

УДК 621.891.2

А.В. ДУДАН, канд. техн. наук; В.П. ИВАНОВ, д-р техн. наук; Т.В. ВИГЕРИНА, канд. техн. наук  
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, г. Новополоцк, Республика Беларусь

## ВЛИЯНИЕ НАНО- И МИКРОРАЗМЕРНЫХ ДОБАВОК, ВВОДИМЫХ В ПЛАСТИЧНУЮ СМАЗКУ, НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ ПАРЫ ТРЕНИЯ «СТАЛЬ — БРОНЗА»

*В работе представлены исследования влияния нано- и микроразмерных добавок, вводимых в пластичную смазку, на интенсивность изнашивания пары трения «сталь — бронза» в зависимости от удельной нагрузки процесса трибомодифицирования. Исследования смоделированы на основании условий работы тяжело нагруженных деталей узлов трения трехосных грузовых автомобилей МАЗ (балансир). Установлено оптимальное процентное содержание ультрадисперсной наноалмазной добавки, обеспечивающей минимальный износ в паре трения скольжения. Полученные графические зависимости показывают, что интенсивность изнашивания снижается в 3,5–4 раза при введении наноалмазных добавок.*

**Ключевые слова:** наноалмазные добавки, интенсивность изнашивания, трение скольжения, узлы трения, пластичная смазка, трибомодифицирование

**Введение.** 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 [1–4].

Важную группу смазочных материалов составляют пластичные смазки, обеспечивающие работоспособность подвижных сопряжений машин и оборудования общего назначения, повышающие надежность и долговечность приборов, специальных устройств в сложных и экстремальных условиях их эксплуатации [5]. Наряду с расширением областей использования пластичных смазочных материалов повышаются требования, вытекающие из роста температур, нагрузок, скоростей взаимного перемещения и ужесточения других условий их применения. Данное требование основано на тенденциях развития техники, 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), 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 двигателей внутреннего сгорания) [1, 2].

В качестве основных компонентов пакета добавок комплексной литиевой смазки использовались дисульфид молибдена (противозадирная (антифрикционная) добавка), шихта ША-А (структурирующая и приработочная добавка). Повышение функциональных свойств смазки достигается введением в ее состав пакета нано- и микроразмерных 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 задания индекса задира) характеристик смазки [6, 8].

*Целью работы* являлось снижение интенсивности изнашивания в паре трения «сталь — бронза» за счет введения в состав пластичной смазки пакета нано- и микроразмерных добавок.

**Методы исследований.** Исследуемые образцы изготовлены из бронзы БрО5Ц5С5 ГОСТ 613-79 и представляют собой ролик  $\varnothing 10 \times 15$  мм. В качестве контртела был выбран диск  $\varnothing 70 \times 6$  мм из закаленной стали 45. Ролики устанавливаются в держатель. Держатель устанавливается во вращающийся шпиндель машины. Контртело устанавливается на опорную поверхность. Далее на его поверхность наносится пластичная смазка. Затем держатель с бронзовыми телами опускают на контртело и нагружают заданным (избыточным) усилием. В программе машины задаются все необходимые параметры для проведения опыта (количество оборотов, угловая скорость).

Триботехнические испытания проводились на универсальной машине трения ММВ-1А вертикального типа с компьютерным управлением. Машина поддерживает силу нагрузки в течение эксперимента постоянной с отклонением  $\pm 2$  Н. Относительная погрешность изме-

рения силы трения не превышала  $\pm 2\%$  при жидкостном режиме смазывания. Значения коэффициента трения измерялись и записывались постоянно с применением программы автоматизации LGraph2 2.34.36. Перед проведением исследования для повышения точности эксперимента производилась подготовка поверхности образцов. Для уменьшения шероховатости производилась притирка с использованием наждачной бумаги зернистостью Р600. Перед испытаниями рабочие поверхности контактирующих тел обезжиривались («Обезжириватель универсальный») и просушивались.

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  $\Delta m$  (мг), на аналитических весах AS 60/220/C/2/N после прохождения каждые 500 м [13].

Для определения зависимости влияния нагрузочно-скоростных режимов трибозаимодействия была использована пластичная комплексная литиевая смазка +0,5 масс.%; +1,0 масс.%; +1,5 масс.% ША-А. В качестве базовой смазки была выбрана серийно выпускаемая пластичная смазка Литол-24 (ГОСТ 21150-87).

