

Новые антифрикционные алюминиевые сплавы для литых монометаллических подшипников скольжения. Стендовые испытания

А. Е. МИРОНОВ^{1,2}, Г. Г. АНТЮХИН¹, Е. И. ГЕРШМАН², П. А. ПОДРАБИННИК²,
Е. В. КУЗНЕЦОВА², Н. Ю. ПЕРЕТЯГИН²

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»), Москва, 127994, Россия

Аннотация. Представлен алюминиевый антифрикционный сплав из серии новых разработанных сплавов взамен бронз для монометаллических подшипников скольжения. Сложнолегированные алюминиевые сплавы разработаны с привлечением методов неравновесной термодинамики и теории самоорганизации. Прохождение самоорганизации приводит к снижению интенсивности изнашивания в несколько раз. Сложное легирование облегчает прохождение самоорганизации. Исследованы вторичные структуры на поверхностях трения алюминиевых сплавов. Проанализировано отличие вторичных структур от поверхности сплавов до трения. Определены механические и трибологические свойства алюминиевых сплавов. Проведено сравнение свойств алюминиевых сплавов с бронзами. Алюминиевые антифрикционные сплавы, уступая бронзам по механическим свойствам, значительно превосходят их по трибологическим. Алюминиевые сплавы в 6 раз меньше, чем бронза, изнашивают стальное контртело; нагрузка задира алюминиевых сплавов в 2,5 раза больше нагрузки задира бронзы; интенсивность изнашивания алюминиевых сплавов в 2 раза меньше интенсивности изнашивания бронзы. Из экспериментального алюминиевого сплава были изготовлены втулочные подшипники скольжения. Результаты стендовых испытаний, проведенных на турбокомпрессоре, подтвердили преимущества алюминиевого сплава перед бронзой даже при более жестких условиях смазывания и охлаждения алюминиевых подшипников по сравнению с условиями смазывания и охлаждения бронзовых.

Ключевые слова: алюминиевые антифрикционные сплавы; бронзы; интенсивность изнашивания; прирабатываемость; нагрузка задира; монометаллические подшипники скольжения; турбокомпрессоры; стендовые испытания

Введение. В настоящее время монометаллические подшипники турбокомпрессоров тепловозов изготавливаются согласно требованиям чертежей из бронз марок БрО10С10 и БрО8С12 (ГОСТ 613–79 «Бронзы оловянные литейные. Марки»). Преимущество среди них отдается бронзе БрО8С12 из-за ее меньшей стоимости и более высокого комплекса трибологических свойств [1]. Для бронзовых подшипников существенным недостатком является проявление эффекта Ребиндера в аварийной ситуации, когда капли рас-

плавленной меди становятся для стали поверхностно-активным веществом, вызывающим появления трещин по границам стальных зерен вплоть до полного разрушения стального контртела [2].

Во многих странах, в том числе и в России, проводятся исследования по разработке новых антифрикционных алюминиевых сплавов, способных заменить бронзу при изготовлении монометаллических подшипников скольжения [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Во всех случаях разработчики стремятся получить прочность и твердость не ниже, чем у заменяемой бронзы, так как монометаллическим подшипникам требуется определенный уровень прочности и хорошие литейные свойства при сохранности триботехнических характеристик [10, 11, 12]. При этом материал должен иметь износостойкость, не уступающую бронзе, и слабо изнашивать сопряженное стальное контртело. Замена бронзы на алюминиевый сплав дает заметный экономический эффект, так как алюминий в 2,5 раза дешевле меди по стоимости единицы веса и в 3,3 раза легче меди. Алюминиевые сплавы более легкоплавки, что позволяет сэкономить 15–20 % энергии на процессе плавления, а еще 10–12 % — за счет более легкой механической обработки алюминиевого сплава в сравнении с бронзой.

С учетом этих обстоятельств авторами был разработан новый класс антифрикционных сплавов на основе алюминия для монометаллических подшипников скольжения. Исследованы их структура, состав, проведены лабораторные и стендовые испытания механических и антифрикционных свойств.

Материалы, прошедшие испытания, испытательная техника. Механические свойства сплавов определялись на разрывной машине Schenck-100 с максимальной нагрузкой 100 кН. Твердость измерялась по Бринеллю на твердомере ХПО-250 (Carl Zeiss). Использовался шарик диаметром 2,5 мм, нагрузка 159,25 Н.

