

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 004.42+621.891

*БЕЛЯЕВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,  
sabvt@rambler.ru*

*КУРГУЗОВА ОЛЕСЯ АЛЕКСАНДРОВНА, канд. техн. наук, доцент,  
sabvt@rambler.ru*

*Омский автобронетанковый инженерный институт,  
644098, г. Омск, 14-й военный городок,*

*ДОРОШЕНКО ЮЛИЯ НИКОЛАЕВНА, канд. техн. наук, доцент,  
kafotopvent1@rambler.ru*

*СОЛОВЬЕВА ОЛЬГА ЮРЬЕВНА, ассистент,  
kafotopvent1@rambler.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

## **ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В СМАЗКЕ НА ПОВЕДЕНИЕ ПАР ТРЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ТВЕРДОСТИ СТАЛЬНЫХ КОНТРЕЛ**

В настоящей работе приведено исследование характера изнашивания пары трения диск – шар, смазываемой минеральным маслом и этим же маслом, модифицированным высокодисперсными частицами цинка. Элементы пары трения изготовлены из инструментальной стали с содержанием углерода 0,8 %. При смазывании пары трения с закаленным диском (HRC 63), модифицированным маслом, ширина следа износа увеличилась на 20,5 % по сравнению со смазыванием обычным маслом. Обратная ситуация сложилась для пары трения с термически необработанным диском (185 HB). Использование модифицированного масла уменьшает ширину следа износа на 10 %. Смазочное действие металлической добавки объясняется взаимодействием частиц цинка с кислородом смазки и механическим деформированием этих же частиц, попадающих на участки фактического касания.

**Ключевые слова:** трение; износ; смазка; твердость; ультрадисперсный порошок.

*SERGEY A. BELYAEV, PhD, A/Professor,  
sabvt@rambler.ru*

*OLESYA A. KURGUZOVA, PhD, A/Professor,  
sabvt@rambler.ru*

*Omsk Tank Engineering Institute,  
14-I Voennyi Gorodok, 644098, Omsk, Russia,  
YULIYA N. DOROSHENKO, PhD, A/Professor,  
kafotopvent1@rambler.ru  
OL'GA YU. SOLOV'YEV, Instructor,  
kafotopvent1@rambler.ru  
Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

## **LUBRICANT ULTRAFINE PARTICLE EFFECT ON FRICTION COUPLE BEHAVIOR WITH DIFFERENT HARDNESS OF STEEL COUPLED ELEMENTS**

This paper presents the wear analysis of disk-ball couple element lubricated with mineral oil and zinc ultrafine particles modified with this oil. Friction couple elements are produced from different hardness structural 0,8 % carbon steel. In modified oil lubrication of the coupled elements with tempered steel disk (63 HRC), the width of the wear path increased by 20,5 % comparing to non-modified lubricant. Another situation is observed for the friction couple with the thermally non-treated disk (185 HB). The use of modified oil particles reduces the wear path by 10 %. The lubricating effect is explained by the interaction of zinc particles with lubrication oxygen and mechanical deformation of these particles that appear on the friction surfaces.

**Keywords:** friction; wear; lubrication; hardness; ultra-fine powder.

Одним из способов повышения надежности и долговечности деталей машин и оборудования является улучшение качества смазочных материалов за счет введения в них добавок, изготовленных на основе высоко-(нано)-дисперсных частиц металлов, сплавов или химических соединений [1–3]. В пластичных смазках или маслах дисперсные частицы используются как противоизносный и/или антифрикционный агент. Однако эти добавки не всегда являются средством снижения трения и износа. Например, добавление наночастиц оксида цинка в синтетическое смазочное масло вызывало снижение износостойкости стальных образцов по сравнению с использованием базового масла [3] при некоторых режимных нагрузках.

