

УДК 621

DOI: 10.12737/23158

А.Е. Миронов, И.С. Гершман, Е.И. Гершман

НОВЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ СПЛАВЫ ВЗАМЕН БРОНЗ ДЛЯ МОНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОГО ТРЕНИЯ

Описан комплекс исследований и испытаний опытных алюминиевых антифрикционных сплавов в сравнении со стандартной бронзой марки БрО4Ц4С17. Определены механические и триботехнические характеристики 8 сплавов с различными комплексами легирования алюминиевой основы в сравнении со стандартной бронзой. Показана связь свойств сплавов с их химическим составом. Определены оптимальные уровни легирования алюминия 6 различными элементами для получения необходимого уровня прочности, твердости, задиростойкости, прирабатываемости и износо-

стойкости. Показана возможность варьирования свойств в зависимости от изменений химического состава. Дано объяснение полученных результатов с точки зрения прохождения процессов неравновесной термодинамики при самоорганизации поверхностей трения за счет образования вторичных структур.

Ключевые слова: алюминиевые антифрикционные сплавы, бронза, механические свойства, прочность, твердость, триботехнические свойства, прирабатываемость, задиростойкость, износостойкость, вторичные структуры.

А.Е. Mironov, I.S. Gershman, E.I. Gershman

NEW ALUMINUM ANTIFRICTION ALLOYS INSTEAD OF BRONZES FOR MONOMETALLIC BEARINGS OPERATING UNDER CONDITIONS OF BOUNDARY FRICTION

In the paper there is presented an investigation on the subject of the substitution of materials used for manufacturing monometallic one-piece sliding bearings. The most widely used material for their manufacturing is bronze of BrO4Ts4S17 grade which has rather high values of antifriction and strength properties. A whole complex of materials based on aluminum alloys is under consideration. There were investigated eight experimental alloys different with chemistry. In the paper there is described a procedure for carrying out experimental investigations. The comparative tables of

the influence of these or those elements upon tribological properties are shown. An evident advantage of aluminum alloys over a compared material – bronze of BrO4Ts4S17 grade is identified. The following tribotechnical properties of experimental alloys such as score-resistance, conformability, durability, frictional moment are considered.

Key words: aluminum antifriction alloys, bronze, stress-strain properties, strength, hardness, tribotechnical properties, conformability, score-resistance, durability, secondary structures.

Введение

В настоящее время подавляющее количество монометаллических цельнолитых подшипников скольжения изготавливается из литейных антифрикционных бронз [1; 2]. Эти бронзы помимо хороших литейных свойств обладают достаточно высоким комплексом механических и триботехнических характеристик. Наиболее распространена бронза марки БрО4Ц4С17, являющаяся самой прочной из антифрикционных и самой антифрикционной из прочных литейных бронз. Однако бронзы имеют ряд существенных недостатков: они дороже алюминиевых сплавов, чаще вы-

зывают аварийные нагревы, сопровождающиеся задирами и схватываниями трущихся поверхностей, что может повлечь разрушение стального контртела (эффект Ребиндера) [3; 4].

Замена материала таких подшипников на алюминиевые сплавы решает эти проблемы. Алюминий легче и дешевле меди, что делает подшипники значительно экономичнее. Алюминий не является для стали поверхностно-активным веществом, поэтому в аварийной ситуации не происходит изломов стальных осей.

Остается решить задачу получения алюминиевых сплавов, одновременно об-

ладающих высокой (на уровне бронзы) прочностью для обеспечения конструкционной прочности подшипника и не уступающих бронзе по комплексу триботехнических характеристик, обусловленных условиями эксплуатации. В качестве критериев антифрикционности сплавов приняты показатели прирабатываемости, задиростойкости, износа материала и стального контртела, определенные при сравнительных испытаниях в одинаковых условиях с бронзой при граничной смазке.

В работах [5-7] приведены данные по механическим и триботехническим свойствам твердых и прочных сплавов систем Al-Sn-Pb-Cu-Si и Al-Sn-Pb-Cu-Si-Vi, предназначенных для подшипников скольжения, работающих в условиях сухого трения или при случайном попадании смазки в зону трения (упорные подшипники). За рубежом также отмечен рост интереса к алюминиевым антифрикционным

Материалы и методы исследований

Сплавы шихтовались из технически чистых металлов с минимальным содержанием вредных примесей. В расплавленный алюминий поочередно вводили медь, кремний, магний, цинк, свинец и олово. Легирование титаном производилось путем введения в расплав дегазатора-модификатора «Зернолит-2», содержащего легко разлагающуюся соль титана (гексафтортитан).

В качестве стального контртела при триботехнических испытаниях использовались ролики из стали 38ХНЗМА, применяемой при изготовлении коленчатых валов тепловозов.

