

УДК 621.81

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН, канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА,
В.И. КРАВЧУК, И.И. ПИЛИПЕНОК
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Показано, что для увеличения срока службы деталей тяжело нагруженных узлов трения автомобилей рекомендуется использовать комплексные смазки: литиевую смазку с использованием структурирующей и прирабочной добавки в виде пакета наноразмерных алмазов и сульфат-кальциевую с добавками фторопласта и вязкостной присадкой. Испытания смоделированы на основании условий работы пары трения ось–втулка балансира, эксплуатируемые с контактным давлением 1,5–6,0 МПа. Установлено, что для пары трения бронза–сталь в условиях граничного трения при указанном контактном давлении максимальная износостойкость образцов на стадиях приработки и устоявшегося трения достигается при использовании комплексной сульфат-кальциевой пластичной смазки с добавками фторопласта и вязкостной присадкой. Использование комплексной литиевой смазки с наноразмерными алмазами сокращает период приработки на всех указанных режимах и эффективна при удельной нагрузке, не превышающей 3 МПа.

Ключевые слова: износостойкость, узлы трения, наноразмерные алмазы, фторопласт, коэффициент трения, комплексные смазки.

Введение. Во многих узлах современных машин и механизмов имеются пары трения, работающие в тяжелых условиях. Высокие значения удельных нагрузок и скоростей скольжения, нередко действующих совместно с динамическим нагружением, и, как правило, при недостаточной смазке, создают неблагоприятные условия работы узлов трения, что приводит к потере их работоспособности. В трехосных грузовых автомобилях, а также в двух- и трехосных полуприцепах МАЗ используется задняя подвеска балансира типа.

Балансирная подвеска имеет следующую конструкцию (рисунок 1). В задней нижней части рамы автомобиля жестко установлены кронштейны, в которых с помощью подшипников скольжения вмонтированы короткие оси балансира. На осях также с помощью подшипников установлены балансиры, играющие в подвеске одну из основных ролей. Сверху на балансирах с помощью стремянок закреплены перевернутые полуэллиптические рессоры. Кронштейны и балансиры установлены между средним и задним мостами автомобиля, поэтому рессоры концами опираются на балки мостов, фиксируясь на них с помощью специальных опорных кронштейнов¹.



Рисунок 1. – Балансир автомобиля МАЗ

Благодаря такой конструкции задние мосты автомобиля и вся их подвеска, включая рессоры, образует тележку, которая может более или менее свободно качаться как единое целое на осях балансира – это дает автомобилю возможность преодолевать небольшие и крупные неровности дороги, т.к. качающиеся движения тележки исключают крен и кручение рамы. С другой стороны, мосты благодаря рессорам и реактивным штангам могут независимо друг от друга двигаться в вертикальной плоскости, что позволяет сглаживать мелкие неровности дороги.

¹ Балансир МАЗ: основа устойчивости минских грузовиков и прицепов [Электронный ресурс] / Автоальянс. – 04.08.2014. – Режим доступа: <https://www.autoopt.ru>, свободный.

Подвеской такой конструкции сегодня оснащаются большинство моделей трехосных автомобилей и многоосных полуприцепов МАЗ.

Подвеска грузового автомобиля работает в сложных условиях, все ее элементы испытывают большие нагрузки (в единицы и десятки тонн), поэтому их срок службы ограничен. Довольно часто отказывают балансиры МАЗ, кронштейны, рессоры, реактивные штанги, а также разнообразные сальники, уплотнители и иные компоненты. Наиболее частой неисправностью является появление трещин и изломов кронштейнов, балансира и изнашивание втулок балансира (рисунок 2). Износ втулки является распространенной причиной отказа балансира. Скорость изнашивания увеличивается при движении. Увеличение пространства между втулкой и осью влияет на рычаг управления, который откидывается от оси и деформирует детали. Номинальный зазор составляет 0,12–0,30 мм. Изношенные втулки следует заменять при достижении зазора между втулкой и осью в 1 мм.



Рисунок 2. – Втулка балансира

Ресурс узлов трения в значительной степени определяется работоспособностью смазочных материалов. Современное развитие техники связано с повышением скоростей и нагрузок в узлах трения, что требует разработки новых смазочных материалов, обладающих повышенной нагрузочной способностью и обеспечивающих более низкую интенсивность изнашивания. В настоящее время получают все большее распространение попытки направленного улучшения свойств пластичных смазок введением третьего компонента (добавки) в состав пластичной смазки. Введенные в состав смазки разнообразные твердые добавки даже в случае выдавливания смазочного материала из зоны трения остаются в ней, образуя разделяющий слой, снижающий степень металлического контакта поверхностей.