Эти неординарные результаты вызваны отсутствием систематизации проводимых исследований. В частности, факторы, которые могут повлиять на эффективность смазочного действия добавок при проведении экспериментов, часто не учитываются исследователями. Эти факторы многочисленны, и они определены кинематикой трибосопряжений, режимом смазывания пар трения, технологией изготовления и обработки материала контактирующих образцов и т. д. В работе [4] факторы проведения триботехнического эксперимента были систематизированы в четыре группы: физико-химические (структурное состояние материала образцов, тип смазки); режимные (нагрузочно-скоростной режим трения и его длительность); кинематические (геометрическая схема фрикционного контакта); конструкторско-технологические (например, способ подачи смазки). Эффективность таких добавок подробно изучалась при влиянии физико-химических и режимных факторов. Роль остальных факторов остается малоизученной.

Целью работы является определение влияния добавки наноструктурированных высокодисперсных частиц цинка к минеральному маслу на величины коэффициента трения и линейного износа высокоуглеродистой стали с определенным соотношением величин твердости рабочих поверхностей пар трения с точечным кинематическим контактом. Данный фактор – сочетание величин твердости, участвующих в трении поверхностей, является конструкторско-технологическим фактором. Оно может соответствовать так называемой «прямой» или «обратной» паре трения [5]. В высших кинематических парах трения (контакт по линии или точке) встречается и комбинация значений твердости как «твердый материал по твердому материалу» [Там же].

Для выяснения механизма смазочного действия добавки было изучено структурное состояние поверхностей трения и поверхностных слоев материала образцов с привлечением исследовательских методик.

### Методика проведения экспериментов

Эксперименты проводились при комнатной температуре около 22 °С, при относительной влажности воздуха около 50 % с использованием трибометра CSM Instruments по рабочей схеме «шар по диску». Диски были изготовлены из стали марки У8 (С – 0,8 %, Si – 0,25 %, Mn – 0,25 %, S – 0,01 %, P – 0,01 %). В термически необработанном состоянии они использовались для обратной пары трения. Для другой пары трения диски были термически обработаны до получения твердости 63–65 HRC. Диаметр образцов «шар» был равен 3,0 мм. Материал сферических образцов – сталь ШХ-15 (%) с твердостью 64 HRC. Шероховатость всех рабочих поверхностей была равна  $Ra = 0,1$  мкм.

Все эксперименты проводились при скорости скольжения 0,22 м/с и нормальной нагрузке, равной 10 Н, в течение 1800 с. Проведение всех экспериментов дублировалось.

Минеральное масло И-20 (ГОСТ 20799–88) использовалось как эталонная смазка. Наноструктурированные частицы высокодисперсного порошка цинка были получены методом электрического взрыва проводника-проволочки в среде аргона. Средний размер частиц составлял 80–120 нм. Концентрированная масляная суспензия частиц порошка как функциональная добавка была получена в магнитно-турбулентном аппарате HPMS TK22. В таком виде добавка вводилась в базовое масло в пропорции 1 к 22 (по объему) и затем механически взбалтывалась вместе с маслом ручным способом около 4–5 мин. Метод смазывания пары трения заключался в погружении фрикционного контакта на незначительную глубину (около 1 мм) от уровня зеркала масла.

Расчет контактных напряжений согласно теории Герца при заданных условиях контактирования показал, что максимальное контактное напряжение было около 2,32 ГПа, а среднее – около 1,55 ГПа [6]. Износ образцов-дисков оценивался по ширине дорожки износа с использованием оптического микроскопа Axiovert 200 MAT, а также по глубине дорожки с использованием бесконтактного профилографа-профилометра Stil3D Micromeasure. Измерение величины износа образцов «шар» не производилось. До и после эксперимента образцы очищались в ультразвуковой ванне СТ-420С. Поверхности трения анализировали методами оптической микроскопии и микрорентгеноспек-

трального анализа (с использованием приставки Camebax Microbeam). Концентрационные профили элементов по глубине поверхностного слоя вблизи поверхностей трения образцов-дисков определяли на Оже-спектрометре «Шхуна-2». Энергия электронов зондирующего пучка составила 3 кэВ. Ионное распыление поверхностей трения образцов производилось ионами аргона.