В качестве смазки при триботехнических испытаниях использовалось масло марки М14В₂, применяемое в дизелях магистральных и маневровых тепловозов.

Химический состав опытных сплавов, бронзы и стали определялся спектральным методом на установке Spektrolab-S по пяти точкам на каждом образце.

Механические свойства ($\sigma_{в.}$, δ) определялись при испытаниях на растяжение на универсальной испытательной машине Schenk цилиндрических образцов диаметром 6 мм. Твердость по Бринеллю оценивалась на твердомере ХПО-250 на пластинах толщиной 15-17 мм. Ударную вязкость

сплавам, легированным 3-5 различными элементами [8-12]. При этом некоторые исследователи стараются повысить в первую очередь прочность алюминиевой матрицы, другие – получить многокомпонентные включения мягкой структурной составляющей, а третьи – повысить свойства за счет создания большого количества твердых включений.

В данной работе рассмотрены новые сложнолегированные алюминиевые антифрикционные сплавы системы Al-Cu-Sn-Pb-Zn-Si-Mg-Ti с различными соотношениями легирующих элементов, которые сочетают повышенную легированность алюминиевой матрицы, разнообразие выделений мягкой структурной составляющей по составу, размерам и свойствам, а также наличие большого количества мелких твердых включений на основе меди, кремния и титана [13-15].

образцов с U-образным надрезом определяли на копке VEB марки КМ-05 мощностью 50 кгс·см.

Триботехнические испытания проводились на серийной машине трения СМЦ-2 по схеме «вал - колодка» (вращающийся стальной ролик – неподвижная колодка в виде звездочки с 5 поверхностями трения, изготовленная из антифрикционного материала) в условиях ограниченной подачи смазки.

Ролики имели диаметр 40 мм и ширину 10 мм. Рабочая поверхность роликов перед испытаниями полировалась. Частота вращения роликов при всех видах испытаний составляла 500 об/мин (1,05 м/с).

Колодки изготавливались из опытных сложнолегированных алюминиевых сплавов различного состава и бронзы марки БрО4Ц4С17. Они имели рабочую поверхность шириной 10 мм и радиус кривизны 20 мм для испытаний на задиростойкость и износостойкость или радиус 22,5 мм для испытаний на прирабатываемость.

На рабочую поверхность стальных роликов подавалась смазка (масло марки М14В₂) капельным способом со скоростью 2 капли в минуту (0,002 л/ч), что обеспечивает граничные условия трения.

При испытаниях на прирабатываемость к колодке ступенчато, через каждые 10 минут, прикладывалась увеличивающаяся нагрузка в диапазоне от 304 до 1058 Н. После испытаний на каждой нагрузке (т.е. через каждые 10 минут) машина останавливалась, каретка с колодкой поднималась и производился замер ширины пятна контакта с помощью штангенциркуля в двух местах по краям колодки для определения площади контакта образцов. В течение всего периода испытания велась непрерывная запись момента трения $M_{тр}$ (Н·м). Температура стальной поверхности трения измерялась на выходе из-под колодки в конце периода приложения каждой нагрузки (каждые 10 минут) с помощью оптического пирометра Opttris Mini Sight с точностью до $0,1^{\circ}$ и округлялась до 1°C .

При испытаниях на задиростойкость до начала основных испытаний пара трения прирабатывалась при минимальной нагрузке 304 Н до достижения контурной площади трения в пределах 90-95% от номинальной.

В ходе испытаний на задиростойкость каждой пары трения нагрузку на колодку ступенчато повышали через каждые 10 минут на величину 137-187 Н до достижения нагрузки задира. В качестве критерия, характеризующего задиростойкость пар трения, принимали нагрузку P (Н) на образец, которая приводила к скачкооб-

разному непрерывному повышению момента трения $M_{тр}$, либо нагрузку, при которой температура рабочей поверхности стального ролика превышала 200°C . Признаками задира также служили запах сгоревшего масла и появление дыма. При этих условиях испытание прекращалось, а нагрузка считалась величиной задиростойкости для данной пары трения. Момент трения и температура фиксировались так же, как и при испытаниях на прирабатываемость.

Перед испытаниями на износостойкость каждую пару трения прирабатывали аналогично испытаниям на задиростойкость. После окончания приработки ролик и колодку обезжиривали, промывали, сушили и затем взвешивали на электронных лабораторных весах VIBRA HTR-220 CE с точностью до 0,1 мг. После взвешивания образцы устанавливались на испытательную машину для 40-часовых испытаний при постоянной нагрузке 617 Н. Сравнением веса роликов и колодок после приработки и после 40 часов испытаний определялись износы стали и антифрикционного материала. Момент трения записывался непрерывно, а температура стальной поверхности измерялась в определенные периоды от начала до окончания испытаний.

