

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.771.07

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОДШИПНИКОВЫХ ОПОР ПРОКАТНЫХ КЛЕТЕЙ «КВАРТО» ПРИ ИХ ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ

Пузик Е.А.¹, Жиркин Ю.В.¹, Филатов А.А.²

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

² ГНЦ «ВНИИМЕТМАШ», Москва, Россия

Аннотация. В данной статье рассмотрены вопросы технического обслуживания прокатных клетей «кварт», приведены данные о техническом обслуживании производственных объектов данной сферы ОАО «ММК», описана методика по установлению влияния различных смазочных материалов на ресурс подшипников качения, приведены результаты расчётов, позволяющие осуществить выбор оптимального класса вязкости смазочного материала, в определённых производственных условиях увеличивающего долговечность работы подшипниковых узлов исследуемых объектов.

Ключевые слова: подшипниковые опоры прокатных клетей, долговечность подшипников качения, техническое обслуживание подшипниковых опор.

Введение

Долговечность подшипников качения является комплексной характеристикой влияния различных факторов, среди которых особое место занимают условия их эксплуатации. Подшипники качения (ПК) прокатных клетей подвержены значительным нагрузкам при высоких скоростях качения, в результате чего развиваются высокие температуры, что способствует их перегреву и последующему отказу. Так, на сегодняшний день средний ресурс подшипников качения наиболее нагруженной 5 рабочей клети стана-тандем 2000 холодной прокатки по данной причине составляет 4711 ч, что ведёт к существенным затратам на поддержание оборудования в работоспособном состоянии. Решение проблем повышения ресурса подшипниковых опор прокатных клетей «кварт» отражено в ряде работ [1–4] и связано с изменением конструктивного исполнения каналов подвода смазочного материала и режима его подачи в подшипники качения.

Материалы и методы исследования

В данной статье решается задача повышения ресурса подшипниковых опор в процессе их технического обслуживания путём применения минерального масла класса вязкости, обеспечивающего

минимальное тепловыделение в нагруженной зоне контакта подшипников качения опор валков рабочих клетей «кварт». Согласно ГОСТ 18322-78 «Система технического обслуживания и ремонта. Термины и определения» техническое обслуживание (ТО) – это комплекс операций по поддержанию работоспособности или исправности изделия при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании.

ТО подшипниковых опор предполагает решение следующих вопросов:

- 1) выбор определённой системы смазывания ПК опор валков;
- 2) выбор режима подачи смазочного материала (СМ);
- 3) выбор марки СМ.

Вопросы применения различных систем смазывания и выбора режима смазывания, как правило, представлены в рекомендациях изготовителей подшипников качения, таких как FAG, SKF, NSK, TIMKEN, SNC, Koyo, Kluber lubrication.

На стане-тандем 2000 холодной прокатки ОАО «ММК» техническое обслуживание подшипниковых опор валков прокатных клетей осуществляется автоматизированной системой смазывания «масло-воздух», особенностью которой является дозированная подача минерального масла в узел трения. Точечная доставка

смазочного материала в дозируемых количествах при высоких физических и температурных нагрузках является основой для их широкого использования при техническом обслуживании подшипниковых опор. Кроме того, изготовители подшипников – FAG, SKF, NSK, TIMKEN, SNC, Коуо и другие рекомендуют использование именно этой системы смазывания.

Вопрос выбора определённой марки СМ в конкретных условиях эксплуатации остаётся открытым, хотя и существуют рекомендации, выданные фирмами-изготовителями подшипников качения. Однако в данных рекомендациях, как правило, указывается диапазон классов вязкости (КВ) с последующим установлением конкретного КВ в процессе эксплуатации.

Так, например, в настоящее время для смазывания подшипниковых опор рабочих и опорных валков 1–5 клетей стана 2000 холодной прокатки (ХП) применяется минеральное масло Mobilgear 320 класса вязкости 320.

Но оно, как показала практика, не является оптимальным. Выбор соответствующего КВ СМ определяется возможностью реализации в подшипниках качения опор валков прокатных клетей режима эластогидродинамической (ЭГД) смазки, что рассматривалось в работах [5, 6]. Проявление же термоэффекта входной зоны на контакте ведёт к интенсивному тепловыделению, которое зависит от вязкости смазочного материала, поступающего в зону контакта.