Трибомеханическое модифицирование представляет собой финишную операцию обработки поверхности, предназначенную для окончательного формирования структурно-фазового состояния рабочей поверхности. Оно рекомендуется для применения преимущественно в узлах трения-скольжения (подшипники скольжения, опоры, направляющие и т.д.), для тяжело нагруженных узлов трения, работающих в условиях высоких нагрузок и вибраций (карьерная техника, железнодорожный транспорт, строительные дорожные машины, сельхозтехника, дробилки, грохоты), для повышения качества узлов и деталей, подверженных сильному износу (штоки, узлы трения, подшипники, передачи, поршни, цилиндры ДВС и др.)² [2].

В комплексной литевой смазке в качестве основных компонентов пакета добавок используются дисульфид молибдена (противозадирная (антифрикционная) добавка), шихта ША-А (структурирующая и приработочная добавка). Повышение функциональных свойств смазки достигается введением в ее состав пакета нано- (рисунок 3, а) и микроразмерных (рисунок 3, б) добавок. Выбор количественного состава пакета добавок проведен с точки зрения оптимального сочетания объемно-механических (коллоидная стабильность, пенетрация и температура каплепадения) и триботехнических (нагрузка сваривания, нагрузка заедания индекс задира) характеристик смазки.

Комплексная литевая дисперсная фаза по сравнению с простой литевой дисперсной фазой при одинаковых дисперсионных средах придает смазке следующие улучшенные качества²:

- возрастание несущей способности граничного слоя смазки в 2–3 раза, что позволяет повысить нагрузочные характеристики узла трения;
- повышение температуры каплепадения на 20–40%, что дает возможность повысить допустимую температуру применения узла и механизма в целом;

² Иванов, В.П. Триботехническое модифицирование поверхностей узлов трения в технике / В.П. Иванов, А.В. Дудан, Т.В. Вигерина // Актуальные проблемы развития экономики и управления в современных условиях : материалы IV междунар. науч.-практ. конф., Москва, 10 нояб. 2021 г. / Моск. экон. ин-т. – М. : МЭИ, 2021. – С. 45–48.

- увеличение механической стабильности в 1,5–2,0 раза, позволяющая ужесточать режимы работы узла без опасения разрушения и вытекания смазочного материала;
- общее повышение и переход на другой уровень всех остальных параметров смазки, приводящее к увеличению работоспособности смазочного материала и, как следствие, узла в целом.

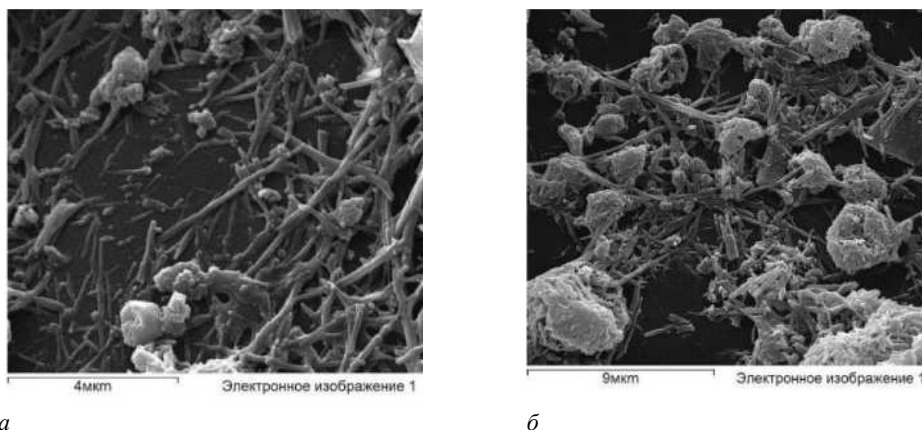


Рисунок 3. – Микроструктура дисперсной фазы комплексной литиевой смазки с пакетом наноразмерных алмазосодержащих добавок [3]

Комплексная сульфат-кальциевая с добавками фторопласта и вязкостной присадкой за счет введения в состав мелкодисперсного фторопласта улучшает антифрикционные характеристики, повышает устойчивость в агрессивных средах (концентрированные кислоты и щелочи).