Каждое триботехническое свойство для каждого антифрикционного материала определялось по результатам 3 испытаний.

Обсуждение результатов исследований

В данной работе были исследованы 8 экспериментальных сплавов, отличающихся по химическому составу (табл. 1), и

бронза марки Бр04Ц4С17, вырезанная из натурального моторно-осевого подшипника, отлитого в локомотивном депо «Елец».

Таблица 1
Химический состав экспериментальных алюминиевых антифрикционных сплавов и бронзы

Обозначение сплава	Содержание элементов, % масс.								
	Sn	Pb	Cu	Zn	Mg	Si	Ti	Fe	Al
1	8,7	3,2	3,4	2,9	0,4	0,5	0,03	0,08	ост
2	11,0	2,6	3,9	2,6	-	0,1	0,01	0,07	ост
3	9,8	2,5	4,5	2,4	1,2	0,6	0,03	0,13	ост
4	9,6	3,2	4,9	4,4	0,3	0,1	0,02	0,09	ост
5	6,4	3,0	4,1	1,9	1,4	0,9	0,01	0,08	ост
6	5,4	2,6	3,5	2,3	1,7	0,8	0,03	9,10	ост
7	5,8	2,7	4,1	2,3	1,5	1,5	0,03	0,14	ост
8	7,6	3,3	4,0	0,5	-	1,0	0,06	0,12	ост
Бр04С4С17	4,1	16,9	Ост	3,8	-	-	-	0,12	Ост

Благодаря комплексному легированию все экспериментальные сплавы имеют гетерогенную структуру, основными составляющими которой являются значительно легированная алюминиевая матрица, включения мягких фаз различного состава и размера, а также несколько видов твердых включений на основе интерметаллидных фаз (рис. 1).

Разнообразие легирования обусловило значительные различия эксперимен-

тальных сплавов между собой по уровню механических свойств в литом и термообработанном состоянии (табл. 2).

Из представленных данных следует, что в литом состоянии все экспериментальные сплавы имеют значение прочности выше, чем у бронзы. Однако после термообработки прочность сплавов 5, 6 и 7 уступает прочности бронзы на 3-8 %, что можно признать удовлетворительным.

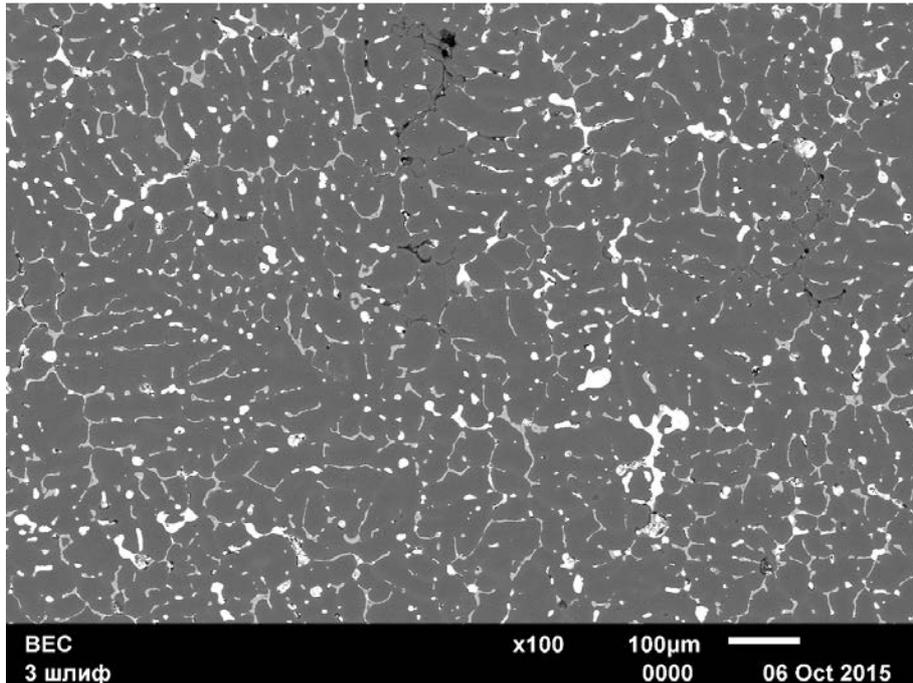


Рис. 1. Структура сплава 3 в исходном состоянии (до трения)

В литом состоянии половина экспериментальных сплавов имеют твердость выше, чем у бронзы, а после термообработки – только один сплав. Однако авторы

считают, что снижение твердости у экспериментальных сплавов по сравнению с бронзой может являться (в определенных пределах) положительным фактором.