### Результаты и их обсуждение

Влияние наночастиц на значения коэффициента трения при использовании названных ранее пар трения показано на рис. 1 и 2.

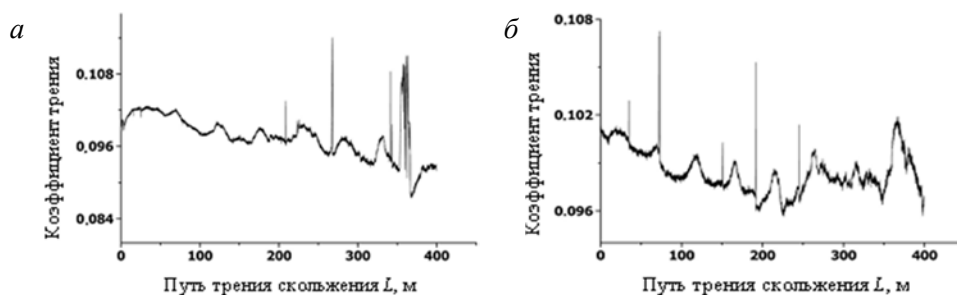


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от пути трения для случаев использования модифицированного (а) и минерального (б) масла с термически необработанными дисками

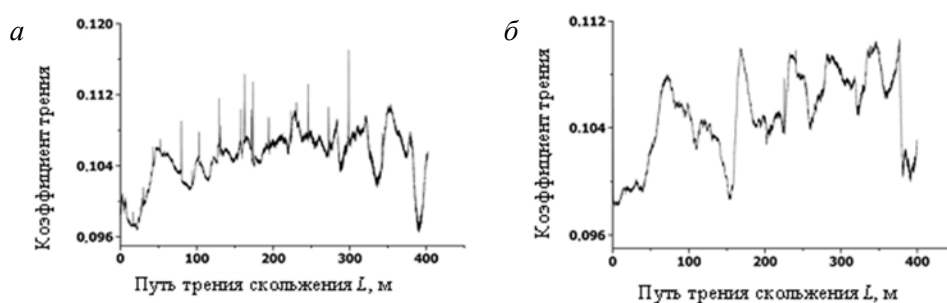


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от пути трения для случаев использования модифицированного (а) и минерального (б) масла с термически обработанными дисками

На рис. 1, а можно заметить, что, когда производилось смазывание модифицированным маслом при использовании незакаленного контртела, имелась общая тенденция к уменьшению значения коэффициента трения по сравнению с тем случаем, когда использовалось базовое масло. Однако присутствие спорадических всплесков коэффициента трения, появляющихся время от времени на диаграмме трения, соответствует обоим случаям использования смазок.

Когда использовались стальные образцы с равной твердостью, тенденция к уменьшению значения коэффициента трения не прослеживалась при использовании какой-либо смазки (рис. 2). При этом добавление частиц цинка к маслу привело к частому появлению «пиковых» значений, подобных тем,

которые имеются на предыдущих зависимостях (рис. 2, а). Максимальное значение коэффициента трения достигало около 0,117.

В таблице показаны темпы изнашивания образцов дисков с различной твердостью после испытаний с использованием и без использования наноструктурированных частиц. Когда пара трения с закаленным диском смазывалась модифицированным маслом, было установлено, что ширина дорожки трения увеличилась примерно на 20 % по сравнению с тем случаем, когда использовалось минеральное масло. Обратная ситуация имела место, когда применялись пары трения с необработанными подвижными образцами. В последнем случае модифицирование смазки привело к снижению ширины дорожки износа на 10 %.

#### Результаты измерения износа линейным методом

| Используемая смазка                 | Средняя величина ширины дорожки износа, мкм | Средняя величина площади поперечного сечения дорожки износа, мкм <sup>2</sup> |
|-------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Стандартное минеральное масло       | 147<br>195*                                 | 99,0<br>18,3*                                                                 |
| Минеральное масло с частицами цинка | 132 (–10 %)<br>235* (+20,5 %)               | 80,1 (–19,1 %)<br>20,6* (+12,6 %)                                             |

\* Данные величины соответствуют термически обработанным образцам.

