

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.4.23:673.8

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-330-338

EDN: <https://elibrary.ru/zfxydl>



МОНОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МОТОРНО-ОСЕВЫЕ ПОДШИПНИКИ ТЕПЛОВЗОВ: ЗАМЕНА МАТЕРИАЛА С БРОНЗЫ НА КОМПЛЕКСНО-ЛЕГИРОВАННЫЙ АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ

А. Е. Миронов, И. С. Гершман✉, А. А. Крылов, П. О. Мусерский

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Замена материала монометаллических моторно-осевых подшипников, изготавливаемых в настоящее время, с бронзы на алюминиевый сплав целесообразна для повышения безопасности движения в связи с более высокой надежностью и экономичностью таких подшипников.

Материалы и методы. Рассмотрены материалы монометаллических моторно-осевых подшипников — бронзы и предлагаемых комплексно-легированных алюминиево-оловянных сплавов. Стандартными методами определены механические свойства: предел прочности на растяжение, относительное удлинение (пластичность), твердость по Бринеллю, ударная вязкость. Антифрикционные свойства (прирабатываемость, задиростойкость, износостойкость антифрикционного сплава и сопряженной с ним стали, температура нагрева поверхности стали и коэффициент трения) определялись по методикам ВНИИЖТ, утвержденным ОАО «РЖД», на машине трения СМЦ-2. С дизельным маслом М-14В₂ испытаны бронза и три марки алюминиевых сплавов, а с осевым маслом — бронза, баббит Б16 и одна марка алюминиевого сплава.

Результаты. В результате исследований показана возможность замены бронзы на комплексно-легированные алюминиевые сплавы как по экономическим показателям, так и по антифрикционным свойствам. Проведено сравнение механических свойств, по большинству из которых алюминиевые сплавы превосходят или не уступают бронзе. Исключением является пластичность, по значениям которой бронза превосходит предлагаемые сплавы.

Обсуждение и заключение. По комплексу служебных характеристик, полученных при лабораторных исследованиях, представляется целесообразной замена бронзы на комплексно-легированный алюминиевый антифрикционный сплав. Окончательное решение о подобной замене может быть принято после стендовых и эксплуатационных испытаний моторно-осевых подшипников на тепловозах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: моторно-осевые подшипники тепловозов, бронза, алюминиевые сплавы, механические свойства, антифрикционные свойства, экономическая эффективность, стендовые и эксплуатационные испытания

Для цитирования: Миронов А. Е., Гершман И. С., Крылов А. А., Мусерский П. О. Монометаллические моторно-осевые подшипники тепловозов: замена материала с бронзы на комплексно-легированный алюминиевый сплав // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 4. С. 330–338. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-330-338>.

✉ gershman.iosif@vniizht.ru (И. С. Гершман)

© Миронов А. Е., Гершман И. С., Крылов А. А.,
Мусерский П. О., 2022



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.4.23:673.8

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-330-338

EDN: <https://elibrary.ru/zfxyd1>



MONOMETALLIC MOTOR-AXIAL BEARINGS OF DIESEL LOCOMOTIVES: REPLACING BRONZE WITH COMPLEX ALUMINIUM ALLOY

Alexander E. Mironov, Iosif S. Gershman✉,
Anton A. Krylov, Prokopy O. Muserskiy

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Replacing the material of monometallic motor-axial bearings currently manufactured from bronze to aluminium alloy is advisable to improve traffic safety due to the higher reliability and efficiency of such bearings.

Materials and methods. This article studies the materials of monometallic motor-axial bearings, bronze and the proposed complex aluminium-tin alloys. Mechanical properties are determined by standard methods: tensile strength, relative elongation (ductility), Brinell hardness, impact strength. Antifriction properties (abradability, score resistance, wear resistance of the antifriction alloy and the steel associated with it, the heating temperature of the steel surface and the coefficient of friction) were determined according to the methods of the Railway Research Institute approved by JSC Russian Railways on the SMTs-2 friction machine. Bronze and three grades of aluminium alloys were tested with M-14V₂ diesel oil, and bronze, B16 babbitt and one grade of aluminium alloy were tested with axial oil.

Results. This research shows the possibility of replacing bronze with complex-alloyed aluminium alloys both in terms of economic indicators and antifriction properties. A comparison of mechanical properties is carried out, in most of which aluminium alloys are found superior or not inferior to bronze. The exception is ductility, in terms of which bronze surpasses the proposed alloys.

Discussion and conclusion. According to the complex of service characteristics obtained in laboratory studies, it seems expedient to replace bronze with complex aluminium antifriction alloy. The final decision on such a replacement could be made after bench and operational tests of motor-axial bearings on diesel locomotives.

KEYWORDS: motor-axial bearings of diesel locomotives, bronze, aluminium alloys, mechanical properties, antifriction properties, economic efficiency, bench and operational tests

For citation: Mironov A. E., Gershman I. S., Krylov A. A., Muserskiy P. O. Monometallic motor-axial bearings of diesel locomotives: replacing bronze with complex aluminium alloy. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(4):330-338. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-330-338>.