Таблица 2

Механические свойства экспериментальных сплавов и бронзы

Обозначение сплава	Предел прочности при растяжении σ_b , МПа		Твердость по Бринеллю НВ		Относительное удлинение при растяжении δ , %		Ударная вязкость КСУ, кДж/м ²	
	Литое состояние	После т/о	Литое состояние	После т/о	Литое состояние	После т/о	Литое состояние	После т/о
1	168	168	50	60	4,4	5,5	71	83
2	151	173	56	59	9,5	2,9	119	121
3	162	163	77	74	0,4	0,3	28	21
4	187	285	65	63	1,7	3,8	50	50
5	183	136	73	55	0,9	2,3	24	35
6	171	144	74	53	0,9	2,9	23	32
7	187	140	78	55	0,6	1,9	17	24
8	151	159	53	50	4,1	4,0	48	45
БрО4Ц4С17	146	148	70	65	4,4	8,8	28	40,0

Значения пластичности большинства экспериментальных сплавов ниже, чем у бронзы, как в литом, так и в термообработанном состоянии. Значимость такой разницы не имеет однозначной трактовки.

Ударная вязкость, характеризующая работу, затрачиваемую на зарождение и развитие трещины, редко используется как критерий работоспособности антифрикционных материалов. Представляет интерес анализ влияния ударной вязкости на триботехнические характеристики материалов в широком диапазоне значений.

Поскольку монометаллические подшипники после отливки проходят обязательную термическую обработку, то представляет интерес выявление зависимости именно механических свойств после термообработки от химического состава экспериментальных сплавов. Выявлено, что при комплексном легировании добавки способны так взаимодействовать, что их влияние на реальные свойства сплавов оказывается непредсказуемым.

Предполагалось, что элементы, входящие в состав мягкой структурной составляющей (олово и свинец) будут снижать прочность и твердость, а элементы-упрочнители (медь, цинк, магний, кремний, железо) – повышать прочность и твердость. Однако полученные зависимости предела прочности при растяжении от концентрации различных легирующих элементов показали, что повышение концентрации олова, меди и цинка приводит к повышению прочности, а для кремния, свинца и магния наблюдается обратная тенденция. Для титана и железа однозначной тенденции не выявлено. При этом необходимо отметить, что минимальную прочность имеют именно сплавы с минимальным легированием оловом.

Для твердости сплавов эти зависимости еще менее выражены. Можно говорить о тенденции к повышению твердости с повышением содержания олова и о тенденции к снижению твердости с повышением содержания магния. Для всех остальных легирующих элементов однозначной тенденции влияния на твердость не выявлено, но во всех случаях сплавы с низким со-

держанием олова отличаются существенно пониженной твердостью.

Для пластичности тенденция к повышению отмечается только при повышении содержания свинца, а для меди и железа наблюдается обратная тенденция. Для остальных легирующих элементов таких тенденций не установлено. Однако для магния, цинка, меди и кремния заметно различие в пластичности для сплавов с содержанием до и более 7 % олова. Это, естественно, наблюдается и для зависимости пластичности от самого олова.

При испытаниях на ударную вязкость образцов с U-образным надрезом не выявлено легирующих элементов, повышающих эту характеристику. Однако и тенденция к снижению ударной вязкости обнаружена только при повышении содержания железа. Для остальных легирующих элементов взаимосвязи ударной вязкости с их концентрацией не установлено. При этом для меди, цинка и кремния есть различия между сплавами, имеющими различные уровни легирования оловом.

Зависимость механических свойств от олова и, опосредованно, от комплекса легирования оловом и другими элементами свидетельствует об их взаимном воздействии друг на друга и, соответственно, о влиянии олова на матрицу и твердые включения в составе сплава. С другой стороны, не вызывает сомнения факт воздействия других легирующих элементов на свойства оловянных фаз мягкой структурной составляющей экспериментальных сплавов. В результате этого экспериментальные сплавы можно разделить на две условные группы: низкооловянистые и среднеоловянистые.

Проведенные сравнительные испытания по определению параметров триботехнических характеристик показывают заметное преимущество экспериментальных алюминиевых антифрикционных сплавов над бронзой БрО4Ц4С17 по большинству показателей (табл. 3).

Полученные результаты показывают, что все экспериментальные сплавы на 52-263 % превосходят бронзу по задиростойкости, на 1,2-47,4 % - по прирабатываемости и на 47,5-667 % меньше изнашивают

стальное контртело. С износом самого антифрикционного материала дело обстоит не так однозначно. По весовому износу все алюминиевые сплавы превосходят бронзу на 12-675 %, однако, с учетом разницы в удельных весах алюминия и меди, линей-

ный износ сплавов 1, 2 и 4 больше, чем у бронзы, на 33-267 %, у сплава 5 линейный износ такой же, как у бронзы, а у сплавов 3, 6, 7, 8 он даже на 22,2-225 % меньше, чем у бронзы.

