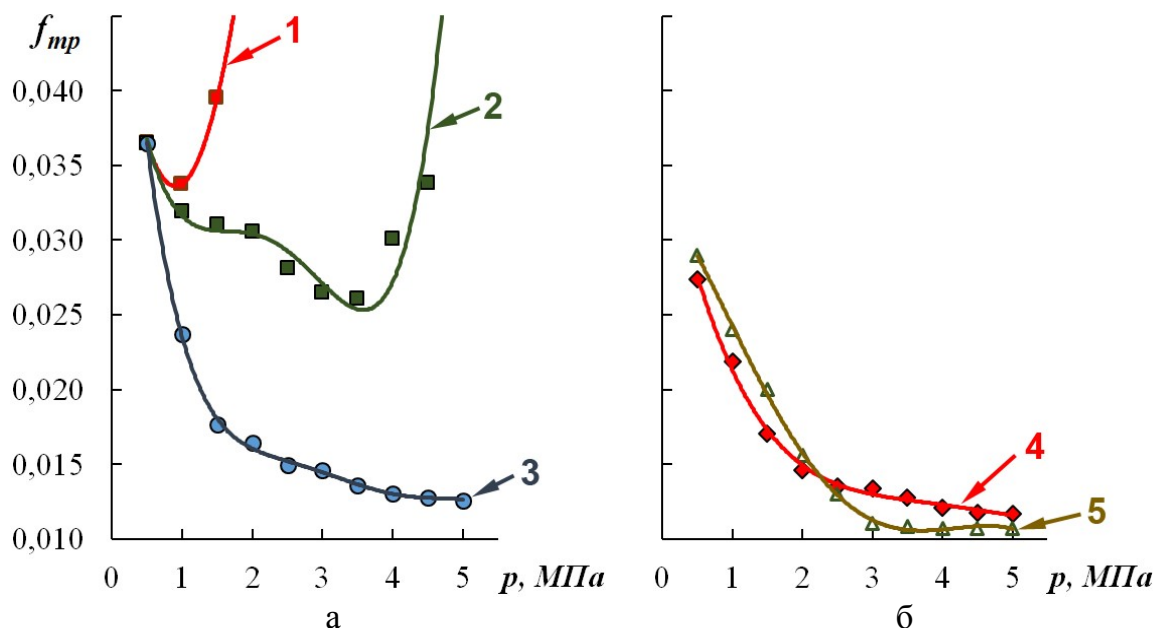


Рисунок 8 – Коэффициент трения в зависимости от давления в зоне контакта и термических обработок для бронз: (а) – БрЖНХА 12-9-3-1, (б) – БрЖНХК 12-7-5-1, где: 1 – отливка; 2 – отливка после обработки холодом при -20 °С, 72 часа; 3 – после закалки от 950 °С + обработка холодом при -20 °С, 72 часа; 4 – отливка; 5 – после закалки от 950 °С + старение при 450 °С, 2 часа

Таблица 8

Интенсивность изнашивания (*I*) бронз БрЖНХА 12-9-3-1, БрЖНХК 12-7-5-1, в литом состоянии и после термических обработок в сравнении с бронзой БрО10

№ на рисунке 8	Бронза	<i>I</i> , мкм/км
1	БрЖНХА 12-9-3-1 отливка	0,047
2	БрЖНХА 12-9-3-1 обр. холодом	0,034
3	БрЖНХА 12-9-3-1 закалка + обр. холодом	0,010
4	БрЖНХК 12-7-5-1 отливка	0,006
5	БрЖНХК 12-7-5-1 закалка + старение	0,004

Представляется интересным сравнение коэффициента трения бронзы БрЖНХА 12-9-3-1 в литом состоянии (рисунок 8, кривая 1) и после обработки холодом (рисунок 8, кривая 2). Уже при малых давлениях аустенитные дендриты адгезионно взаимодействуют с контртелом, что приводит к «схватыванию». Но если частично перевести аустенит в мартенсит, путем охлаждения (-20 °С, 72 часа), то схватывание наступает при давлениях в 4 раза большем. При полном превращении А-М (закалка от 950 °С + обработка холодом -20 °С, 72 часа) коэффициент трения становится минимальным (кривая 3, рисунок 8). В данном случае видно влияние типа кристаллической решетки на трибологические процессы при трении, ОЦК структура

(кривая 2 и 3) предпочтительна ГЦК структуре (кривая 1) дендрита.

Наилучшие трибологические свойствами, среди всех исследованных, имеет бронза БрЖНХК 12-7-5-1, армированная аустенитными нержавеющими дендритами (Х17Н17С3).

Мы полагаем, что такой высокий уровень антифрикционных свойств обусловлен наличием твердой самовосстанавливающейся окисной нанопленки типа $(\text{Fe,Cr})_3\text{O}_2$, «покрывающей» дендриты, не склонной к адгезионному взаимодействию в условиях трения со смазкой с контртелом.

