

УДК 621.822; 669.018.24

И.Ю. КУДЕЛКО

научный сотрудник лаборатории проблем надежности и металлоемкости карьерных автосамосвалов большой и особо большой грузоподъемности центра НТЦ «Карьерная техника»¹
E-mail: samosvaloim@mail.ru

А.Г. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук

заведующий лабораторией проблем надежности и металлоемкости карьерных автосамосвалов большой и особо большой грузоподъемности НТЦ «Карьерная техника»¹
E-mail: samosvaloim@mail.ru

М.В. СОТНИКОВ

научный сотрудник лаборатории проблем надежности и металлоемкости карьерных автосамосвалов большой и особо большой грузоподъемности НТЦ «Карьерная техника»¹
E-mail: samosvaloim@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 09.10.2023.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

Рассматриваются основные виды и причины поверхностных повреждений, которые приводят к разрушению и выходу из строя крупногабаритных подшипников редукторов мотор-колес (РМК) карьерных самосвалов БЕЛАЗ. Приведены недостатки стали 20Х2Н4А, применяемой в настоящее время для изготовления крупногабаритных подшипников РМК. Показано, что, используя эту сталь, проблематично достичь высокого и равномерного распределения величин микротвердости по толщине упрочненного слоя. Выполнен анализ разрушения данного вида подшипников из стали 20Х2Н4А, во многом определяющих требуемый ресурс редукторов мотор-колес. Полученные результаты исследований указывают на необходимость использования новых марок сталей для изготовления крупногабаритных колец подшипников РМК.

Ключевые слова: крупногабаритные подшипники, редукторы мотор-колес, разрушение, микротвердость, сталь 20Х2Н4А, коробление

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-4-65-31-37>

Введение. Создание и производство карьерных самосвалов особо большой грузоподъемности ставит ряд задач, среди которых важнейшей является обеспечение надежности и долговечности РМК и их элементов [1]. Ресурс РМК, их аварийность и стоимость являются важными составляющими, определяющими конкурентоспособность машин. При этом доминирующая роль в обеспечении ресурса данного узла принадлежит крупногабаритным подшипникам.

Применяемая в настоящее время для изготовления крупногабаритных колец подшипников РМК сталь 20Х2Н4А имеет высокие физико-механические свойства, однако весьма нетехнологична на всех стадиях металлургического передела [2]. В цементованных слоях деталей из этой стали трудно избежать повышенного содержания остаточного аустенита, что вызывает значительные трудности в стабильном получении требуемой поверхностной твердости (≥ 58 HRC), эффективной

толщины цементованного слоя, а также сохранении формы и размеров деталей [3, 4].

Основными причинами выхода из строя крупногабаритных подшипников в гарантийный период являются нарушение технологических регламентов в процессе производства, монтажа и установки деталей в узел при сборке, а также несоблюдение условий эксплуатации [5–8].

Проведенный анализ отказов показывает, что в большинстве случаев выход из строя крупногабаритных подшипников карьерных автосамосвалов БЕЛАЗ происходит вследствие повреждения рабочих поверхностей колец подшипников и их элементов.

При рассмотрении отказов наблюдаются следующие виды разрушения:

- износ дорожек качения и роликов (выбоины, трещины, разрушение роликов и т. д.);
- разрывы и раскрытие сепараторов от действия тел качения и центробежных сил (иногда в узле

обнаруживаются металлические фрагменты и (или) стружка).

В результате дефектовок выявлялось периодическое заклинивание роликов подшипников, и, как следствие, проворачивание колец подшипников с сепаратором по посадочным поверхностям с износом поверхностей сопрягаемых деталей и разрушением сепаратора. Зачастую инородные тела, элементы разрушенного ролика попадали в зону зацепления шестерен, что приводило к их повреждению и разрушению. Встречались крупногабаритные подшипники, непригодные для дальнейшей эксплуатации из-за усталостного и абразивного износа, коррозии рабочих поверхностей колец, их перегрева, окалины, проникающей через уплотнения, недостаточного количества смазки, повышенного износа роликов и дорожек качения колец.

Все эти факторы во многом способствуют снижению эксплуатационных характеристик крупногабаритных подшипников.

На основе анализа [9, 10] возникающих повреждений и отказов подшипников указывается на необходимость дальнейшего совершенствования применяемых конструкционных материалов, технологических процессов изготовления элементов подшипника, повышения технического контроля при их изготовлении, сборке и установке в узел, строгом соблюдении условий эксплуатации.

