

УДК 620.178.6

© Ю. И. Молев, д-р техн. наук, профессор
© В. Ф. Кулепов, д-р техн. наук, профессор
© А. А. Аникин, д-р техн. наук, начальник лаборатории
© В. Н. Наумов, д-р техн. наук, профессор
(Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия)
E-mail: moleff@yandex.ru, kulepov@dpingtu.ru, anikin.zvm@mail.ru, vn.naumov1941@yandex.ru
© С. А. Коростелев, д-р техн. наук, зав. кафедрой
(Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, Барнаул, Россия)
E-mail: korsan73@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-5-105-112

© Yu. I. Molev, Dr. Sci. Tech., Professor
© V. F. Kulepov, Dr. Sci. Tech., Professor
© A. A. Anikin, Dr. Sci. Tech., Head of Laboratory
© V. N. Naumov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia)
E-mail: moleff@yandex.ru, kulepov@dpingtu.ru, anikin.zvm@mail.ru, vn.naumov1941@yandex.ru
© S. A. Korostelev, Dr. Sci. Tech., Head of the Department
(Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia)
E-mail: korsan73@mail.ru

МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ ТВЕРДОСТИ АНТИФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ВКЛАДЫШЕЙ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

METHODOLOGY FOR TESTING THE HARDNESS OF THE ANTIFRICTION MATERIAL OF THE SLIDING BEARING LINERS DURING OPERATION

Представлены результаты анализа изменения прочностных свойств подшипникового материала при эксплуатации. Получены результаты изменения твердости от изменения толщины подшипникового материала вкладыша. Предложена методика определения начальной твердости материала, имевшей место до начала эксплуатации, которая позволяет определять отсутствие или наличие производственного дефекта, возникшего на этапе производства вкладышей. На основе статистического анализа изменения твердости от степени износа получены показатели точности предложенного расчета, определены границы применения разработанной методики. Приведенные данные позволили повысить точность диагностического исследования, снизить затраты на проведение ремонтов двигателя, повысить эксплуатационную надежность транспортных средств.

Ключевые слова: вкладыш, износ, твердость.

The paper presents the results of the analysis of changes in the strength properties of the bearing material during operation. There have been obtained results of hardness change in regard to changes in the thickness of the liners. There is proposed a method for determining the initial hardness of the material before the start of operation, which allows determining the absence or presence of a manufacturing defect that occurred at the production stage of liners. Based on the statistical analysis of the change in hardness from the degree of wear, there have been determined the accuracy indicators of the proposed calculation, as well as the boundaries of the application of the developed methodology. The data provided make it possible to increase the accuracy of the diagnostic study, reduce the cost of engine repair, and increase the operational reliability of vehicles.

Keywords: liner, wear, hardness.

Введение

Несмотря на активное развитие и популяризацию такого направления развития, как «зеленая энергетика», доля двигателей вну-

тренного сгорания в транспортной отрасли продолжает оставаться доминирующей. В настоящее время на их долю приходится более 85 % энергии, потребляемой транс-

портом [1]. Старение автомобильного парка нашей страны [2] приводит к тому, что для повышения эксплуатационной надежности все больший объем работ перераспределяется с технического обслуживания на ремонт, затраты на который могут в несколько раз превышать первоначальную стоимость объекта [3]. При этом до 20 % случаев выхода из строя двигателей внутреннего сгорания приходится на повреждение шатунных подшипников [4, 5]. Анализ причин выхода из строя двигателей большинство исследователей связывают их с нарушением гидродинамической смазки подшипников [6]. При этом конкретные причины изменения режима работы вкладышей могут быть различны, а ошибки в диагностировании неисправностей могут приводить к выбору неправильной технологии ремонта, что повлечет необходимость как минимум повторного ремонта, а иногда и полной утраты двигателем своего ресурса [7]. Поэтому совершенствование методики определения причин выхода из строя вкладышей коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания, а также корректировка планов технического обслуживания и ремонтов, исходя из индивидуальных условий эксплуатации [8, 9], являются актуальной научно-практической задачей.