✉ gershman.iosif@vniizht.ru (I. S. Gershman)

© Mironov A. E., Gershman I. S., Krylov A. A.,
Muserskiy P. O., 2022

Введение. Среди нескольких типов моторно-осевых подшипников (МОП) широко распространены монометаллические вкладыши, изготовленные из бронзы марки БрО4Ц4С17 в соответствии с ГОСТ 613–79 [1]. По данным Н. М. Рудницкого [2], бронза этой марки наиболее подходит для литейного изготовления монометаллических подшипников скольжения, так как она менее других бронз изнашивается сама и минимально изнашивает стальное контртело при наличии прочности, достаточной для моторно-осевых подшипников. В работах [3–5] рассмотрены все возможные случаи условий эксплуатации данных бронзовых МОП. При этом особое внимание уделено работе бронзы в аварийных условиях, когда отмечается появление на стальной поверхности осей сетки трещин или даже полного разрушения оси по эффекту Ребиндера [6]. П. А. Ребиндер в начале XX в. открыл и теоретически обосновал эффект адсорбционного снижения прочности твердых тел под действием поверхностно-активных веществ. Н. А. Буше [7], основываясь на теории Ребиндера, доказал, что для стали таким поверхностно-активным веществом является расплавленная медь, а алюминий и его сплавы поверхностной активностью для стали не обладают. Было установлено, что при наличии растягивающих напряжений и расплавленной меди идет процесс проникновения меди по межзеренным границам в сталь. Чем больше образуется расплавленной меди, тем существеннее трещинообразование, вплоть до полного разрушения стальной детали. При меньшем количестве расплавленной меди образуются омедненные трещины, служащие концентраторами напряжений, от которых развиваются усталостные трещины, а наличие самих трещин повышает износ сопряженных деталей, в данном случае — вкладышей МОП.

Следовательно, замена материала МОП с бронзы на алюминиевый сплав целесообразна для безопасности движения, так как в этом случае омедненные трещины не образуются.

Бронзовые МОП смазываются осевым маслом с помощью польстера, что не может гарантировать гидродинамического режима трения при знакопеременных нагрузках [8–10], поэтому одним из основных требований к материалу подшипников является способность выдерживать эти нагрузки без разрушений [8, 9], т. е. обладать необходимым комплексом механических свойств.

В работах [2, 8, 11–14] сформулированы основные требования к антифрикционным материалам:

- достаточная усталостная прочность, выражающаяся в способности выдерживать знакопеременные нагрузки во всем диапазоне рабочих температур;
- низкий коэффициент трения в условиях смешанного и граничного трения;

- высокая износостойкость подшипникового материала и способность в минимальной степени изнашивать и повреждать стальную ось в аварийной ситуации;

- способность поглощать и удерживать посторонние твердые абразивные частицы без повреждения поверхности трения оси;

- высокая коррозионная стойкость в среде смазочного масла;

- способность компенсировать неточности изготовления и сборки за счет хорошей прирабатываемости;

- экономичность материала подшипника.

Очевидно, что некоторые из указанных требований противоречивы и в ряде случаев являются взаимоисключающими. Например, увеличение прочности и износостойкости материала обычно достигается повышением твердости, а это, в свою очередь, ведет к ухудшению прирабатываемости, снижает способность удерживать или поглощать абразив, а также приводит к увеличению износа стального контртела. Поэтому выбор материала подшипника является определением необходимых компромиссов для максимально возможного удовлетворения всех противоречивых требований, к ним предъявляемых, и получения наилучших соотношений цена/потребительские качества.

По мере снижения стоимости алюминия были проведены работы по замене бронз в монометаллических подшипниках на алюминиевые сплавы, легированные медью, сурьмой, никелем, железом и кремнием [5, 15]. Новые сплавы интенсивно изнашивали стальное контртело. Выход был найден применением сплавов системы Al–Sn–Cu [16, 17], но данные сплавы имеют ограниченную усталостную прочность. Высокая стоимость олова обусловила поиск других мягких металлов для алюминиевых сплавов, в первую очередь свинца [18, 19]. Эти сплавы имели значительную ликвацию элементов по высоте слитка.

В настоящее время наибольшее развитие получили разработки комплексно-легированных алюминиевых сплавов, таких как системы Al–Si–Cu–Sn–Pb, Al–Cu–Sn–Pb [20, 21], Al–Sn–Si–Cu–Bi, Al–Sn–Si–Cu–Pb–Bi [22], предложенные специалистами Московского института стали и сплавов (МИСиС) и Института проблем механики РАН (ИПМех РАН).

Авторами данной статьи в содружестве со специалистами МГТУ «СТАНКИН» разработана гамма сплавов системы Al–Sn–Pb–Cu–Si–Mg–Zn–Ti [23–25], способная, по мнению разработчиков, заменить бронзу БрО4Ц4С17 в качестве материала монометаллических МОП.