Химический состав сплавов определялся с помощью спектрального анализа на спектрометре Spectrolab S. Трибологические испытания проводились

Таблица 1

Результаты химического анализа литого антифрикционного сплава на основе алюминия, полученные на оптическом эмиссионном спектрометре Spectrolab S

Table 1

Results of chemical analysis of an aluminum-based cast antifriction alloy obtained on a Spectrolab S optical emission spectrometer

Обозначение сплава	Содержание элементов, масс. %										
	Sn	Pb	Cu	Si	Zn	Fe	Ti	Ni	Mn	Mg	Al
АО-6.1	6,12	2,94	4,12	1,01	2,79	0,1	0,081	0,02	0,01	1,5	81,309

на машине трения СМЦ-2 по схеме стальной ролик — колодка из антифрикционного сплава. Методики трибологических испытаний ранее приводились в [13].

Антифрикционные алюминиевые сплавы выплавлялись в индукционной высокочастотной плавильной печи в графито-шамотном тигле. Разливка осуществлялась в графитовые изложницы. Затем из отливки изготавливались опытные образцы подшипников для стендовых испытаний. Опытные образцы были изготовлены на ООО «СпецДизельСервис» (Новосибирская область) из литых заготовок после их термической обработки.

Испытания были проведены на стенде ОАО «СКБТ» (г. Пенза) в составе серийного турбокомпрессора ТК33Н-02. Выбор данного турбокомпрессора как объекта для испытаний опытных втулочных подшипников из экспериментального алюминиевого сплава АО-6.1 не привязан к конкретной модели турбокомпрессора и определялся программой выпуска турбокомпрессоров и степенью загрузки испытательного стенда ОАО «СКБТ». Изготовленные ООО «СпецДизельСервис» опытные образцы унифицированы по размерам для широкого применения в подшипниковых узлах различных турбокомпрессоров и могут устанавливаться в опорах ротора турбокомпрессоров типа ТК30, ТК33 и ТК34. Особенностью опытной партии подшипников из сплава АО-6.1 являлась минимально допустимая по чертежам величина внутреннего диаметра рабочей поверхности трения изготовленных деталей.

При подготовке к испытаниям каждая опорная втулка и подпятника были оснащены двумя термодатчиками «ХК» (хромель/копель), а в трубопроводы подачи масла для смазки подшипников установлены расходомеры ШЖУ-25М-16 с классом точности 0,5.

При проведении испытаний подшипники турбокомпрессора смазывались маслом М14В2 по ГОСТ 12337–84 «Масла моторные для дизельных двигателей. Технические условия», проходящим очистку в стендовых фильтрах. Перед входом в турбокомпрессор измерялось давление масла штатными манометрами стенда ИД-1 с классом точности 2,5, а измере-

ние температуры масла на входе в турбокомпрессор и на сливе из него проводилось штатными стендовыми приборами.

Сравнение опытных втулочных подшипников из сплава АО-6.1 с подшипниками из бронзы БрО8С12. Бронза БрО8С12, как и остальные стандартные антифрикционные бронзы, уступает бронзе БрО4Ц4С17 по антифрикционным свойствам, но превосходит ее по механическим. Лабораторные трибологические испытания антифрикционных алюминиевых сплавов проводились в сравнении с бронзой БрО4Ц4С17. Алюминиевые антифрикционные сплавы, которые превосходили по трибологическим характеристикам бронзу БрО4Ц4С17, заведомо будут превосходить другие стандартные антифрикционные бронзы, в том числе бронзу БрО8С12.

Микроструктурные исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе (SEM Vega-3, Tescan, Чешская Республика) с энергодисперсным микроанализатором.

Результаты испытаний. Состав предложенного авторами сложнолегированного алюминиевого сплава АО-6.1 [14] представлен в табл. 1. Комплексное легирование алюминия оловом, свинцом, медью, кремнием, цинком, титаном и магнием позволило получить сплав, сочетающий высокий уровень механических свойств (табл. 2) с высокими антифрикционными свойствами (табл. 3).

Из приведенных данных видно, что алюминиевый сплав незначительно уступает бронзе по прочности (на 24,8 %) и твердости (на 11,1 %), но при этом превосходит бронзу по задиристости в 2,56 раза, по износостойкости — в 5,4 раза, в 5,7 раза меньше изнашивает сталь и в 1,77 раза легче прирабатывается. Такие результаты получены благодаря гетерогенности структуры сплава (см. рисунок) и синергетике взаимодействия всех входящих в его состав легирующих элементов с алюминиевой матрицей, повышающего способность сплава к самоорганизации и образованию наиболее выгодных вторичных структур как на поверхности трения самого сплава, так и на сопряженной поверхности трения стали.