Методы

В настоящее время в практике выполнения диагностических работ особое место

отводится визуальному контролю повреждений, на основании которого проводятся углубленные инструментальные исследования. Особенный интерес представляют повреждения в виде следа износа центра вкладыша, а также растрескивание подшипникового слоя (рис. 1), причиной которых может быть и применение некачественного материала вкладышей [10, 11].

Способом выявления причины возникновения указанных неисправностей является проверка соответствия материала антифрикционного слоя подшипника (состоящего из подшипникового материала, подслоя и рабочего слоя) нормативным требованиям.

Исследования, проведенные путем анализа отраженного рентгеновского спектра на приборе X-MET 8000, показали, что химический состав антифрикционного слоя не является постоянным, что соответствует данным, приведенным в работе [12].

В зависимости от длительности эксплуатации растет загрязнение подшипникового материала кремнием, а при износе деталей кривошипно-шатунного механизма и цилиндро-поршневой группы — железом. При этом изменение процентного соотношения загрязнений носит не равномерный, а скачкообразный характер, при котором содержание примесей даже на одном комплекте подшипников может изменяться более, чем в 2 раза. Также в связи с отсутствием норма-

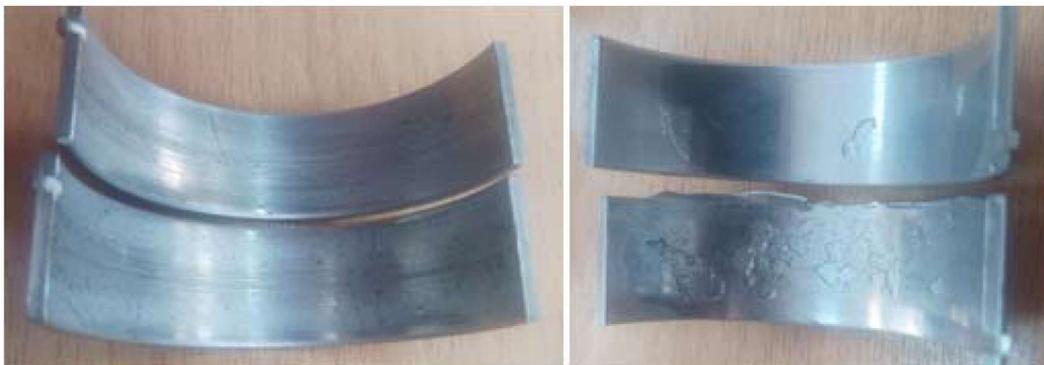


Рис. 1. Общий вид повреждений подшипников в виде следа износа центра вкладыша и растрескивания подшипникового слоя

тивных требований и предельно допустимых значений не представляется возможным проверить структуру подшипникового материала при диагностике подшипников.

Следует отметить, что, кроме химического состава и структуры, имеется еще один параметр, который подлежит контролю, — твердость материала [13, 14]. Однако прямое измерение твердости антифрикционного слоя не может быть использовано для диагностирования, так как проведенные исследования показали монотонный рост данного параметра от степени износа подшипника. Данный факт объясняется тем, что при достижении определенного износа измерительный конус прибора протыкает подшипниковый материал насквозь и упирается в стальную основу вкладыша, т. е. чем тоньше слой подшипникового материала, тем раньше измерительный конус начинает взаимодействовать с более твердой основой, меньше внедряется в тело подшипника и оставляет меньший отпечаток, в результате чего прибор фиксирует большую твердость исследуемого объекта.

Для решения данной проблемы была разработана математическая модель внедрения измерительного конуса в подшипник, отличительной особенностью которой является учет наличия двух или трех (с учетом подложки) слоев, имеющих разную твердость.

Расчет твердости по методу Виккерса заключается в определении отношения действующей нагрузки к площади боковой поверхности полученного отпечатка. Зависимость между данными параметрами приводится по нормативным документам¹:

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2} \text{ или } d = \sqrt{\frac{0,1891F}{HV}}$$

$$\text{и } F = \frac{HVd^2}{0,1891}, \quad (1)$$

где HV — значение твердости по шкале Виккерса; F — величина нагрузки в Н; а d —

среднеарифметическая длина диагоналей отпечатка.