Материалы и методы. Химический состав бронзы марки БрО4Ц4С17 и трех исследуемых комплексно-легированных алюминиевых сплавов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав бронзы и исследуемых алюминиевых сплавов

Table 1

Chemical composition of bronze and the proposed aluminium alloys

№ п/п	Марка сплава	Содержание элементов, % масс.							
		Sn	Pb	Zn	Cu	Mg	Si	Ti	Al
1	Бронза БрО4Ц4С17	4,6	17,2	4,7	Ост.	—	—	—	—
2	Сплав А09М3,5Ц3С3МгКТ	8,7	3,2	2,9	3,4	0,4	0,5	0,03	Ост.
3	Сплав А06М2,5С2,5Ц4Мг1,5К1,5Т	5,8	2,7	4,1	2,3	1,5	1,5	0,04	Ост.
4	Сплав А05,5М3,5С2,5Ц2,5Мг1,5КТ	5,4	2,6	2,3	3,5	1,7	0,8	0,04	Ост.

Исследования антифрикционных свойств с осевым маслом «В» (всесезонным) проводились для бронзы, одного алюминиевого сплава и баббита Б16 (Pb + 16,2 % Sn + 16,1 % Sb + 1,9 % Cu), с дизельным маслом марки М-14В₂ — для бронзы и трех алюминиевых сплавов.

Сплавы выплавлялись в индукционных печах и разливались в чугунные изложницы. После отливки для снятия внутренних напряжений и глобулизации выделений легкоплавких фаз слитки подвергались отжигу при 350 °С в течение 3 ч с охлаждением на воздухе. Из термообработанных слитков изготавливались образцы. Твердость сплавов определялась по Бринеллю. Испытания на растяжение с определением предела прочности и относительного удлинения проводились по ГОСТ 1497–84 [26] на цилиндрических образцах диаметром $d_0 = 6$ мм и расчетной длиной $l_0 = 30$ мм.

Испытания на ударную вязкость образцов проводились в соответствии с ГОСТ 9454–78 [27] на образцах квадратного сечения 10×10×55 мм с U-образным надрезом глубиной 2 мм.

Все трибологические испытания сплавов и бронзы проводились по схеме «вал—колодка» на серийной машине СМЦ-2. Звездочки из антифрикционных материалов для проведения испытаний на прирабатываемость имели увеличенный до 22,5 мм радиус скругления рабочей поверхности, в то время как образцы для определения износо- и задиростойкости имели радиус 20 мм. В качестве контртела использовались стальные ролики радиусом 20 мм и шириной 10 мм. При испытаниях с маслом М-14В₂ они изготавливались из стали 38ХН3МА, а при работе с осевым всесезонным маслом — из осевой стали колесных пар тепловоза.

Масло М-14В₂ в процессе испытаний подавалось на стальной ролик капельным способом с интенсивностью две капли в минуту (0,02 л/ч), а смазывание осевым маслом «В» (всесезонным) производилось окунанием нижнего края стального ролика в масля-

ную ванну. В первом случае капельная смазка обеспечивала граничный режим, а во втором — смешанный режим смазывания.

Скорость вращения стального ролика во всех случаях испытаний составила 500 об/мин.

Испытания на прирабатываемость заключались в периодическом измерении фактической площади контакта трущихся поверхностей образца в процессе постепенного увеличения нагрузки. Нагрузка ступенчато увеличивалась через каждые 10 мин на 137–187 Н. Начальная нагрузка составляла 304 Н, а завершались испытания при нагрузке 1058 Н. За значение приработки принималось среднее значение площади пятна контакта по трем испытаниям.

При испытаниях на износостойкость каждая пара трения проходила этап приработки в течение 30 мин при нагрузке 304 Н до достижения контурной площади не менее 90–95 % от номинальной. После приработки колодка и ролик снимались с испытательной машины, промывались, обезжиривались, сушились и взвешивались. После повторной установки на СМЦ-2 испытания проводились в течение 40 ч при постоянной нагрузке (617 Н) и скорости вращения (500 об/мин). После 40 ч трения образцы повторно снимались, промывались, обезжиривались, сушились и взвешивались. Разница в весе после 40 ч трения в сравнении с весом после приработки показывала весовой износ колодки и ролика.

Испытания на задиростойкость начинали с нагрузки 304 Н, после чего через каждые 10 мин нагрузку ступенчато увеличивали на 97–147 Н. Испытания продолжались до нагрузки, при которой происходило скачкообразное повышение момента трения или появлялось интенсивное дымление масла. Данная нагрузка считалась моментом наступления задира, а среднее значение по трем испытаниям принималось за нагрузку заедания, характеризующую задиростойкость пары трения.

