

# Разработка и внедрение биметаллических подшипников скольжения из алюминиевых сплавов

А. Е. МИРОНОВ<sup>1</sup>, Г. С. ФОКС-РАБИНОВИЧ<sup>2</sup>, К. М. РАКОВ<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Университет Макмастера, Гамильтон, 1280, Канада

**Аннотация.** Проанализирован комплекс работ школы трибологического материаловедения, созданной Н.А. Буше, по разработке и внедрению на железнодорожном транспорте и других отраслях промышленности биметаллических подшипников скольжения с антифрикционным слоем из алюминий-оловянных сплавов. Показаны преимущества алюминиевых сплавов над бронзами на примере подшипников коленчатого вала тепловозов. Рассмотрены разнообразные способы повышения ресурса и надежности алюминиевых антифрикционных материалов. Показаны принципы применения разработанных данной школой теорий совместимости трущихся пар и самоорганизации трущихся поверхностей при разработке новых антифрикционных материалов.

**Ключевые слова:** биметаллические подшипники скольжения; алюминий-оловянные антифрикционные сплавы; бронзы; надежность; износостойкость; совместимость; самоорганизация

**Введение.** Школа трибологического материаловедения, созданная Н.А. Буше во ВНИИЖТе, являлась многие десятилетия ведущей в нашей стране в области разработки и внедрения подшипников скольжения с антифрикционными слоями из алюминий-оловянных сплавов.

Воссоздав в 1959 г. лабораторию цветных металлов во ВНИИЖТе, Н.А. Буше сумел собрать в ней разносторонних специалистов, способных решать все вопросы по цветным металлам и сплавам из них для деталей и узлов трения железнодорожной техники и инфраструктуры. Но, безусловно, любимым детищем Н.А. Буше были алюминий-оловянные сплавы и подшипники из них. Актуальность этих исследований не исчезла и до настоящего времени. Подобные сплавы широко разрабатываются и в России [1, 2], и в ряде зарубежных стран [3–6].

**Производство подшипников.** Первым шагом по внедрению биметаллических сталеалюминиевых подшипников коленчатого вала была замена на них бронзо-баббитовых вкладышей дизелей типа Д100. Эти работы проводились на заводе тяжелого машиностроения им. Малышева (г. Харьков, Украина) [7, 8], который оборудовал ими более 3000 дизелей, в том числе 69

дизелей были оборудованы полным комплектом шатунных и коренных сталеалюминиевых подшипников. На остальных были установлены только шатунные вкладыши. Это было обусловлено не только разными требованиями к шатунным и коренным подшипникам, но и большей толщиной коренных, для которых были необходимы более толстые заготовки.

Для производства такого подката на существовавших тогда заводах просто не хватало мощностей пресов. Выход из этой ситуации был найден с помощью Института гидроимпульсной техники СО РАН и его дочернего предприятия — ООО «МАТЕМ» (г. Новосибирск). Был предложен технологический процесс производства заготовок вкладышей с использованием энергии взрыва, когда подкат из плакированного алюминий-оловянного сплава соединялся со стальной пластиной взрывом [9]. Использование этой технологии не только позволило получать заготовки вкладышей практически любой толщины, но и обеспечивало повышение прочности соединения слоев биметалла.

Эти результаты были получены после многочисленных экспериментов и исследований. Было показано, что необходимо строго соблюдать рецептуру взрывчатого вещества и его количество. Специальными методами удалось смягчить воздействие взрывной волны таким образом, чтобы она очищала соединенные поверхности, но не создавала условий для образования интерметаллидов в переходном слое.

Производство вкладышей и их установка на дизели типа Д100 были освоены на Улан-Удэнском локомотивовогоремонтном заводе и Даугавпилсском локомотиворемонтном заводе (Латвия). Их эксплуатация проходила на Северной, Южно-Уральской, Свердловской, Московской железных дорогах, на БАМе, а также в странах СНГ. Замена бронзово-баббитовых подшипников на сталеалюминиевые увеличила ресурс вкладышей более чем в 4 раза за счет снижения износа и повышения усталостной прочности антифрикционного слоя.