Цель данной работы – повышение износостойкости деталей тяжело нагруженных узлов трения за счет введения в литиевую и сульфат-кальциевую смазки приработочных добавок в виде пакета наноразмерных алмазов и фторопласта.

Методы исследований. Исследуемые образцы изготовлены из бронзы Бр05Ц5С5 ГОСТ 613-79 и представляют собой ролик Ø 10 x 15 мм. В качестве контртела был выбран диск Ø 70 x 6 мм из закаленной стали 45.

Триботехнические испытания проводились на универсальной машине трения ММВ-1А вертикального типа с компьютерным управлением. Машина поддерживает силу нагрузки в течении эксперимента постоянной с отклонением ± 2 Н. Относительная погрешность измерения силы трения не превышала $\pm 2\%$ при жидкостном режиме смазывания. Модель испытаний приведена на рисунке 4.

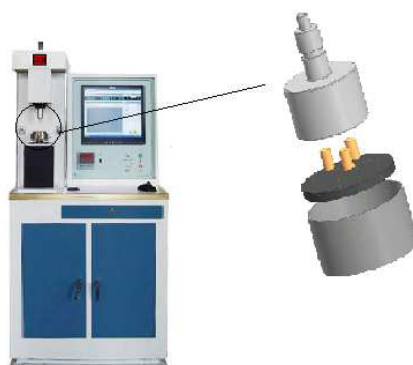


Рисунок 4. – Модель испытаний

Перед проведением исследования для повышения точности эксперимента производилась подготовка поверхности образцов. Для уменьшения шероховатости производилась притирка с использованием наждачной бумаги зернистостью Р600.

В процессе испытаний фиксировались значения величин силы трения и коэффициента трения с частотой один раз в 1 с в режиме реального времени с возможностью сохранения в файл. Полученные данные аккумулировались в графическом и текстовом виде и после аппроксимации подвергались анализу.

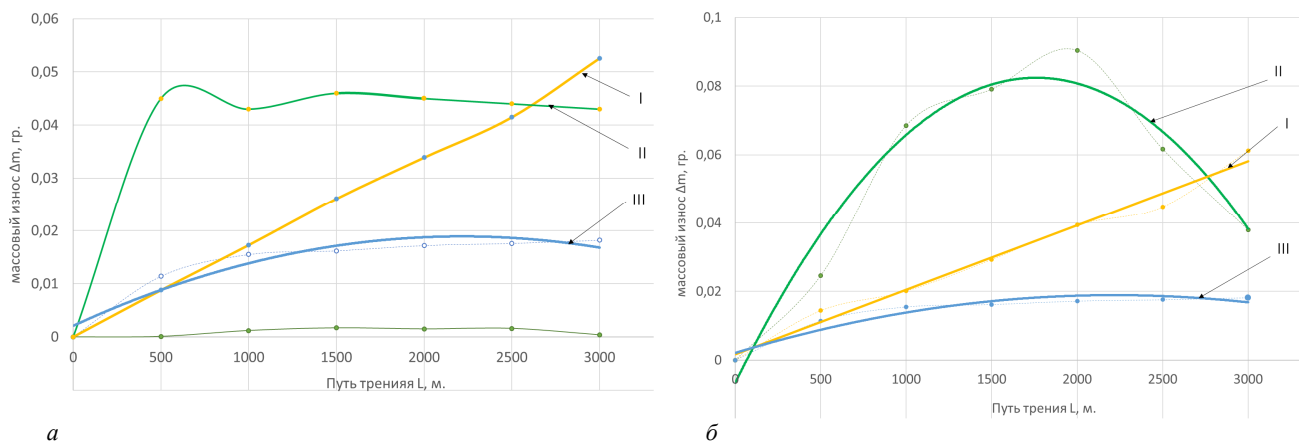
Интенсивность изнашивания оценивалась массовым износом Δm , мг, на аналитических весах AS 60/220/C/2/N после прохождения каждых 500 м.

Для определения зависимости влияния нагрузочно-скоростных режимов трибозаимодействия была использована пластичная комплексная литиевая смазка +1,0 масс.% ША-А и комплексная сульфат-кальциевая

с добавками фторопласта и вязкостной присадкой. В качестве базовой смазки была выбрана серийно выпускаемая пластичная смазка Литол-24 (ГОСТ 21150-87).

Режимы трения при испытании образцов: давление 3–6 МПа; скорость скольжения 0,1 м/с; расстояние, пройденное образцами, – 500–3000 м.