В пятой главе рассмотрено влияние разных способов изготовления и обработки перспективных составов композитных бронз: литье, вакуумное литье, аргоно-дуговой переплав, наплавка на бронзовую, чугунную и стальные основы на механические и трибологические свойства.

Микроструктуры бронз, в переплавленном состоянии существенно отличаются от микроструктуры в литом состоянии, более высокой дисперсностью дендритной составляющей, при этом в переходной зоне присутствуют дендриты как малой, так и высокой дисперсности (рисунок 9).

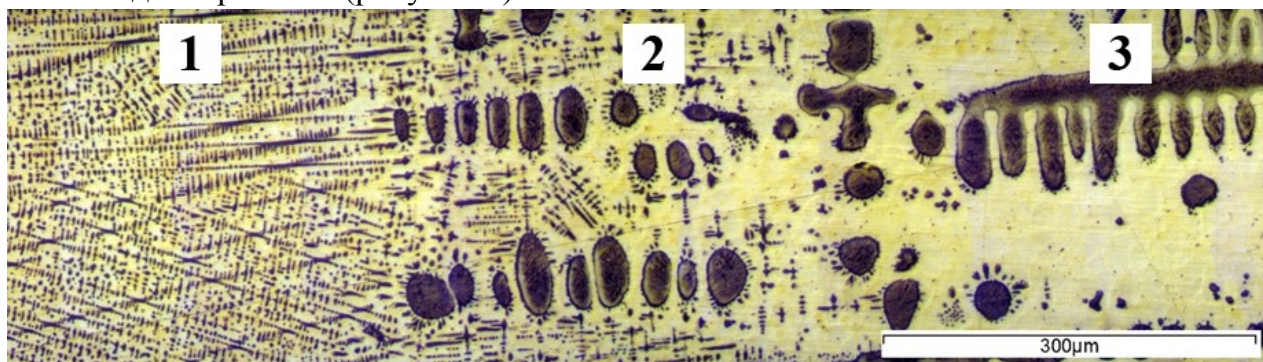


Рисунок 9 – Структура бронзы типа БрЖНКоА:

1 - переплавленный слой; 2 - переходная зона; 3 - исходная отливка

Формирование такой структуры обусловлено более высокой (на 2-3 порядка) скоростью кристаллизации и охлаждения бронзы при дуговом переплаве, чем при кристаллизации отливки. В переплавленном слое плотность дендритов повышается с увеличением содержания основных легирующих элементов (Fe, Ni) (рисунок 10), от степени легирования зависит химический состав дендритов, а состав матрицы остается постоянным (таблица 9).

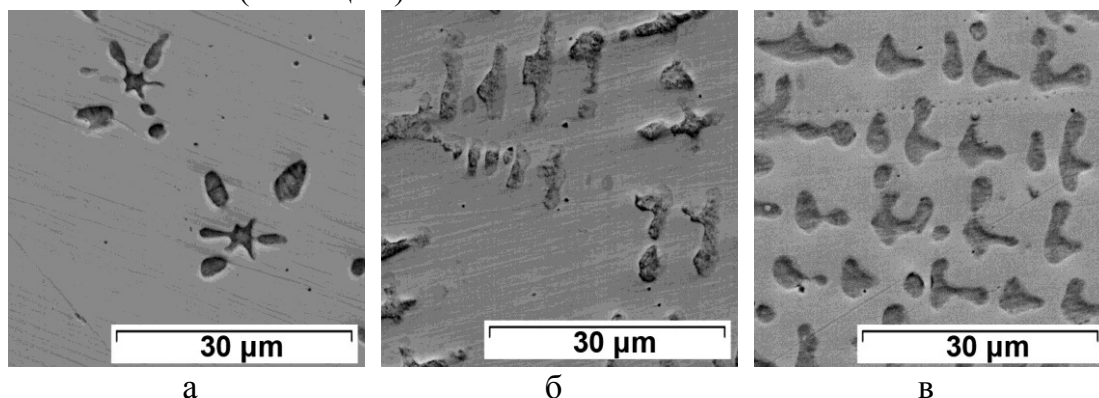


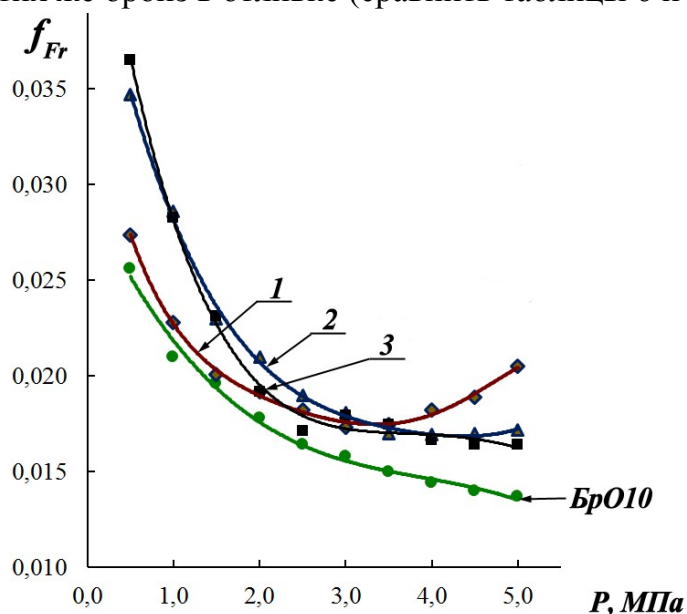
Рисунок 10 – Микроструктура переплавленного слоя бронз: а - БрЖНКоА 9-4-1-1, б - БрЖНКоА 18-8-2-1, в - БрЖНКоА 23-8-3-1