Поскольку согласно указанной нормативной документации угол вершины пирамиды является постоянным и равным 136° , имеется возможность связать твердость испытываемого образца с глубиной внедрения измерительной пирамиды. Исходя из схемы внедрения пирамиды, приведенной на рис. 2, соотношение (1) примет вид:

$$\frac{d}{2} = htg(\alpha/2) \rightarrow d = 2htg(\alpha/2) \rightarrow$$

$$\rightarrow HV = 0,1891 \frac{F}{4h^2tg^2(\alpha/2)}$$

или

$$h = 2htg(\alpha/2) \sqrt{0,1891 \frac{F}{HV}} = 2,1524 \sqrt{\frac{F}{HV}}, \quad d = 4,95h.$$

Тогда, заменяя d в зависимости (1) на полученное соотношение глубины внедрения измерительной пирамиды, получим

$$F = \frac{24,5HVh^2}{0,1891} = 129,574HVh^2. \quad (2)$$

Если известны остаточная толщина слоя подшипникового материала и суммарная твердость двух слоев вкладыша, то можно определить глубину внедрения измерительной пирамиды в основу h_1 и длину диагонали отпечатка d_1 :

$$h_1 = 0,088 \sqrt{\frac{F}{HV}} - h_2;$$

$$d_1 = d_2 = 2h_1tg(\alpha/2) = 4,95h_1,$$

где h_2 — остаточная толщина подшипникового слоя вкладыша. Тогда усилие, необходимое для внедрения измерительного конуса в стальную основу вкладыша, имеющую твердость HV_1 , может быть найдено из условия

$$F_1 = 129,574HV_1h_1^2 = 129,574HV_1(0,088 \sqrt{\frac{F}{HV}} - h_2)^2.$$

При этом усилие F_2 , которое будет восприниматься материалом подшипникового слоя, определится как разница между общей величиной нагрузки F и нагрузкой F_1 , которую воспринимает стальная основа,

$$F_2 = F - F_1 = F - 129,574HV_1(0,088 \sqrt{\frac{F}{HV}} - h_2)^2.$$

¹ ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Национальный стандарт Российской Федерации. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200060184>

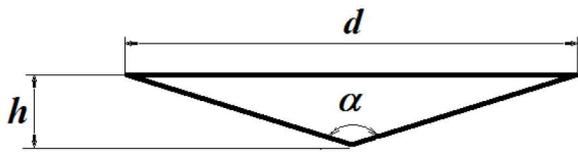


Рис. 2. Геометрическая схема к определению взаимосвязи между твердостью материала, длиной диагонали отпечатка и глубиной внедрения конуса в материал

Тогда твердость подшипникового материала, равная отношению воспринимаемого им усилия F_2 к площади сечения боковой грани, ограниченной диагоналями, равными d и d_2 , определится из уравнения

$$HV_2 = \frac{F - F_1}{S - S_1} = 0,1891 \frac{F_2}{d^2 - d_2^2} =$$

$$= 0,1819 \frac{F - 129,574 HV_1 (0,088 \sqrt{\frac{F}{HV}} - h_2)^2}{\frac{0,1891 F}{HV} - (4,95 (0,088 \sqrt{\frac{F}{HV}} - h_2))^2}$$

Зная толщину подшипникового материала и его твердость, можно определить силу, которую необходимо приложить к измерительной пирамиде для того, чтобы конус вошел в контакт с металлической основой $F_2 = 129,574 HV_2 h_2^2$. Разница между этой силой и силой нагружения пирамиды создаст до-

полнительное погружение в материал вкладыша, который определится из условия

$$F_1 = F - F_2 = F - 129,574 HV_2 h_2^2 \rightarrow$$

$$\rightarrow h_1 = 0,088 \sqrt{\frac{F - 129,574 HV_2 (h_2^2 + 2h_2 h_1)}{HV_1}},$$

где $2h_2 h_1$ — параметр, учитывающий увеличение площади контакта измерительной пирамиды со слоем подшипникового материала при погружении в металлическую основу вкладыша на глубину h_1 .