Согласно результатам применения неравновесной термодинамики и теории самоорганизации к процессу трения, интенсивность изнашивания трущихся тел может снижаться в несколько раз при прохождении в трибосистеме самоорганизации и образовании диссипативных структур [15]. Процесс самоорганизации происходит только после потери термодинамической устойчивости. Потеря устойчивости — вероятностный процесс [16]. Это связано с тем, что условия теоремы Ляпунова об устойчивости необходимые, но не достаточные. В связи с этим при соблюдении данных условий появляется возможность потери устойчивости. В [17] было показано, что чем сложнее трибосистема, тем больше вероятность потери термодинамической устойчивости и, следовательно, прохождения самоорганизации. Самоорганизация определяется интенсивным протеканием физико-химических процессов с отрицательным производством энтропии, т. е. такие процессы протекают в направлении увеличения свободной энергии. Самоорганизация выражается в образовании необходимых вторичных структур. Сложность системы в нашем случае увеличивали благодаря повышению сложности антифрикционных материалов, т. е. за счет увеличения количества легирующих элементов.

На рисунке видна матрица на основе алюминия (черные поля), включения мягкой фазы на основе олова и свинца (белые округлые включения), включения твердых интерметаллидных фаз на основе меди и кремния (вытянутые серые включения).

В исходном состоянии (до трения) в сплаве выявлено несколько структурных составляющих, основными из которых являются фазы со следующим содержанием элементов:

1. Алюминиевая матрица, легированная медью, цинком, кремнием и магнием при отдельных зонах, обогащенных титаном, поверхность которой при изготовлении образца прореагировала с углеродом и кислородом. Состав алюминиевой матрицы приведен в табл. 4.

Матрица сплава по сравнению с матрицей ранее исследованных сплавов оказалась более легированной медью, кремнием и титаном при меньшем содержании цинка и магния. Она заметно слабее прореагировала с углеродом и кислородом. Благодаря этому у матрицы сплава просматривается большая склонность к образованию твердых включений по правилу Шарпи при меньшей склонности к образованию металлополимерных пленок в результате взаимодействия с углеродом и кислородом из смазки в процессе трения.

2. Включения мягкой структурной составляющей на основе олова, состав которых приведен в табл. 4. Для этих включений отмечается высокое содержание

Таблица 2

Механические свойства бронзы и алюминиевого сплава, из которых были изготовлены монометаллические подшипники турбокомпрессора тепловоза

Table 2

Mechanical properties of bronze and aluminum alloy, from which monometallic bearings of a diesel locomotive turbocharger were made

Материал	Механические свойства	
	Предел прочности при растяжении, МПа	Твердость по Бринеллю, НВ
Бронза	242	81
Сплав	182	72

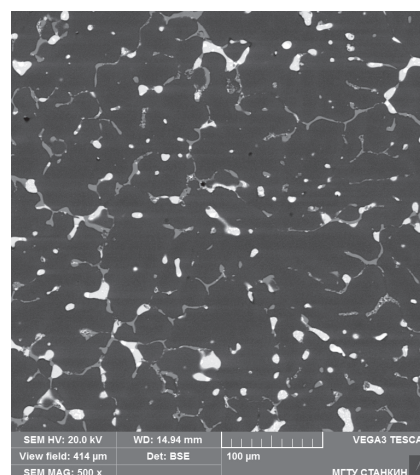
Таблица 3

Антифрикционные свойства бронзы и алюминиевого сплава, из которых были изготовлены подшипники турбокомпрессора тепловоза, определенные на машине трения СМЦ-2

Table 3

Antifriction properties of bronze and aluminum alloy, from which the bearings of the diesel locomotive turbocharger were made, determined on the SMTs-2 friction machine

Материал	Антифрикционные свойства			
	Нагрузка задира, Н	Прирабатываемость, мм ²	Износ сплава, мг	Износ стали, мг
Бронза	1081	29	2,7	4,0
Сплав	2767	51,3	0,5	0,7



Характерная гетерогенная структура алюминиевого антифрикционного сплава АО-6.1

Characteristic heterogeneous structure of the aluminum antifriction alloy AO-6.1:
matrix based on aluminum (black fields), inclusions of the soft phase based on tin and lead (white rounded inclusions), inclusions of solid intermetallic phases based on copper and silicon (elongated gray inclusions)

олова. Еще следует отметить уменьшение содержания свинца, алюминия, меди и цинка при отсутствии кремния. При этом возросло локальное содержание