Исследования, смоделированные на основании условий работы тяжело нагруженных деталей узлов трения трехосных грузовых автомобилей МАЗ (балансир) [9, 10]. Режимы трения при испытании образцов: давление — 3–6 МПа; скорость скольжения — 0,1 м/с; расстояние, пройденное образцами — 500–3000 м.

**Результаты исследований.** Комплексная литиевая дисперсная фаза по сравнению с простой литиевой дисперсной фазой при одинаковых дисперсионных средах придает смазке следующие улучшенные качества [2]:

- 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;
- 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.

Полученные зависимости массового износа от пути трения при различном содержании наноалмазной шихты (рисунок 1) показывают, что максимальная интенсивность изнашивания характерна для комплексной литиевой смазки с процентным содержанием шихты 0,5 %, а минимальным износом — смазка с 1,0 % ША-А. Причем для всех закономерностей характерно увеличение интенсивности изнашивания до 2000–2500 м, что можно объяснить наличием разделительного слоя смазки при начале испытаний. При дальнейшем проведении исследований в зоне трения происходит нагрев смазочного материала, снижение его кинематической вязкости и частичное выдавливание смазочного материала из зоны контакта.

При увеличении удельной нагрузки до 6 МПа (рисунок 2) максимальная интенсивность изнашивания наблю-

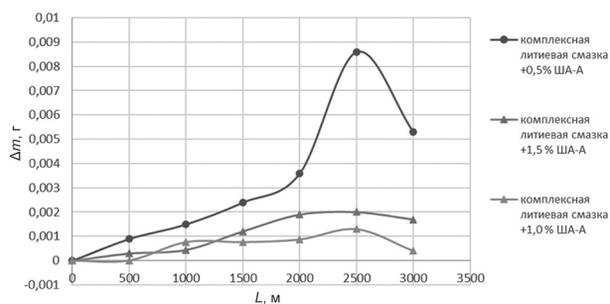


Рисунок 1 — Зависимость массового износа от пути трения при удельной нагрузке 3 МПа

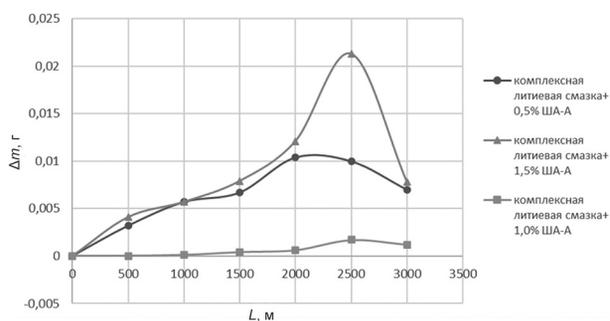


Рисунок 2 — Зависимость массового износа от пути трения при удельной нагрузке 6 МПа

дается при 1,5 % содержания алмазосодержащей шихты, а минимальным износом характеризуется пара трения при содержании в смазке 1,0 % ША.

Таким образом, можно сказать, что наиболее оптимальной концентрацией алмазосодержащей шихты является 1,0 % по массе для различных режимов нагружения.

Сопоставим массовый износ образцов, испытываемых в смазке Литол-24 и смазки с ультрадисперсной алмазографитовой шихтой (рисунок 3). Минимальным износом (~3,5–4 раза меньше) обладает образец, работающий в комплексной литиевой смазке с добавлением наноалмазных частиц как при давлении 3 МПа, так и при давлении 6 МПа. Закономерности, приведенные на рисунке 3, показывают, что для смазки Литол-24 период приработки не наступил и увеличение значения массового износа может продолжаться и далее.

Преимущества пластичной смазки с содержанием ультрадисперсных наноалмазных добавок можно объяснить тем, что находящаяся между трущимися поверхностями наночастица начинает катиться во время работы вместо трения скольжения. За счет сферической формы наноалмазных частиц часть трения скольжения транс-

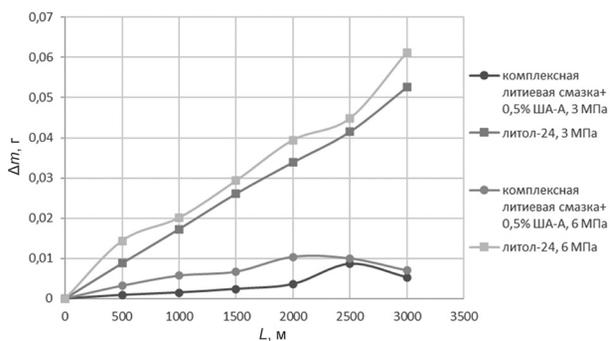


Рисунок 3 — Зависимость массового износа от пути трения при различных удельных нагрузках для различных смазочных материалов

формируется в трение качения с заведомо более низким коэффициентом трения, что снижает интенсивность изнашивания.

