

УДК 621.891.2

А.В. ДУДАН, канд. техн. наук; А.А. ГУЩА

Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк, Республика Беларусь

## ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНОГО ДАВЛЕНИЯ НА СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ «БРОНЗА — СТАЛЬ» В СРЕДЕ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ

*В работе приведены результаты исследований пар трения «бронза БрБ2 — сталь 45». Для определения зависимости влияния нагрузочно-скоростных режимов трибозаимодействия была использована пластичная прирабочная комплексная литиевая смазка третьего поколения OIMOL KL R 2 с ультрадисперсной алмазографитовой шихтой с концентрацией наноалмазов 0,5 %. Исследования показали, что в условиях граничного трения пары «бронза — сталь» модифицирование смазочного материала добавками ультрадисперсной алмазографитовой шихты эффективно при давлениях свыше 20 МПа. Установлено, что модифицированную смазку достаточно применять только на стадии приработки.*

**Ключевые слова:** трибомодифицирование, трение, интенсивность изнашивания, наноразмерные добавки, пластичная смазка

**Введение.** Трибомеханическое модифицирование представляет собой финишную операцию обработки поверхности, предназначенную для окончательного формирования необходимого структурно-фазового состояния рабочей поверхности [1]. Оно рекомендуется для применения преимущественно в тяжело нагруженных узлах трения скольжения (подшипники скольжения, опоры, направляющие и др.), работающих в экстремальных условиях, в условиях высоких нагрузок и вибраций (карьерная техника, железнодорожный транспорт, строительно-дорожные машины, сельскохозяйственная техника, дробилки, грохоты), для повышения нагрузочной способности узлов и деталей, подверженных интенсивному изнашиванию (штоки, подшипники коленчатых валов, поршни, цилиндры двигателей внутреннего сгорания и др.) [2].

Одним из эффективных способов трибомодифицирования поверхностей трения является применение модифицированных смазок введением в их состав функциональных добавок [3]. В настоящее время все большую актуальность приобретает использование в качестве подобных добавок наноразмерных алмазосодержащих компонентов [4, 5]. Важной задачей при этом является выбор таких параметров и критериев процесса трибомеханического модифицирования, чтобы в условиях эксплуатации стабильно получать рабочие поверхности деталей с заданными свойствами [6].

**Методы исследований.** Исследуемые образцы изготовлены из бронзы БрБ2 [7] и представляют собой стержни диаметром 10 и длиной 15 мм. В качестве контртела был выбран диск из закаленной стали 45 диаметром 70 мм и высотой 6 мм.

Триботехнические испытания проводились на универсальной машине трения MMW-1A вертикального типа с компьютерным управлением. Машина поддерживает постоянную силу на поверхности контакта в течение эксперимента с отклонением  $\pm 2$  Н. Относительная погрешность измерения силы трения не превышала  $\pm 2$  % при жидкостном режиме смазывания.

Перед проведением исследования для повышения точности эксперимента производилась подготовка рабочих поверхностей образцов: для уменьшения шеро-

ховатости их полировали наждачной бумагой зернистостью Р600.

В процессе испытаний измерялись сила трения и коэффициент трения с частотой один раз в 1 секунду 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 на аналитических весах AS 60/220/C/2/N после прохождения каждые 500 м пути трения.

Для определения зависимости влияния нагрузочно-скоростных режимов трибозаимодействия была использована пластичная прирабочная комплексная литиевая смазка третьего поколения OIMOL KL R 2 с ультрадисперсной алмазографитовой шихтой (УДАГ) с концентрацией наноалмазов 0,5 %. В качестве базовой смазки была выбрана серийно выпускаемая пластичная смазка Литол-24 [8].

Режимы трения при испытании образцов:

- контактное давление 10–40 МПа;
- скорость скольжения 0,25 м/с;
- расстояние, пройденное образцами, 500–3000 м.