Таблица 3

Результаты сравнительных триботехнических испытаний экспериментальных сплавов и бронзы

Обозначение сплава	Нагрузка задира, Н	Площадь контакта при приработке, мм ²	Износ антифрикционного материала, мг	Износ стального контртела, мг	Средний момент трения при испытании на износ, Н · м	Средняя температура стали при испытании на износ, °С
1	2407	50,0	2,4	0,8	0,293	32
2	1650	49,8	1,2	0,6	0,270	33
3	2832	57,8	0,7	0,7	0,206	31
4	2107	42,8	2,0	2,1	0,252	37
5	2767	53,0	0,9	1,0	0,183	38
6	2825	49,7	0,5	0,7	0,229	36
7	2330	39,7	0,4	0,6	0,242	40
8	1823	46,8	0,5	0,8	0,353	42
БрО4Ц4С17	1081	39,2	2,7	4,0	0,325	38

Представляет интерес сравнение средних значений момента трения и температуры стальной поверхности трения при 40-часовых испытаниях на износ при одинаковых постоянных условиях нагрузки, смазки и скорости скольжения. У сплава 8 момент трения оказался выше, чем у бронзы, на 9 %, а у остальных сплавов ниже, чем у бронзы, на 11-78 %. При этом температура поверхности трения стального ролика оказалась выше, чем при работе с бронзой, у сплавов 7 и 8 (на 2 - 4 °С), у сплава 5 она была одинаковой с бронзой, а у сплавов 1, 2, 3, 4 и 6 она оказалась ниже, чем при работе с бронзой, на 1 - 7 °С. Интересно отметить, что экспериментальные сплавы со средним содержанием олова имели большее значение момента трения при меньших температурах нагрева, чем сплавы с низким содержанием олова. Наиболее вероятно, что это связано с образованием разных типов вторичных структур на поверхностях трения этих групп сплавов.

Экспериментальные сплавы показали значительный разброс значений триботехнических свойств, что связано с их различиями в концентрациях легирующих эле-

ментов. Такая разница в химическом составе сказывается на способности экспериментальных сплавов к самоорганизации при трении (образование вторичных структур на поверхности трения). Благодаря комплексности легирования структура поверхностей трения этих сплавов (рис. 2) существенно отличается от исходной структуры (рис. 1).

Задиростойкость экспериментальных сплавов имеет тенденцию к повышению с увеличением содержания магния и к снижению с увеличением содержания свинца. Для зависимости задиростойкости от содержания кремния имеется оптимальная концентрация от 0,5 до 0,9 % Si, обеспечивающая повышенную нагрузку задира. Для остальных легирующих элементов такой зависимости не выявлено.

Прирабатываемость экспериментальных сплавов показала тенденцию к снижению с повышением содержания свинца и выявила оптимальное содержание кремния на уровне 0,5-0,9 %. Для остальных легирующих элементов зависимости прирабатываемости сплавов от концентрации какого-либо элемента не выявлено.

