

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ШАРНИРНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ ЗА СЧЁТ АЗОТИРОВАНИЯ

© 2025 В.Б. Балякин¹, А.А. Филиппов², Д.Е. Долгих¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва,
г. Самара, Россия

² Вологодский завод специальных подшипников, г. Вологда, Россия

Статья поступила в редакцию 14.04.2025

В настоящей статье описана методика определения интенсивности изнашивания сфер шарнирных сферических подшипников. Приведены результаты определения коэффициента интенсивности изнашивания в паре трения сталь ШХ-15 и ЭИ347 с различным видом термохимической обработки. Экспериментальные значения коэффициента интенсивности изнашивания были аппроксимированы в виде степенной аналитической зависимостями относительно контактных напряжений. Погрешность аппроксимации не превышала 20%.

Полученные зависимости позволят определять значения износа материала с учётом изменения максимальных контактных напряжений. Применение азотирования сферы шарнирных подшипников повышает их долговечность.

Ключевые слова: шарнирные подшипники, шарик, азотирование, износ.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-40-45

EDN: MWODBE

ВВЕДЕНИЕ

Коэффициенты трения скольжения и интенсивности изнашивания играют существенную роль в сферических шарнирных подшипниках [1], для обеспечения низкого момента сопротивлению вращению и заданного ресурса [2]. В связи с этим необходимо иметь достоверные сведения о значении коэффициентов трения скольжения и интенсивности изнашивания для различных материалов, из которых изготавливаются детали подшипников [3,4,5]. При повышенных коэффициентах трения скольжения важно добиваться их снижения за счёт различных технологических мероприятий [6,7]. Одним из таких мероприятий является азотирование поверхностей деталей [8]. Известно, что азотирование снижает коэффициенты трения [9] и коэффициент интенсивности изнашивания при наличии азотированного слоя на поверхности контактирующих поверхностей деталей [10]. Важно оценить влияние азотирования на интенсивность изнашивания шариков из стали ЭИ 347 наиболее часто применяющихся в шарнирных подшипниках аэрокосмического применения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Экспериментальная установка - автоматизированная машина трения Tribometer TRB (см. рис. 1) позволяет провести испытания образца, максимально приближенные к реальным условиям при работе подшипника, такие как материалы, находящиеся в контакте, скорость скольжения, смазка, контактное напряжение, температура.

С её помощью можно производить измерения силы трения как в режиме линейного возвратно-поступательного, так и вращательного движений. Прибор стандартно оснащен персональным компьютером с установленным программным обеспечением для управления и анализа данных TriboX.

При работе трибометра сфера, штифт или плоская поверхность рабочего элемента - индентора прижимается к поверхности испытываемого образца, причем величина усилия очень точно определена тарированными грузами. Индентор установлен на упругом рычаге, передающим усилие без трения. Во время испытаний определяется сила трения путем измерения прогиба упругого рычага трибометра, которое пересчитывается в коэффициент трения. Коэффициенты износа материалов шара и диска рассчитываются исходя из потерь объема материала в процессе испытаний. Этот простой метод позволяет исследовать процесс трения и произвести оценку износа комбинаций почти всех твердых материалов с применением или без применения смазывающего вещества. Более того,

*Балякин Валерий Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой основ конструирования машин.
E-mail: 029-029@mail.ru*

Филиппов Александр Александрович, заместитель Генерального директора.

Долгих Дмитрий Евгеньевич, аспирант.



Рисунок 1 - Внешний вид установки Tribometer TRB

контроль при испытании таких параметров как скорость, частота измерений, контактное давление, времени и параметров окружающей среды (температуры, влажности, наличие или отсутствие смазки) позволяют моделировать реальные рабочие условия с возможностью накопления информации.

Величина контактных напряжений обеспечивалась подбором тарированных грузов и определялась программным комплексом прибора. Например, груз в 1Н, как показано на рисунке 2 обеспечивал максимальные контактные напряжения 485 МПа.