Таблица 4

Составы структурных составляющих экспериментального алюминиевого антифрикционного сплава (средние значения)

Table 4

Compositions of structural components of the experimental aluminum antifriction alloy (average values)

Структуры	Химические элементы, масс. %									
	Al	Cu	Zn	Si	Mg	Ti	Pb	Sn	C	O
Матрица	87,9–91,2	1,0–2,7	0,8–1,2	0,1–0,6	0,1–0,2	0,1–0,3	—	—	3,6–7,7	1,1–1,9
Включения на основе Sn	0,4–1,8	0,4–0,9	0,0–1,2	—	0,0–5,4	—	—	—	0,7–2,1	2,8–7,0
Включения на основе Pb	0,3–37,4	1,1–1,8	1,5–2,3	—	0,0–2,2	—	45,0–58,3	5,3–35,7	4,3–5,2	3,0–3,8
Включения на основе Θ -фазы	46,1–49,7	36,5–43,9	0,4–1,2	0,5–0,8	0,0–3,2	—	—	—	4,9–7,0	1,3–2,3
Включения с высоким содержанием Si	41,8–55,6	10,6–15,1	0,8–2,0	5,0–11,2	0,0–0,2	—	0,5–4,5	10,0–23,7	5,0–7,6	3,2–7,5

Таблица 5

Химический состав вторичных структур на участке площадью $2,07 \times 2,07$ мм поверхности трения экспериментального алюминиевого антифрикционного сплава

Table 5

Chemical composition of secondary structures in the area of 2.07×2.07 mm of the friction surface of the experimental aluminum antifriction alloy

Содержание элементов, масс. %												
Al	Cu	Zn	Si	Mg	Sn	Pb	Fe	Cr	C	O	S	Ca
59,1	4,5	2,4	1,5	0,6	3,2	0,4	0,2	0,1	18,9	8,9	0,1	0,1

магния. Степень взаимодействия с углеродом и кислородом можно считать одинаковой.

3. Включения мягкой фазы с высоким содержанием свинца, состав которых приведен в табл. 4. Для данной фазы характерен большой разброс в содержаниях олова и алюминия, повышенное содержание меди, цинка и магния. Взаимодействие с углеродом и кислородом находится на одинаковом уровне по сравнению с подобными ранее разработанными сплавами.

4. Включения твердой фазы на основе Θ -фазы (CuAl_2), содержащей в твердом растворе на этой основе другие элементы сплава. Состав включений приведен в табл. 4. Дополнительно эта структурная составляющая содержит 0,0–0,3% Fe, 0,2–0,8% Ni. В данной фазе алюминия больше, чем меди, что не соответствует стехиометрическому составу фазы CuAl_2 , но в сплаве данные включения дополнительно легированы магнием, железом и никелем. Взаимодействие этих фаз с углеродом и кислородом является стабильным.

5. Включения твердой фазы с повышенным содержанием кремния, состав которых приведен в табл. 4. В этих включениях меньше кремния по сравнению с другими сплавами, но больше их количество и размеры. Как правило, они расположены в межузлиях или на границах зерен алюминия и представляют собой гетерогенные смеси на основе алюминия или олова.

Сплав содержит фазы, где обнаруживаются практически все легирующие элементы сплавов, что выгодно для процессов самоорганизации при трении.

Зерна алюминиевой матрицы сплава достаточно мелкие (от 20 до 60 мкм), а включения твердой фазы на основе Θ -фазы имеют преимущественно вытянутую форму при незначительной толщине (до 5 мкм). В межузлиях отмечается сочетание мягких и твердых фаз (см. рисунок). Внутри алюминиевых зерен преобладают включения мягких фаз на основе олова или свинца сферической формы, значительно легированные магнием.

Такое разнообразие фаз, размеров их включений и химических составов делает экспериментальный алюминиевый сплав способным к самоорганизации и образованию различных типов вторичных структур на поверхности трения.

Наличие в этих структурах не только легирующих элементов из сплава, но и органики (C+O), металлов и неметаллов из разложившейся смазки (Ca, K, Na+Cl, S, P) в сочетании с элементами из стального контртела (Fe, Mn, Cr) позволяет оценить вторичные структуры как металлополимерный слой переменного состава.

Исследования вторичных структур, образовавшихся на алюминиевом антифрикционном сплаве после 40 ч трения, были проведены на электронном

сканирующем микроскопе. Пример состава вторичных структур представлен в табл. 5.