Основная часть. Результаты испытаний, приведенные на рисунке 5, *а*, *б*, показали, что влияние модифицирующей добавки к смазке на процессы изнашивания зависит от давления. При относительно низком номинальном давлении 3 МПа износ образцов из бронзы Бр05Ц5С5 при трении в среде смазки модифицированной наноразмерными алмазами сопоставим с массовым износом образцов, испытываемых в смазке Литол-24 (рисунок 5, *а*). Минимальным износом (~2 раза меньше) обладает образец, работающий в комплексной сульфат-кальциевой смазке с добавками фторопласта и вязкостной присадкой. С увеличением контактного давления до 6 МПа массовый износ для смазки с ультрадисперсной алмазографитовой шихтой (УДАГ) в 1,12 раз превышает износ Литол-24 и в 4 раза износ смазки с добавками фторопласта. Однако следует отметить, что при различных давлениях период приработки смазок с наночастицами завершается в интервале от 500 до 1500 м, тогда как приработка с использованием смазки Литол-24 достигает 5000 м. Повышение триботехнических свойств и снижение периода приработки при модифицировании пластичной смазки наноразмерными частицами может быть обусловлено как изменением физико-химических и реологических свойств смазочного материала (в частности повышением термостойкости и несущей способности масляной пленки), так и упрочнением поверхностных слоев пары трения за счет их интенсивного пластического деформирования в процессе трения со смазочным материалом, содержащим твердые частицы [2]. В качестве причин противоизносного действия наноразмерных твердых частиц рассматривается упорядочение структуры смазочного материала под воздействием собственного заряда наноразмерных частиц. Причиной возникновения заряда является несовершенство их строения, появляющееся на стадии получения частиц либо в процессе эксплуатации трибосопряжения (триборазрушения).

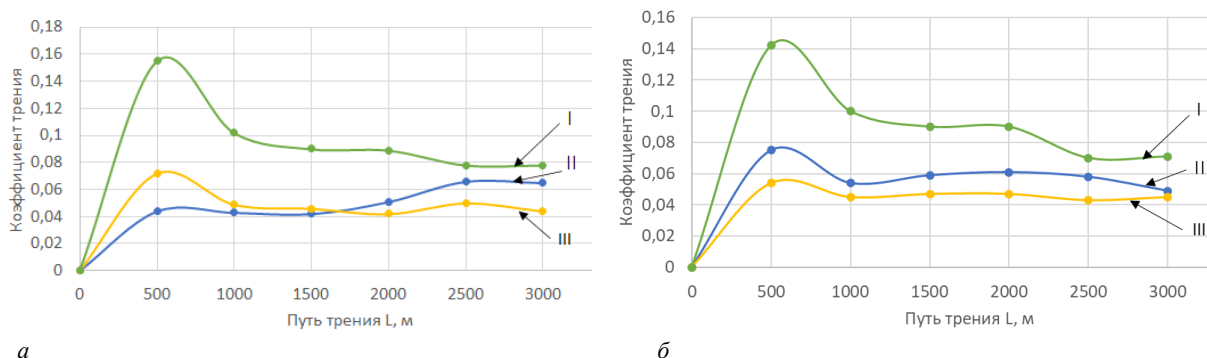


**I – Литол-24; II – комплексная литиевая смазка +1,0 масс.% ША-А;
III – комплексная сульфат-кальциевая с добавками фторопласта и вязкостной присадкой;
а – при удельной нагрузке 3 МПа; *б* – при удельной нагрузке 6 МПа**