Результаты и обсуждение. Проведенные исследования показали, что варьируя химический состав

алюминиевых сплавов, можно в широких диапазонах изменять их механические и трибологические характеристики. При этом наиболее непонятная ситуация наблюдается с уровнем механических свойств бронзы и рассматриваемых алюминиевых сплавов (табл. 2). Так, по пределу прочности данные материалы имеют близкие показатели, а сплав А09М3,5Ц3С3МгКТ даже превосходит бронзу более чем на 10 %.

В то же время бронза значительно пластичнее всех трех алюминиевых сплавов и незначительно тверже. Ударная вязкость, характеризующая работу на зарождение и развитие трещин, может быть у алюминиевых сплавов как почти в 1,5–2 раза ниже, чем у бронзы, так и более чем в 2 раза превосходить бронзу (А09М3,5Ц3С3МгКТ). Это не позволяет заранее предугадать работоспособность алюминиевых МОП по сравнению с бронзовыми на основе сопоставления их механических свойств.

Трибологические испытания с дизельным маслом М-14В₂ (табл. 3) дают более однозначную картину в пользу алюминиевых антифрикционных сплавов. Все три рассматриваемых сплава превосходят бронзу по задиростойкости (в 2–2,5 раза), по прирабатываемости (до 25 %), по меньшему весовому износу антифрикционных материалов (до 6,75 раза), по меньшему износу стального контртела (в 5–6,5 раза).

При трении двух из трех алюминиевых сплавов нагрев стального контртела происходит слабее, чем с бронзой. Однако по значениям коэффициента трения бронза превосходит все три алюминиевых сплава. Данные эксперименты были проведены для проверки материалов монометаллических подшипников дизелей тепловозов (втулок компрессоров). Стендовые испытания опытной партии подшипников из алюминиевых сплавов подтвердили возможность замены ими бронзовых подшипников [22].

Таблица 2

Механические свойства бронзы и алюминиевых сплавов

Table 2

Mechanical properties of bronze and aluminium alloys

№ п/п	Механические свойства	Бронза БрО4Ц4С17	Сплав А09М3,5Ц3С3МгКТ	Сплав А06М2,5С2,5Ц4Мг1,5К1,5Т	Сплав А05,5М3,5С2,5Ц2,5Мг1,5КТ
1	Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	148	168	140	144
2	Относительное удлинение при растяжении σ_s , %	8,8	5,5	1,9	2,9
3	Твердость по Бринеллю, НВ	65	60	55	53
4	Ударная вязкость КСv, КДж/м ²	40	83	24	32

Таблица 3

Трибологические свойства бронзы и алюминиевых сплавов по результатам лабораторных трибологических испытаний с дизельным маслом марки М-14В₂

Table 3

Tribological properties of bronze and aluminium alloys according to the results of laboratory tribological tests with М-14V₂ diesel oil

№ п/п	Трибологическая характеристика	Бронза БрО4Ц4С17	Сплав А09М3,5Ц3С3МгКТ	Сплав А06М2,5С2,5Ц4Мг1,5К1,5Т	Сплав А05,5М3,5С2,5Ц2,5Мг1,5КТ
1	Нагрузка задира, Н	1081	2407	2330	2846
2	Прирабатываемость, мм ²	39	50	40	50
3	Износ материала, мг	2,7	2,4	0,4	0,5
4	Износ стального контртела, мг	4,0	0,8	0,6	0,7
5	Коэффициент трения	0,016	0,022	0,018	0,017
6	Нагрев поверхности стального контртела, °С	38	32	40	36

В моторно-осевом блоке тепловозов используются другие масла, наиболее распространенным из которых является осевое масло «В» (всесезонное), которое подается на ось польстером, обеспечивая более щадящий режим трения — смешанную, а не граничную смазку. Так как в настоящее время МОП имеют антифрикционный слой либо из баббита марки Б16, либо из бронзы БрО4Ц4С17, трибологические испытания с маслом осевым «В» были для сравнения проведены именно с этими материалами и со сплавом А09М3,5Ц3С3МгКТ, который имеет наилучший комплекс механических свойств, что чрезвычайно важно для материала монометаллического МОП. При этом данный сплав даже при трении с маслом М-14В₂ превосходит бронзу по задиристости, прирабатываемости, меньше изнашивает и нагревает стальное контртело. Результаты трибологических испытаний материалов при смазке осевым маслом «В» (всесезонным) приведены в табл. 4.

Смена масла и условий трения существенно изменила картину трибологических характеристик.

По сравнению с бронзой задиристость сплава А09М3,5Ц3С3МгКТ еще больше повысилась, а прирабатываемость относительно снизилась, но все равно осталась лучше, чем у бронзы. Следовательно, в аварийной ситуации вероятность задира уменьшилась. Ожидается уменьшение времени обкатки подшипников после их установки на тепловоз. С осевым маслом алюминиевый сплав стал меньше изнашиваться сам, причем разница с бронзой составила 15 раз. Однако при этом алюминиевый сплав в 3 раза больше, чем бронза, стал изнашивать стальное контртело, хотя коэффициент трения у него значительно снизился в сравнении с бронзой, а нагрев стали оказался на одном уровне с бронзой.