Вторым шагом стало внедрение сталеалюминиевых подшипников взамен сталебронзовых для дизелей

типа Д49. Производство таких вкладышей освоили Улан-Удэнский ЛВРЗ, Запорожский механический завод (Украина), ОАО «Завод подшипников скольжения» (г. Тамбов). Первоначально наибольшее количество вкладышей производилось по сложной цепочке: алюминиево-оловянный подкат, изготовленный Заволжским моторным заводом или Тамбовским заводом подшипников скольжения, поступал на «МАТЕМ», где его взрывали на сталь и из полученных биметаллических карточек гнули заготовки. Эти заготовки поступали на НПО «Сатурн» (г. Рыбинск), где был организован специальный цех по выпуску продукции для железнодорожного транспорта. Из Рыбинска готовые вкладыши поступали на Воронежский тепловозоремонтный завод для установки на дизели магистральных тепловозов серии 2ТЭ116.

Всего биметаллическими сталеалюминиевыми вкладышами было оборудовано около 500 дизелей типа Д49. Благодаря замене сталебронзовых вкладышей на сталеалюминиевые срок службы последних увеличился в 2 раза — с 300 тыс. до 600 тыс. км пробега, а в отдельных случаях даже до 800 тыс. км. При этом уменьшились трудозатраты на текущие ремонты ТР-3 на 20% за счет возможности их проведения без подъема коленчатых валов и замены коренных подшипников.

В настоящее время основным поставщиком сталеалюминиевых вкладышей для дизелей типа Д49 является ОАО «Завод подшипников скольжения» (г. Тамбов). Но, к сожалению, их основными покупателями являются транспортные цеха крупных промышленных предприятий, а железнодорожный транспорт не использует эту возможность в полной мере.

Для маневровых тепловозов, оборудованных дизелями К6С310DR, сталеалюминиевые вкладыши изготавливает Мичуринский локомотиворемонтный завод («МИЛОРЕМ»). Ранее он использовал для этого полуфабрикаты, изготовленные на ТЗПС, а в настоящее время он переориентировался на биметалл, изготовленный в Китае. Этим заводом сталеалюминиевыми вкладышами было оборудовано более 300 дизелей. Ни один из них не имел внеплановых ремонтов или аварийных ситуаций по вине сталеалюминиевых вкладышей. Досрочное изъятие их из эксплуатации было связано с нарушением режимов работы, наиболее частым из которых являлось обводнение смазки.

Вкладыши менее мощных дизелей типа 14Д40 (11Д45) изготавливались Уссурийским локомотиворемонтным заводом, Мичуринским ЛРЗ, Даугавпилсским ЛРЗ, а в настоящее время основную массу этой продукции выпускает ТЗПС. Такая же ситуация с вкладышами дизеля 12VFE, освоенными Великолукским локомотиворемонтным заводом и ТЗПС.

**Научное сопровождение разработки и внедрения сталеалюминиевых подшипников.** Лаборатория цветных металлов ВНИИЖТа, руководимая Н. А. Буше,

принимала участие во всех этапах работ по созданию и совершенствованию сталеалюминиевых подшипников для железнодорожной техники. Практически каждый из десятков сотрудников лаборатории в той или иной мере принимал участие в этой тематике. Существенный вклад в исследования внесли аспиранты, руководимые Н. А. Буше, 15 из которых защитили свои диссертации на темы, связанные со сталеалюминиевыми сплавами и подшипниками из них.

В начальный период исследований школа Н. А. Буше научно обосновала выбор сплавов для дизельных подшипников скольжения [7]. Был доказан недостаточный уровень триботехнических свойств сплава А9-2 (алюминий +9% олова + 2 % кремния +1% меди). Для шатунных вкладышей был рекомендован сплав АО20-1, а для вкладышей коренных — сплавы АО30-1 и АО40-1. Проверялись различные дополнительные легирующие добавки в эти сплавы (цинк, индий, кадмий, висмут). На Михайловском заводе цветных металлов совместно со специалистами ГИПРОЦМО была отработана технология производства подката и биметаллической ленты.

Эксплуатация сталеалюминиевых подшипников коленчатого вала выявила проблемы с задиристостью сплава АО20-1 по сравнению со свинцовистой бронзой, или, если точнее сказать, с триметаллическими подшипниками, состоящими из стального корпуса, бронзового антифрикционного слоя и тонкого мягкого гальванического покрытия, называемого приработочным слоем. На самом деле основные триботехнические характеристики обеспечиваются именно этим приработочным слоем, и при обнажении 30% бронзового слоя такие подшипники подлежат замене.