Рисунок 5. – Зависимость массового износа от пути трения

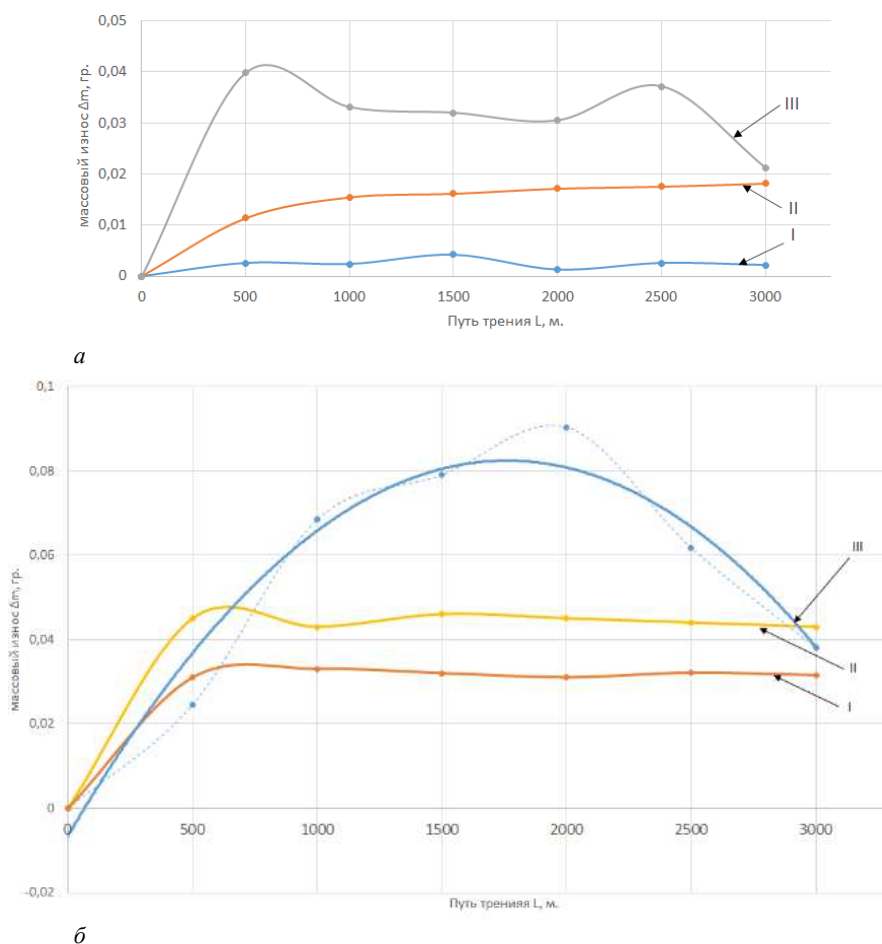
Анализ характера изменения коэффициента трения при различных нагрузках и смазочных материалах сопоставим с изменениями массового износа. В случае испытаний с контактным давлением 3 МПа (рисунок 6, *а*) максимальный коэффициент трения возникает при использовании базовой смазки Литол-24 $f = 0,08$. Значения коэффициентов трения комплексных смазок с твердыми частицами приблизительно одинаковы и лежат в интервале значений $f = 0,04–0,06$, что в 1,3–2,0 раза ниже коэффициента трения базовой смазки. При увеличении нагрузки до 6 МПа характер изменения коэффициентов трения практически не изменяется, лишь на этапе приработки коэффициент трения литиевой смазки с УДАГ на 0,02 превышает коэффициент трения смазки с добавкой фторопласта, в то время как при контактном давлении 3 МПа наблюдалась обратная картина. Период приработки всех пластичных смазок сопровождается повышением коэффициентом трения, максимальная разница коэффициента трения на этапе приработки и этапе установившегося режима (в ~1,7 раза) характерна для смазки Литол-24, для комплексных смазок это значение значительно меньше ~1,3.

Увеличение номинальных давлений испытаний до 6 МПа приводит к увеличению массового износа образцов, работающих при одной и той же смазке (рисунок 7, *а*, *б*). Массовый износ при использовании комплексной сульфат-кальциевой смазки с добавками фторопласта и вязкостной присадкой на этапе приработки при увеличении удельной нагрузки с 1,5 до 6 МПа увеличился в 8 раз, а на этапе установившегося режима – в 5 раз. Испытания комплексной литиевой смазки +1,0 масс.% ША-А показали увеличения массового износа на первом этапе в 3 раза, на втором – в 2,5 раза.



**I – Литол-24; II – комплексная литевая смазка +1,0 масс. % ША-А;
 III – комплексная сульфат-кальциевая с добавками фторопласта и вязкостной присадкой;
 а – при удельной нагрузке 3 МПа; б – при удельной нагрузке 6 МПа**

Рисунок 5. – Зависимость коэффициента трения от пути трения



**I – 1,5 МПа; II – 3 МПа; III – 6 МПа
 а – комплексная литевая смазка +1,0 масс. % ША-А;
 б – комплексная сульфат-кальциевая с добавками фторопласта и вязкостной присадкой**

Рисунок 7. – Зависимость массового износа от давления

Исследования влияния давления испытаний на режим приработки и триботехнические свойства фрикционной пары бронза–сталь, проведенные при номинальном давлении испытаний, равном 1,5; 3 и 6 МПа, показали, что максимальная износостойкость образцов на стадиях приработки и устоявшегося режима трения достигается при использовании комплексной сульфат-кальциевой смазки с добавками фторопласта и вязкостной присадкой. Одной из возможных причин указанного эффекта является формирование на поверхности бронзы разделительного слоя с повышенной нагрузочной способностью и расширенным диапазоном рабочих температур. Использование

комплексной литиевой смазки с шихтой УДАГ сокращает период приработки на всех указанных режимах и эффективно при удельной нагрузке, не превышающей 3 МПа.