Не вызывает сомнения целесообразность замены материала МОП с бронзы на алюминиевый сплав с точки зрения экономичности. Ведь удельный вес алюминиевых сплавов ниже, чем у бронзы, почти в 2,5 раза, а стоимость единицы веса на 30–45% меньше (табл. 5). Соответственно, только благодаря этому стоимость одного вкладыша МОП снизится в 3–4 раза при такой замене.

Таблица 4

Трибологические свойства бронзы, баббита и алюминиевого сплава при работе с осевым маслом «В» (всесезонное)

Table 4

Tribological properties of bronze, babbitt and aluminium alloy when working with axle oil V (all-weather)

№ п/п	Трибологическая характеристика	Бронза БрО4Ц4С17	Баббит Б16	Сплав А09М3,5Ц3С3МгКТ
1	Нагрузка задира, Н	1201	936	2700
2	Прирабатываемость, мм ²	42	43	35
3	Весовой износ материала, мг	3,2	3,1	0,21
4	Весовой износ стального контртела, мг	5,0	15,0	4,6
5	Коэффициент трения	0,027	0,025	0,023
6	Нагрев поверхности стального контртела, °С	42	40	41

Таблица 5

Оценка физических свойств и экономических показателей трех алюминиевых сплавов относительно бронзы

Table 5

Evaluation of the physical properties and economic performance of three aluminium alloys relative to bronze

№ п/п	Показатель	Бронза БрО4Ц4С17	Сплав А09М3,5Ц3С3МгКТ	Сплав А06М2,5С2,5Ц4Мг1,5К1,5Т	Сплав А05,5М3,5С2,5Ц2,5Мг1,5КТ
1	Удельный вес, %	100	43	43	41
2	Стоимость единицы веса, %	100	70	55	56
3	Вес единицы продукции, %	100	43	43	41
4	Стоимость единицы продукции, %	100	30	24	23

Дополнительный эффект можно ожидать за счет уменьшения энергозатрат на плавку алюминиевого сплава, так как температура плавления алюминия на 300 °С ниже, чем у меди. Возможно получить экономию и при механической обработке данных сплавов, так как трудозатраты для алюминиевых сплавов обычно ниже, чем для бронз.

Кроме повышения безопасности эксплуатации при такой замене материалов можно ожидать и увеличения межремонтных пробегов и уменьшения сменяемости МОП в эксплуатации. Данный вывод обусловлен повышенными трибологическими свойствами сплавов.

Заключение. Авторы данной статьи считают, что представленные материалы доказывают возможность и целесообразность замены материала МОП с бронзы на комплексно-легированный алюминиевый сплав. При этом, как показывают итоги стендовых испытаний монометаллических подшипников скольжения турбокомпрессоров тепловозов из подобного сплава, необходимо установить оптимальные размеры масляного зазора между МОП и моторной осью, так как коэффициент линейного расширения алюминиевых сплавов значительно больше, чем у бронзы и, следовательно, при нагреве от трения такой зазор будет сильнее уменьшаться. Определить этот параметр можно при стендовых и эксплуатационных испытаниях. АО «ВНИИЖТ» приглашает к сотрудничеству все заинтересованные организации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 613–79. Бронзы оловянные литейные. Марки [Электронный ресурс]: дата введения 1980-01-01. URL: <https://rags.ru/gosts/gost/31486> (дата обращения: 12.09.2022).
- Рудницкий Н. М. Материалы автотракторных подшипников скольжения. М.: Машиностроение, 1965. 164 с.
- Никифоров В. А. Состав и свойства трущихся деталей из цветных металлов на тепловозах и повышение их качества с учетом структурной самоорганизации: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. М., 2003. 30 с.
- Миронов А. Е., Никифоров В. А. О качестве бронзовых вкладышей моторно-осевых подшипников тепловозов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2003. № 1. С. 35–40.
- Буше Н. А. Подшипниковые сплавы для подвижного состава. М.: Транспорт, 1967. 224 с.
- Ребиндер П. А., Лихтман В. А., Масленников В. В. Облегчение деформации металлических монокристаллов под влиянием адсорбции поверхностно-активных веществ // Доклады Академии наук СССР. 1941. Т. 32, № 2. С. 125.
- Буше Н. А. Трение, износ и усталость в машинах. М.: Транспорт, 1987. 223 с.
- Khonsari M. M., Booser E. R. Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication. 3rd Edition. New York: Wiley, 2017. 672 p.
- Основы трибологии (трение, износ, смазка): учеб. для технических вузов / А. В. Чичинадзе [и др.]; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. 2-е изд. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.