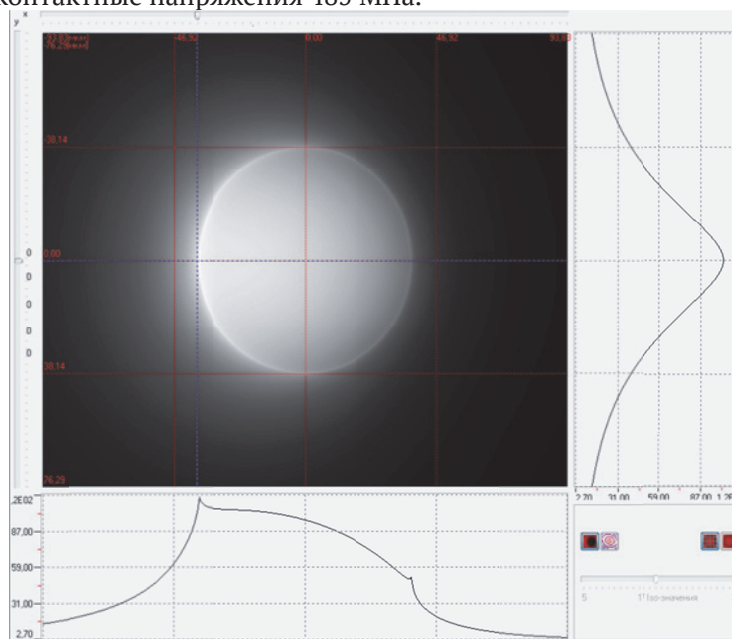


Рисунок 2 - Распределение давления и пятно контакта при нагрузке 1Н

Шарик из стали диаметром 9,525 мм устанавливался в держатель и со скоростью 1 м/с скользил по кольцу. Длительность испытаний устанавливалась в виде длины пути $S=100...1000$ м.

Все испытания проводились при одинаковых значениях температуры окружающей среды в 20°C и влажности 52%.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АЗОТИРОВАНИЯ ШАРИКОВ ИЗ СТАЛИ ЭИ 347 НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ И ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНОСА

Для сравнения определялись коэффициенты трения закалённого шарика из стали ЭИ 347 и азотированного в паре со сталью ШХ-15.

На рисунке 3 показано влияние азотирования подшипниковой стали ЭИ347 на коэффициент трения сталь по стали.

Из графика видно, что азотирование поверхности стальных шариков из стали ЭИ 347 снижает коэффициент трения скольжения сталь по стали на 5%...8%.

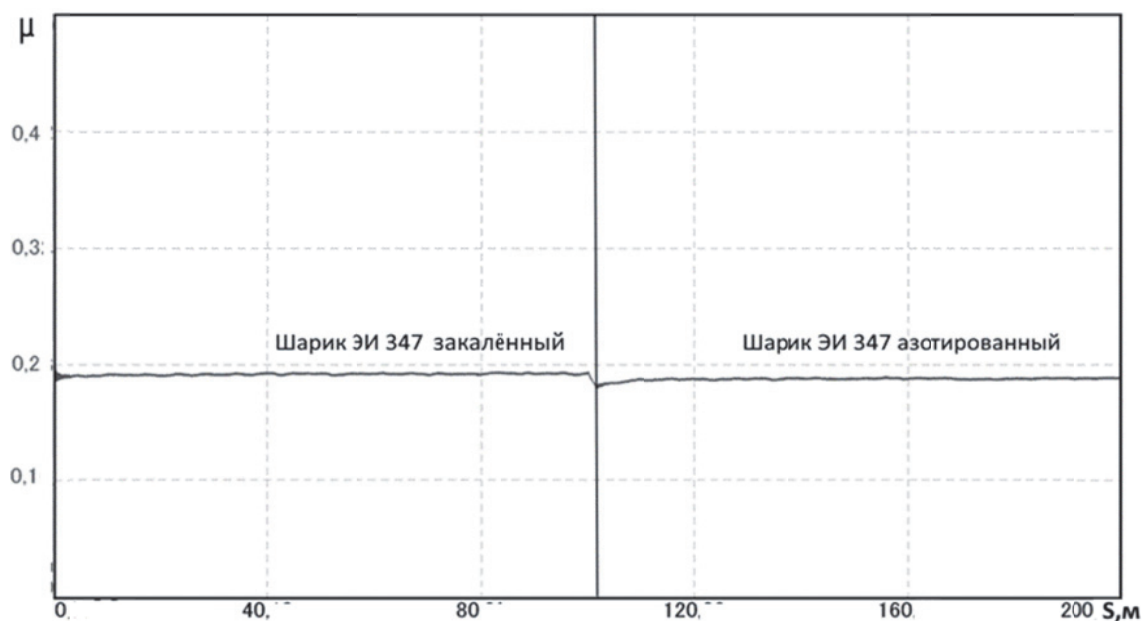


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента трения μ для закалённого шарика из ЭИ 347 и азотированного от длины пробега S

