

## **Актуальность и степень разработанности темы исследования**

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. Большинство современных антифрикционных материалов получают методами порошковой металлургии и плазменным напылением – это порошковые сплавы на основе меди, железа, алюминия. Порошковые, пористые материалы, как антифрикционные покрытия, обладают хорошими трибологическими свойствами, однако имеют своеобразные, зачастую неудовлетворительные механические свойства в отличие от литых (монокристаллических).

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

Научная новизна и практическая значимость работы:

Впервые обосновано легирование антифрикционных бронз, обеспечивающее формирование дендритов из мартенситно-старяющихся и аустенитных нержавеющей сталей обладающих повышенными трибологическими свойствами. Разработаны бронзы, армированные дендритами из мартенситно-старяющихся, аустенитных и аустенитных нержавеющей сталей, представляющих собой композитные бронзы антифрикционного назначения: 1) бронза БрЖНА 12-7-1 (содержание 11,0-13,0 % Fe; 6,5-7,5 % Ni и 0,7-1,2 % Al), патент RU 170923 U1; 2) бронза БрЖНХК 12-7-5-1 1 (содержание 12,0-14,0 % Fe; 6,0-7,5 % Ni и 4,0-5,0 % Cr; 0,7-1,3 Si), патент RU 2784661 C1.

Экспериментально подтверждена высокая эффективность нового подхода к формированию износостойкой опорной поверхности при трении – твердые оксидные пленки  $(Fe,Cr)_2O_3$ , не склонные к адгезионному взаимодействию с соответствующими контртелами.

По комплексу механических, технологических и служебных свойств композитные антифрикционные бронзы БрЖНА 12-7-1 (дендриты – мартенситно-

стареющая сталь) и БрЖНХК 12-7-5-1 (дендриты – аустенитная нержавеющая сталь) 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 10 раз более высокую износостойкость, чем у применяемых в настоящее время.

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 1, а) выполняет функцию опорной поверхности при трении - правило Шарпи, для антифрикционных сплавов. Химический состав структурных составляющих бронзы БрЖНА 12-7-1 представлен в таблице 1.

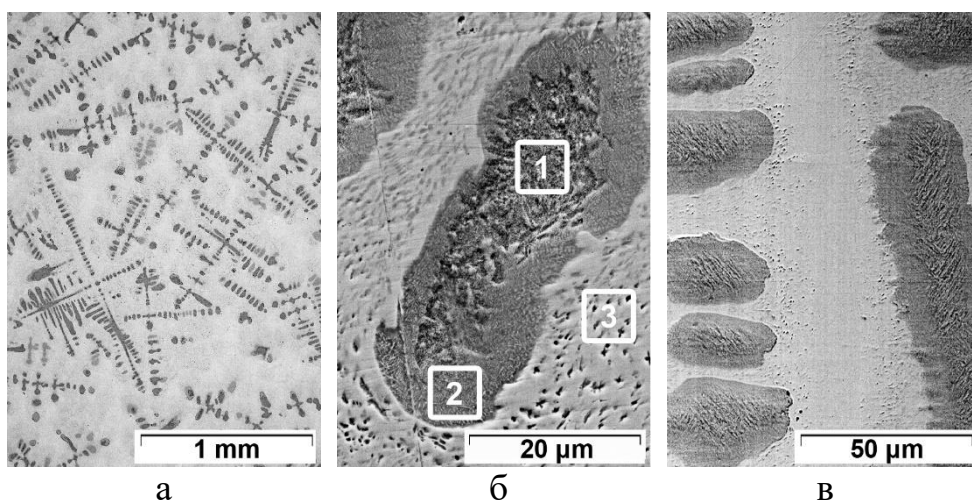


Рисунок 1 – Структура композитной бронзы БрЖНА 12-7-1:  
а – дендритная сетка; б – микроструктура дендрита; в – междендритное пространство после закалки от 950 °С, 1 час

Таблица 1

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

Зоны химического анализа на рисунке 3 б		Среднее содержание хим. элемента, % вес.				HV <sup>0,05</sup>
		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 Н23Ю1 мартенситного

класса, а периферийная часть дендрита – сталь Н27Ю1. Эти дендриты при наличии Al представляют собой мартенситно-стареющую сталь, упрочняемую дисперсионным твердением. После закалки от 950 °С твердость матрицы снижается с 169 HV<sup>0,05</sup> (см. таблицу 1, позиция 3) до 104 HV<sup>0,05</sup> вследствие растворения дисперсных включений (рисунок 1, 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 2 и таблицу 2).