- Lorenz N., Offner G., Knaus O. Thermal analysis of hydrodynamic lubrication journal bearings in internal combustion engines // Proceedings of the Institution of mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics. 2017. Vol. 231 (3). P. 406–419. <https://doi.org/10.1177/146441931769387>.
- Скрябин В. А. Особенности применения подшипников скольжения в технологических машинах // Машиностроитель. 2015. № 8. С. 8–21.
- Анализ путей совершенствования и технологии изготовления подшипников коленчатого вала тепловозных дизелей / С. М. Захаров [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2015. № 6. С. 11–18.
- Захаров С. М., Никитин А. П., Загорянский Ю. А. Подшипники коленчатых валов тепловозных дизелей. М.: Транспорт, 1981. 181 с.
- Cheng K., Rowe W. B. A selection strategy for the design of externally pressurized journal bearings // Tribology International. 2007. Vol. 28, no. 7. P. 465–474. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(95\)00011-R](https://doi.org/10.1016/0301-679X(95)00011-R).
- Алюминиевые сплавы антифрикционного назначения / Н. А. Белов [и др.]; под ред. А. Е. Миронова [и др.]. М.: Изд. Дом «МИСиС», 2016. 222 с.
- Pratt G. C. Materials for plain bearings // International Metallurgical Reviews. 1973. Vol. 18 (2). P. 62–88.
- Буше Н. А. Трение, износ и усталость в машинах: Транспортная техника: учеб. для вузов ж.-д. транспорта. М.: Транспорт, 1987. 223 с.
- Рассадин Ю. А., Рудницкий Н. М., Авинян Ю. Л. Повышение качества алюминиевых антифрикционных сплавов введением в них свинца // Повышение качества и надежности биметаллических подшипников: [сб. ст.] / под ред. В. А. Ротенберга. М.: ЦНИИТЭИ Тракторсельхозмаш, 1992. С. 30–35. (Технология и автоматизация производственных процессов).
- Маркова Т. Ф. Антифрикционные материалы системы Al–Pb–Sn для подшипников скольжения транспортных дизелей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. М., 1986. 23 с.
- Tribological and Structural study of new aluminum based antifriction material / I. I. Kurbatkin [et al.] // Journal of Friction and Wear. 2014. Vol. 35, no. 2. P. 93–97. <https://doi.org/10.3103/S106836661402007X>.
- Phase composition and structure of aluminum Al–Cu–Si–Sn–Pb alloys / N. A. Belov [et al.] // The physics of metals and metallography. 2016. Vol. 117 (6). P. 570–587. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0031918X16040025>.
- Столярова О. О. Обоснование состава и структуры литейных антифрикционных алюминиевых сплавов, легированных легкоплавкими металлами: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. М., 2016. 217 с.
- Миронов А. Е., Котова Е. Г. Разработка новых марок литейных алюминиевых антифрикционных сплавов для замены бронз в узлах трения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. С. 1136–1140.
- Новые антифрикционные алюминиевые сплавы с повышенной способностью к адаптации при трении для монометаллических подшипников скольжения взамен бронз / С. Н. Григорьев [и др.]. М.: МГУ «СТАНКИН», 2021. 136 с.
- Новые антифрикционные алюминиевые сплавы для литых монометаллических подшипников скольжения. Стендовые испытания / А. Е. Миронов [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79, № 4. С. 217–223. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-4-217-223>.
- ГОСТ 1497–84 (ИСО 6892–84). Металлы. Методы испытаний на растяжение [Электронный ресурс]: дата введения 1986-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004888> (дата обращения: 12.09.2022).

27. ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах [Электронный ресурс]: дата введения 1979-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005045> (дата обращения: 12.09.2022).