**Заключение.** Показано, что повышение функциональных свойств пластичной смазки может быть достигнуто введением в ее состав пакета нано- и микро-размерных добавок. Исследования, смоделированные на основании условий работы тяжело нагруженных деталей узлов трения трехосных грузовых автомобилей МАЗ (балансир), подтвердили, что износостойкость пары трения увеличивается при использовании комплексной литевой смазки с содержанием ультрадисперсной алмазной добавки. Получены графические зависимости влияния пути трения при различной удельной нагрузке на интенсивность изнашивания пары трения «бронза — сталь», показывающие, что максимальная износостойкость образцов достигается при использовании комплексной литевой смазки с 1,0 % алмазной шихты. Интенсивность изнашивания образцов, работающих с комплексной литевой смазкой с добавлением нанодiamondных частиц, снижается в 3,5–4 раза при различном удельном давлении по сравнению со смазкой Литол-24.

#### Список литературы

1. Повышение свойств триботехнических материалов их модифицированием твердыми наноразмерными компонентами / П.А. Витязь [и др.] // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. — 2008. — № 4. — С. 45–49.
2. Модифицирование материалов покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П.А. Витязь [и др.]. — Минск: Беларус. навука, 2011. — 527 с.
3. Смазочная композиция для тяжело нагруженных узлов трения: пат. ВУ 5906 / П.А. Витязь, В.И. Жорник, В.А. Верещагин, Н.Е. Гильнич. — Оpubл. 30.03.2004.
4. Пластичная смазка: пат. ВУ 6906 / Т.И. Халапсина, Т.Г. Чмыхова, Е.Н. Волнянко, И.И. Злотников, В.А. Смуругов. — Оpubл. 30.03.2005.
5. Хитрюк, В.А. Автомобильные эксплуатационные материалы: учеб. пособие / В.А. Хитрюк, А.К. Трубилов. — Минск: РИПО, 2013. — 323 с.
6. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А. Витязь [и др.]; под общ. ред. П.А. Витязя. — Минск: Беларус. навука, 2013. — 381 с.
7. Леонтьев, Л.Б. Системный анализ технологии формирования износостойких покрытий на поверхностях трения деталей / Л.Б. Леонтьев, А.Л. Леонтьев, В.Н. Макаров // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 12 (часть 4). — С. 729–734.
8. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка / А.В. Чичинадзе [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 2003. — 575 с.
9. 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: сб. мат. IV Междунар. науч.-практич.м конф., Москва, 10 нояб. 2021 г. / Московский экономический ин-т; редкол.: Т.С. Саяпина (отв. ред.) [и др.]. — М., 2021. — С. 328–336.
10. Кравчук, В.И. Влияние смазочных материалов на износостойкость деталей тяжело нагруженных узлов трения автомобилей / В.И. Кравчук, И.И. Пилипенко // Электронный сб. тр. молодых специалистов Полоцкого гос. ун-та им. Евфросинии Полоцкой / Полоцкий гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой; редкол.: Ю.Я. Романовский [и др.]. — Новополоцк, 2022. — Вып. 45(115): Промышленность. — С. 110–112.

Dudan A.V., Ivanov V.P., Vigerina T.V.

#### Effect of nano- and microsized additives introduced into plastic grease on wear intensity of “steel — bronze” friction pair

The paper presents studies of the influence of nano- and microsized additives introduced into the plastic grease on the wear rate of “steel — bronze” friction pair depending on the specific load of tribomodifying process. The studies are simulated on the basis of working conditions of heavy loaded parts of friction units of three-axis MAZ trucks (balancer). The optimum percentage is established for ultradispersed nanodiamond additive that provides minimal wear in the sliding friction pair. The obtained graphical dependences show that wear intensity decreases in 3.5–4 times with introduction of nanodiamond additives.

Поступила в редакцию 12.07.2023.