Для обеспечения в начальный период работы высоких противозадиристых свойств сплава АО20-1 были предложены несколько путей. Первый — это нанесение дополнительного приработочного покрытия на основе дисульфида молибдена. Была опробована большая гамма покрытий, и лучшие результаты показала полимерная суспензия МС2000 [10].

Второй метод, разработанный лабораторией цветных металлов, — это обработка рабочей поверхности сплава АО20-1 раствором щелочи. При этом алюминий протравливается, а олово остается целым. При оптимальном режиме возможно получить двукратное повышение содержания олова на поверхности трения, что равнозначно применению сплава АО40-1 в период приработки [10].

Благодаря проведению большого комплекса исследований были разработаны новые режимы обкаточных испытаний тепловозов, оборудованных сталеалюминиевыми подшипниками. Научно обоснованные режимы позволили сократить время приработки пар трения с получением более качественных сопряженных поверхностей. Это привело не только к

уменьшению расхода топлива при обкатке, но и к снижению количества задиров в этот период.

Н. А. Буше лично, с выездом на место, разобрался с повышенным количеством задиров подшипников на Байкало-Амурской магистрали в холодное время года. Оказалось, что в ряде депо запуск двигателя производили с неподогретым маслом, без достаточно надежной его прокачки в масляной системе. Недостаточное количество масла в зоне трения в пусковой период не обеспечивало надлежащий режим трения и, как следствие, часто приводило к задирам. Рекомендации, данные Николаем Александровичем, позволили устранить такие случаи.

Исследования коленчатых валов, работавших в аварийных условиях со сталеалюминиевыми подшипниками, показали, что даже при задирах в валах не образуются трещины, как это происходит при задирах со сталебронзовыми вкладышами. Алюминиево-оловянные сплавы не являются для стали поверхностно-активными веществами в отличие от медных сплавов. Работами Н. А. Буше и его учеников показано, что при аварийной ситуации достаточно образования даже одной капли расплавленной меди и растягивающих напряжений для образования трещины по границам зерен стальной детали [11]. При больших количествах расплавленной меди может образоваться сетка трещин или одна магистральная трещина, способная разрушить такую массивную деталь, как коленчатый вал. Но даже если вал не разрушился, его дальнейшая эксплуатация становится невозможной, если омедненные трещины не удастся удалить шлифованием или проточкой.

При этом проявляется еще одно преимущество алюминиево-оловянных сплавов над свинцовистой бронзой. Многочисленные эксперименты показали, что алюминиево-оловянные сплавы одинаково успешно могут работать с термообработанными и «сырыми» стальными и чугунными валами, в то время как для свинцовистых бронз обязательной является химико-термическая обработка шеек валов. Если такой упрочненный слой на шейке вала изнашивается, то для работы со сталебронзовыми подшипниками необходимо провести повторную химико-термическую обработку стали. Для алюминиево-оловянных сплавов этого не требуется. Поэтому вал можно только перешлифовать

для устранения неровностей и нарушений геометрии шейки без дополнительного упрочнения. Компенсация износа вала производится увеличением толщины вкладыша. В этом случае вал можно перетачивать и перешлифовать несколько раз и применять все более толстые градационные подшипники. В отличие от бронзы, применение градационных сталеалюминиевых подшипников не ухудшает работоспособность узла трения.

**Разработка новых антифрикционных сплавов на алюминиевой основе.** Основным параметром, по которому алюминиево-оловянные сплавы, содержащие более 12% олова, уступают свинцовой бронзе, является предельно допускаемая нагрузка на антифрикционный слой. Для подшипников со слоем бронзы БрО1С22 она составляет 600–650 кгс/см<sup>2</sup>, в то время как для сплава АО20-1 — только 450–475 кгс/см<sup>2</sup>.

Проведенными исследованиями было показано, что решить эту задачу возможно путем замены олова на свинец. Школой Н. А. Буше было предложено несколько составов алюминиево-свинцовых сплавов, полученных с применением технологии магнитной гидродинамики и прессования гранул [12]. Такие материалы имели равномерное распределение свинца в алюминиевой матрице, что обеспечивало стабильно высокий комплекс триботехнических характеристик. Однако изготовление подшипников из таких материалов оказалось технологически сложным и экономически невыгодным.