REFERENCES

- GOST 613–79. Bronzy olovyannye liteynye. Marki [Tin foundry bronzes. Grades]. Introduction date: 1980-01-01. URL: <https://rags.ru/gosts/gost/31486> (access date: 12.09.2022). (In Russ.).
- Rudnitskiy N. M. Materialy avtotraktornykh podshipnikov skol'zheniya [Materials of autotractor plain bearings]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1965. 164 p. (In Russ.).
- Nikiforov V. A. Sostav i svoystva trushchikhysya detaley iz tsvetnykh metallov na teplovozhakh i povyshenie ikh kachestva s uchetom strukturnoy samoorganizatsii [Composition and properties of rubbing parts made of non-ferrous metals on diesel locomotives and improving their quality, taking into account structural self-organization]. Cand. of Sci (Engineering) thesis synopsis: 05.02.01. Moscow; 2003. 30 p. (In Russ.).
- Mironov A. E., Nikiforov V. A. O kachestve bronzovykh vkladyshey motorno-osevykh podshipnikov teplovozhov [On the quality of bronze liners of motor-axial bearings for diesel locomotives]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 2003;(1):35-40. (In Russ.).
- Bushe N. A. Podshipnikovyie splavy dlya podvizhnogo sostava [Bearing alloys for rolling stock]. Moscow: Transport Publ.; 1967. 224 p. (In Russ.).
- Rebinder P. A., Likhtman V. A., Maslennikov V. V. Oblegchenie deformatsii metallicheskih monokristallov pod vliyaniem adsorbtsii poverkhnostno-aktivnykh veshchestv [Facilitation of deformation of metal single crystals under the influence of adsorption of surface-active substances]. *Doklady Akademii nauk SSSR = Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 1941;32(2):125. (In Russ.).
- Bushe N. A. Trenie, iznos i ustalost' v mashinakh [Friction, wear and fatigue in machines]. Moscow: Transport Publ.; 1987. 223 p. (In Russ.).
- Khonsari M. M., Booser E. R. Applied Tribology: Vearing Design and Lubrication. 3rd Edition. New York: Wiley; 2017. 672 p.
- Chichinadze A. V., Braun E. D., Bushe N. A. et al. Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka) [Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication)]. Textbook. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2001. 664 p. (In Russ.).
- Lorenz N., Offner G., Knaus O. Thermal analysis of hydro-dynamic lubrication journal bearings in internal combustion engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics*. 2017;231(3):406-419. <https://doi.org/10.1177/146441931769387>. (In Russ.).
- Skryabin V. A. Osobennosti primeneniya podshipnikov skol'zheniya v tekhnologicheskikh mashinakh [Features of the use of plain bearings in technological machines]. *Mashinostroitel' = Mechanic Engineer*. 2015;(8):8-21. (In Russ.).
- Zakharov S. M., Mironov A. E., Ermolaev A. A., Skvortsov A. E. Analiz putey sovershenstvovaniya i tekhnologii izgotovleniya podshipnikov kolenchatogo vala teplovozhnykh dizeley [Analysis of ways to improve and the technology for the manufacture of crankshaft bearings for diesel locomotives]. *Tyazheloe mashinostroenie = Heavy Engineering*. 2015;(6):11-18. (In Russ.).
- Zakharov S. M., Nikitin A. P., Zagoryanskiy Yu. A. Podshipniki kolenchatykh valov teplovozhnykh dizeley [Bearings of crankshafts of diesel locomotives]. Moscow: Transport Publ.; 1981. 181 p. (In Russ.).
- Cheng K., Rowe W. B. A selection strategy for the design of externally pressurized journal bearings. *Tribology International*. 2007;28(7):465-474. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(95\)00011-R](https://doi.org/10.1016/0301-679X(95)00011-R).
- Belov N. A., Gershman E. I., Gershman I. S. et al. Alyuminievyie splavy antifriktsionnogo naznacheniya [Aluminum antifriction alloys]. Moscow: MISiS Publ.; 2016. 222 p. (In Russ.).
- Pratt G. C. Materials for plain bearings. *International Metallurgical Reviews*. 1973;18(2):62-88. (In Russ.).
- Bushe N. A. Trenie, iznos i ustalost' v mashinakh: Transportnaya tekhnika [Friction, wear and fatigue in machines: Transport technology]. Textbook. Moscow: Transport Publ.; 1987. 223 p. (In Russ.).
- Rassadin Yu. A., Rudnitskiy N. M., Avinyan Yu. L. Povyshenie kachestva alyuminievykh antifriktsionnykh splavov vvedeniem v nikh svintsa [Improving the quality of aluminum antifriction alloys by introducing lead into them]. Povyshenie kachestva i nadezhnosti bimetallicheskih podshipnikov [Improving the quality and reliability of bimetallic bearings]. Collection of articles, ed. by V. A. Rotenberg. Moscow: TsNIITEI Traktorsel'khoz mash Publ.; 1972. P. 30–35. (In Russ.).
- Markova T. F. Antifriktsionnye materialy sistemy Al–Pb–Sn dlya podshipnikov skol'zheniya transportnykh dizeley [Anti-friction Al–Pb–Sn materials for plain bearings of transport diesel engines]. Cand. of Sci. (Engineering) thesis synopsis: 05.02.01. Moscow; 1986. 23 p. (In Russ.).
- Kurbatkin I. I., Belov N. A., Ozerskiy O. N. et al. Tribological and Structural study of new aluminum based antifriction material. *Journal of Friction and Wear*. 2014;35(2):93-97. <https://doi.org/10.3103/S106836661402007X>.
- Belov N. A., Stolyarova O. O., Murav'eva T. I., Zagorskii D. L. Phase composition and structure of aluminum Al–Cu–Si–Sn–Pb alloys. *The physics of metals and metallography*. 2016;117(6):570-587. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0031918X16040025>.
- Stolyarova O. O. Obosnovanie sostava i struktury liteynykh antifriktsionnykh alyuminievykh splavov, legirovannykh legkoplavkami metallami [Substantiation of the composition and structure of cast antifriction aluminium alloys alloyed with low-melting metals]. Cand. of Sci. (Engineering) thesis: 05.16.01. Moscow; 2016. 217 p. (In Russ.).
- Mironov A. E., Kotova E. G. Razrabotka novykh marok liteynykh alyuminievykh antifriktsionnykh splavov dlya zameny bronz v uzlakh treniya [Development of new grades of cast aluminium antifriction alloys to replace bronzes in friction units]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Izvestia RAS SamSC)*. 2011;(13):1136-1140. (In Russ.).
- Grigor'ev S. N., Mironov A. E., Podrabinnik P. A. et al. Novye antifriktsionnye alyuminievyie splavy s povyshennoy sposobnost'yu k adaptatsii pri trenii dlya monometallicheskih podshipnikov skol'zheniya v zameny bronz [New antifriction aluminium alloys with increased ability to adapt to friction for monometallic plain bearings instead of bronzes]. Moscow: MGTU STANKIN Publ.; 2021. 136 p. (In Russ.).
- Mironov A. E., Antyukhin G. G., Gershman E. I. et al. Novye antifriktsionnye alyuminievyie splavy dlya litykh monometallicheskih podshipnikov skol'zheniya. Stendovye ispytaniya [New anti-friction aluminum alloys for cast monometallic plain bearings. Bench tests]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 2020;79(4):217-223. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-4-217-223>. (In Russ.).
- GOST 1497–84 (ISO 6892–84). Metally. Metody ispytaniya na rastyazhenie [Metals. Tensile test methods]. Introduction date: 1986-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004888> (access date: 12.09.2022). (In Russ.).
- GOST 9454–78. Metally. Metod ispytaniya na udarnyy izgib pri ponizhennykh, komnatnoy i povyshennykh temperaturakh [Metals. Test method for impact bending at low, room and elevated temperatures]. Introduction date: 1979-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005045> (access date: 12.09.2022). (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Евгеньевич МИРОНОВ,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, научный центр «Электрификация и теплоэнергетика», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 987209, <https://orcid.org/0000-0002-4406-145X>