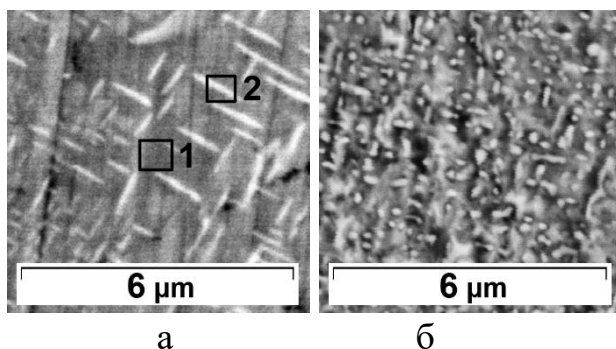


Таблица 2  
Локальный химический анализ дендрита  
бронзы БрЖНА 12-7-1

Зона анализа на рисунке 2 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

Рисунок 2 – Строение дендрита в бронзе БрЖНКоА 9-4-1-1:  
а – отливка, б – после закалки и старения при 450 °С, 2 часа

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

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.

Наибольшая твердость дендритов достигается старением при 400 °С и составляет 500 HV, а повышение температуры старения приводит к уменьшению твердости - эффект перестаривания мартенситно-стареющих сталей.

В литом состоянии, без термической обработки отливки, для композитных бронз коэффициент трения и интенсивность изнашивания равны или ниже, чем у бронзы БрО10 (см. рисунок 3).

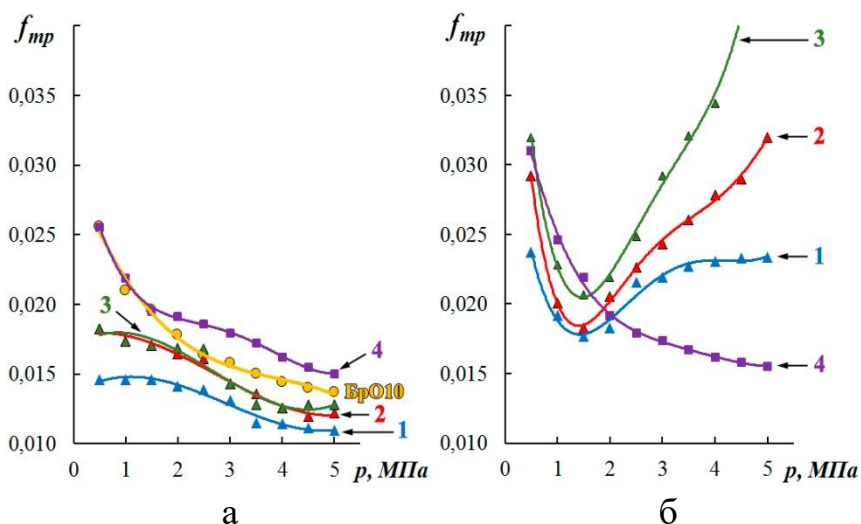


Рисунок 3 – Коэффициент трения в литом состоянии (а) и после закалки и старения (б) бронз: 1 – БрЖНКоА 9-4-1-1; 2 – БрЖНКоА 18-8-2-1; 3 – БрЖНКоА 23-8-3-1; 4 – БрЖНА 12-7-1

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

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 1, 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 3.

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 <sup>0,05</sup>
		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 4, интенсивность изнашивания в таблице 4.