Решение данной задачи было найдено в 90-х гг. XX в. благодаря применению теорий совместимости трущихся пар и самоорганизации трущихся поверхностей. Было решено усложнить легирование антифрикционных алюминиевых сплавов для повышения вероятности создания наиболее выгодных вторичных структур на поверхности трения. При этом учитывались эксплуатационные и технологические особенности по требованиям к материалам тонких антифрикционных слоев биметаллических подшипников скольжения. Такие материалы должны легко прокатываться до толщины 2 мм, иметь твердость не выше 40 НВ, а в их структуре не должно быть твердых и прочных включений размером более 0,05 мм.

Таким требованиям отвечали новые, разработанные ВНИИЖТом [13, 14] совместно с заводами-из-

Таблица 1

Составы новых алюминиевых антифрикционных сплавов

Table 1

Compositions of new aluminum antifriction alloys

| Марка сплава | Содержание элементов, % массы |         |         |         |         |           |         |           |           |           |      |
|--------------|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|-----------|---------|-----------|-----------|-----------|------|
|              | Sn                            | Pb      | Cu      | Zn      | Ni      | Bi        | Si      | Ti        | Mg        | Mn        | Al   |
| АО20-1       | 17,0–23,0                     | —       | 0,7–1,2 | < 0,25  | —       | —         | < 0,5   | 0,02–0,2  | —         | —         | Ост. |
| АО10С2       | 9,0–12,0                      | 1,5–3,5 | 0,5–1,2 | 0,2–0,5 | —       | —         | 0,7–1,5 | 0,01–0,20 | —         | —         | Ост. |
| АО11С3       | 9,–12,0                       | 1,5–3,5 | 1,5–4,0 | 0,1–0,5 | 0,5–2,0 | 0,10–0,30 | 0,4–1,5 | 0,01–0,20 | 0,01–0,03 | 0,01–0,05 | Ост. |

готовителями сплавы системы Al-Sn-Pb-Cu-Zn-Si-Ti (АО10С2) и Al-Sn-Pb-Cu-Zn-Ni-Bi-Si-Ti-Mg-Mn (АО11С3), чьи составы представлены в табл. 1.

Стендовые сравнительные испытания натуральных вкладышей, выполненные Минским моторным заводом, Заволжским моторным заводом и ТЗПС, показали, что сплав АО10С2 имеет значение допустимой нагрузки в пределах 625–650 кгс/см<sup>2</sup>, а сплав АО11С3 – 750–800 кгс/см<sup>2</sup>.

Поверка антифрикционных свойств новых сплавов в сравнении со сплавом АО20-1 показала высокий уровень их триботехнических свойств (табл. 2).

Все три сплава имели максимальную нагрузку задания 1660 Н. Сплавы АО20-1 и АО10С2 одинаково изнашивали стальное контртело, а сплав АО11С3 изнашивал его на 20% интенсивнее.

Из-за недостаточной износостойкости сплава и повышенного износа стального контртела сплав АО11С3 в настоящее время практически не применяется. По данным, полученным от ТЗПС в 2015 г., подшипники со сплавом АО20-1 составляют 50% его продукции, а со сплавом АО10С2 – более 30%. При этом спрос на сплав АО10С2 с каждым годом увеличивается.

**Заключение.** Идеи, заложенные Н. А. Буше, в настоящее время продолжает уже четвертое поколение его школы трибологического материаловедения. Его ученики за последние годы разработали новые сложнослойные сплавы, способные заменить антифрикционные бронзы в монометаллических подшипниках скольжения. Ими предложены сплавы системы Al-Sn-Pb-Cu-Zn-Si-Mg-Ti, превосходящие бронзу в 2–2,5 раза по износостойкости, по прирабатываемости – на 20–45%, по собственной износостойкости – на 20–40% и в 4–6 раз меньше изнашивающие стальное контртело [15, 16].

Эти сплавы прочнее и тверже сплавов АО20-1 и АО10С2, и в их структуре имеется значительное количество твердых включений. Поэтому новые сплавы нельзя прокатывать и невозможно их применение в биметаллических подшипниках. Однако они имеют хорошие литейные свойства и могут использоваться для литых монометаллических подшипников сложной формы. В настоящее время проведены стендовые испытания подшипников турбокомпрессоров дизеля, показавшие высокое качество экспериментальных сплавов в сравнении с качественной бронзой марок БрО10С10 и БрО8С12, из которых сейчас изготавливаются эти ответственные детали.