Для сравнения интенсивности износа испытаниям подвергались шарики из стали 8Х4В9Ф2-Ш (ЭИ-347) закалённые и азотированные. В качестве контр тела использовались закалённые кольца из стали ШХ-15. Испытания проводились без смазки при разных нагрузках для получения зависимости коэффициента интенсивности изнашивания от максимальных контактных напряжений. Максимальные контактные напряжения задавались дискретно в виде значений 250,310,360,485,610,700 и 830 МПа, за счёт использования имеющихся тарированных грузов трибометра. Длина пробега при испытаниях выбиралась в зависимости от величины нагрузки таким образом, чтобы площадь износа после испытаний была приблизительно одинаковой. Каждый из шариков подвергался испытаниям при соответствующих максимальных напряжениях.

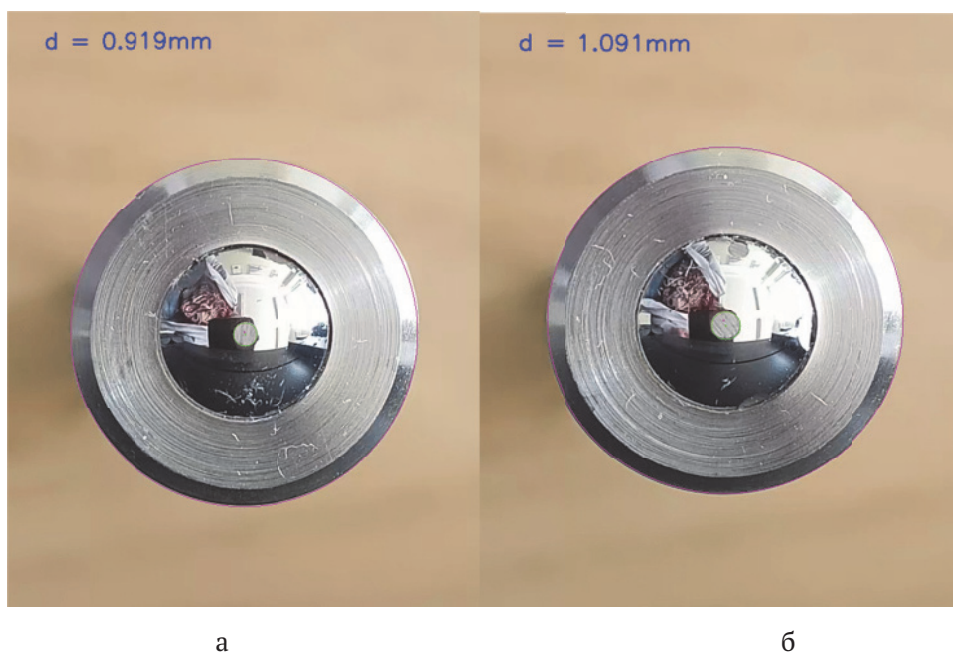


Рисунок 4 - Вид области износа при максимальных контактных напряжениях 360 МПа:
а - азотированного шарика, б - закалённого шарика

После чего на инструментальном микроскопе измерялся диаметр области износа материала в 16 сечениях. Затем определялось среднее значение и среднее квадратичное отклонение. По известной методике[5] определялся объём изношенного материала по зависимости

$$V_c = \pi \int_{R-h}^R (R^2 - x^2) dx = \pi(R^2 x - x^3/3)R/(R-h) = \pi h^2(R-h/3),$$

здесь $h = R - \sqrt{R^2 - r^2}$, где R – радиус шарика, r – радиус пятна износа.

Рассчитанное значение объёма изношенного материала делилось на величину пробега и считывался коэффициент интенсивности изнашивания I и его среднеквадратичное отклонение для каждого значения максимальных контактных напряжений.