Таблица 9

Химические составы фаз в переплавленном слое бронз типа БрЖНКоА

Сплав	Область	Содержание хим. элемента, % вес.				
		Fe	Ni	Co	Al	Cu
БрЖНКоА 9-4-1-1	дендрит	20,46	5,08	1,64	0,66	72,15
	матрица	6,61	4,29	0,60	0,82	87,68
БрЖНКоА 18-8-2-1	дендрит	54,59	11,30	5,29	0,64	28,36
	матрица	6,64	4,27	0,77	0,76	87,56
БрЖНКоА 23-8-3-1	дендрит	57,79	12,75	7,00	0,71	21,76
	матрица	7,09	4,33	0,92	0,85	86,81

Коэффициент трения и интенсивность изнашивания (I) (рисунок 11, таблица 10) коррелирует с химическим составом структурных составляющих переплавленных бронз и плотностью распределения дендритов. Высокая интенсивность изнашивания и резкое увеличение коэффициента трения при давлении от 3,0 - 3,5 МПа (кривая 1 на рисунок 11) обусловлено малым количеством дендритов (опорная поверхность при трении-скольжении) и их химическим составом (20 % вместо положенных 60% Fe) в переплавленном слое бронзы БрЖНКоА 9-4-1-1 (таблица 9). Интенсивность изнашивания переплавленных бронз на порядок ниже интенсивности изнашивания этих же бронз в отливке (сравнить таблицы 6 и 10).

Таблица 10
Интенсивность изнашивания

№	Бронза	I , мкм/к м
	БрО10	0,025
1	БрЖНКоА 9-4-1-1	0,038
2	БрЖНКоА 18-8-2-1	0,005
3	БрЖНКоА 23-8-3-1	0,004

Рисунок 11 – Коэффициент трения и интенсивность изнашивания переплавленных бронз: 1 - БрЖНКоА 9-4-1-1; 2 - БрЖНКоА 18-8-2-1; 3 - БрЖНКоА 23-8-3-1

Таким образом, диспергирование структуры композитных бронз способствует снижению износа в узлах трения-скольжения при равных показателях коэффициента трения. При этом для сохранения высоких трибологических свойств наплавливаемые или переплавляемые бронзы должны содержать не менее 12% Fe.

Способ диспергирования (вакуумное литьё или аргоно-дугового переплав) не влияет на морфологию высокодисперсных дендритов, при этом химический состав дендритов бронз БрЖНА 12-7-1 и БрЖНХК 12-7-5-1 при различном способе получения (отливка, вакуумное литье, переплав) не изменяется существенно (рисунок 12, 13).

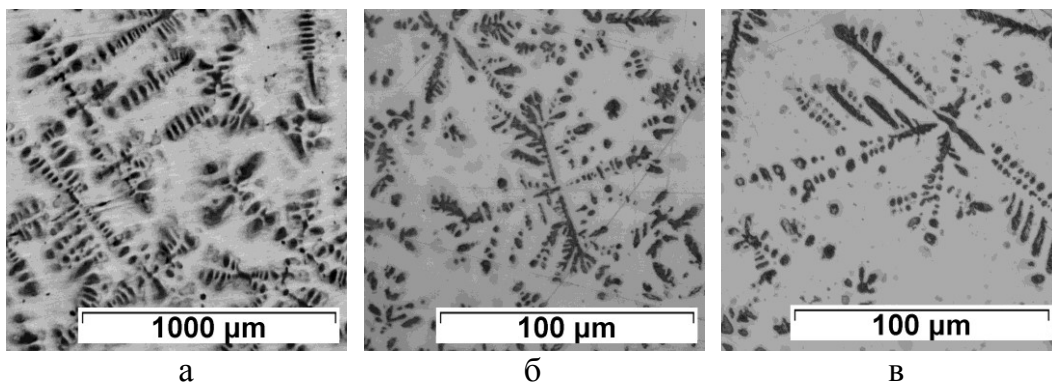


Рисунок 12 – Структура бронзы БрЖНА 12-7-1 в зависимости от способа получения: а - отливка; б - вакуумное литье; в - аргоно-дуговой переплав