Результаты последующего профилографирования поверхностей трения в направлении, поперечном к скольжению, также подтвердили, что добавление металлических частиц при смазывании пары трения с неравной твердостью сопряженных поверхностей способствовало уменьшению значения износа. Глубина и ширина профиля дорожки изнашивания значительно уменьшились. Износ контртел в парах трения с равной твердостью сопряженных поверхностей возможно оценить только за счет измерения значения ширины дорожки износа. Это было связано с обнаруженным отсутствием проникновения тела верхнего образца в поверхность нижнего образца (диска). Следовательно, в процессе трения изнашивание образцов «шар» в этом случае становится преобладающим относительно образцов «диск».

Таким образом, введение высокодисперсных частиц порошка цинка в масло определенно влияет на значения трения и износа стальной пары трения, в том числе и при изменении сочетания твердости сопряженных поверхностей.

На рис. 3 показаны оптические изображения поверхностей трения дисков. Поверхности трения термически необработанных дисков незначительно различались между собой по внешнему виду (рис. 3, а, б). Матовая окраска поверхностей трения указывает на присутствие поверхностных пленок, образованных в процессе трения. Матовая окраска поверхностей трения термически упрочненных образцов дисков также указывает на образование поверхностных пленок при трении, но это явление, по-видимому, в данном случае стало более значительным; окраска пленок приобрела наиболее темный оттенок (рис. 3, в, г).

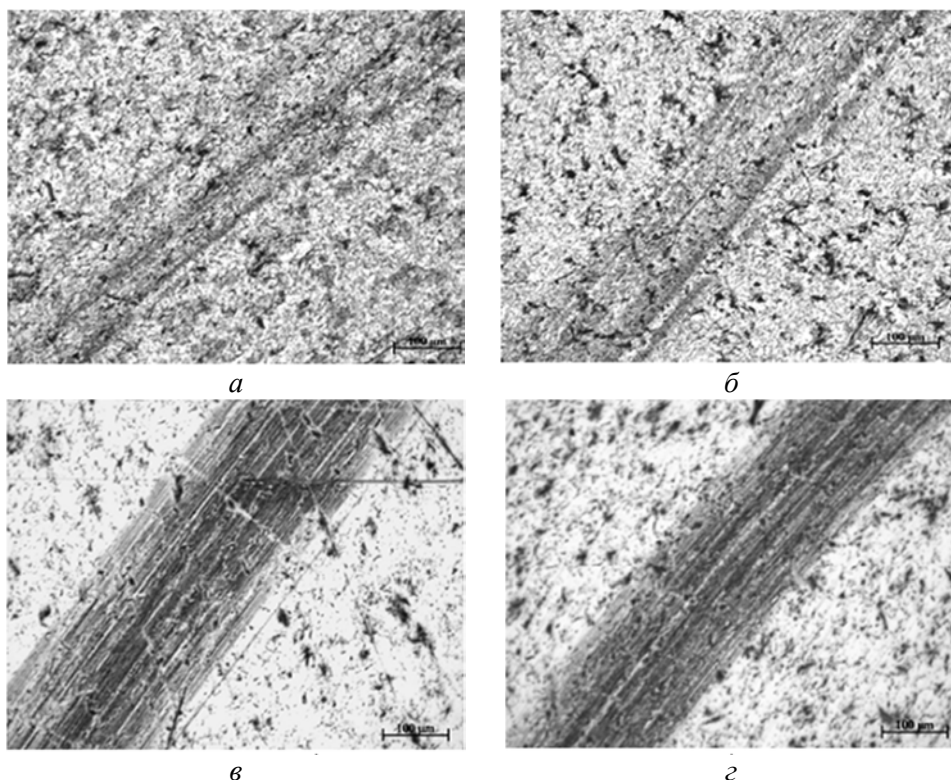


Рис. 3. Оптические изображения поверхностей трения термически не упрочненных (а, б) и упрочненных (в, г) образцов, испытанных в среде базового (б, г) и модифицированного (а, в) минерального масла

Частицы цинка не были обнаружены на какой-либо поверхности трения ни методом микрорентгеноспектрального анализа, ни методом Оже-спектроскопии.