Графическое решение полученного уравнения для условий нагружения измерительной пирамиды усилием F , равным 50 Н (по нормативным требованиям проверки вкладышей); твердости металлической основы вкладыша HV_1 , равной 250 единиц, и базовой твердости вкладыша HV_2 , равной 40 единицам (что соответствует требованиям для материала подшипникового слоя, выполненного из марки ВЗ1), показано на рис. 3 и 4.

Приведенные математические зависимости позволяют на этапе определения причин выхода из строя двигателя определить соответствие механических свойств подшипникового материала нормативным требованиям. Особенностью предложенной методики

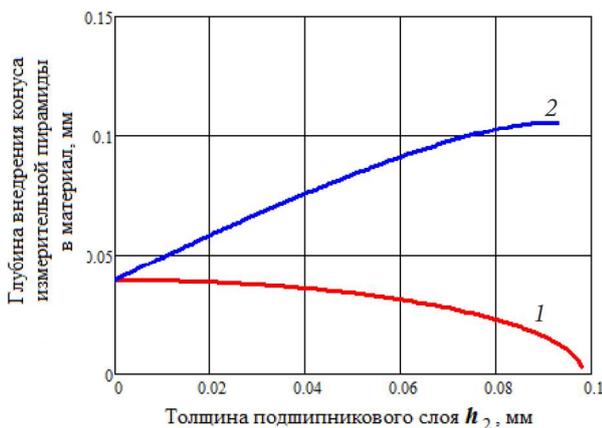


Рис. 3. Зависимость глубины внедрения измерительной пирамиды в материал от толщины остаточного слоя подшипникового материала; 1 — внедрение в металлическую основу h_1 ; 2 — суммарная величина внедрения h

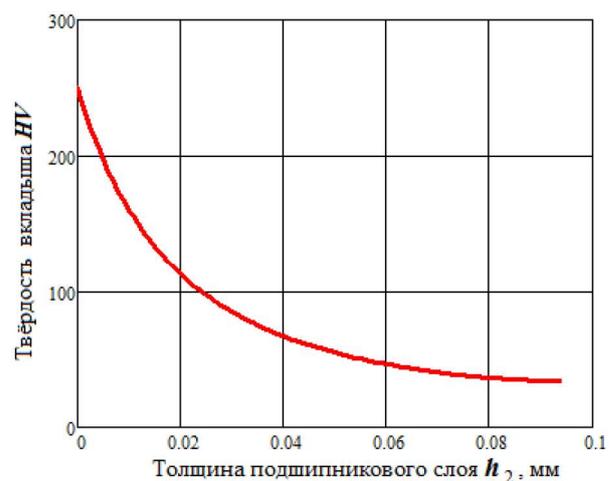


Рис. 4. Зависимость замеренной общей твердости вкладыша от толщины остаточного слоя подшипникового материала

является то, что она может быть выполнена как для подшипников с изношенной рабочей поверхностью, так и для новых образцов, не находившихся в эксплуатации, представленных в качестве эталона.

Результаты

Исследование твердости материалов подшипников проводилось с использованием твердомеров Виккерса Durascan-20 G5 и iRock TR2. Суммарная толщина вкладышей — с использованием индикаторов часового типа. Толщину подшипникового слоя определяли с использованием измерительного микроскопа на шлифе, выполненного на исследуемом вкладыше (рис. 5).

Для определения начальной твердости подшипникового материала использовались вкладыши из одного комплекта, в том числе и с характерными повреждениями (рис. 6).

Выбор вкладышей для определения начальной твердости выбирался исходя из

условия превышения толщины подшипникового материала величины 0,2 мм. На рис. 7 показаны результаты экспериментальной проверки изменения твердости вкладыша при изменении толщины его подшипникового слоя.