Хочется надеяться, что идеи Н. А. Буше еще долгие годы будут вдохновлять все новых и новых исследователей, а школа трибологического материаловедения порадует нас новыми разработками.

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

Таблица 2

Результаты сравнительных испытаний алюминиевых антифрикционных сплавов

Table 2

The results of comparative tests of anti-friction aluminum alloys

| Материал | Время до возникновения задира, мин | Линейный износ при сухом трении, мм | Критическая температура перехода в режим смешанного трения, °С |
|----------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| АО20-1   | 38                                 | 0,20                                | 160                                                            |
| АО10С2   | 180                                | 0,20                                | 180                                                            |
| АО11С3   | 200                                | 0,28                                | 180                                                            |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трибологические и структурные исследования новых антифрикционных материалов на основе алюминия / И. И. Курбаткин [и др.] // Трение и износ. 2014. № 2. С. 52–57.
2. Носкова Н. И., Коршунов Л. Г., Корзников А. В. Микроструктура и трибологические свойства сплавов Al-Sn, Al-Sn-Pb, Sn-Sb-Cu после пластической деформации // Металловедение и термическая обработка металлов. 2008. № 12. С. 34–40.
3. Chen, Shu. Effect of tin on the crystallization of monotectic alloy Al-Pb / Shu Chen, Jinzhou Zhao // Jinshu xuebao. Acta met sin. 2014. Vol. 50. No. 5. pp. 561–566.
4. Ling-yong, Cao. Effect of zinc supplementation in the Al-Mg-Si Cu alloys on their microstructure and mechanical properties. / Cao Ling-yong, Cai Yuan-hua, Cui Hua, Zhahg Ji-Shan // Beijing Keji daxue xuebao. J. Univ. Sei. And Technol—Beijing. 2013. Vol. 35. No. 8, pp. 1040–1045.
5. Chen Xiao. Tezhong zhuzao ji youse hejin / Xiao Chen, Huang Sheng, Wu Rongzhao//Spec. Cast. And Nonferrous alloys, 2012–32—№ 4—p. 306–310.
6. Salam, F. Abd El. Effect of Sn content on the structural and mechanical properties of Al-Si alloy./F. Abd El-Salam, A. M. Abd El-Khalek, R. H. Nada, L. A. Wahab, N. Y. Zahran// Mater. Sci. and Engineering. A—2010-. Vol 527—p. 1223–1229.
7. Буше Н. А. Подшипниковые сплавы для подвижного состава. М.: Транспорт, 1967. 224 с.
8. Подшипники из алюминиевых сплавов / Н. А. Буше [и др.]. М.: Транспорт, 1974. 256 с.
9. Буше Н. А., Злобин Б. С., Миронов А. Е. Новая технология производства биметалла для подшипников скольжения с использованием энергии взрыва // Синергетика. Новые технологии получения и свойства металлических материалов: тезисы докладов 2-го Всесоюзного симпозиума по металлическим материалам. АН СССР, 1991. С. 34–35.
10. Шумицкий А. В., Фролов В. К., Буше Н. А. Формирование прирабаточных слоев для биметаллических подшипников со сплавом АО20-1// Вестник ВНИИЖТ. 2001. № 1. С. 69–76.
11. Буше Н. А. Трение, износ и усталость в машинах. Транспортная техника. М.: Транспорт, 1987. 186 с.
12. Буше Н. А., Мудренко Г. А., Маркова Т. Ф. Композиционные материалы с мягкой структурной составляющей // Трение и износ. 1982. № 3. С. 396–400.
13. Буше Н. А., Миронов А. Е., Маркова Т. Ф. Новый антифрикционный сплав АО10С2 // Тяжелое машиностроение. 2006. № 10. С. 27–29.
14. Буше Н. А., Миронов А. Е., Маркова Т. Ф. Новый алюминиевый сплав, заменяющий традиционные материалы // Железные дороги мира. 2003. № 11. С. 44–47.
15. Исследование микроструктуры и механических свойств экспериментальных антифрикционных сплавов (для монометаллических подшипников скольжения) / Е. Г. Котова [и др.] // Цветные металлы. 2013. № 5. С. 66–72.
16. Сравнение износостойкости новых антифрикционных алюминиевых сплавов и традиционных антифрикционных бронз / А. Е. Миронов [и др.] // Трение и износ. 2015. Т. 36. № 3. С. 334–339.



## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### МИРОНОВ Александр Евгеньевич,

канд. техн. наук, ведущий специалист, АО «ВНИИЖТ»

### ФОКС-РАБИНОВИЧ Герман Симонович,

д-р техн. наук, старший научный сотрудник, Университет Макмастера

### РАКОВ Константин Михайлович,

(1938 – 2016 гг.), канд. техн. наук, ученик Н. А. Буше.

С 1961 по 1980 г. — сотрудник лаборатории цветных металлов ВНИИЖТ. Специалист в области металловедения цветных металлов и сплавов, антифрикционных сплавов и технологии производства биметалла.

Статья поступила в редакцию 10.05.2016 г., принята к публикации 12.08.2016 г.

## Development and implementation of bimetallic sliding bearings made of aluminum alloys

A. E. MIRONOV<sup>1</sup>, G. S. FOX-RABINOVICH<sup>2</sup>, K. M. RAKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

<sup>2</sup>McMaster University, Hamilton, 1280, Canada

**Abstract.** The article analyses complex of works of the school of tribological materials science, founded by N. A. Bushe, on development and implementation of bimetallic sliding bearings with antifriction layer from aluminum-tin alloys in railway transport and other industries. Advantages of the aluminum alloys over bronze on the example of the crankshaft bearings of diesel locomotives are shown. Various ways to improve the service life and reliability of aluminum antifriction materials are considered. Article also shows the principles of application of the theories of compatibility of the friction pairs, developed by this school, as well as self-organization of the friction surfaces when developing new antifriction materials. The results of the application of the theory of self-organization to friction showed that the complexity of doping antifriction alloys enables forming favorable secondary structures. The use of up to nine alloying elements instead of three ones, has greatly improved the tribological properties of the aluminum alloys and reduces the tin content. As a result, new anti-friction monometallic aluminum alloys for slide bearings have been developed. Bench tests have shown that the bearings are made from these alloys can successfully replace bronze bearings. The use of aluminum alloys instead of bronze in slide bearings not only reduces wear of bearing and wear of steel shaft, but also reduces the probability of scoring and completely get rid of the shaft destroyed as a result of scoring.

**Keywords:** bimetallic sliding bearings; aluminum-tin alloys; antifriction alloys; bronze; reliability; wear resistance; compatibility; self-organization

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-5-278-282>

## REFERENCES

1. Kurbatkin I. I., Belov N. A., Ozerskiy O. N., Murav'eva T. I., Stolyarova O. O., Alabin A. N. *Tribologicheskie i strukturnye issledovaniya novykh antifriktsionnykh materialov na osnove alyuminiya* [Tribological and structural studies of new anti-friction aluminum based materials]. *Trenie i iznos* [Friction and wear], 2014, no. 2, pp. 52 – 57.
2. Noskova N. I., Korshunov L. G., Korznikov A. V. *Mikrostruktura i tribologicheskie svoystva splavov Al-Sn, Al-Sn-Pb, Sn-Sb-Cu posle plasticheskoy deformatsii* [Microstructure and tribological properties of Al-Zn, Al-Sn-Pb, Sn-Sb-Cu alloys after plastic deformation]. *Metallavedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallography and heat treatment of metals], 2008, no. 12, pp. 34 – 40.
3. Chen Shu, Jinzhou Zhao. *Effect of tin on the crystallization of monotectic alloy Al-Pb*. Jinshu xuebao. *Acta met sin.* 2014, Vol. 50, no. 5, pp. 561 – 566.
4. Cao Ling-yong, Cai Yuan-hua, Cui Hua, Zhahg Ji-Shan. *Effect of zinc supplementation in the Al-Mg-Si Cu alloys on their microstructure and mechanical properties*. Beijing Keji daxue xuebao, J. Univ. Sei. And Technol — Beijing. 2013, Vol. 35, no. 8, pp. 1040 – 1045.
5. Chen Xiao. *Tezhong zhuzao ji youse hejin*, Xiao Chen, Huang Sheng, Wu Rongzhao, *Spec. casting and nonferrous alloys*, 2012, Vol. 32, no. 4, pp. 306 – 310.
6. Salam, F. Abd El. *Effect of Sn content on the structural and mechanical properties of Al-Si alloy*, F. Abd El-Salam, A. M. Abd El-Khalek, R. H. Nada, L. A. Wahab, N. Y. Zahran, *Mater. Sci. and Engineering. A*, 2010, Vol 527, pp. 1223 – 1229.
7. Bushe N. A. *Podshipnikovye splavy dlya podvizhnogo sostava* [Bearing alloys for rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1967, 224 p.