Поэтому важно знать значения температуры смазочного слоя в нагруженной зоне подшипника качения, которая и определяет фактическую вязкость смазочного материала на контакте и соответственно условия реализации режима эластогидродинамической смазки.

С этой целью было проведено исследование характеристик смазочного материала различных классов вязкости в нагруженной зоне подшипника качения.

Исследование проводилось на испытательном стенде кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Данный стенд позволяет моделировать условия работы подшипников качения, установленных на производственных объектах, путём создания идентичных нагрузок и скоростей качения в контакте. Основным критерием подобия на данном стенде является толщина масляной пленки, разделяющей трущиеся поверхности, величина которой одинакова для подшипников качения, установленных на испытательном стенде, и подшипников качения, установленных на

производственных объектах [7].

На данном стенде моделировались условия на контакте, в подшипниках качения рабочих валков прокатных клетей «кварт» и, в частности, в прокатных клетях №1, 2, 3 стана-тандем 2000 ХП ОАО «ММК».

Согласно [8] момент трения в подшипнике качения находится по формуле

$$M = M_1 + M_2, \quad (1)$$

где M_1 – момент трения, зависящий от типа подшипника и смазочного материала; M_2 – зависит от нагрузки на подшипник.

Момент M_1 ($\text{Н} \cdot \text{мм}$), достигающий значительной величины при высокой частоте вращения и относительно небольших нагрузках, возникает в основном от гидродинамических потерь в смазке:

$$\text{при } vn \geq 2000 \quad M_1 = 10^{-7} \cdot f_0(vn)^{2/3} \cdot D_0^3. \quad (2)$$

Для исследования были выбраны минеральные масла следующих марок: ИР 100 КВ 100, ТНК 522 КВ 220, Mobilgear 320 КВ 320, 460ПВ КВ 460. Данные марки смазочного материала наиболее широко применяются для смазывания ПК в условиях производства.

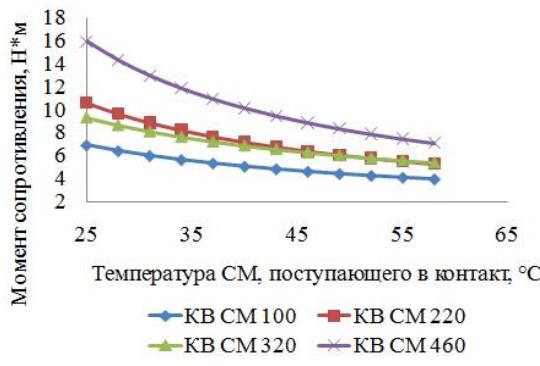
Исследования проводились на двух различных скоростных режимах при числе оборотов приводного вала ЭУ 514 и 1400 об/мин, что обеспечивало формирование суммарных скоростей качения в подшипнике качения ЭУ 2,9 и 7,2 м/с, которые соответствуют суммарной скорости качения в подшипниках качения опор рабочих валков исследуемых объектов.

Подача смазочного материала осуществлялась порционно в объёме 10–20 мл каждые 2–3 мин.

Эксперимент проводился сериями. Каждая серия состояла из трёх экспериментов с использованием одного и того же смазочного материала и сохранением суммарной скорости качения в подшипнике.

В ходе проведения эксперимента с течением времени происходил постепенный разогрев подшипникового узла, что вело к изменению его теплового состояния и, соответственно, отражалось на величине момента сопротивления смазочного материала, как следствие, изменения вязкости на контакте трущихся поверхностей с изменением температуры.

Экспериментальные значения были аппроксимированы кривыми с величиной достоверности аппроксимации, варьируемой от 85,8 до 98,7%, которые представлены на **рис. 1**.



a

Рис. 1. Зависимость момента сопротивления смазочного материала в нагруженной зоне подшипника качения от температуры, с которой он подаётся в зону контакта

Полученные значения момента сопротивления СМ в ПК позволяют определить фактическую вязкость СМ и соответствующую ей температуру из зависимости

$$v_\phi = M^{3/2} \cdot K,$$

где $K = (n^{2/3} \cdot f_0 \cdot 10^{-7} \cdot D_0^3)^{-3/2}$. (3)

Значение фактической кинематической вязкости с учётом давления на контакте по зависимости Баруса (3):

$$v_\phi = v_t e^{\alpha \rho}, \quad (4)$$

где v_ϕ – вязкость смазочного материала на контакте трещущихся поверхностей в подшипнике качения в условиях его нагружения, $\text{мм}^2/\text{с}$, при давлении ρ , МПа; D_0 – средний диаметр подшипника, мм; f_0 – коэффициент, зависящий от типа подшипника и условий смазки; n – частота вращения подшипника, мин^{-1} , α – пьезокоэффициент вязкости СМ, $1/\text{МПа}$.