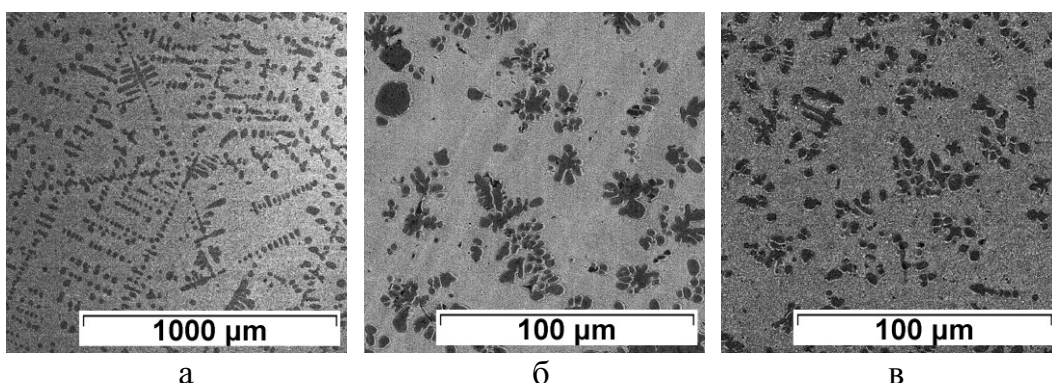


Рисунок 13 – Структура бронзы БрЖНХК 12-7-5-1 в зависимости от способа получения: а - отливка; б - вакуумное литье; в - аргоно-дуговой переплав

По химическому составу дендрит соответствует мартенситно-старееющей стали Н23Ю1 для БрЖНА 12-7-1 и аустенитной нержавеющей стали Х23Н14С1 для БрЖНХК 12-7-5-1. Способ диспергирования структуры бронз практически не влияет на коэффициент трения, однако в 5-10 раз снижает интенсивность изнашивания по сравнению с интенсивностью изнашивания отливки (рисунок 14, таблица 11).

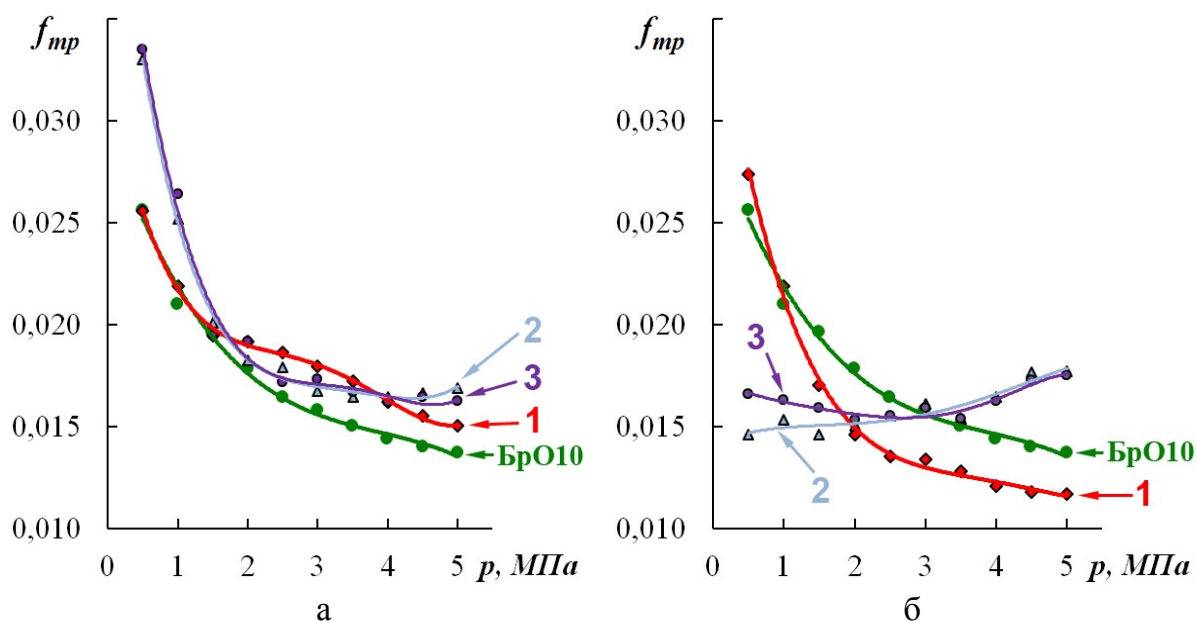


Рисунок 14 – Зависимость коэффициента трения от давления в зоне контакта для бронз БрЖНА 12-7-1 (а) и БрЖНХК 12-7-5-1 (б) полученных: 1 – литьем, 2 – вакуумным литьем, 3 – аргоно-дуговым переплавом

Таблица 11

Интенсивность изнашивания бронз БрЖНА 12-7-1 и БрЖНХК 12-7-5-1

№ на рис. 14	Бронза (способ получения)	I, мкм/км
	БрО10 отливка	0,025
1	БрЖНА 12-7-1 (отливка)	0,025
2	БрЖНА 12-7-1 (вакуумное литье)	0,002
3	БрЖНА 12-7-1 (переплав)	0,007
1	БрЖНХК 12-7-5-1 (отливка)	0,006
2	БрЖНХК 12-7-5-1 (вакуумное литье)	0,001
3	БрЖНХК 12-7-5-1 (переплав)	0,002

На рисунке 15 представлена структура наплавленного слоя бронзы БрЖНА 12-7-1 на сталь. При наплавке формируются две переходные области (рисунок 15).