Иосиф Сергеевич ГЕРШМАН,

д-р техн. наук, главный научный сотрудник, научный центр «Электрификация и теплоэнергетика», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 600051, <https://orcid.org/0000-0002-6370-1440>

Антон Александрович КРЫЛОВ,

директор научного центра «Электрификация и теплоэнергетика», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1140127, <https://orcid.org/0000-0001-9473-5435>

Прокопий Олегович МУСЕРСКИЙ,

ведущий технолог, научный центр «Электрификация и теплоэнергетика», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1147285, <https://orcid.org/0000-0001-6038-3435>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander E. MIRONOV,

Cand. of Sci. (Engineering), Leading Researcher, Electrification and Thermal Power Engineering Researcher Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 987209, <https://orcid.org/0000-0002-4406-145X>

Iosif S. GERSHMAN,

Dr. of Sci. (Engineering), Chief Researcher, Electrification and Thermal Power Engineering Researcher Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 600051, <https://orcid.org/0000-0002-6370-1440>

Anton A. KRYLOV,

Director of the Electrification and Thermal Power Engineering Researcher Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1140127, <https://orcid.org/0000-0001-9473-5435>

Prokopi O. MUSERSKIY,

Leading Technologist, Electrification and Thermal Power Engineering Researcher Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10,

3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1147285, <https://orcid.org/0000-0001-6038-3435>

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Евгеньевич МИРОНОВ. Проведение механических и трибологических испытаний и адаптация изложения в структуру статьи (45%).

Иосиф Сергеевич ГЕРШМАН. Формирование научной концепции статьи, анализ технической литературы (30%).

Антон Александрович Крылов. Определение структуры и логики подачи материала, формирование выводов (10%).

Прокопий Олегович Мусерский. Работа с массивом данных, химический анализ (15%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexander E. MIRONOV. Carrying out mechanical and tribological tests and adapting the presentation to the structure of the article (45%).

Iosif S. GERSHMAN. Formation of the scientific concept of the article, analysis of technical literature (30%).

Anton A. KRYLOV. Determination of the structure and logic of the presentation of the material, formulating conclusions (10%).

Prokopi O. MUSERSKIY. Working with the data array, chemical analysis (15%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 19.09.2022, рецензия от первого рецензента получена 05.10.2022, рецензия от второго рецензента получена 10.11.2022, принята к публикации 14.11.2022.

The article was submitted 19.09.2022, first review received 05.10.2022, second review received 10.11.2022, accepted for publication 14.11.2022.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

На сайте www.elibrary.ru открыт доступ к электронным версиям статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта».

Для работы с фондами библиотеки пользователю необходимо самостоятельно зарегистрироваться, заполнив регистрационную форму на главной странице eLibrary.ru. Доступ возможен по Вашему логину и паролю с любого компьютера, имеющего выход в интернет.

Материалы журнала, размещенные на сайте Научной электронной библиотеки для свободного использования, допускается использовать, копировать, цитировать исключительно в некоммерческих целях с соблюдением соответствующих положений действующего авторского законодательства (Гражданский кодекс РФ от 18.12.2006 № 230-ФЗ, Часть IV; Глава 70 «Авторское право») с обязательным указанием имени автора/ов произведения и источника заимствования.

На сайте журнала www.journal-vniizht.ru контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.