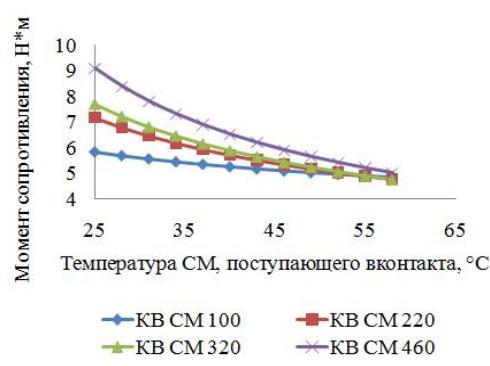
Для определения пьезокоэффициента вязкости существует эмпирическая формула Вустера, устанавливающая зависимость пьезокоэффициента от вязкости смазочного материала при соответствующей температуре:

$$\alpha = (0.6 + \lg v_t) \cdot 10^{-2}. \quad (5)$$

Производя соответствующие преобразования зависимостей (3)–(5):

$$v_{t\phi} = e^N; \quad (6)$$

$$N = \frac{1.5 \cdot \ln M + \ln K - 0.0006\rho}{\left(\frac{0.01 \cdot \rho}{\ln 10} + 1 \right)}.$$



б

Для определения фактической температуры на контакте в ПК воспользуемся формулой Прокофьева

$$v_{t\phi} = v_{t_3} \cdot \left(\frac{t_3}{t_\phi} \right)^n, \quad (7)$$

где $v_{t\phi}$ – кинематическая вязкость СМ при фактической температуре, $\text{мм}^2/\text{с}$; v_{t_3} – кинематическая вязкость СМ при эталонной температуре, $\text{мм}^2/\text{с}$; t_3 – эталонная температура, $^\circ\text{C}$; t_ϕ – фактическая температура, $^\circ\text{C}$.

« n » – показатель степени из работы [9]

$$n = \frac{1 + \lg v_{t_3}}{2.8 - \lg t_3}.$$

При этом значение фактической температуры на контакте может быть вычислено по формуле

$$t_\phi = t_3 \cdot \left(\frac{v_{t_3}}{v_{t\phi}} \right)^{1/n}. \quad (8)$$

Тогда значение фактической температуры на контакте может быть определено по уравнению

$$t_\phi = t_3 \cdot \left(\frac{v_{t_3}}{e^N} \right)^{1/n}, \quad (9)$$

$$\text{где } N = \frac{1.5 \cdot \ln M + \ln K - 0.0006\rho}{\left(\frac{0.01 \cdot \rho}{\ln 10} + 1 \right)},$$

$$K = (n^{2/3} \cdot f_0 \cdot 10^{-7} \cdot D_0^3)^{-3/2}.$$

Полученные экспериментально-расчёты значения температур на контакте представлены на **рис. 2**.

В настоящее время в справочной литературе отсутствуют значения пьезокоэффициентов для выбранных марок СМ: ИР 100 КВ 100, ТНК 522 КВ 220, Mobilgear 600XP 320 КВ 320, 460ПВ КВ 460. Поэтому для выполнения дальнейшего ЭГД-расчёта ставится задача по определению пьезокоэффициентов вязкости данных смазочных материалов.