Первая область, толщиной 20-25 мкм представляет собой твердый раствор Ni в Fe, а медь присутствует в свободном, дисперсном состоянии, и вторая область толщиной 100-150 мкм включает дендриты с высоким (до 69%) содержанием железа. Третья область – зона основной наплавки, по морфологии и химическому составу фаз

Рисунок 15 – Микроструктура наплавленного слоя бронзы БрЖНА 12-7-1 на стальное основание

в ней практически не отличается от бронзы БрЖНА 12-7-1- полученной вакуумным литьем и переплавом (таблица 12).

Таблица 12

Химический состав фаз в областях наплавки

Область наплавки	Фаза	Среднее содержание хим. элемента, % вес			
		Fe	Ni	Al	Cu
Область 1	-	75,69	8,49	0,83	14,99
Область 2	дендрит	68,52	12,01	0,83	18,64
	матрица	8,09	6,06	1,50	84,33
Область 3	дендрит	55,79	18,55	1,15	24,52
	матрица	7,37	5,41	1,76	85,46

Таким образом, область перемешивания наплавляемой бронзы и стали составляет всего 150-170 мкм. Это означает, что даже при однослойной наплавке на рабочей поверхности мы получаем бронзу, соответствующую наплавляемому составу.

Применение бронзы БрЖНА 12-7-1 при наплавке на стальную основу может проводиться без использования различных подслоев и наплавов в несколько слоев, обеспечивающих, при использовании распространенных технологий наплавки, химическое соответствие наплавленного слоя наплавляемой бронзе.

Коэффициент трения наплавленного слоя бронзы БрЖНА 12-7-1 (рисунок 16) соответствует коэффициенту трения бронзы БрЖНА 12-7-1 в диспергированном состоянии (переплав, вакуумное литье). Интенсивность изнашивания такого покрытия составляет 0,012 мкм/км, что в два раза ниже чем у бронзы БрО10.

Для сравнения на рисунке 16 представлены коэффициенты трения наплавленных слоев бронзами БрКМц 3-1 и ДТ-СuАl8, которые широко применяются в качестве наплавочных антифрикционных покрытий.

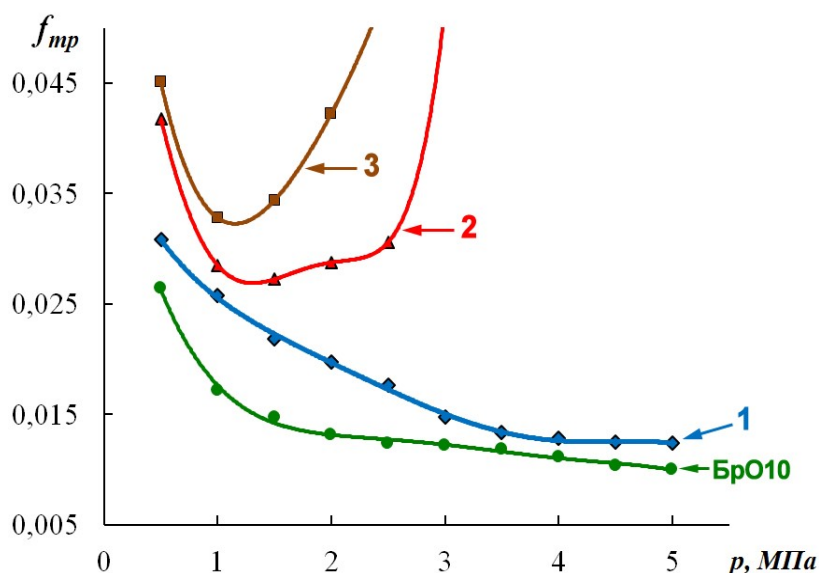


Рисунок 16 – Зависимость коэффициента трения от давления в зоне контакта наплавки на сталь: 1 – бронза БрЖНА 12-7-1; 2 – бронза ДТ-СuАl8; 3 – бронза БрКМц 3-1

Начало схватывания с поверхностью контртела происходит для бронзы БрКМц 3-1 при давлении 2,5 МПа и при 3,0 МПа для алюминиевой бронзы.

Интенсивность изнашивания у этих покрытий – 0,032 мкм/км для бронзы БрКМц 3-1 и 0,015 мкм/км для алюминиевой бронзы ДТ-СuАl8.

Применение в качестве наплавки композитной бронзы БрЖНА 12-7-1 предпочтительно, в сравнении с традиционными антифрикционными бронзами.

При наплавке бронзы БрЖНА 12-7-1 на чугун СЧ-28 в зоне сплавления не наблюдается «отбела», что обусловлено наличием сильных графитизаторов Ni, Cu и Al, что позволяет рассматривать эту наплавку для создания биметаллических подшипников скольжения, например.