Полученные значения интенсивности изнашивания были нанесены на график (рисунок 5) в зависимости от максимальных контактных напряжений. Для каждой точки были построены эллипсы рассеяния возможных значений при вероятности 0,99. Для чего по оси абсцисс откладывалась полуось размером три величины среднеквадратичного отклонения коэффициента интенсивности изнашивания, а по оси ординат погрешность определения контактных напряжений, которая определялась погрешностью тарировки грузов трибометра. Полученные графики были аппроксимированы кривыми, проходящими через эллипсы рассеяния всех точек. Погрешность аппроксимации не превышает 20%. Эти кривые были описаны соответствующими аналитическими зависимостям, в виде степенной функции и представлены на рисунке 5.

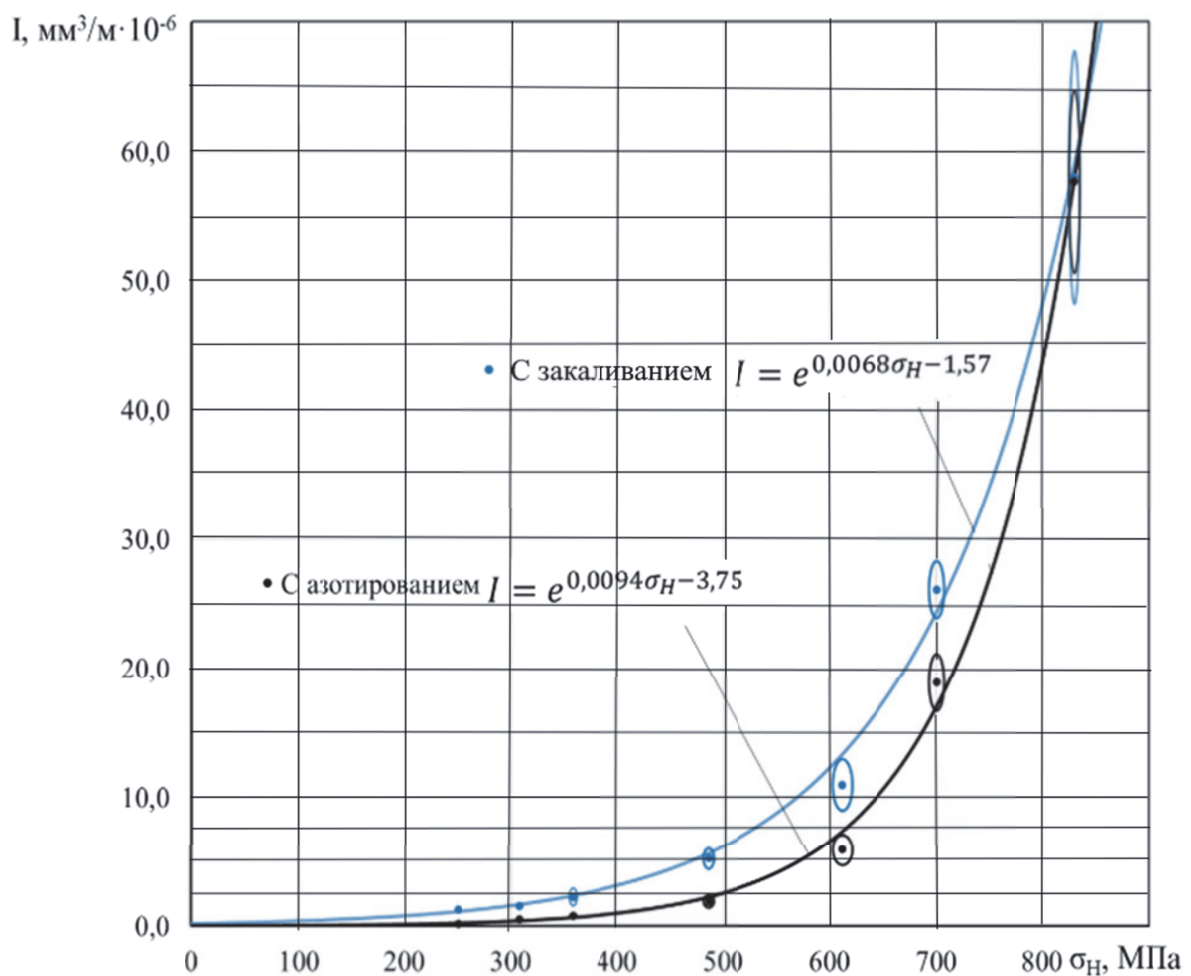


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента интенсивности изнашивания шариков из стали ЭИ 347 с различной термообработкой в зависимости от максимальных контактных напряжений