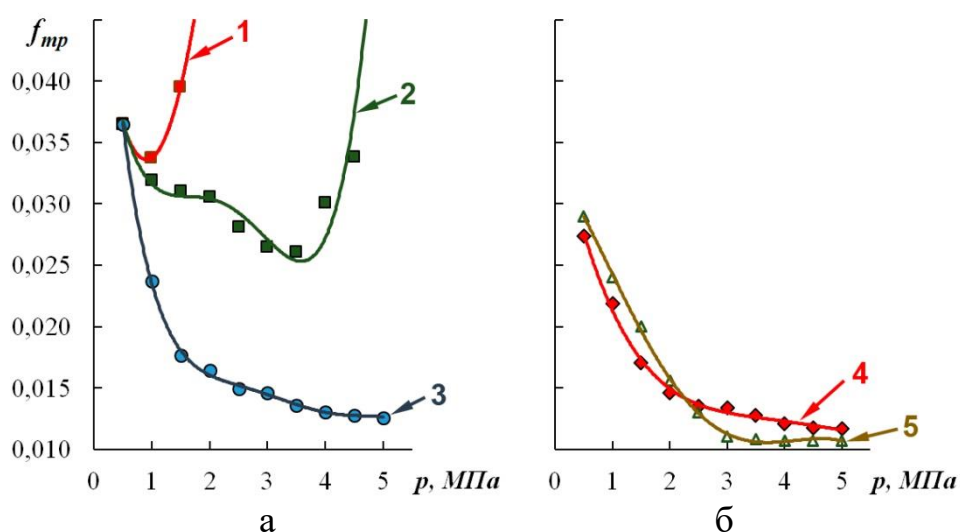


Рисунок 4 – Коэффициент трения в зависимости от давления в зоне контакта и термических обработок для бронз: (а) – БрЖНХА 12-9-3-1, (б) – БрЖНХК 12-7-5-1, где: 1 – отливка; 2 – отливка после обработки холодом при  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 72 часа; 3 – после закалки от  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$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

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 4	Бронза	$I$ , 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

Наилучшие трибологические свойствами, среди всех исследованных, имеет бронза БрЖНХК 12-7-5-1, армированная аустенитными нержавеющей дендритами (X17H17C3).

Мы полагаем, что такой высокий уровень антифрикционных свойств обусловлен наличием твердой самовосстанавливающейся окисной нанопленки типа  $(Fe,Cr)_3O_2$ , «покрывающей» дендриты, не склонной к адгезионному взаимодействию в условиях трения со смазкой с контртелом.

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

Способ диспергирования (вакуумное литье 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.

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 5, таблица 5).

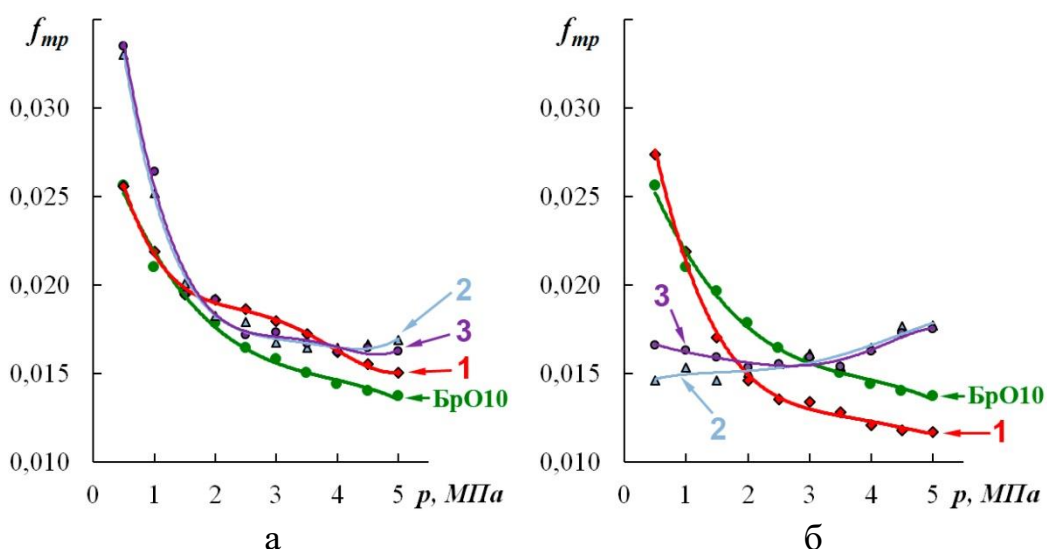


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента трения от давления в зоне контакта для бронз БрЖНА 12-7-1 (а) и БрЖНХК 12-7-5-1 (б) полученных: 1 – литьем, 2 – вакуумным литьем, 3 – аргоно-дуговым переплавом