Целью данной работы являлось исследование параметров цементованного слоя крупногабаритного кольца подшипника РМК, изготовленного из стали 20Х2Н4А, а также характера повреждений и параметров цементованного слоя, разрушенного в процессе эксплуатации кольца подшипника РМК.

Проведение исследований. На первом этапе работ проводились исследования параметров цементованного слоя наружного кольца крупногабаритного подшипника из стали 20Х2Н4А карьерного автосамосвала БЕЛАЗ (рисунок 1).

Изготовление образцов для исследований выполнялось согласно эскизу (рисунок 2).

Исследования проводились после цементации колец на линии «Ипсен» с последующей закалкой 820 ± 10 °С и отпуском 180 ± 10 °С.

Химический анализ исследуемых образцов проводился на приборе Epsilon 1 с методическим программным обеспечением Epsilon 3 компании PANalytica I. Результаты исследований показаны в таблице.

Из представленных данных видно, что сталь соответствует марке 20Х2Н4А.



Рисунок 1 — Общий вид наружных крупногабаритных колец подшипников из стали 20Х2Н4А

Figure 1 — General view of large-sized outer bearing rings made of 20Kh2N4A steel

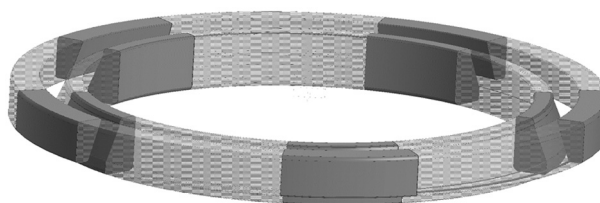


Рисунок 2 — Места вырезки образцов из наружного крупногабаритного кольца подшипника
Figure 2 — Locations for cutting samples from the large-sized outer bearing ring

Определение твердости цементованной поверхности и микротвердости по глубине цементованного слоя производилось на образцах, вырезанных из наружного кольца подшипника (см. рисунок 2), перпендикулярно его нешлифованной поверхности. Результаты исследований представлены на рисунке 3.

Микроструктура закаленного цементованного слоя наружного крупногабаритного кольца подшипника представляет собой мелкогальчатый мартенсит 4-го балла, встречаются участки среднегальчатого мартенсита 5-го балла. Содержание остаточного аустенита соответствует 2–3-му баллу по инструкции БЕЛАЗ 620.25102.00003. Твердость цементованной поверхности составила 57–59 HRC.

Анализ полученных результатов исследований позволяет сделать вывод, что из-за наследственности и нестабильности структуры, применяемой для изготовления крупногабаритных колец подшипников стали 20Х2Н4А, проблематично полу-

Таблица — Элементный состав материала крупногабаритного кольца подшипника после ХТО
Table — Elemental composition of the large-sized bearing ring material after chemical-thermal treatment

Наименование анализируемой пробы	Содержание элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P
Образец крупногабаритного кольца подшипника	0,20	0,28	0,47	1,50	3,50	0,04	0,016	0,021

читать высокую поверхностную твердость и микротвердость цементованного слоя, что является необходимым элементом обеспечения требуемой прочности и надежности подшипника.

На втором этапе работ проводились исследования одного из двух разрушенных в процессе эксплуатации крупногабаритных подшипников РМК карьерного самосвала БЕЛАЗ. Объектом исследования являлся фрагмент наружного крупногабаритного кольца подшипника из стали 20Х2Н4А.

Установлено, что поверхность детали притертая, в направлении скольжения выявлены неглубокие бороздки, вмятины. Имеются несплошности в виде разрывов металла, распространяющиеся на глубину цементованного слоя, наличие микротрещин и выкрашиваний в поверхностном слое (рисунки 4, 5). Выявлены значительные поверхностные повреждения роликов, свидетельствующие о работе подшипника при повышенных нагрузках (рисунок 6).