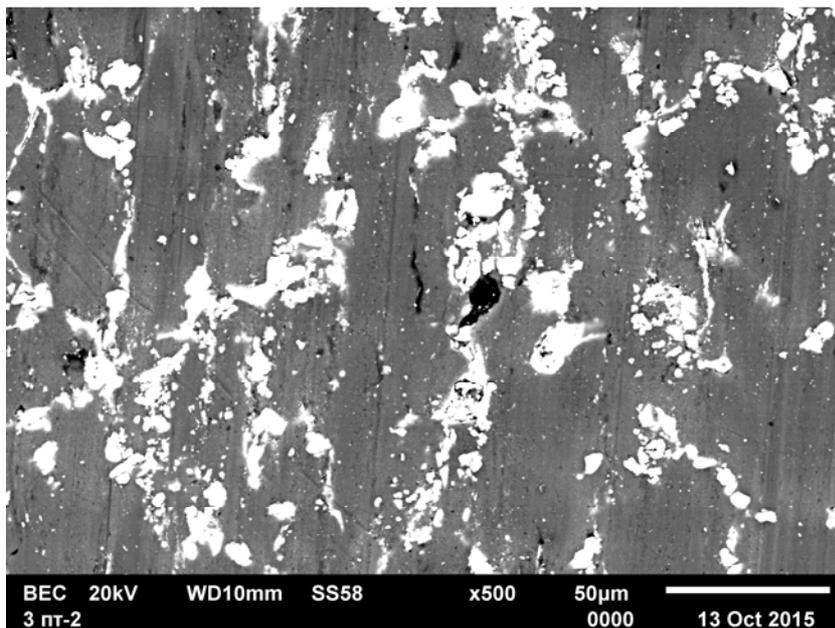


Рис. 2. Структура поверхности трения сплава 3

Износостойкость экспериментальных сплавов имеет тенденцию к повышению с повышением концентрации магния, кремния и железа. Для свинца характерна обратная тенденция. Для ряда легирующих элементов имеется оптимальная концентрация, обеспечивающая минимальные значения износа экспериментальных сплавов: от 4,0 до 4,5 % меди, от 1,0 до 1,7 % магния, от 0,8 до 1,5 % кремния, не более 2,7 % свинца и 2,5 % цинка. Кроме того, необходимо отметить, что низкооловянистые сплавы показали более высокую износостойкость по сравнению со среднеоловянистыми сплавами. Исключением является только сплав 3, который содержит 9,8 % Sn, а по износостойкости превосходит сплав 5, содержащий 6,4 % Sn. Данный факт показывает, что для сложнолегируемых алюминиевых сплавов максимальная износостойкость связана не столько со способностью выдавливать олово и за счет этого получать тонкую защитную пленку на поверхности трения, сколько с изменениями при трении состава и свойств алюминиевой матрицы и формы, размеров и состава твердых включений.

Износостойкость стального контртела, работавшего в паре с экспериментальными сплавами, практически не зависит от содержания олова, что противоречит общепринятым понятиям об антифрикцион-

ных алюминиевых сплавах. Не укладывается в эту теорию и тенденция к снижению износостойкости с повышением содержания свинца свыше 2,75 %. При этом для меди, магния, кремния и цинка явного влияния на износостойкость стали не выявлено, хотя можно определить зоны их оптимального содержания, обеспечивающие стабильный незначительный износ стали. Для меди это концентрации от 3,5 до 4,5 %, для магния – от 1,0 до 1,7 %, для цинка – от 2,0 до 3,0 %, для кремния – от 0,5 до 1,5 %. Для железа такой диапазон отсутствует.

Момент трения существенно отличается у среднеоловянистых и низкооловянистых экспериментальных сплавов. При этом у низкооловянистых значения момента трения заметно ниже (за исключением сплава 3). В обеих группах просматривается тенденция к снижению момента трения с повышением содержания олова, что соответствует общепринятым представлениям. О такой же тенденции можно говорить для меди и магния.

Обратная тенденция - повышение момента трения с повышением концентрации легирующего элемента - наблюдается для свинца, содержание которого по этому критерию следует ограничить 3 %.

Для цинка и кремния следует говорить об оптимальной концентрации, кото-

рая обеспечивает стабильно низкое значение момента трения. Она составляет для цинка от 1,5 до 2,5 %, а для кремния – от 0,5 до 0,9 %.

Для железа влияния на момент трения не установлено.

Потери при трении на нагрев стального контртела зависят главным образом от содержания олова. Среднеоловянистые экспериментальные сплавы 1, 2 и 3 вызывают заметно меньший нагрев стали, чем низкооловянистые сплавы 5, 6 и 7. Интересен тот факт, что максимальный нагрев (средняя температура во время 40-часовых испытаний) был отмечен у сплава 8, содержащего 7,6 % Sn, который можно отнести как к одной, так и к другой группе. Это может свидетельствовать о том, что промежуточное содержание олова недостаточно для пленочного механизма образования вторичных структур, но избыточно для вторичных структур, соответствующих правилу Шарпи.

Выводы

Проведенные эксперименты показали принципиальную возможность замены бронз на алюминиевые антифрикционные сплавы при изготовлении монометаллических подшипников. Доказано, что благодаря комплексному легированию экспериментальных алюминиевых сплавов возможно получить антифрикционные материалы, сочетающие необходимый уровень механических свойств (на уровне бронзы) с более высоким, чем у бронзы, комплексом триботехнических характеристик. Показано, что, изменяя степень легированности экспериментальных сплавов, можно регулировать уровень механических и триботехнических свойств материала.

Именно различием в механизмах образования вторичных структур можно объяснить тот факт, что повышение концентрации цинка в среднеоловянистых сплавах вызывает повышение температуры стальной поверхности, а в низкооловянистых сплавах – снижение ее температуры. Для кремния наблюдается обратная картина: при повышении концентрации в среднеоловянистых сплавах с 0,1 до 0,6 % происходит снижение температуры, а при повышении концентрации в низкооловянистых сплавах с 0,8 до 1,5 % происходит повышение температуры.

Повышение содержания магния в обеих группах экспериментальных сплавов приводит к снижению температуры стальной поверхности.

Для свинца, меди и железа влияния изменения их содержания на температуру стальной поверхности трения не выявлено.

Экспериментами показано, что среднеоловянистые и низкооловянистые алюминиевые антифрикционные сплавы обладают различиями в механических и триботехнических характеристиках. Последние зависят от механизма образования вторичных структур, который отличается у этих двух групп сплавов.