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

№ на рис. 5	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)	<b>0,002</b>
3	БрЖНА 12-7-1 (переплав)	<b>0,007</b>
1	БрЖНХК 12-7-5-1 (отливка)	0,006
2	БрЖНХК 12-7-5-1 (вакуумное литье)	<b>0,001</b>
3	БрЖНХК 12-7-5-1 (переплав)	<b>0,002</b>

На рисунке 6 представлена структура наплавленного слоя бронзы БрЖНА 12-7-1 на сталь. При наплавке формируются две переходные области. 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 в ней практически не отличается от бронзы БрЖНА 12-7-1- полученной вакуумным литьем и переплавом (таблица 6).



Таблица 6  
Химический состав фаз в областях наплавки

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

Рисунок 6 – Микроструктура наплавленного слоя бронзы БрЖНА 12-7-1 на стальное основание

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 7) 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 7 представлены коэффициенты трения наплавленных слоев бронзами БрКМц 3-1 и ДТ-CuAl8, которые широко применяются в качестве наплавочных антифрикционных покрытий.

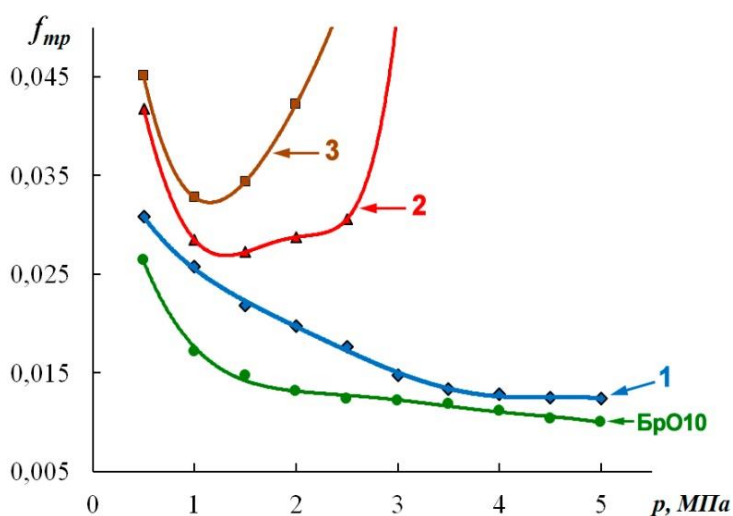


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента трения от давления в зоне контакта наплавки на сталь: 1 – бронза БрЖНА 12-7-1; 2 – бронза ДТ-CuAl8; 3 – бронза БрКМц 3-1

Интенсивность изнашивания у этих покрытий – 0,032 мкм/км для бронзы БрКМц 3-1 и 0,015 мкм/км для алюминиевой бронзы ДТ-CuAl8. Применение в качестве наплавки композитной бронзы БрЖНА 12-7-1 предпочтительно, в сравнении с традиционными антифрикционными бронзами.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. 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  $Cu_{31}Sn_8$  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%.



2. Установлено, что наилучшим сочетанием прочностных и пластических свойств обладает бронза БрЖНА 12-7-1 (патент RU 170923 U1) 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.

3. Определен состав бронзы БрЖНХК 12-7-5-1 (патент RU 2784661 C1), дендриты в которой представляют собой аустенитную нержавеющую сталь X17N17C3. 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  $(Fe,Cr)_3O_2$ , «покрывающие» эту сталь, не склонные к адгезионному взаимодействию в условиях трения со смазкой с контртелом (сталь ШХ15, НРС 45).

4. 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.

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

Свойства \ Состав	БрО10	БрЖНА 12-7-1		БрЖНХК 12-7-5-1	
	отливка	отливка	наплавка	отливка	наплавка
$f_{тр}$	0,016	0,018	0,017	0,013	0,016
I, мкм/км	0,025	0,025	0,012	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.