Проведены исследования распределения микротвердости по глубине цементованного слоя разрушенного наружного кольца подшипника из стали 20Х2Н4А. Установлено, что на расстоянии 0,1 мм от поверхности величина микротвердости составила всего лишь $617 \text{ HV}_{0,2}$, что свидетельствует о разупрочнении цементованного слоя вследствие

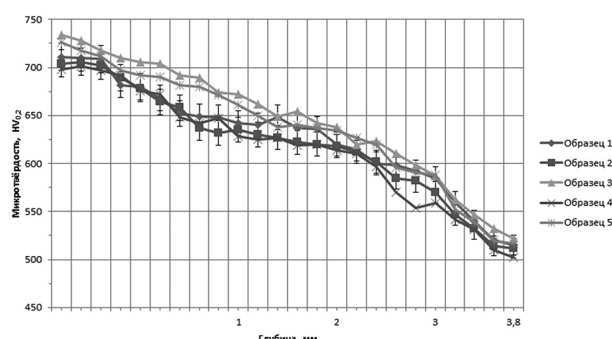


Рисунок 3 — Распределение микротвердости по глубине цементованного слоя образцов, вырезанных из наружного крупногабаритного кольца подшипника из стали 20Х2Н4А

Figure 3 — Distribution of microhardness along the depth of the cemented layer of samples cut from the large-sized outer bearing ring made of 20Kh2N4A steel

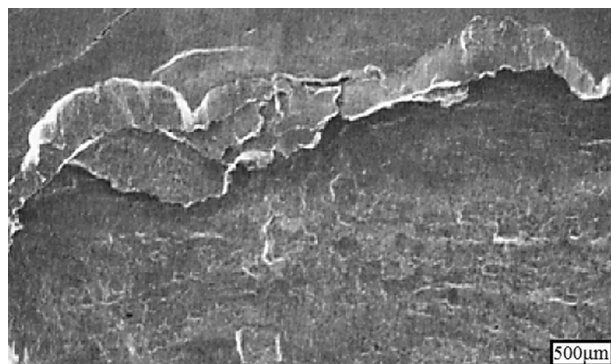


Рисунок 4 — Фрагмент поверхностного выкрашивания на внутреннем кольце крупногабаритного подшипника
Figure 4 — Fragment of surface pitting on the large-sized inner bearing ring

недостаточной его поверхностной твердости после ХТО (рисунок 7).

Под действием нагрузки на дорожках качения происходит скольжение контактирующих поверхностей с образованием продуктов износа. Частицы металла, попадающие между сопрягаемыми поверхностями, образуют микроскопические вмятины, где металл упрочняется. Наклеп поверхности увеличивается за счет коробления профиля беговых дорожек крупногабаритных колец под-

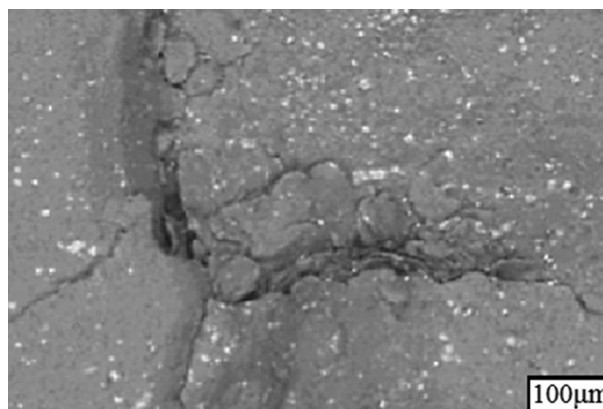


Рисунок 5 — Микротрещины в поверхностном слое наружного крупногабаритного кольца подшипника
Figure 5 — Microcracks in the surface layer of the large-sized outer bearing ring

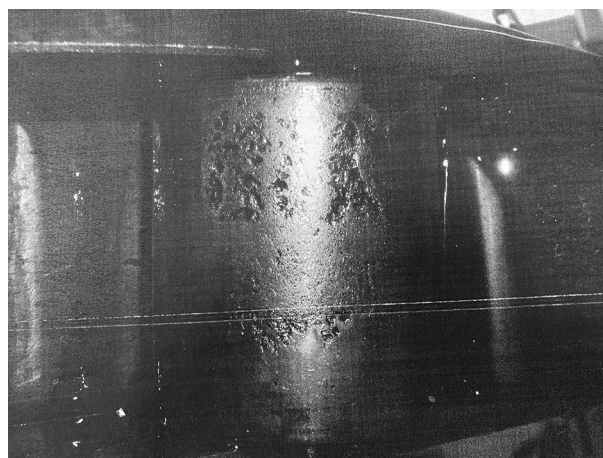


Рисунок 6 — Общий вид поверхностного повреждения ролика крупногабаритного подшипника
Figure 6 — General view of surface damage to a large-sized bearing roller