Способность алюминиевого антифрикционного сплава к самоорганизации с образованием выгодных вторичных структур на поверхности трения стала одним из определяющих факторов при его выборе в качестве материала для монометаллических подшипников турбокомпрессоров тепловозов.

Для относительного ужесточения работы подшипников из алюминиевого сплава АО-6.1 образцы подшипников из бронзы были изготовлены с большим внутренним диаметром рабочей поверхности трения, что обеспечивало для них более интенсивную подачу масла при испытаниях. Это повышало интенсивность охлаждения бронзовых подшипников и обеспечивало их лучшую смазываемость по сравнению с подшипниками из алюминиевого сплава. Расход масла через турбину для бронзовых подшипников в несколько раз превышал расход масла для алюминиевых. Это послужило причиной того, что температура втулок опорного подшипника из бронзы в процессе испытаний была ниже температуры втулок из алюминиевого сплава, хотя максимальная температура подпятника опорно-упорного подшипника и для бронзы, и для сплава АО-6.1 сохранялась на одном уровне.

Кроме того, подшипники из сплава по сравнению с бронзой оказались в неравных условиях смазки из-за снижения давления масла на входе в компрессор почти в 2 раза (с 4,6 до 2,4 кгс/см²) и почти в 1,5 раза (с 4,2–4,5 до 2,8 кгс/см²) на входе в турбину.

В результате средняя температура втулок опорного подшипника, изготовленных из сплава АО-6.1, превысила температуру втулок, изготовленных из бронзы, а температура опорно-упорных подшипников из сплава АО-6.1 и из бронзы была примерно равной.

Осмотром и обмером подшипников установлено, что по размерам они соответствуют требованиям чертежей. Визуальный осмотр показал, что все поверхности трения имели до испытаний большое количество рисок, нанесенных при изготовлении деталей.

После проведения стендовых испытаний констатируется соответствие состояния деталей и узлов турбокомпрессора требованиям чертежа. Не отмечено видимой выработки шеек ротора, подпятника и втулки компрессора, но на опорной втулке турбины отмечены натир и риски. Износ внутреннего диаметра втулок от первоначального значения составил 0,005 мм для втулки опорного подшипника и 0,01 мм для втулок опорно-упорного подшипника. Общее состояние рабочих поверхностей шеек ротора, подпятника и втулки опорно-упорного подшипника из сплава АО-6.1 после испытаний признано удовлетво-

рительным. Для определения ресурсных показателей втулок подшипников турбокомпрессоров из сплава АО-6.1 предложено проведение эксплуатационных испытаний.

В результате проведения стендовых испытаний втулочных подшипников скольжения турбокомпрессоров тепловозов доказано, что даже в условиях уменьшенной подачи смазки, обусловленной намеренным уменьшением масляного зазора до минимально допустимого, а также недостаточной чистотой механической обработки втулок, сплав АО-6.1 показал необходимый уровень работоспособности. Уменьшение начального масляного зазора приводит к увеличению нагрева подшипников и уменьшению прокачки масла между подшипниками и валом. Однако при эксплуатации по мере износа трущихся поверхностей зазор будет увеличиваться, а дополнительный запас толщины сплава увеличит наработку подшипников до их снятия по износу.

Стендовые испытания не выявили необходимости внесения изменений в состав сплава АО-6.1 для деталей, предназначенных для эксплуатационных испытаний.

Заключение. Разработан новый класс алюминиевых антифрикционных сплавов для монометаллических подшипников скольжения взамен бронз. Разработка сплавов проведена на основе применения методов неравновесной термодинамики и теории самоорганизации к процессам трения. Сложное легирование повышает вероятность прохождения самоорганизации при трении. Это приводит к снижению интенсивности изнашивания.

Новые алюминиевые антифрикционные сплавы незначительно уступают бронзе по механическим свойствам, но заметно превосходят ее по трибологическим. Алюминиевые сплавы в 6 раз меньше, чем бронза, изнашивают стальное контртело; нагрузка задира алюминиевых сплавов в 2,5 раза больше нагрузки задира бронзы; интенсивность изнашивания алюминиевых сплавов в 2 раза меньше интенсивности изнашивания бронзы.