Среднее квадратичное отклонение результатов опытов от математического моделирования составило 2 HRV, погрешность на основе 155 измерений равняется 0,2 HRV, с 95-процентной вероятностью отклонение реальной базовой твердости от расчетной не превысит 6 HRV. Таким образом, при обработке результатов экспериментальных исследований по предложенной методике необходимо учитывать наличие погрешности, связанной как с погрешностью прибора, так и с неравномерностью износа слоя подшипникового материала, неравномерностью самого слоя подшипникового материала. С 95-процентной вероятностью признать

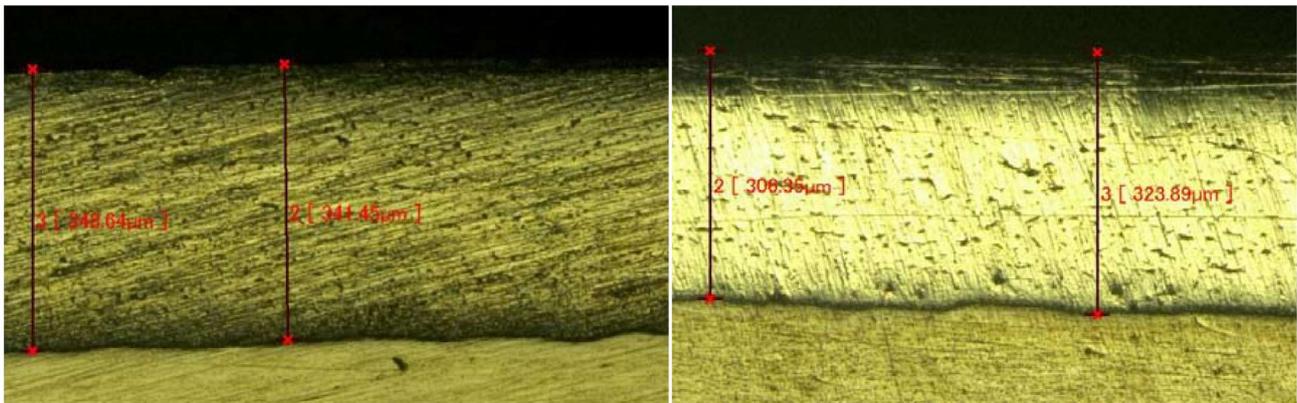


Рис. 5. Вид структуры и замер толщины подшипникового слоя исследуемых вкладышей



Рис. 6. Подшипник с местным выкрашиванием материала

причиной выхода из строя представленных вкладышей производственный дефект можно, только если значения полученной фактической твердости подшипникового слоя будут отличаться от нормативных требований более, чем на 6 единиц по шкале Виккерса.

Выводы и обсуждение

Приведенные на рис. 7 данные позволяют сделать выводы о том, что разработанная ма-

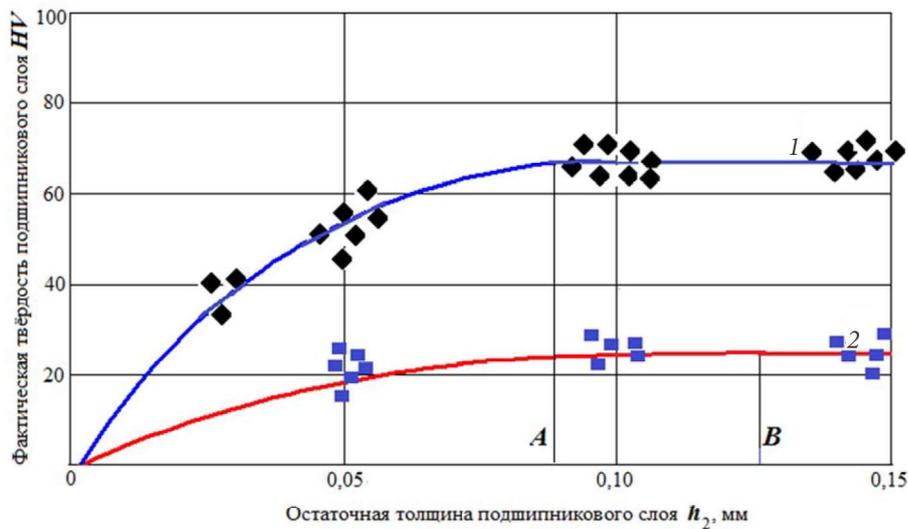


Рис. 7. Зависимость пересчета данных по твердости подшипникового слоя между полученными в результате прямого замера и его фактическими значениями в зависимости от остаточной толщины: 1 — для замеренной твердости, равной 70 HRV; 2 — для замеренной твердости, равной 25 HRV; А — глубина внедрения измерительной пирамиды, равной 0,074 мм, характерной для твердости 70 HRV при нагружении усилием 50 Н; В — глубина внедрения измерительной пирамиды, равной 0,124 мм, характерной для твердости 25 HRV при нагружении усилием 50 Н