Экспериментальные данные показывают, что при азотировании существенно снижается интенсивность изнашивания по сравнению с закалённой сталью до 85% при максимальных контактных напряжениях в 250 МПа. С увеличением контактных напряжений эффект от азотирования в виде снижения интенсивности изнашивания уменьшается. Происходит снижение интенсивности изнашивания на 67% при 310 МПа, на 64% при 360 МПа, на 62% при 485 МПа, на 48% при 610 МПа и при максимальных контактных напряжениях 700 МПа при азотировании по сравнению с закалкой составляет только 28%. При значениях 830 МПа эффект от азотирования исчезает полностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Азотирование поверхности стальных шариков из стали ЭИ 347 снижает коэффициент трения скольжения сталь по стали на 5%...8%.

Применение азотирования сферы для шарнирного сферического подшипника даёт эффект в виде снижения интенсивности изнашивания при низких контактных напряжениях до 85%. С увеличением максимальных контактных напряжений эффект от азотирования снижается и при напряжениях более 830 МПа этот эффект полностью исчезает. Полученные результаты исследования влияния азотирования стали ЭИ347 и аппроксимированные аналитические зависимости позволяют более точно оценивать долговечность шарнирных подшипников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог 2012. ЕРК. Дивизион специальных подшипников. – Самара, Изд-во ОАО «ЕПК Самара», 2012. – 54 с.
2. Дроздов, Ю.Н. Прикладная трибология (трение, износ, смазка) [Под ред. Ю.Н. Дроздова] / Ю.Н. Дроздов, Е.Г. Юдин, А.И. Белов. – М.: Эко-Пресс, 2010. – 604 с.
3. Чернец, М. Трибоанализ антифрикционных материалов на основе полиамидов для металлополимерных подшипников скольжения / М. Чернец, С. Шилько, А. Корниенко, М. Пашечко // Трение и износ. – 2023. – Т. 44. – № 2. – С. 103–113.
4. Адамов, А.А. Оценка работоспособности ПТФЭ-композиатов в качестве антифрикционных слоев опорных частей с шаровым сегментом / А.А. Адамов, И.Э. Келлер, Д.С. Петухов и др. // Трение и износ. – 2023. – Т. 44, № 3. – С. 201–211.
5. Бабак, В.П. Антифрикционные наноструктурные стеклокомпозиционные самосмазывающиеся покрытия / В.П. Бабак, В.В. Щепетов, С.Д. Харченко // Трение и износ 2022. – Т.43. – №3. – С.327–335.
6. Балякин, В.Б. Триботехнические характеристики антифрикционного материала на основе серебра с добавлением дисульфида молибдена / В.Б. Балякин, А.А. Филиппов, Д.Е. Долгих // Трение и износ. – 2024. – Т. 45. – № 5. – С. 449–454.
7. Балякин, В.Б. Улучшение триботехнических характеристик поверхности антифрикционного материала на основе серебра за счёт модификации графитом с целью повышения долговечности шарнирных подшипников / В.Б. Балякин, А.А. Филиппов, Д.Е. Долгих // Известия Самарского научного центра РАН. – 2024. – Т. 26. – № 4. – С. 26–34.
8. Ковалева, М.Г. Триботехнические свойства покрытий на основе углерода и углерода, легированного азотом, полученных импульсным вакуумно-дуговым методом / М.Г. Ковалева, А.Я. Колпаков, А.И. Поплавский, М.Е. Галкина, Ж.В. Герус, Р.А. Любушкин, М.В. Мишунин // Трение и износ 2018. – Т. 39. – №4. – С.433–437.
9. Балякин, В.Б. Влияние азотирования поверхности сталей на их триботехнические свойства и долговечность подшипников / В.Б. Балякин, А.А. Филиппов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2025. – Т. 27. – № 1. – С. 5–11.
10. Белов, Д.С. Сравнение стойкости ионно-плазменных вакуумно-дуговых покрытий Ti-Al-Ni-N и Ti-Al-Ni-Mo-N к изнашиванию и эрозии / Д.С. Белов, В.С. Сергевнин, И.В. Блинков, Н.И. Смирнов, А.В. Черногор // Трение и износ. – 2020. – Т.41. – № 2. – С.136–144.