Результаты стендовых испытаний подтвердили преимущества алюминиевого сплава перед бронзой даже при более жестких условиях смазывания и охлаждения алюминиевых подшипников по сравнению с условиями смазывания и охлаждения бронзовых.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по Соглашению № 074-11-2018-011 от 31 мая 2018 г. по теме: «Разработка и организация высокотехнологичного производства инновационных комплексов электрического обогрева межотраслевого применения с прорывными эксплуатационными характеристиками» в рамках реализации постановления Правительства РФ № 218 от 09 апреля 2010 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подшипники из алюминиевых сплавов / Н. А. Буше [и др.]. М.: Транспорт, 1974. 256 с.
2. Буше Н. А. Трение, износ и усталость в машинах. М.: Транспорт, 1987. 186 с.
3. Gorny M., Sikora G. Effect of Titanium Addition and Cooling on Primary α (Al) Grains and Tensile Properties of Al–Cu Alloy // The Journal of Materials Engineering and Performance (JMEP). 2015. Vol. 24. No. 3. P. 1150–1156.
4. Improving We performance of dual-scale Al–Sn allows. The role of Mg addition in enhancing Sn distribution and tribolayer stability / Z. C. Lu [et al.] // Wear. 2014. Vol. 309. No. 1/2. P. 216–225.
5. Mechanisms Involved in the Formation of Secondary Structures on the Friction Surface of Experimental Aluminum Alloys for Monometallic Journal Bearings / P. Podrabinnik [et al.] // Lubricants. 2018. No. 6. P. 104.
6. Prasad Rao A. K. Nucleation in Al Alloys Processed by MCDC Casting // Journal of Materials Engineering and Performance (JMEP). 2015. Vol. 24. No. 6. P. 2219–2224.
7. Formation of nanocrystalline and amorphous phase of Al–Pb–Si–Sn–Cu powder during mechanical alloying / R. Guang [et al.] // Materials Science and Engineering: A. 2006. Vol. 416. No. 1/2. P. 45–50.
8. Influence of tin content on tribological characteristics of spray formed Al–Si alloys / M. Anila [et al.] // Wear. 2010. Vol. 268. No. 11/12. P. 1250–1256.
9. Белов Н. А., Столярова О. О., Яковлева А. О. Влияние свинца на структуру и фазовый состав литейного сплава Al–5%Si–4%Cu // Металлы. 2016. № 2. С. 35–43.
10. Белов Н. А. Фазовый состав алюминиевых сплавов. М.: МИСиС, 2009. 392 с.
11. Расчетно-экспериментальное изучение фазовой диаграммы Al–Cu–Si–Sn в области алюминиевых сплавов / Н. А. Белов [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 4. С. 11–17.
12. Исследование триботехнических свойств и структуры антифрикционных железосодержащих алюминиевых сплавов / Б. Я. Сачек [и др.] // Трение и износ. 2018. Т. 39. № 3. С. 259–268.
13. Self-Organization during Friction of Slide Bearing Antifriction Materials / I. S. Gershman [et al.] // Entropy. 2015. No. 17(12). P. 7967–7978.

14. Comparison of Scoring Resistance of New Antifriction Aluminum Alloys and Tradition al Antifriction Bronze / A. E. Mironov [et al.] // Wear. 2015. Vol. 36. No. 3. P. 257–261.
15. Гершман И. С., Буше Н. А. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах // Трение и износ. 1995. Т. 16. № 1. С. 61–70.
16. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. М.: Мир, 2002. 464 с.
17. Self-Organization during Friction in Complex Surface Engineering Tribosystems / G. S. Fox-Rabinovich [et al.] // Entropy. 2010. No. 12(5). P. 275–288.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

МИРОНОВ Александр Евгеньевич,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ»; лаборатория искрового плазменного спекания, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

АНТЮХИН Георгий Георгиевич,

канд. техн. наук, заведующий лабораторией, отделение «Тяговый подвижной состав», АО «ВНИИЖТ»

ГЕРШМАН Евгений Иосифович,

научный сотрудник, лаборатория искрового плазменного спекания, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

ПОДРАБИННИК Павел Анатольевич,

начальник лаборатории искрового плазменного спекания, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

КУЗНЕЦОВА Екатерина Викторовна,

научный сотрудник, лаборатория искрового плазменного спекания, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

ПЕРЕТЯГИН Никита Юрьевич,

инженер, лаборатория искрового плазменного спекания, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Статья поступила в редакцию 02.05.2020 г., принята к публикации 04.07.2020 г.

Для цитирования: Новые антифрикционные алюминиевые сплавы для литых монометаллических подшипников скольжения. Стендовые испытания / А. Е. Миронов [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 4. С. 217–223. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-4-217-223>.