тематическая модель оценки базовой (начальной) твердости в зависимости от степени износа подшипникового слоя позволяет повысить точность:

- диагностирования причин выхода из строя двигателей внутреннего сгорания, в том числе определить, соответствовали ли прочностные свойства материала вкладышей требуемым нормам или нет;
- определения причин выхода из строя двигателя; снизить затраты на проведение его ремонтов, повысить эксплуатационную надежность транспортных средств.

Полученные результаты согласуются со статистическими данными причин выхода из строя двигателей транспортных средств, приведенных в работах [15–17].

Библиографический список

1. Мишина Н. А., Котова Л. Г., Смирнова Д. К., Носкова А. С. «Зеленая» энергетика в системе мировой экономики: опыт разных стран, современное состояние и перспективы // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Общественные науки.

2022. № 2 (62). С. 167–179. DOI 10.21685/2072-3016-2022-2-16.

2. Воробьев С. А. Введение в специальность. Изд. 2-е. СПб.: Научное издание, 2024. 106 с.

3. Денисов А. С. Теоретические основы автосервиса. Изменение технического состояния элементов автомобиля в процессе эксплуатации. Саратов: Саратовский гос. техн. ун-т, 1999. 118 с.

4. Барыльникова Е. П. Повышение ресурса автомобильных двигателей стабилизацией режима смазывания шатунных подшипников в эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10. Оренбург, 2013. 140 с.

5. Назаров А. Д. Повреждения и изнашивание коренных и шатунных вкладышей коленчатых валов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2005. № 7. С. 31–33.

6. Суханов С. А., Новиков А. Н., Тахтамышев Х. М. Методика диагностирования процесса приработки капитально отремонтированных двигателей внутреннего сгорания автомобилей при полевых испытаниях // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 4-1 (83). С. 32–38. DOI 10.33979/2073-7432-2023-4-1(83)-32-38.

7. Денисов А. С., Кулаков А. Т. Обеспечение надежности автотракторных двигателей. Саратов: Саратовский гос. техн. ун-т, 2007. 422 с.

8. Подопригора Н. В. Методическое обеспечение аппарата инструментального контроля и диагности-

рования высокоавтоматизированных транспортных средств // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 6 (101). С. 117–124. DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-6-117-124.

9. Черняев И. О., Верхорубов В. В. Методика обоснования программы по техническому обслуживанию автотранспортных средств в системах обеспечения работоспособности с индивидуальной коррекцией сервисного интервала // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 5 (100). С. 88–96. DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-5-88-96.

10. MS Motorservice International Gmb. Повреждения подшипников скольжения. URL: <https://www.ab-engine.com/manuals/ks-bearings.pdf> (дата обращения: 19.09.2024).

11. Леонтьев Л. Б., Шапкин Н. П., Макаров В. Н., Молоков К. А., Болотова В. П. Влияние химического состава материала и физико-механических свойств покрытия на износостойкость трибоузла «вал – покрытие – вкладыш подшипника» // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102, № 4. С. 326–329. URL: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-4-326-329>

12. Столярова О. О., Муравьева Т. И., Загорский Д. Л., Губенко М. М. Исследование поверхности антифрикционных алюминиевых сплавов системы Al-Cu-Si-Sn-Pb // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 8. С. 50–58. DOI 10.7868/S0207352817080078.

13. Новиков И. А., Новиков А. Н., Загорский Н. А., Шевцова А. Г. Современные проблемы и направления развития ремонта и обслуживания автомобилей. Белгород: Белгородский гос. технологический ун-т им. В. Г. Шухова, 2018. 521 с. ISBN 978-5-361-00778-3.