Определено влияние основных легирующих элементов и примеси железа на значения механических свойств и триботехнических характеристик (прирабатываемости, задиростойкости, износостойкости) материала и изнашиваемость стального контртела в широких диапазонах изменения концентрации легирующих элементов.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского научного фонда № 15-19-00217, № 14-19-01033.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буше, Н.А. Подшипниковые сплавы для подвижного состава/ Н.А.Буше. – М.: Транспорт, 1967. - 224 с.
2. Буше, Н.А. Подшипники из алюминиевых сплавов/ Н.А.Буше, А.С.Гуляев, В.А.Двоскина, К.М.Раков. - М.: Транспорт, 1974. - 256 с.
3. Ребиндер, П.А. Облегчение деформации металлических монокристаллов под влиянием адсорбции поверхностно-активных веществ/ П.А.Ребиндер, В.Н.Лихтман, В.В.Масленников// Докл. АН СССР. - 1941. - Т. 32. - № 2. - С. 125.

4. Буше, Н.А. Трение, износ и усталость в машинах. Транспортная техника/ Н.А.Буше. - М.: Транспорт, 1987. - 186 с.
5. Труды 7-й международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» (г.Москва, 1-15 нояб. 2013 г.). - М., 2013. - С. 137-141.
6. Курбаткин, И.И. Трибологические и структурные исследования новых антифрикционных материалов на основе алюминия/ И.И.Курбаткин, Н.А.Белов // Трение и износ. - 2014. - Т. 35. - № 2. - С. 127-133.
7. Сачек, Б.Я. Исследование трибологических свойств антифрикционных алюминиевых сплавов с использованием метода склерометрии/ Б.Я.Сачек, А.М.Мезрин, Т.И.Муравьева, О.О.Столярова, Д.Л.Загорский, Н.А.Белов// Трение и износ. - 2015. - Т. 36. - № 2. - С. 137-146.
8. Zhang, A. Effect of pre-aging on microstructure and mechanical properties of A357 alloy/ A.Zhang, W.Huang // Heat Treat Metals. - 2014. - Vol. 39. - № 10. - P. 21-24.
9. Elgallad, E.M. Effect of two-step aging on the mechanical properties of AA2219 DC cast alloy/ E.M.ElGallad, Z.Zhang, X.-G.Chen// Mater. Sci. and Eng. - 2015. - № 635. - P. 107-113.
10. Shuangxi, H. Effect of aging on microstructure and mechanical properties of 2A12 aluminium alloy/ He Shuangxi, Liu Xiagyang, Xie Guanghui [et al.]// Heat Treat Metals. - 2014. - Vol. 39. - № 6. - P. 94-96.
11. Xiagiang, F. Effect of aging on microstructure and mechanical properties of a new-type aluminium-lithium alloy/ Fu Xiagiang, Ma Chao, Bao Pengli, Chen Lie [et al.]// Heat Treat Metals. - 2014. - Vol. 39. - № 5. - P. 70-73.
12. Chen, L. Influence of aging temperature on corrosion behavior of Al-Zn-Mg-Sc-Zr alloy/ Li Chen, Pan Qinglin, Chi Yunjia, Wang Ying [et al.]// Mater and Des. - 2014. - № 55. - P. 551-559.
13. Mironov, A.E. Comparison of Scoring Resistance of New Antifriction Aluminum Alloys and Traditional Antifriction Bronze/ A.E.Mironov, I.S.Gershman, A.V.Ovechkin, E.I.Gershman// Journal of Friction and Wear. - 2015. - Vol. 36. - № 3. - P. 257-261.
14. Котова, Е.Г. Исследование микроструктуры и механических свойств экспериментальных антифрикционных сплавов (для монометаллических подшипников скольжения)/ Е.Г.Котова, И.И.Курбаткин, А.Е.Миронов, И.С.Гершман// Цветные металлы. - 2013. - № 5. - С. 66-72.
15. Котова, Е.Г. Микроструктура и механические свойства экспериментальных антифрикционных сплавов на основе алюминия/ Е.Г.Котова, А.Е.Миронов, И.С.Гершман// Железнодорожный транспорт на современном этапе развития: труды ОАО «ВНИИЖТ»/ под ред. М.М.Железнова, Г.В.Гогричани. - М.: Интекст, 2013. - С. 253-259.
1. Bouche, N.A. *Bearing Alloys for Rolling-Stock*/ N.A.Bouche. - М.: Transport, 1967. - pp. 224.
2. Bouche, N.A. *Bearings Made of Aluminum Alloys*/ N.A.Bouche, A.S.Gulyaev, V.A.Dvoskina, K.M.Rakov. - М.: Transport, 1974. - pp. 256.
3. Rebinder, P.A. Deformation facilitation of metal monocrystals affected by adsorption of surface-active matters/ P.A.Rebinder, V.N.Lichtman, V.V.Maslennikov// *Proceedings of AS of the USSR. - 1941. - Vol. 32. - № 2. - pp. 125.*
4. Bouche, N.A. *Friction, Wear and Fatigue in Machinery. Transport Equipment*/ N.A.Bouche. - М.: Transport, 1987. - pp. 186.
5. *Proceedings of the 7-th Inter. Sc.-Pract. Conf. "Promising Foundry Techniques" (Moscow, November 1-15, 2013).* - М., 2013. - pp. 137-141.
6. Kurbatkin, I.I. Tribological and structural investigations of new antifriction materials based on aluminum/ I.I.Kurbatkin, N.A.Belov // *Friction and Wear.* - 2014. - Vol. 35. - № 2. - pp. 127-133.
7. Sачek, B.Ya. Investigation of tribological properties in antifriction aluminum alloys using method of sclerometry / B.Ya.Sачek, A.M.Mezrin, T.I.Muraviyova, O.O.Stolyarova, D.L.Zagorsky, N.A.Belov// *Friction and Wear.* - 2015. - Vol. 36. - № 2. - pp. 137-146.
8. Zhang, A. Effect of pre-aging on microstructure and mechanical properties of A357 alloy/ A.Zhang, W.Huang // Heat Treat Metals. - 2014. - Vol. 39. - № 10. - P. 21-24.
9. Elgallad, E.M. Effect of two-step aging on the mechanical properties of AA2219 DC cast alloy/ E.M.ElGallad, Z.Zhang, X.-G.Chen// Mater. Sci. and Eng. - 2015. - № 635. - P. 107-113.
10. Shuangxi, H. Effect of aging on microstructure and mechanical properties of 2A12 aluminium alloy/ He Shuangxi, Liu Xiagyang, Xie Guanghui [et al.]// Heat Treat Metals. - 2014. - Vol. 39. - № 6. - P. 94-96.
11. Xiagiang, F. Effect of aging on microstructure and mechanical properties of a new-type aluminium-lithium alloy/ Fu Xiagiang, Ma Chao, Bao Pengli, Chen Lie [et al.]// Heat Treat Metals. - 2014. - Vol. 39. - № 5. - P. 70-73.
12. Chen, L. Influence of aging temperature on corrosion behavior of Al-Zn-Mg-Sc-Zr alloy/ Li Chen, Pan Qinglin, Chi Yunjia, Wang Ying [et al.]// Mater and Des. - 2014. - № 55. - P. 551-559.
13. Mironov, A.E. Comparison of Scoring Resistance of New Antifriction Aluminum Alloys and Traditional Antifriction Bronze/ A.E.Mironov, I.S.Gershman, A.V.Ovechkin, E.I.Gershman// Journal of Friction and Wear. - 2015. - Vol. 36. - № 3. - P. 257-261.
14. Kotova, E.G. Investigation of microstructure and stress-strain properties of experimental antifriction alloys (for monometallic sliding bearings)/ E.G.Kotova, I.I.Kurbatkin, A.E.Mironov,