New anti-friction aluminum alloys for cast monometallic plain bearings. Bench tests

A. E. MIRONOV^{1,2}, G. G. ANTUKHIN¹, E. I. GERSHMAN², P. A. PODRABINNIK², E. V. KUZNETSOVA², N. Yu. PERETYAGIN²

¹ Joint Stock Company “Railway Research Institute” (JSC “VNIIZhT”), Moscow, 129626, Russia

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Moscow State Technological University “STANKIN” (FGBOU VO “MG TU “STANKIN”), Moscow, 127994, Russia

Abstract. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the Agreement No. 074-11-2018-011 of May 31, 2018 on the topic: “Development and organization of high-tech production of innovative electric heating systems for inter-industry use with breakthrough performance” in the framework of the implementation of the RF Government decree No. 218 dated April 09, 2010.

The article presents aluminum antifriction alloy from a series of newly developed alloys to replace bronzes for monometallic plain

bearings. Complex alloyed aluminum alloys are developed using methods of nonequilibrium thermodynamics and the theory of self-organization. According to the results of applying nonequilibrium thermodynamics and the theory of self-organization to the friction process, the wear rate of rubbing bodies can decrease several times as the self-organization passes through the tribosystem and dissipative structures form. Complex alloying facilitates self-organization. Self-organization is determined by the intense occurrence of physicochemical processes with negative entropy production, i.e. such processes

proceed in the direction of increasing free energy. Self-organization is expressed in the formation of the necessary secondary structures. The complexity of the system in our case was increased due to an increase in the complexity of antifriction materials, i.e. increase in the number of alloying elements. The results of the study of secondary structures on the friction surface of antifriction aluminum alloys are presented. The differences in the compositions and microstructure of secondary structures from the composition and microstructure of the alloy to friction are shown. The role of various chemical elements in the formation of the necessary secondary structures is discussed. Chemical elements could get into secondary structures from an antifriction alloy, steel counterbody, lubricant, atmosphere.

The mechanical and tribological properties of aluminum alloys are determined. The properties of aluminum alloys with bronzes are compared. Aluminum antifriction alloys, inferior to bronzes in mechanical properties, significantly surpass them in tribological properties. Aluminum alloys are 6 times smaller than bronze, wear a steel counterbody; the load of the seizure of aluminum alloys is 2.5 times the load of the seizure of bronze; the wear rate of aluminum alloys is 2 times less than the wear rate of bronze. A pilot batch of monometallic plain bearings was manufactured from the new alloy and bench tests were carried out for comparison with bronze bearings. The bench test results confirmed the advantages of aluminum alloy over bronze, given that the lubrication and cooling conditions of aluminum bearings were more stringent than the conditions for lubricating bronze.

Keywords: aluminum antifriction alloys; bronze; wear rate; conformability; scuff load; monometallic plain bearings; turbochargers; bench tests

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-4-217-223>

REFERENCES

1. Bushe N.A., Gulyaev A.S., Dvoskina V.A., Rakov K.M. *Podshipniki iz alyuminiyevykh splavov* [Bearings of aluminum alloys]. Moscow, Transport Publ., 1974, 256 p.
2. Bushe N.A. *Trenie, iznos i ustalost' v mashinakh* [Friction, wear and fatigue in machines]. Moscow, Transport Publ., 1987, 186 p.
3. Gorny M., Sikora G. *Effect of Titanium Addition and Cooling on Primary α (Al) Grains and Tensile Properties of Al–Cu Alloy*. The Journal of Materials Engineering and Performance (JMEP), 2015, Vol. 24, no. 3, pp. 1150–1156.
4. Lu Z., Gao Y., Zeng M., Zhu M. *Improving we performance of dual-scale Al–Sn allows. The role of Mg addition in enhancing Sn distribution and tribolayer stability*. Wear, 2014, Vol. 309, no. 1/2, pp. 216–225.
5. Podrabinnik P., Gershman I., Kuznetsova E., Peretyagin P. *Mechanisms Involved in the Formation of Secondary Structures on the Friction Surface of Experimental Aluminum Alloys for Monometallic Journal Bearings*. Lubricants, 2018, no. 6, p. 104.
6. Prassado Rao A.K. *Nucleation in Al Alloys Processed by MCDC Casting*. Journal of Materials Engineering and Performance (JMEP), 2015, Vol. 24, no. 6, pp. 2219–2224.
7. Guang R., Jing-En Z., Shengqi X., Pengliang L. *Formation of nanocrystalline and amorphous phase of Al–Pb–Si–Sn–Cu powder during mechanical alloying*. Materials Science and Engineering, A. 2006, Vol. 416, no. 1/2, pp. 45–50.
8. Anila M., Srivastava V.C., Ghosha M.K., Ojha S.N. *Influence of tin content on tribological characteristics of spray formed Al–Si alloys*. Wear, 2010, Vol. 268, no. 11/12, pp. 1250–1256.