14. Гольчевский В. Ф., Власов Ф. М., Несмеянов А. А. и др. Теоретические основы решения практических задач автотехнической экспертизы. Т. 1. Ч. 1. Иркутск: Восточно-Сибирский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, 2014. 204 с.

15. Барун В. Н. и др. Причины и устранение случаев задира и проворачивания вкладышей подшипников коленчатого вала автомобильного дизеля КамАЗ // Двигателестроение. 1983. № 4. С. 3–5.

16. Кулаков А. Т. и др. Диагностика технического состояния подшипников коленчатого вала в процессе эксплуатации автомобиля // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники: материалы Междунар. научно-техн. семинара им. В. В. Михайлова. Саратов, 15–16 мая 2019 года. Вып. 32. Саратов: Амирит, 2019. С. 189–196.

17. Алиматов Б. А., Кунцов С. В., Волков И. Г. Анализ недостатков эксплуатируемых двигателей КамАЗ-740.51 // Уральский научный вестник. 2017. Т. 12, № 4. С. 19–22.

References

1. Mishina N. A., Kotova L. G., Smirnova D. K., Noskova A. S. «Zelenaya» energetika v sisteme mirovoy ekonomiki: opyt raznykh stran, sovremennoe sostoyanie i perspektivy [“Green” energy in the system of world economy: experience of different countries, current state and prospects]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Obshchestvennye nauki – Bulletin of Higher Education Institutions. Volga River Region. Social Sciences*, 2022, no. 2 (62), pp. 167–179. DOI 10.21685/2072-3016-2022-2-16.

2. Vorobev S. A. *Vvedenie v spetsial'nost'* [Introduction to the specialty]. 2-nd ed. St. Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2024, 106 p.

3. Denisov A. S. *Teoreticheskie osnovy avtoservisa. Izmenenie tekhnicheskogo sostoyaniya elementov avtomobilya v protsesse ekspluatatsii* [Theoretical bases of automobile service. Change of technical condition of automobile elements in the process of operation]. Saratov, Sarat. gos. tekhn. un-t Publ., 1999, 118 p.

4. Baryl'nikova E. P. *Povyshenie resursa avtomobil'nykh dvigateley stabilizatsiy rezhima smazyvaniya shatunnykh podshipnikov v ekspluatatsii. Diss. kand. tekhn. nauk* [Increase of resource of automobile engines by stabilization of mode of lubrication of connecting rod bearings in operation. PhD in Sci. Tech. diss.]. Orenburg, 2013, 140 p.

5. Nazarov A. D. *Povrezhdeniya i iznashivanie korennykh i shatunnykh vkladyshey kolenchatykh valov* [Damage and wear of crankshaft main and connecting rod liners]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya – Repair. Restoration. Modernization*, 2005, no. 7, pp. 31–33.

6. Sukhanov S. A., Novikov A. N., Takhtamyshev Kh. M. *Metodika diagnostirovaniya protsessa prirabotki kapital'no otremonirovannykh dvigateley vnutrennego sgoraniya avtomobiley pri polevykh ispytaniyakh* [Methodology of diagnostics of process of acclimation of overhauled internal combustion engines of automobiles at field tests]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin – World of Transportation and Technological Machines*, 2023, no. 4–1 (83), pp. 32–38. DOI 10.33979/2073-7432-2023-4-1(83)-32-38.

7. Denisov A. S., Kulakov A. T. *Obespechenie nadezhnosti avtotraktornykh dvigateley*. [Ensuring the reliability of automotive tractor engines]. Saratov, Saratovskiy gos. tekhn. universitet Publ., 2007, 422 p.

8. Podoprigora N. V. *Metodicheskoe obespechenie apparata instrumental'nogo kontrolya i diagnostirovaniya vysokoavtomatizirovannykh transportnykh sredstv* [Methodical support of the apparatus of instrumental control and diagnostics of highly automated vehicles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*,

2023, no. 6 (101), pp. 117–124. DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-6-117-124.