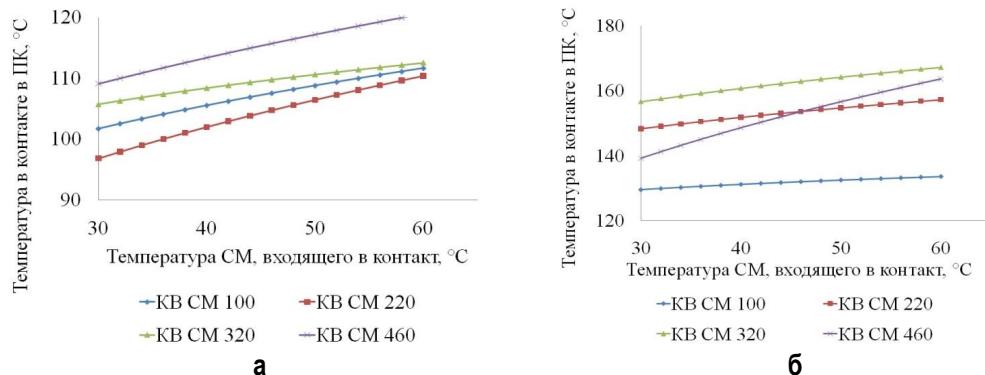


Рис. 2. Изменение температуры на контакте в ПК для четырёх классов вязкости смазочного материала:
а – суммарная скорость качения в контакте 2,9 м/с; б – суммарная скорость качения в контакте 7,92 м/с

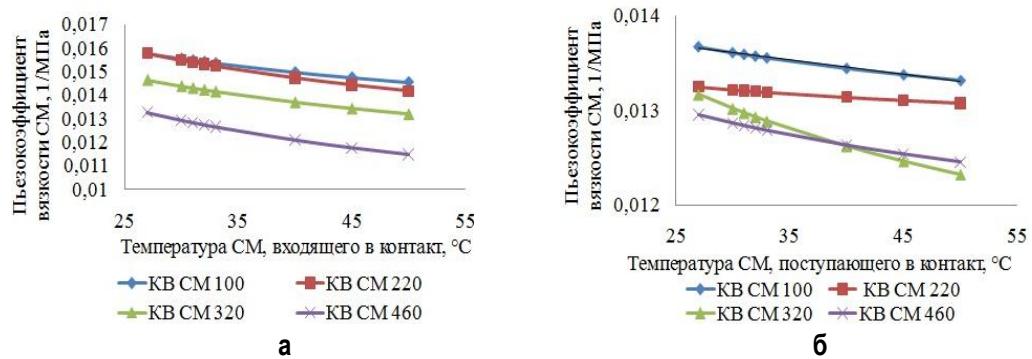


Рис. 3. Значения пьезокоэффициента: а – суммарная скорость качения 2,9 м/с;
б – суммарная скорость качения 7,92 м/с

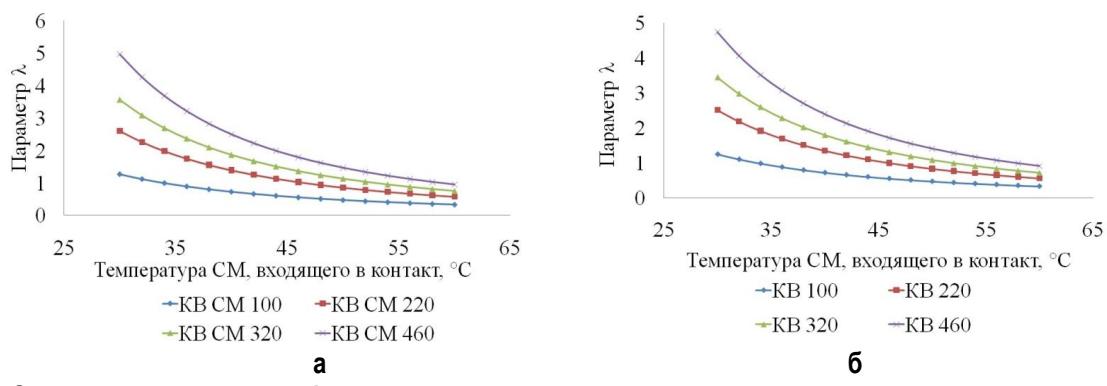


Рис. 4. Зависимость параметра λ от температуры смазочного материала, поступающего в зону контакта для четырёх классов вязкости: а – суммарная скорость качения в контакте 2,9 м/с;
б – суммарная скорость качения в контакте 7,92 м/с

Используя полученные значения фактических температур, становится возможным определение значения пьезокоэффициентов вязкости СМ по формуле Вустера (5).

Полученные значения пьезокоэффициентов вязкости для различных классов вязкости представлены на **рис. 3**.

Установленные значения температур в нагруженной зоне контакта позволили установить изменение величины коэффициента толщины масляной пленки λ в зависимости от температуры минерального масла, подаваемого в ПК (**рис. 4**).