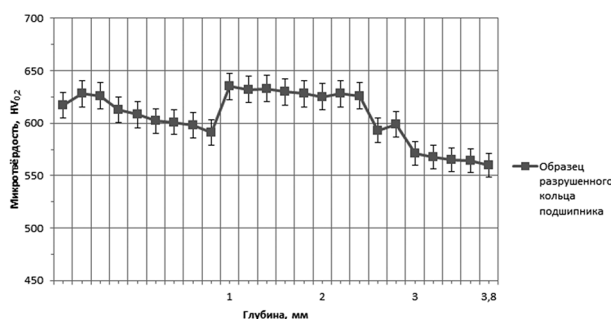


Рисунок 7 — Распределение микротвердости по глубине цементованного слоя образца разрушенного наружного крупногабаритного кольца подшипника из стали 20X2H4A
Figure 7 — Distribution of microhardness along the depth of the sample cemented layer of the destroyed large-sized bearing ring made of 20Kh2N4A steel

шипника. Дальнейшее упрочнение металла создает условия для возникновения усталостных микро- и макротрещин и начала усталостного выкрашивания, причиной которого на первом этапе могут быть даже небольшие повреждения поверхностного слоя.

В работе [4] представлены результаты измерений погрешности формы (коробления) крупногабаритных колец подшипников после ХТО из двух марок сталей: 20XНЗМА и 20X2H4A. Сделан вывод, что причиной большего коробления колец из стали 20X2H4A является нестабильность структуры материала и существование в ней на всех этапах технологического передела высоких значений локального и остаточного аустенита, способного перманентно изменять размеры деталей при внешнем силовом и температурном воздействии. Другой причиной коробления и ускоренного повреждения является формирующаяся в стали 20X2H4A химическая, структурная и механическая неоднородности границ зерен, их приграничных объемов, обусловленных концентрацией и взаимодействием некоторых легирующих и примесных элементов. Вследствие этого в наиболее нагруженных объемах металла быстрее реализуется микро- и макро-механизм усталостного повреждения с образованием зон сосредоточенной деформации — полос негомогенной макротекучести. Образующиеся впоследствии микро- и макротрещины развиваются вдоль этих полос локализованной деформации с постепенным выходом на поверхность кольца подшипника и его разрушения.

В работах [11–13] с применением современных экспериментальных методов, а также численного моделирования приводятся данные о влиянии состояния объемов металла, близких к поверхности контакта, а также о влиянии отклонения формы сопрягаемых поверхностей на долговечность подшипника. Выделяют две разные стадии развития выкрашивания из-за повреждения поверхности. Вначале происходит достаточно медленное развитие поперечного разрушения дорожки качения, а затем более быстрое продольное распростране-

ние повреждения. Поперечное развитие выкрашивания связано с более высокими напряжениями на диаметрально противоположных краях площадки контакта, т. е. в направлении, перпендикулярном качению, по сравнению с напряжениями на краях повреждения в продольном направлении.

Результаты исследований изменений микро-структуры, а также механизмов образования трещин, приводящих к разрушению элементов подшипника, приведены и в других работах [14–17].

Необходимо отметить, что наиболее частой причиной преждевременного отказа и выхода из строя крупногабаритных подшипников является их перегрузка (рисунок 8). Дорожки качения наружных колец испытывают большие нагрузки, чем дорожки качения внутренних колец. Это приводит к увеличению неравномерности распределения нагрузки между телами качения, к повышенному тепловыделению, а также к снижению жесткости подшипника из-за возможного перекоса колец.

В случаях, когда подшипники постоянно работают при более высоких нагрузках, в зоне контакта возникает макропластическая деформация, которая накапливается и приводит к изменению формы контактирующих деталей. При дополнительном увеличении нагрузки на подшипник на 40 % срок его службы сокращается в 2 раза, а на 100 % — в 8 раз [18].

Приведенные выше результаты исследований указывают на то, что сегодня трудно спрогнозировать и обеспечить высокий и стабильный ресурс крупногабаритных подшипников РМК из стали 20X2H4A и, следовательно, требуемый уровень надежности машин в эксплуатации.