8. Bushe N. A., Gulyaev A. S., Dvoskina V. A., Rakov K. M. *Podshipniki iz alyuminievykh splavov* [Bearings made of aluminum alloys]. Moscow, Transport Publ., 1974, 256 p.

9. Bushe N. A., Zlobin B. S., Mironov A. E. *Novaya tekhnologiya proizvodstva bimetallo dlya podshipnikov skol'zheniya s ispol'zovaniem energii vzryva* [New technology for the production of bimetal for sliding bearings using the energy of the explosion], *Sinergetika. Novye tekhnologii polucheniya i svoystva metallicheskih materialov. Tezisy dokladov 2-go Vsesoyuznogo simpoziuma po metallicheskim materialam* [Synergetics. New technologies and properties of metallic materials. Abstracts of the 2nd All-Union Symposium on metallic materials]. Kyiv, the Academy of Sciences of USSR Publ., 1991, pp. 34 – 35.

10. Shumitskiy A. V., Frolov V. K., Bushe N. A. *Formirovanie pri-rabotochnykh sloev dlya bimetallicheskih podshipnikov so splavom AO20-1* [Formation of the running-in layers for bimetal bearings with the alloy AO20-1]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2001, no. 1, pp. 69 – 76.

11. Bushe N. A. *Trenie, iznos i ustalost' v mashinakh* [Friction, wear and fatigue in machinery]. *Transportnaya tekhnika* [Transport machinery], Moscow, Transport Publ., 1987, 186 p.

12. Bushe N. A., Mudrenko G. A., Markova T. F. *Kompozitsionnye materialy s myagkoy strukturnoy sostavlyayushchey* [Composite materials with mild structural component]. *Trenie i iznos* [Friction and wear], 1982, no. 3, pp. 396 – 400.

13. Bushe N. A., Mironov A. E., Markova T. F. *Novyy antifriktsionnyy splav AO10S2* [New anti-friction alloy AO10S2]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy engineering], 2006, no. 10, pp. 27 – 29.

14. Bushe N. A., Mironov A. E., Markova T. F. *Novyy alyuminievy splav, zamenyayushchiy traditsionnye materialy* [A new aluminum alloy that replaces traditional materials]. *Zheleznnye dorogi mira* [World railways], 2003, no. 11, pp. 44 – 47.

15. Kotova E. G., Kurbatkin I. I., Mironov A. E., Gershman I. S. *Issledovanie mikrostruktury i mekhanicheskikh svoystv eksperimental'nykh antifriktsionnykh splavov (dlya monometallicheskih podshipnikov skol'zheniya)* [Study on microstructure and mechanical properties of experimental anti-friction alloys (for monometallic sliding bearings)]. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2013, no. 5, pp. 66 – 72.

16. Mironov A. E., Gershman I. S., Ovechkin A. V., Gershman E. I. *Sravnienie zadirostoystki novykh antifriktsionnykh alyuminievykh splavov i traditsionnykh antifriktsionnykh bronz* [Comparison of score resistance of new anti-friction aluminum alloys and traditional anti-friction bronzes]. *Trenie i iznos* [Friction and wear], 2015, Vol. 36, no. 3, pp. 334 – 339.

## ABOUT THE AUTHORS

### MIRONOV Aleksander Evgen'evich,

Cand. Sci.(Eng.), Leading Engineer, JSC "VNIIZhT"

### FOX-RABINOVICH German Simonovich,

Dr. Sci.(Eng.), Chief Researcher, McMaster Manufacturing Research Institute, McMaster University, Hamilton, Canada

### RAKOV Konstantin Mikhaylovich,

(1938 – 2016), Cand. Sci.(Eng.), N. A. Bushe's apprentice

From 1961 to 1980 — expert in laboratory of non-ferrous metals of VNIIZhT. Specialist in the field of metallurgy of non-ferrous metals and alloys, antifriction alloys and bimetal technology.

Received 10.05.2016

Accepted 12.08.2016

■ E-mail: isgershman@gmail.com (A. E. Mironov)