Параметр λ является критерием для оценки долговечности подшипниковых опор. При $\lambda > 1$ фактическая долговечность ПК превышает расчётную. При $\lambda > 3$ реализуется режим ЭГД-смазки. Создание этого ЭГД – режима позволит в несколько раз повысить расчётную долговечность.

Аналитически-экспериментальные данные были обработаны посредством программы Statistica, в результате чего были получены зависимости интенсивности разогрева минерального масла (рис. 5), учёт которых позволяет принимать меры по предотвращению перегрева ПК в подшипниковых опорах валков.

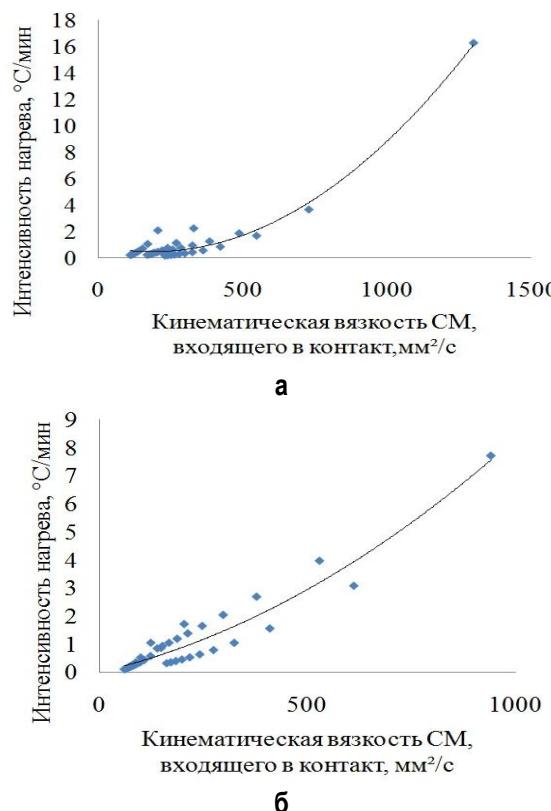


Рис. 5. Интенсивность роста температуры в зависимости от КВ СМ: а – суммарная скорость качения в контакте 2,9 м/с; б – суммарная скорость качения в контакте 7,92 м/с

Высокая интенсивность роста температуры ведёт к тепловому разогреву подшипникового узла до температур, превышающих допустимые значения.

Заключение

При выборе минерального масла в подшипниковые опоры валков прокатных клетей «кварт» соответствующего класса вязкости необходимо учитывать не только возможность реализа-

ции на контакте в подшипниках качения, но и возникающую при этом температуру, которая может достигать 140–160°C.

Температуру в зоне контакта можно регулировать температурой минерального масла, поступающего в подшипниковый узел.

Расчёты по полученным зависимостям с использованием алгоритма, представленного в работе [10] для подшипниковых опор валков клетей «кварт» стана-тандем 2000 холодной прокатки, показали, что при КВ 220 обеспечивается наиболее низкое тепловыделение в контактной зоне подшипников качения, исключающее их перегрев, и соответственно повышение ресурса подшипниковых опор на 40–45%.

Список литературы

1. Математическое моделирование теплового состояния подшипникового узла тяущих роликов стана 2000 ОАО «ММК» холодной прокатки / Ячиков И.М., Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И., Султанов Н.Л. // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2014. № 1 (4). С. 29–36.
2. Дудоров Е.А., Жиркин Ю.В. Модернизация подшипникового узла с целью продления его ресурса // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 4. С. 94–96.
3. Исследование и разработка режимов смазывания подшипниковых узлов рабочих валков стана 2000 горячей прокатки / Платов С.И., Терентьев Д.В., Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И., Мезин И.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 2. С. 98–100.
4. Влияние вязкости минеральных масел на температурный режим подшипниковых узлов рабочих валков прокатных станов / Дудоров Е.А., Резванов С.Б. Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 58–60.
5. Жиркин Ю.В., Пузик Е.А. Аналитико-экспериментальное определение параметров ЭГД-смазки в подшипниках качения опор рабочих валков стана 2000 горячей прокатки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. № 4. С. 52–56.
6. Пузик Е.А., Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И. Исследование условий реализации эластогидродинамической смазки в подшипниках качения рабочих валков прокатных клетей кварт // Производство проката. 2011. № 7. С. 44–46.
7. Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И., Дудоров Е.А. Физическое моделирование режима смазки подшипниковых узлов рабочих валков прокатных станов. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2007. № 4. С. 54–56.
8. Перель Л.Я., Филатов А.А. Подшипники качения: Расчёт, проектирование и обслуживание опор: справочник. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1992. 608 с.
9. Жиркин Ю.В. Надежность, эксплуатация и ремонт металлургических машин: учеб. пособие. Москва: Технопром, 2009. 336 с.
10. Пузик Е.А. Жиркин Ю.В. Алгоритм подбора смазочного материала для смазывания подшипниковых опор рабочих валков клетей кварт // Механическое оборудование металлургических заводов. 2015. № 1 (4). С. 55–60.