Полученные данные позволяют представить следующее. Известно, что добавление порошков металлов, сплавов или их солей дает возможность стимулировать или ингибировать процесс окисления минеральных масел и пластичных смазок [7]. Результаты ранее проведенного анализа на определение антиоксидантной стабильности базового масла и масла с добавками пластичных частиц показали, что частицы обладают также каталитическим эффектом [8].

Следовательно, нахождение дисперсных частиц цинка в смазке должно способствовать снижению содержания в нем кислорода (в молекулярном или связанном виде), который всегда присутствует в минеральных маслах. При отсутствии в смазке кислорода и других, химически активных к трущимся поверхностям элементов (пассиваторов), количество участков локального повреждения вторичных структур обычно увеличивается. Повреждение проявляется в виде истирания или отслаивания поверхностных пленок (вторичных структур), появления микротрещин. Однако оптические изображения поверхностей трения, представленные на фотографиях, не соответствуют такому характеру их повреждения у образцов, испытанных как с базовым, так и с мо-

диффицированным маслом. Несмотря на ожидаемый стимулирующий каталитический эффект дисперсных металлических частиц, количество кислорода в зоне трения было достаточным. Это подтверждается также данными Оже-спектроскопии (рис. 4).

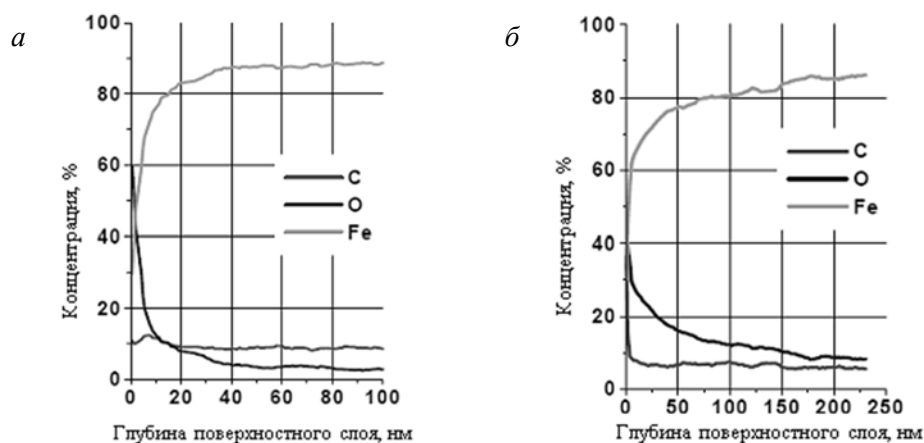


Рис. 4. Концентрационные Оже-профили элементов, полученные послойным травлением поверхностного слоя термически обработанного (а) и необработанного (б) стальных образцов, испытанных в среде модифицированного масла

Данная ситуация, возможно, связана с методом подачи смазки в зону трения. Фрикционный контакт поверхностей производился при неглубоком погружении относительно уровня смазки в смазочной ванне. По литературным сведениям [4], при таком методе смазывания процесс каталитического окисления смазочного масла не имеет выраженного влияния на масштаб диффузии кислорода в сталь (вследствие значительного насыщения смазки воздухом в тонком смазочном слое).

Помимо стимулирующего каталитического эффекта, частицы цинка, попадающие в пятна фактического контакта при достаточном сопутствующем поступлении кислорода, могут изменять характер окислительного изнашивания. Например, известно, что дисперсные или высокодисперсные частицы меди, добавленные к маслу, могут способствовать при трении выраженному коррозионно-механическому характеру изнашивания стальных пар трения за счет проявления гальванического эффекта [7]. В противоположность этому, частицы цинка, вступая в низкотемпературную реакцию с кислородом смазки, окисляются и тем самым оказывают абразивное влияние на поверхностные слои стальных образцов. В работе [3] было показано, что нахождение оксида цинка в дисперсном виде при граничном трении стали вызывает абразивное воздействие.