9. Chernyaev I. O., Verkhorubov V. V. *Metodika obosnovaniya programmy po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu avtotransportnykh sredstv v sistemakh obespecheniya rabotosposobnosti s individual'noy korrektsiyey servisnogo intervala* [Methodology of substantiation of the program on maintenance of motor vehicles in serviceability systems with individual correction of service interval]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2023, no. 5 (100), pp. 88–96. DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-5-88-96.

10. *MS Motor service International Gmb. Povrezhdeniya podshipnikov skol'zheniya* [MS Motor service International Gmb. Friction bearing damage]. Available at: <https://www.ab-engine.com/manuals/ks-bearings.pdf> (accessed: 19.09.2024).

11. Leont'ev L. B., Shapkin N. P., Makarov V. N., Molokov K. A., Bolotova V. P. *Vliyaniye khimicheskogo sostava materiala i fiziko-mekhanicheskikh svoystv pokrytiya na iznosostoykost' tribouzla «val – pokrytie – vkladysh podshipnika»* [Influence of a chemical composition of a material and physical and mechanical properties of a coating on wear resistance of a tribojunction “shaft – coating – bearing insert”]. *Vestnik mashinostroeniya – Machine Building Bulletin*, 2023, vol. 102, no. 4, pp. 326–329. Available at: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-4-326-329>

12. Stolyarova O. O., Murav'eva T. I., Zagorskiy D. L., Gubenko M. M. *Issledovanie poverkhnosti antifriktsionnykh alyuminievykh splavov sistemy Al-Cu-Si-Sn-Pb* [Investigation of the surface of antifriction aluminum alloys of the Al-Cu-Si-Sn-Pb system]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya – Surface. X-ray, Synchrotron and Neutron Studies*, 2017, no. 8, pp. 50–58. DOI 10.7868/S0207352817080078.

13. Novikov I. A., Novikov A. N., Zagorodniy N. A., Shevtsova A. G. *Sovremennyye problemy i napravleniya razvitiya remonta i obsluzhivaniya avtomobiley* [Modern problems and directions of development of repair and maintenance of automobiles]. Belgorod, Belgorodskiy gosudarstvenniy tekhnologicheskii universitet im. V. G. Shukhova Publ., 2018, 521 p. ISBN 978-5-361-00778-3.

14. Gol'chevskiy V. F., Vlasov F. M., Nesmeyanov A. A., et al. *Teoreticheskie osnovy resheniya prakticheskikh zadach avtotekhnicheskoy ekspertizy* [Theoretical bases for solving practical problems of automobile technical expertise]. Vol. 1. Pt. 1. Irkutsk, Vostochno-Sibirskiy institut Ministerstva vnutrennikh del Rossiyskoy Federatsii Publ., 2014. 204 p.

15. Barun V. N., et al. *Prichiny i ustraneniye sluchaev zadira i provorachivaniya vkladyshey podshipnikov kolenchatogo vala avtomobil'nogo dizelya KamAZ* [Causes and elimination of cases of scoring and turning of crankshaft bearing shells of automobile diesel engine KamAZ]. *Dvigatellestroenie – Engine Engineering*, 1983, no. 4, pp. 3–5.

16. Kulakov A. T., et al. *Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya podshipnikov kolenchatogo vala v protsesse ekspluatatsii avtomobilya* [Diagnostics of technical condition of crankshaft bearings in the process of automobile operation]. *Problemy ekonomichnosti i ekspluatatsii avtotraktornoy tekhniki: materialy Mezhdunar. nauchno-tekhn. seminara im. V. V. Mikhaylova*, Saratov, May 15–16, 2019, iss. 32. [Problems of economy and operation of automobile and tractor equipment: materials of the International scientific and technical seminar named after V. V. Mikhailov, Saratov, May 15–16, 2019, iss. 32]. Saratov, Amirit Publ., 2019, pp. 189–196.

17. Alimatov B. A., Kuntsov S. V., Volkov I. G. *Analiz nedostatkov ekspluatiruemykh dvigateley KamAZ-740.51* [Analysis of the shortcomings of the operated engines KamAZ-740.51]. *Ural'skiy nauchniy vestnik – Ural Scientific Bulletin*, 2017, vol. 12, no. 4, pp. 19–22.