Показатели механических свойств исследованных бронз представлены в таблице 13. Общие тенденции формирования механических свойств таковы: с увеличением в бронзах железа, то есть объема дендритной составляющей, возрастает предел текучести со 153 до 328 МПа, предел прочности с 372 до 473 МПа, а пластические характеристики ψ и δ % уменьшаются. При этом следует отметить, что уже в литом состоянии без термической обработки показатели ψ и δ % вполне удовлетворительны и в разы превышают таковые для бронзы БрО10. Закалка исследуемых бронз может существенно повысить пластичность, а старение во всех случаях снижает эти показатели, что коррелирует с изменениями химического состава и микротвердости матрицы и дендритов при термических обработках.

Таблица 13

Механические свойства экспериментальных бронз в зависимости от их состава, способа производства и термической обработки (ТО)

№	Состав бронз	Режимы ТО	Механические свойства				
			σ _{0,2} , МПа	σ _в , МПа	ψ, %	δ, %	δ _p , %
отливка							
1	БрО10	нет	170	215	< 5	3-10	-
2	БрЖНКА 9-4-1-1	нет	153	372	42,0	25,0	14,1
		закалка	148	311	37,8	26,2	18,3
		зак.+ стар.	136	264	14,5	6,6	5,3
3	БрЖНКА 18-8-2-1	нет	328	473	8,4	6,1	3,8
		закалка	185	338	25,6	21,3	12,5
		зак.+ стар.	208	482	16,8	14,4	11,8
4	БрЖНА 12-7-1	нет	170	364	42,8	38,2	20,3
		закалка	147	300	69,5	66,9	34,2
		зак.+ стар.	149	301	39,4	51,4	39,3
5	БрЖНОА 12-7-2-1	нет	246	336	10,1	1,2	2,0
		закалка	200	252	5,5	1,1	2,1
		зак.+ стар.	200	228	0,5	1,0	2,4
вакуумная отливка							
6	БрЖНА 12-7-1	нет	220	295	38,5	16,0	6,4
		зак.+ стар.	238	322	35,5	11,1	5,5
7	БрЖНОА 12-7-2-1	нет	208	220	18,4	6,7	4,1
		зак.+ стар.	240	329	7,6	2,6	0,6
8	БрЖНХА 12-9-3-1	нет	216	321	34,4	11,2	5,5
		закалка	188	228	19,6	4,2	1,7
		обр. холодом	212	292	20,8	7,6	3,7
9	БрЖНХА 12-7-5-1	нет	173	288	14,1	16,9	-
		закалка	152	242	10,0	9,3	-

Бронза БрЖНА 12-7-1, среди всех рассматриваемых в работе бронз, обладает лучшими пластическими свойствами, как в состоянии отливки, так и после термических обработок, что делает эту бронзу деформируемой, в отличие от широко применяемой БрО10 (таблица 13, строка 4). Легирование бронзы БрЖНА 12-7-1 даже малыми количествами олова резко снижает пластические свойства (см. таблицу 13, строки 4, 5). Диспергирование структуры вакуумным литьем (аналог наплавленного покрытия) повышает прочностные характеристики на 30-50% при сохранении достаточной пластичности ψ (таблица 13, строки 6-9).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Изучение возможностей улучшения морфологии частиц интерметаллидной фазы $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ в классической бронзе БрО10 путем легирования ее Ni, Co не привело к позитивным результатам. При этом на базе известных и полученных нами данных сформировалось представление о том, что в качестве опорной поверхности при трении-скольжении хрупкие интерметаллиды можно и следует заменить на стальные дендриты, свойствами которых можно управлять в широких пределах.

1. Разработан базовый вариант композитной бронзы БрЖН 12-7, в котором матрица представляет собой бронзу БрЖН 5-4, а дендрит – сталь мартенситного класса Н23. Дополнительное легирование базового варианта бронзы алюминием 1% переводит дендрит в мартенситно-стареющую сталь Н23Ю1. При увеличении содержания в бронзе никеля до 9% и хрома до 3% дендриты представляют собой сталь аустенитного класса Н26Х9Ю, а матрица бронзу БрНЖХА 3-2-1-1.

2. Исследовано влияние Fe (9-28%), Ni (4-9%), Co (до 2%) на количество дендритной фазы (16-43%), на интенсивность упрочнения при старении дендритов. При наличии Co твердость дендритов после старения достигает 511 НВ, что выше твердости интерметаллида $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ на 110 ед. НВ (БрО10). Дендриты состоят из стальных фрагментов, разделенных оболочкой матричного состава или пластинами $h = 0,05$ мкм, которые после термической обработки глобулизируются ($d = 0,3$ мкм). Количество матричной фазы в дендритах может достигать 16%.