Заключение. Показано, что повышение функциональных свойств пластичной смазки может быть достигнуто введением в ее состав пакета нано- и микроразмерных добавок. Исследования, смоделированные на основании условий работы тяжелонагруженных деталей узлов трения трехосных грузовых автомобилей МАЗ (балансир), подтвердили, что износостойкость пар трения увеличивается, а период приработки снижается при использовании комплексных смазок. Получены графические зависимости влияния удельной нагрузки испытаний на триботехнические свойства пары трения бронза–сталь, показывающее, что максимальная износостойкость образцов на стадиях приработки и устоявшегося режима трения достигается при использовании комплексной сульфат-кальциевая смазки с добавками фторопласта и вязкостной присадкой. Использование комплексной литиевой смазки с ультрадисперсной алмазографитовой шихтой сокращает период приработки на всех указанных режимах и эффективно при удельной нагрузке, не превышающей 3 МПа. Смазка Литол-24 обеспечивает износостойкость на уровне литиевой смазки с алмазографитовой шихтой, но при этом период приработки пары трения увеличивается до 3,5–4 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонт'ев, Л.Б. Системный анализ технологии формирования износостойких покрытий на поверхностях трения деталей / Л.Б. Леонт'ев, А.Л. Леонт'ев, В.Н. Макаров // *Фундамент. исслед.* – 2014. – № 12 (ч. 4). – С. 729–734.
2. Модифицирование материалов покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П.А. Витязь [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 527 с.
3. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А. Витязь [и др.] ; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 381 с.

REFERENCES

1. Leont'yev, L.B., Leont'yev, A.L. & Makarov, V.N. (2014). Sistemnyy analiz tekhnologii formirovaniya iznosostoykikh pokrytiy na poverkhnostyakh treniya detaley [System analysis of technology for the formation of wear-resistant coatings on friction surfaces of parts]. *Fundamental'nyye issledovaniya [Fundamental research]*, (12, part 4), 729–734. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Vityaz', P.A., Zhornik, V.I., Kukareko, V.A., Komarov, A.I. & Senyut', V.T. (2011). *Modifitsirovaniye materialov pokrytiy nanorazmernymi almazosoderzhashchimi dobavkami [Modification of coating materials with nanosized diamond-containing additives]*. Minsk: Minsk: Bielaruskaja Navuka. (In Russ.).
3. Vityaz', P.A., Il'yushchenko, A.F. & Zhornik, V.I. (2013). *Nanoalmazы detonatsionnogo sinteza: polucheniye i primeneniye [Nanodiamonds of detonation synthesis: production and application]*. In P.A. Vityaz' (Eds.). Minsk: Minsk: Bielaruskaja Navuka. (In Russ.).

Поступила 17.06.2022

INCREASED WEAR RESISTANCE OF PARTS HEAVY-LOADED FRICTION ASSEMBLY OF VEHICLES

A. DUDAN, T. VIGERINA, V. KRAVCHUK, I. PILIPENOK

The paper shows that in order to increase the service life of parts of heavily loaded friction units of cars, it is recommended to use complex lubricants: lithium grease using a structuring and pre-processing additive in the form of a package of nanoscale diamonds and calcium sulfate with fluoroplast additives and a viscous additive. The tests are modeled on the basis of the operating conditions of the axle – bushing balancer friction pairs operated with contact pressure 1.5–6.0 MPa. It is established that for the bronze–steel friction pair under conditions of boundary friction at the specified contact pressure, the maximum wear resistance of the samples at the stages of run-in and established friction is achieved by using a complex calcium sulfate grease with fluoroplast additives and a viscous additive. The use of a complex lithium lubricant with nanoscale diamonds reduces the run-in period in all these modes and is effective at a specific load not exceeding 3 MPa.

Keywords: wear resistance, friction units, nanosized diamonds, fluoroplastic, coefficient of friction, complex lubricants.