INCREASE IN THE LIFE OF BEARING SUPPORTS OF FOUR-HIGH STANDS DURING THEIR MAINTENANCE

Puzik Ekaterina Aleksandrovna – Master's degree student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ekshalimova@mail.ru.

Zhirkin Yuri Vasilyevich – Ph.D. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: girkin@yandex.ru.

Filatov Aleksandr Andreyevich – D.Sc. (Eng.), Chief Researcher, State Scientific Center VNIIMETMASH, Moscow, Russia. E-mail: smm93@list.ru.

Abstract. This paper focuses on maintenance of four-high rolling stands, gives data on maintenance of such facilities at OJSC MMK, describes the technique for finding the effect of various lubricants on the rolling bearing life, contains calculations to select an optimum viscosity grade of a lubricant to increase the life of the bearing units of facilities under study in certain work conditions.

Keywords: Bearing supports of mill stands, rolling bearing life, maintenance of bearing supports.

References

- Yachikov I. M., Zhirkin Yu. V., Mironenkov E. I., Sultanov N. L. Mathematical modeling of the thermal state of the bearing unit of pinch rolls on cold rolling mill 2000 at OJSC MMK. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie sistem v promyshlennoj i sotsial'noj sfereakh* [Mathematical support and software of systems in industrial and social spheres]. 2014, no. 1 (4), pp. 29-36.
- Dudorov E. A., Zhirkin Yu. V. Modernization of the bearing unit to extend its resource. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2007, no. 4, pp. 94-96.
- Platov S. I., Terentyev D. V., Zhirkin Yu. V., Mironenkov E. I., Mezin I. Yu. Research and development of lubrication modes of bearing assemblies of work rolls on hot rolling mill 2000. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 2, pp. 98-100.
- Dudorov E.A., Rezvanov S. B. Zirkin Yu. V., Mironenkov E. I. Effect of mineral oil viscosity on temperature of bearing units of rolling mill work rolls. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2006, no. 1, pp. 58-60.
- Zhirkin Yu. V., Puzik E. A. Analytical and experimental determination of parameters of EHD lubrication in rolling bearings of supports of work rolls of hot rolling mill 2000. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 4, pp. 52-56.
- Puzik E. A., Zhirkin Yu. V., Mironenkov E. I. Study of the conditions of implementation of elastohydrodynamic lubrication in rolling bearings of work rolls of four-high stands. *Proizvodstvo prokata* [Production of steel products]. 2011, no. 7, pp. 44-46.
- Zhirkin Yu. V., Mironenkov E. I., Dudorov E. A. Physical modeling of the lubrication mode of the bearing units of rolling mill work rolls. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 2007, no. 4, pp. 54-56.
- Perel L. Ya., Filatov A. A. [Rolling bearings: Calculation, design and maintenance of supports: Guide. 2nd ed.]. Moscow: Mashinostroenie, 1992, 608 p.
- Zhirkin Yu. V. *Nadezhnost', ehkspluatatsiya i remont metallurgicheskikh mashin: uchebnoe posobie* [Reliability, operation and maintenance of metallurgical machines: a textbook]. Moscow: Teplotekhnika, 2009, 336 p.
- Puzik E. A., Zhirkin Yu. V. Algorithm for the selection of a lubricant for lubrication of bearing supports of work rolls of four-high mill stands. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical equipment of metallurgical plants]. 2015, no. 1 (4), pp. 55-60.

Пузик Е.А., Жиркин Ю.В., Филатов А.А. Повышение долговечности подшипниковых опор прокатных клетей «кварт» при их техническом обслуживании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 83–88.

Puzik E.A., Zhirkin Yu.V., Filatov A.A. Increase in the life of bearing supports of four-high stands during their maintenance. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 83–88.