Заключение. Отмечены технологические недостатки стали 20X2H4A, которая характеризуется повышенным короблением изготавливаемых из нее крупногабаритных колец подшипников и фор-

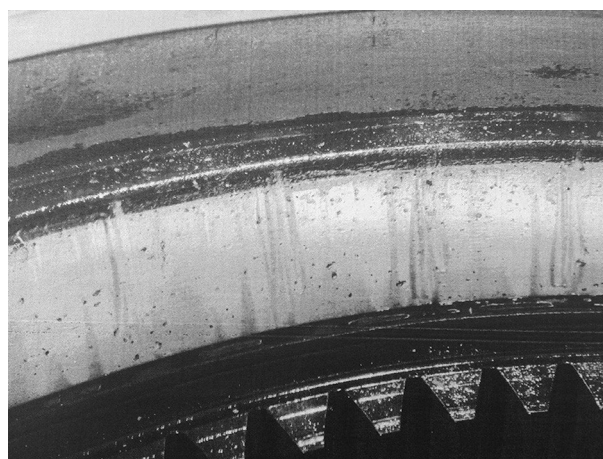


Рисунок 8 — Общий вид кольца подшипника карьерного самосвала из стали 20X2H4A с поверхностным износом дорожек качения из-за чрезмерной нагрузки
Figure 8 — General view of the bearing ring of a dump truck made of 20Kh2N4A steel with surface wear of the raceways due to excessive loading

мированием в связи с этим недостаточной эффективной толщины цементованного слоя, определяющего работоспособность детали.

Сделан вывод, что причиной большего коробления колец из стали 20Х2Н4А является нестабильность структуры стали и существование в ней на всех этапах технологического передела высоких значений локального и остаточного аустенита, способного перманентно изменять размеры крупногабаритных деталей при внешнем силовом и температурном воздействии. Другой причиной коробления и ускоренного повреждения является, по мнению авторов, формирующаяся химическая, структурная и механическая неоднородности границ зерен стали 20Х2Н4А, ее приграничных объемов. Вследствие этого в наиболее нагруженных объемах металла быстрее реализуется микро- и макро механизм усталостного повреждения с образованием зон (полос) сосредоточенной неомогенной деформации.

Приведенные выше результаты исследований указывают на необходимость использования для изготовления крупногабаритных колец подшипников новых марок сталей, менее склонных к локализации микро- и макропластической деформации и короблению на технологических переделах и в эксплуатации с обеспечением высоких показателей по эффективной толщине цементованного слоя.

Список литературы

1. Новации в создании и обеспечении конкурентоспособности карьерной техники БЕЛАЗ / П.А. Пархомчик [и др.] // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. — 2020. — Т. 65, № 2. — С. 185–196. — DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-185-196>.
2. Гурченко, П.С. Перспективы применения углеродистых сталей для подшипников и шестерен с упрочнением управляемой объемно-поверхностной закалкой с индукционным нагревом / П.С. Гурченко, А.А. Солонович // Литье и металлургия. — 2015. — № 1(78). — С. 91–97. — DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2015-1-91-97>.
3. Куделко, И.Ю. Сталь 20ХНЗМА для крупногабаритных подшипников / И.Ю. Куделко, А.Г. Сидоренко, В.И. Моисеенко // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2018. — Вып. 7. — С. 380–383.
4. Куделко, И.Ю. Применение цементуемой стали 20ХНЗМА для изготовления крупногабаритных колец подшипников / И.Ю. Куделко, А.Г. Сидоренко, В.И. Моисеенко // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2021. — Вып. 10. — С. 349–352.
5. Черменский, О.Н. Подшипники качения: справочник-каталог / О.Н. Черменский, Н.Н. Федотов. — М.: Машиностроение, 2003. — 576 с.
6. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для техн. вузов / Э.Д. Браун [и др.]; под ред. А.В. Чичинадзе. — М.: Центр «Наука и техника», 1995. — 777 с.
7. Мельников, А.А. Исследование механизма разрушения рабочей поверхности крупногабаритных подшипников в процессе эксплуатации / А.А. Мельников, М.О. Дмитриева // Вестн. Самарского ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2019. — Т. 18, вып. 1. — С. 184–191. — DOI: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-1-184-191>.
8. Failure Analysis of a Cylindrical Roller Bearing Caused by Excessive Tightening Axial Force / X. Hou [et al.] // Machines. — 2022. — Vol. 10, iss. 5. — Pp. 322–337. — DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10050322>.
9. Bearing damage and failure analysis [Electronic resource] // SKF. — Mode of access: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968064c148-Bearing-failures---14219_2-EN_tcm_12-297619.pdf. — Date of access: 10.04.2023.
10. Bearing damage analysis. Reference guide [Electronic resource] // Timken. — Mode of access: <https://www.timken.com/resources/5892-bearing-damage-analysis-with-lubrication-reference-guide/>. — Date of access: 12.04.2023.
11. Огар, П.М. Геометрия контакта при упругопластическом внедрении сферической неровности / П.М. Огар, В.А. Тарасов, А.В. Турченко // Системы. Методы. Технологии. — 2012. — № 1(13). — С. 9–16.
12. Исследование эксплуатационных разрушений подшипников методами оптической, растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа / М.П. Орлов [и др.] // Труды ВИАМ. — 2016. — № 1(37). — С. 62–79.
13. Панова, И.М. Определение долговечности гибридных подшипников / И.М. Панова, А.Д. Панов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». — 2017. — Т. 9, № 2. — DOI: <http://naukovedenie.ru/PDF/118TVN217.pdf>.
14. Using advanced tomography techniques to investigate the development of White Etching Cracks in a prematurely failed field bearing / B. Gould [et al.] // Tribology International. — 2017. — Vol. 116. — Pp. 362–370. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.07.028>.
15. Gloeckner, P. An approach to understanding micro-spalling in high-speed ball bearings using a thermal elastohydrodynamic model / P. Gloeckner, W. Sebal, V. Bakolas // Tribology Transactions. — 2009. — Vol. 52, iss. 4. — Pp. 534–543.
16. Root Cause Failure Analysis of Deep-Groove Ball Bearing Used in a Governor / X. Hou [et al.] // Applied Sciences. — 2022. — Vol. 12, iss. 19. — DOI: <https://doi.org/10.3390/app12199658>.
17. Further understanding of rolling contact fatigue in rolling element bearings – A review / M.V. Laithy [et al.] // Tribology International. — 2019. — Vol. 140. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105849>.
18. Bearing for Mining Machinery [Electronic resource] // NSK. — Mode of access: <https://www.nsk.com/common/data/ctrpPdf/bearings/e1265a.pdf>. — Date of access: 10.05.2023.