- I.S.Gershman// *Non-Ferrous Metals*. - 2013. - № 5. - pp. 66-72.
15. Kotova, E.G. Microstructure and stress-strain properties of experimental antifriction alloys based on aluminum/ E.G.Kotova, A.E. Mironov, I.S. Gersh-

man// *Railway Transport at Current Development: Proceedings of Stock Co. "ARRIRT"/* under the editorship of M.M. Zheleznov, G.V. Gogrichiany. - M.: Intext, 2013. - pp. 253-259.

*Статья поступила в редколлегию 18.10.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Орловского
государственного университета
Савин Л.А.*

Сведения об авторах:

Миронов Александр Евгеньевич, к.т.н., вед. специалист акционерного общества «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), тел.: (499) 262-34-57, (495) 685-04-89.

Гершман Иосиф Сергеевич, д.т.н., специалист акционерного общества «Научно-исследовательский институт железнодорожного

транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), тел.: (499) 238-07-09, e-mail: isgershman@gmail.com.

Гершман Евгений Иосифович, нач. отдела акционерного общества «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), тел.: (499) 262-34-57, (499) 238-07-09, e-mail: gershmanei@gmail.com.

Mironov Alexander Evgenievich, Can. Eng. Leading Expert of "ARRIRT" Co., Phone: (495) 685-04-89

Gershman Joseph Sergeevich, D. Eng. Chief Expert of "ARRIRT" Co, E-mail: isgershman@gmail.com.

Gershman Evgeny Iosiphovich, Head of the Dep. of "ARRIRT" Co., E-mail: gershmanei@gmail.com.