INCREASED WEAR RESISTANCE OF ARTICULATED SPHERICAL BEARINGS DUE TO NITRIDING

© 2025 V.B. Balyakin¹, A.A. Filippov², D.E. Dolgikh¹

¹ Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

² Vologda Special Bearings Plant, Vologda, Russia

This article describes a technique for determining the wear intensity of the spheres of articulated spherical bearings. The results of determining the coefficient of wear intensity in a friction pair of steel SHX-15 and EI347 with various types of thermochemical treatment are presented. The experimental values of the coefficient of wear intensity were approximated in the form of a power-law analytical relationship with respect to contact stresses. The approximation error did not exceed 20%. The obtained dependences will allow us to determine the wear values of the material, taking into account changes in the maximum contact stresses. The use of nitriding in the sphere of articulated bearings increases their durability.

Keywords: articulated bearings, ball, nitriding, wear.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-40-45

EDN: MWODBE

REFERENCES

1. Katalog 2012. ERK. Divizion special'nyh podshipnikov. – Samara, Izd-vo OAO «EPK Samara», 2012. – 54 s.
2. Drozdov, Yu.N. Prikladnaya tribologiya (trenie, iznos, smazka) [Pod red. Yu.N. Drozdova] / Yu.N. Drozdov, E.G. Yudin, A.I. Belov. – M.: Eko-Press, 2010. – 604 s.
3. Chernec, M. Triboanaliz antifrikcionnyh materialov na osnove poliamidov dlya metallopolimernykh podshipnikov skol'zheniya / M. Chernec, S. Shil'ko, A. Kornienko, M. Pashechko // Trenie i iznos. – 2023. – T. 44. – № 2. – S. 103–113.
4. Adamov, A.A. Ocenka rabotosposobnosti PTFE-kompozitov v kachestve antifrikcionnykh sloev opornykh chastej s sharovym segmentom / A.A. Adamov, I.E. Keller, D.S. Petuhov i dr. // Trenie i iznos. – 2023. – T. 44, № 3. – S. 201–211.
5. Babak, V.P. Antifrikcionnye nanostrukturnye steklokompozicionnye samosmazyvayushchiesya pokrytiya / V.P. Babak, V.V. Shchepetov, S.D. Harchenko // Trenie i iznos 2022. – T.43. – №3. – S.327-335.
6. Balyakin, V.B. Tribotekhnicheskie harakteristiki antifrikcionnogo materiala na osnove serebra s dobavleniem disul'fida molibdena / V.B. Balyakin, A.A. Filippov, D.E. Dolgih // Trenie i iznos. – 2024. – T. 45. – № 5. – S. 449-454.
7. Balyakin, V.B. Uluchshenie tribotekhnicheskikh harakteristik poverhnosti antifrikcionnogo materiala na osnove serebra za schyot modifikacii grafitom s cel'yu povysheniya dolgovechnosti sharnirnykh podshipnikov / V.B. Balyakin, A.A. Filippov, D.E. Dolgih // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2024. – T. 26. – № 4. – S. 26-34.
8. Kovaleva, M.G. Tribotekhnicheskie svojstva pokrytij na osnove ugleroda i ugleroda, legirovannogo azotom, poluchennykh impul'snym vakuumno-dugovym metodom / M.G. Kovaleva, A.Ya. Kolpakov, A.I. Poplavskij, M.E. Galkina, Zh.V. Gerus, R.A. Lyubushkin, M.V. Mishunin // Trenie i iznos 2018. – T. 39. – №4. – S.433-437.
9. Balyakin, V.B., Vliyanie azotirovaniya poverhnosti stalej na ih tribotekhnicheskie svojstva i dolgovechnost' podshipnikov / V.B. Balyakin, A.A. Filippov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2025. – T. 27. – № 1. – S. 5-11.
10. Belov, D.S. Sravnenie stojkosti ionno-plazmennyykh vakuumno-dugovykh pokrytij TI-AL-NI-N i TI-AL-NI-MO-N k iznashivaniyu i erozii / D.S. Belov, V.S. Sergevnin, I.V. Blinkov, N.I. Smirnov, A.V. Chernogor // Trenie i iznos. – 2020. – T.41. – № 2. – S.136-144.