3. Установлено, что наилучшим сочетанием прочностных и пластических свойств обладает бронза БрЖНА 12-7-1 в отливке ($\sigma_{0,2} = 170$ МПа, $\sigma_B = 364$ МПа, $\psi = 43\%$, $\delta = 38\%$), важно, что для получения этих свойств не требуется термическая обработка. При повышении скорости кристаллизации (переплав, наплавка, вакуумное литье) показатели прочности ($\sigma_{0,2} = 220$ МПа, $\sigma_B = 295$ МПа, $\psi = 39\%$, $\delta = 16\%$) у всех исследованных нами бронз выше на 30-50% по сравнению с БрО10, при высокой пластичности.

4. Определен состав бронзы (БрЖНХК 12-7-5-1), дендриты в которой представляют собой аустенитную нержавеющую сталь Х17Н17С3. Эта бронза обладает наилучшими, среди исследованных, трибологическими свойствами. Композитная бронза БрЖНХК 12-7-5-1 имеет износостойкость в отливке 0,006 мкм/км, а бронза БрО10 (прототип) – 0,025 мкм/км. В данном случае в качестве опорной поверхности работает не собственно нержавеющая сталь дендрита, а самовосстанавливающиеся нанопленки окислов типа $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{O}_2$, «покрывающие» эту сталь, не склонные к адгезионному взаимодействию в условиях трения со смазкой с контртелом (сталь ШХ15, НРс 45).

5. При наплавке бронзы БрЖНА 12-7-1 на сталь 20 формируются переходные зоны, обеспечивающие качественное адгезионно взаимодействие наплавленного слоя с основой. А заданный химический состав формируется уже на поверхности первого слоя наплавки. При наплавке на чугун СЧ-28 бронзы БрЖНА 12-7-1 «отбела» в зонах термического влияния не происходит – результат графитизирующего влияния Ni, Cu, Al. Это предопределяет повышенную технологичность применения этой бронзы при наплавке.

6. Интенсивность изнашивания композитных бронз в наплавленном состоянии в 5-10 раз ниже, чем у соответствующих отливок.

Состав Свойства	БрО10	БрЖНА 12-7-1		БрЖНХК 12-7-5-1	
	отливка	отливка	наплавка	отливка	наплавка
$f_{\text{тр}}$	0,016	0,018	0,017	0,013	0,016
I, мкм/км	0,025	0,025	0,002	0,006	0,001

Коэффициент трения композитных бронз в общем случае не коррелирует с их износостойкостью (основная служебная характеристика антифрикционных сплавов).

Бронза, содержащая Fe (11-13%), Ni (6,5-7,5%), Cr (4,0-4,6%), Si (0,5-1,0%), армированная аустенитными нержавеющими дендритами, является наилучшей, среди исследованных композитных антифрикционных бронз, по комплексу технологических и трибологических свойств.

СПИСОК РАБОТ, ОБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ

1. Potehkin B.A. Creation of composite bronze – maraging steel alloy / B.A. Potehkin, V.V. Ilushin, **A.S. Khristolyubov**, A.Yu. Zhlyakov, A. Ernandes // Metal Science and Heat Treatment. – 2013. – Vol. 55, Nos. 5-6. – P. 232-236. (0,31 п.л. / 0,06 п.л.). (WoS, Scopus)

2. Потехин Б.А. Особенности формирования структуры композитных бронз, армированных стальными дендритами / Б.А. Потехин, **А.С. Христоролюбов**, А.Ю. Жилияков, В.В. Илюшин // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 4 (76). – С. 43-49. (0,44 п.л. / 0,12 п.л.).

3. Потехин Б.А. Структурные особенности наплавленных композитных бронз типа БрЖНКА 18-8-2-1 / Б.А. Потехин, **А.С. Христоролюбов**, А.Ю. Жилияков // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 4 (80). – С. 67-73. (0,44 п.л. / 0,19 п.л.).

4. Potehkin B.A. Formation of structure and properties of composite bronzes reinforced by steel dendrites / B.A. Potehkin, V.V. Ilushin, **A.S. Khristolyubov**, A.Yu. Zhlyakov // The Physics of Metals and Metallography. – 2014. – Vol. 115. – Issue 4. – P. 413-419. (0,44 п.л. / 0,09 п.л.). (WoS, Scopus)

5. Потехин Б.А. Структура и свойства композитной бронзы БрЖНА 12-7-1, полученной литьем, наплавкой и вакуумным всасыванием / Б.А. Потехин, **А.С. Христоролюбов**, А.Ю. Жилияков, В.В. Илюшин, Н.К. Джемилев // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 4 (84). – С. 38-44. (0,44 п.л. / 0,15 п.л.).