KUDELKO Igor U.

Researcher of the Laboratory of Reliability Problems and Metal Intensity of High and Extra-High Capacity
Dump Trucks of the R&D Center "Mining Machinery"¹
E-mail: samosvaloim@mail.ru

SIDORENKO Aleksandr G., Ph. D. in Eng.

Head of the Laboratory of Reliability Problems and Metal Intensity of High and Extra-High Capacity
Dump Trucks of the R&D Center "Mining Machinery"¹
E-mail: samosvaloim@mail.ru

SOTNIKOV Maksim V.

Researcher of the Laboratory of Reliability Problems and Metal Intensity of High and Extra-High Capacity
Dump Trucks of the R&D Center "Mining Machinery"¹
E-mail: samosvaloim@mail.ru

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 09 Oktober 2023.

RESEARCH OF DESTRUCTION CAUSES OF LARGE-SIZED BEARINGS OF MINING DUMP TRUCKS

The paper considers the main types and causes of surface damage that lead to the destruction and failure of large-sized bearings of motor-wheel reducers (MWR) of BELAZ mining dump trucks. The disadvantages of 20X2H4A (20Kh2N4A) steel currently used for the manufacture of large-sized MWR bearings are given. It is shown that using this steel it is problematic to achieve a high and uniform distribution of microhardness values over the thickness of the hardened layer. The analysis of the destruction of this type of bearings made of 20Kh2N4A steel largely determining the required life of the motor-wheel reducers, is carried out. The obtained research results indicate the need to use new grades of steels for the manufacture of large-sized MWR bearings.

Keywords: large-sized, bearings, motor-wheel reducers, fracture, microhardness, 20X2H4A (20Kh2N4A) steel, warpage