Следует отметить, что диффузия кислорода в приповерхностные объемы стали увеличилась при контакте поверхностей трения равной твердости, (рис. 4, а). Это произошло из-за интенсивного фрикционного тепловыделения при контакте термически обработанных сталей, обладающих высокими механическими свойствами. В термически обработанном материале масштаб пластической деформации в поверхностных слоях уменьшается (из-за наличия

в структуре стали мартенсита), в то время как насыщение кислородом увеличивается в локальных объемах материала, близких к поверхности. Следовательно, в данном случае существует большая вероятность окисления частиц цинка при трении, нежели при другом сочетании величин твердости сопряженных поверхностей. Предполагая образование фазы ZnO в процессе трения, нужно заметить, что она является менее твердой, чем окислы железа. Но при контакте стальных поверхностей оксид цинка (в дисперсном состоянии), как указывалось выше, часто выступает в роли абразива (так называемого «третьего тела»), причем как при граничной смазке, так и при сухом трении [9]. В то же время совокупность всех результатов, связанных с использованием пары трения с термически необработанным контртелом, указывает на положительное влияние добавки. Проникновение кислорода в сталь наблюдается на гораздо большем глубинном уровне, однако концентрация данного элемента уже не столь значительна на сопоставимых расстояниях вблизи поверхности (рис. 4, б). Следовательно, положительное смазочное влияние частиц добавки связано с проявлением механического эффекта их воздействия, чему должно способствовать нанокристаллическое состояние структуры цинка [10]. Отсюда можно предположить, что наличия только нанокристаллического строения частиц добавляемого порошка недостаточно для создания при трении поверхностных зон с низкой сдвиговой устойчивостью. Необходимо подавление эффекта окисления частиц добавки при трении, чего можно достичь за счет проведения процесса электровзрыва металлического проводника не в среде защитных газов, а в среде защитных жидкостей, например жирных кислот [11], и тем самым за счет создания защитной оболочки частицы. Этим же путем возможно решение проблемы агломерации дисперсных частиц, возникающей как при производстве порошка, так и при длительном хранении приготовленной суспензии.

### Выводы

1. В соответствии с полученными результатами введение ультрадисперсных частиц цинка в смазочное масло при работе пары трения сталь – сталь с термически необработанным контртелом привело к повышению ее износостойкости. Износостойкость пары трения с закаленным контртелом в среде модифицированной смазки заметно понизилась. Для первого же случая контактирования поведение коэффициента трения изменилось – наблюдается общая тенденция к постоянному снижению его величин в ходе всего времени испытаний. Однако при использовании термически обработанного контртела характер поведения диаграммы трения оказался аналогичен тому случаю, когда использовалось базовое смазочное масло для пары трения с равными величинами твердости контактирующих поверхностей.

2. При контактных напряжениях до 2,32 ГПа, после использования смазочной добавки, не наблюдалось формирования защитной плакирующей пленки ни на одной из сопряженных поверхностей, что было подтверждено методами микрорентгеноспектрального анализа и Оже-спектроскопии.