■ E-mail: gershman.iosif@vniizht.ru (A. E. Mironov)

9. Belov N.A., Stolyarova O.O., Yakovleva A.O. *Vliyaniye svintsya na strukturu i fazovyy sostav liteynogo splava Al–5 %Si–4 %Cu* [Effect of lead on the structure and phase composition of the casting alloy Al–5 % Si–4 % Cu]. Metally [Metals], 2016, no. 2, pp. 35–43.

10. Belov N.A. *Fazovyy sostav alyuminiyevykh splavov* [Phase composition of aluminum alloys]. Moscow, MISiS Publ., 2009, 392 p.

11. Belov N.A., Mikhaylina A.O., Alabin A.N., Stolyarova O.O. *Raschetno-eksperimental'noye izucheniye fazovoy diagrammy Al–Cu–Si–Sn v oblasti alyuminiyevykh splavov* [Calculation and experimental study of the Al–Cu–Si–Sn phase diagram in the field of aluminum alloys]. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov [Metallurgy and heat treatment of metals], 2016, no. 4, pp. 11–17.

12. Sachek B.Ya., Mezrin A.M., Shcherbakova O.O., Murav'eva T.I., Zagorskiy D.L. *Issledovaniye tribotekhnicheskikh svoystv i struktury antifrictionnykh zhelezosoderzhashchikh alyuminiyevykh splavov* [Investigation of tribotechnical properties and structure of antifriction iron-containing aluminum alloys]. Friction and Wear, 2018, Vol. 39, no. 3, pp. 259–268.

13. Gershman I.S., Mironov A.E., Gershman E.I., Fox-Rabinovich G.S., Veldhuis S.C. *Self-Organization during Friction of Slide Bearing Antifriction Materials*. Entropy, 2015, no. 17 (12), pp. 7967–7978.

14. Mironov A.E., Gershman I.S., Ovechkin A.V., Gershman E.I. *Comparison of Scoring Resistance of New Antifriction Aluminum Alloys and Tradition al Antifriction Bronze*. Wear, 2015, Vol. 36, no. 3, pp. 257–261.

15. Gershman I.S., Bushe N.A. *Realizatsiya dissipativnoy samoorganizatsii poverkhnostey treniya v tribosistemakh* [Implementation of dissipative self-organization of friction surfaces in tribosystems]. Friction and Wear, 1995, Vol. 16, no. 1, pp. 61–70.

16. Prigozhin I., Kondepudi D. *Sovremennaya termodinamika* [Modern thermodynamics]. Moscow, Mir Publ., 2002, 464 p.

17. Fox-Rabinovich G.S., Gershman I.S., Yamamoto K., Bicsa A., Veldhuis C.C., Beake B.D., Kovalev A.I. *Self-Organization during Friction in Complex Surface Engineering Tribosystems*. Entropy, 2010, no. 12 (5), pp. 275–288.

ABOUT THE AUTHORS

Aleksander E. MIRONOV,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, JSC “VNIIZhT”; Spark Plasma Sintering Laboratory, FGBOU VO “MGU “STANKIN”

Georgiy G. ANTYUKHIN,

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, Department “Traction Rolling Stock”, JSC “VNIIZhT”

Evgeniy I. GERSHMAN,

Researcher, Spark Plasma Sintering Laboratory, FGBOU VO “MGU “STANKIN”

Pavel A. PODRABINNIK,

Head of the Spark Plasma Sintering Laboratory, FGBOU VO “MGU “STANKIN”

Ekaterina V. KUZNETSOVA,

Researcher, Spark Plasma Sintering Laboratory, FGBOU VO “MGU “STANKIN”

Nikita Yu. PERETYAGIN,

Engineer, Spark Plasma Sintering Laboratory, FGBOU VO “MGU “STANKIN”

Received 02.05.2020

Accepted 04.07.2020

For citation: Mironov A. E., Antyukhin G. G., Gershman E. I., Podrabinnik P. A., Kuznetsova E. V., Peretyagin N. Yu. New anti-friction aluminum alloys for cast monometallic plain bearings. Bench tests // VNIIZhT Scientific Journal. 2020. 79 (4): 217–223 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-4-217-223>.