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-4-65-31-37>

References

- Parkhomchik P.A., et al. Novatsii v sozdanii i obespechenii konkurentosposobnosti karenoy tekhniki BELAZ [Novations in creation and ensuring the competitiveness of BELAZ quarry machinery]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 185–196. DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-185-196> (in Russ.).
- Gurchenko P.S., Solonovich A.A. Perspektivy primeniya uglerodistykh staley dlya podshipnikov i shesteren s uprochneniem upravlyаемoy obemno-poverkhnostnoy zakalkoy s induktsionnogo nagreva [Prospects of application carbon steel for bearings and gear wheels with operated surface hardening from induction heating]. *Foundry production and metallurgy*, 2015, no. 1(78), pp. 91–97 (in Russ.).
- Kudelko I.Yu., Sidorenko A.G., Moiseenko V.I. Stal 20KhN3MA dlya krupnogabaritnykh podshipnikov [Steel 20KhN3MA for big bearings]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2018, iss. 7, pp. 380–383 (in Russ.).
- Kudelko I.U., Sidorenko A.G. Primenenie tsementuemoy stali 20KH3MA dlya izgotovleniya krupnogabaritnykh kolets podshipnikov [Usage of cementation steel 20XH3MA (20KhN3MA) for producing large bearing rings]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2021, iss. 10, pp. 349–352 (in Russ.).
- Chermenskiy O.N., Fedotov N.N. *Podshipniki kacheniya* [Rolling bearings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 576 p. (in Russ.).
- Braun E.D., et al. *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka)* [Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication)]. Moscow, Nauka i tekhnika Publ., 1995. 777 p. (in Russ.).
- Melnikov A.A., Dmitrieva M.O. Issledovanie mekhanizma razrusheniya rabochey poverkhnosti krupnogabaritnykh podshipnikov v protsesse ekspluatatsii [Mechanism of failure of working faces of big bearings in the process of operation]. *Vestnik of Samara University. Aerospace and mechanical engineering*, 2019, vol. 18, no. 1, pp. 184–191. DOI: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-1-184-191> (in Russ.).
- Hou X., Diao Q., Liu Y., Liu C., Zhang Z., Tao C. Failure analysis of a cylindrical roller bearing caused by excessive tightening axial force. *Machines*, 2022, vol. 10, iss. 5. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10050322>.
- Bearing damage and failure analysis*. 2017. 106 p. Available at: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968064c148-Bearing-failures---14219_2-EN_tcm_12-297619.pdf (accessed 10 April 2023).
- Bearing damage analysis. Reference guide*. 2023. 24 p. Available at: <https://www.timken.com/resources/5892-bearing-damage-analysis-with-lubrication-reference-guide/> (accessed 12 April 2023).
- Ogar P.M., Tarasov V.A., Turchenko A.V. Geometriya kontakta pri uprugoplasticheskom vnedrenii sfericheskoy nerovnosti [Contact geometry in the process of the elastic-plastic indentation of a spherical asperity]. *Systems. Methods. Technologies*, 2012, no. 1(13), pp. 9–16 (in Russ.).
- Orlov M.R., Grigorenko V.B., Morozova L.V., Naprienko S.A. Issledovanie ekspluatatsionnykh razrusheniy podshipnikov metodami opticheskoy, rastrovoy elektronnoy mikroskopii i rentgenospektralnogo mikroanaliza [Research of operational damages of bearings by methods of optical microscopy, scanning elec-

- tron microscopy and X-ray microanalysis]. *Proceedings of VIAM*, 2016, no. 1(37), pp. 62–79. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-1-62-79> (in Russ.)
13. Panova I.M., Panov A.D. Opredelenie dolgovechnosti gibridnykh podshipnikov [Determination of the durability of hybrid bearings]. *Naukovedenie*, 2017, vol. 9, no. 2. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/118TVN217.pdf> (in Russ.).
 14. Gould B., Greco A., Stadler K., Vegter E., Xiao X. Using advanced tomography techniques to investigate the development of White Etching Cracks in a prematurely failed field bearing. *Tribology international*, 2017, vol. 116, pp. 362–370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.07.028>.
 15. Gloeckner P., Sebald W., Bakolas V. An approach to understanding micro-spalling in high-speed ball bearings using a thermal elastohydrodynamic model. *Tribology transactions*, 2009, vol. 52, iss. 4, pp. 534–543. DOI: <https://doi.org/10.1080/10402000902774267>.
 16. Hou X., Liu Y., Li T., Liu C., Zhang Z., Tao C. Root cause failure analysis of deep-groove ball bearing used in a governor. *Applied sciences*, 2022, vol. 12, iss. 19. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12199658>.
 17. El Laithy M., Wang L., Harvey T.J., Viernusel B., Correns M., Blass T. Further understanding of rolling contact fatigue in rolling element bearings – A review. *Tribology international*, 2019, vol. 140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105849>.
 18. *Bearings for mining machinery*. 2005. 15 p. Available at: <https://www.nsk.com/common/data/ctrpPdf/bearings/e1265a.pdf> (accessed 10 May 2023).