3. Смазочное действие добавленных к маслу частиц связано с химическим взаимодействием частиц с кислородом смазки (окислением частиц) и механическим деформированием частиц, попадающих в пятна фактического контакта.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Evaluating the use of zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles in a metalworking fluid from a toxicological perspective* / S.H. Seyedmahmoudi [etc.] // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2015. – № 2. – 17:104.
2. *Tang, Z.* A review of recent developments of friction modifiers for liquid lubricants (2007-present) / Z. Tang, S. Li // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. – 2014. – № 18. – P. 119–139.
3. *The tribological behaviour of ZnO nanoparticles as an additive to PAO6* / A. Hernandez Battez [etc.] // *Wear*. – 2006. – № 261. – P. 256–263.
4. *Гаркунов, Д.Н.* Износ и безызносность / Д.Н. Гаркунов. – М. : МСХА, 2004. – 616 с.
5. *Voitov, V.A.* Coupling of friction pairs according to the hardness and designing methods to increase the wear resistance / V.A. Voitov // *Friction and Wear*. – 1994. – № 15. – P. 452–460.
6. *Himanshu Patel, C.* Characteristics of lubrication at nanoscale on the performance of transversely rough slider bearing / C. Himanshu Patel, G.M. Deheri // *Mechanika*. – 2009. – № 80. – P. 64–71.
7. *Фролов, К.В.* Современная трибология: итоги и перспективы / К.В. Фролов. – М. : Изд-во ЛКИ, 2008. – 480 с.
8. *Влияние УДП присадки меди в смазке на процессы трения и изнашивания* / А.В. Колубаев, С.А. Ларионов, С.Ю. Тарасов, С.А. Беляев // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2000. – № 2. – С. 232–238.
9. *Lubricious zinc oxide films: synthesis, characterization and tribological behaviour* / J.S. Zabinski [etc.] // *Journal of Materials Science*. – 1997. – № 32. – P. 5313–5319.
10. *Tarasov, S.Yu.* Alloying contact zones by metallic nanopowders in sliding wear / S.Yu. Tarasov, S.A. Belyaev // *Wear*. – 2004. – № 257. – P. 523–530.
11. *Facile synthesis of surface oxide free copper nanoparticles by in-situ coating with oleic acid* / G.-J. Lee [etc.] // *Powder Technology*. – 2014. – № 261. – P. 143–146.

## REFERENCES

1. *Seyedmahmoudi S.H., et al.* Evaluating the use of zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles in a metalworking fluid from a toxicological perspective. *Journal of Nanoparticle Research*. 2015. No. 2. Pp. 17–104.
2. *Tang Z., Li S.* A review of recent developments of friction modifiers for liquid lubricants (2007–present). *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2014. No. 18. Pp. 119–139.
3. *Hernandez Battez A., et al.* The tribological behaviour of ZnO nanoparticles as an additive to PAO6. *Wear*. 2006. No. 261. Pp. 256–263.
4. *Garkunov D.N.* Iznos i bezyznosnost' [Wear and non-wear]. Moscow : MSHA Publ., 2004. 616 p. (rus)
5. *Voitov V.A.* Coupling of friction pairs according to the hardness and designing methods to increase the wear resistance. *Friction and Wear*. 1994. No. 15. Pp. 452–460. (rus)
6. *Himanshu Patel C., Deheri G.M.* Characteristics of lubrication at nanoscale on the performance of transversely rough slider bearing. *Mekhanika*. 2009. No. 80. Pp. 64–71.
7. *Frolov K.V.* Sovremennaya tribologiya: itogi i perspektivy [Modern tribology: summary and perspectives]. Moscow : LKI Publ., 2008. 480 p. (rus)
8. *Kolubaev A.V., Larionov S.A., Tarasov S.Yu., Belyaev S.A.* Vliyanie UDP prisadki medi v smazke na protsessy treniya i iznashivaniya [Effect of ultrafine copper additive to lubricant on friction and wear processes]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2000. No. 2. Pp. 232–238. (rus)
9. *Zabinski J.S., et al.* Lubricious zinc oxide films: synthesis, characterization and tribological behaviour. *Journal of Materials Science*. 1997. No 32. Pp. 5313–5319.
10. *Tarasov S.Yu., Belyaev S.A.* Alloying contact zones by metallic nanopowders in sliding wear. *Wear* 2004. No 257. Pp. 523–530.
11. *Lee G.-J., et al.* Facile synthesis of surface oxide free copper nanoparticles by in-situ coating with oleic acid. *Powder Technology*. 2014. No 261. Pp. 143–146.