6. Potehkin B.A. Development of Composite Bronzes Reinforces by Steel Dendrites / B.A. Potehkin, V.V., **A.S. Khristolyubov**, A.Yu. Zhlyakov // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2018. – Vol. 59. – No. 5. – P. 527-532. (0,44 п.л. / 0,2 п.л.). (WoS, Scopus)

7. Potehkin B.A. Influence of the microstructure dispersion on the tribological properties of composite bronzes reinforced with steel dendrites [Электронный ресурс] / B.A. Potehkin, A.A. Hernandez Fereira, **A.S. Khristolyubov**, A.Yu. Zhilyakov, V.V. Ilushin // 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, LACCEI 2019. – Montego Bay, Jamaica; – 2019. – Режим доступа: <https://doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.295>. (0,63 п.л. / 0,15 п.л.). (Scopus)

8. Potehkin, B.A. Tribological properties of composite bronzes reinforced with dendrites from maraging and stainless steels / B.A. Potehkin, **A.S. Khristolyubov**, A.Yu. Zhilyakov // Lecture Notes in Mechanical Engineering (Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering - ICIE 2020). – 2021. – 1st ed. – С. 1214-1220. (0,44 п.л. / 0,2 п.л.). (Scopus)

Патент:

9. Пат. 170923 RU, Порошковая проволока для получения антифрикционных покрытий / В.И. Шумяков, Б.А. Потехин, Ю.С. Коробов, **А.С. Христоролюбов** и др. – №2015126187. Заявлено 30.06.2015. Опубликовано 15.05.2017. Бюл. № 14.

Другие публикации:

10. Потехин Б.А. Технологические пути повышения прочности цветных сплавов с интерметаллидным упрочнением / Б.А. Потехин, В.В. Илюшин, **А.С. Христоролюбов** //

Материалы XLVII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности». – Н. Новгород, – 2008. – Ч.1. – С. 272-274. (0,19 п.л. / 0,05 п.л.).

11. Илюшин В.В. Возможности улучшения оловянных бронз / В.В. Илюшин, Б.А. Потехин, В.А. Сарычев, **А.С. Христолюбов** // Материалы науч.-техн. конф. «Наука – образование – производство: Опыт и перспектива развития...» в 3 т. Т2. «Сварка – Реновация – Триботехника». – Нижний Тагил: НТИ (ф) УрФУ. – 2011. – С. 79-80. (0,13 п.л. / 0,03 п.л.).

12. Илюшин В.В. Перспективный антифрикционный материал / В.В. Илюшин, **А.С. Христолюбов**, Б.А. Потехин // Леса России и хозяйство в них. – 2012. – №1-2 (42-43). – С. 42-47. (0,38 п.л. / 0,13 п.л.).

13. Илюшин В.В. Направление создания сплавов скольжения с повышенными технологическими свойствами / В.В. Илюшин, Б.А. Потехин, **А.С. Христолюбов** // Леса России и хозяйство в них. – 2013. – № 1 (44). – С. 169-171. (0,19 п.л. / 0,06 п.л.).

14. **Христолюбов А.С.** Морфологические особенности композитных бронз, армированных дендритами из мартенситно-стареющих сталей / **А.С. Христолюбов**, А. Эрнандес, А.Ю. Жиликов, В.В. Илюшин, Б.А. Потехин // Materials of the X International scientific and practical conference «Modern european». – 2014. – Vol. 17. Sheffield Science and Education LTD. – P. 4-12. (0,56 п.л. / 0,30 п.л.).

15. Потехин Б.А. Экспериментальное моделирование наплавленного металла на примере бронзы БрЖНА 12-7-1 / Б. А. Потехин, **А. С. Христолюбов**, В. И. Шумяков // Сварка и диагностика: сборник докладов форума. – Екатеринбург: УрФУ. – 2016. – С. 233-238. (0,38 п.л. / 0,15 п.л.).

16. Потехин Б.А. Композитные бронзы, армированные дендритами из мартенситных, аустенитных или ферритных сталей / Б.А. Потехин, **А.С. Христолюбов**, В.В. Илюшин // Актуальные проблемы прочности: сборник материалов и конкурсных докладов LIX Международной конференции. – Тольятти, ТГУ. – 2017. – С. 132- 133. (0,13 п.л. / 0,05 п.л.).

17. Potekhin B.A. New class of composite bronze, armed with steel dendrites for antifriction technique / B.A. Potekhin, **A.S. Khristolyubov**, A.A. Hernandez Ferreira // International scientific journal «Materias science non-equilibrium phase transformation». – 2016. – Vol. 2. – Issue 3. – P. 28-30. (0,19 п.л. / 0,09 п.л.).

18. Потехин Б.А. Закономерности формирования трибологических свойств сплавов скольжения / Б.А. Потехин, **А.С. Христолюбов**, В.В. Илюшин // XXIV Уральская школа металловедов-термистов. Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2018. – С. 41-43. (0,19 п.л. / 0,08 п.л.).

19. Zhilyakov A.Yu. The Formation of the Structure and Tribological Properties of Composite Bronzes Reinforced with Steel Dendrites [Электронный ресурс] / A.Yu. Zhilyakov, **A.S. Khristolyubov**, B.A. Potekhin, V.V. Ilyushin // KnE Engineering / XIX International scientific-technical conference «The Ural school-seminar of metal scientists-young researchers». – 2019. – С. 176–183. – Режим доступа: <https://doi.org/10.18502/keg.v1i1.4407>. (0,5 п.л. / 0,17 п.л.).