**Результаты исследований.** Результаты испытаний, приведенные на рисунке 1, показывают, что влияние модифицирующей добавки в смазке на процессы изнашивания существенно зависит от контактного давления. При относительно низком номинальном контактном давлении ( $p_a = 10$  МПа) износ образцов бронза БрБ2 при трении в среде модифицированной смазки существенно превышает (примерно в 2 раза) износ образцов, испытываемых в смазке Литол-24 (см. рисунок 1 а). Коэффициент трения пары, работающей в среде модифицированной смазки (см. рисунок 1 б), на начальных стадиях испытаний составляет  $f = 0,10$ – $0,14$ , и затем, по мере увеличения пути трения  $l$ , регистрируется постепенное снижение значений коэффициента трения до  $f = 0,087$ – $0,084$  ( $l \approx 500$ – $1000$  м) и до  $f = 0,075$  ( $l \approx 1500$ – $3000$  м). Указанное изменение коэффициента трения с увеличением пути трения  $l$  связано с процессами приработки фрикционной пары [9].

В случае применения смазки Литол-24 ход зависимости коэффициента трения от пути трения подобен

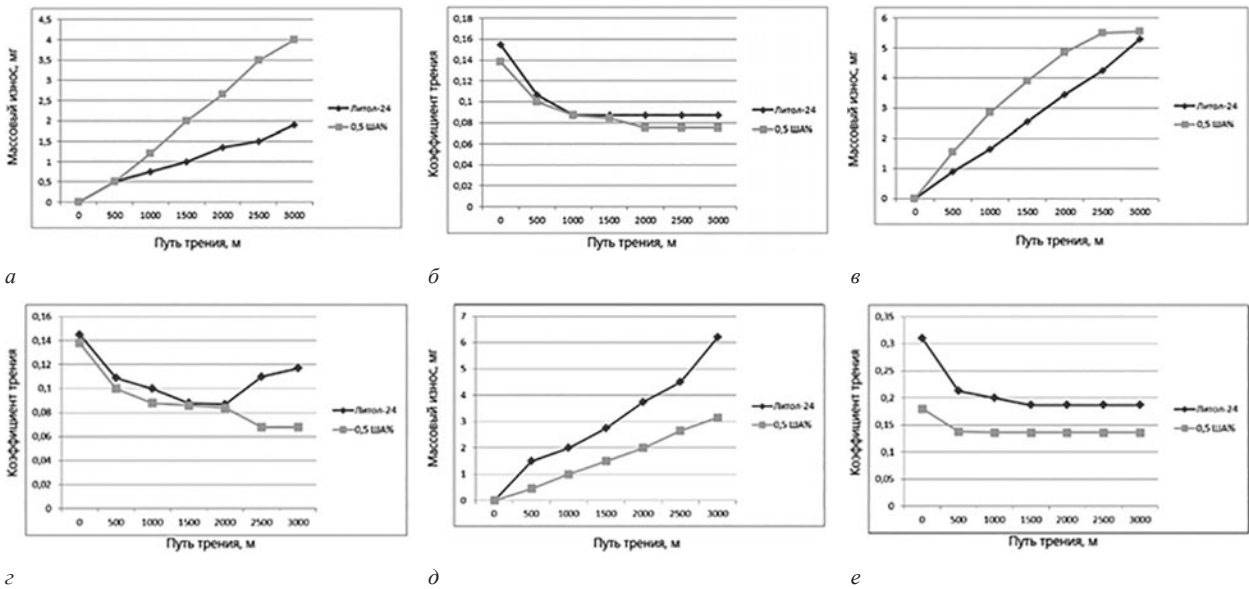


Рисунок 1 — Зависимость массового износа бронзы БрБ2 (а, в, д) и коэффициента трения (б, г, е) от пути трения при различном контактном давлении: а, б — 10 МПа; в, г — 20 МПа; д, е — 40 МПа

описанному выше ходу зависимости для смазки с УДАГ. Вместе с тем значения коэффициента трения на последующих стадиях испытаний превышают соответствующие значения  $f$  для случая испытаний со смазкой, содержащей УДАГ, при этом фиксируется более низкое значение массового износа бронзы.

Увеличение контактного давления до  $p_a = 20$  МПа приводит к сближению зависимостей массового износа бронзы от пути трения для случаев испытаний в среде модифицированной смазки и смазки Литол-24 (см. рисунок 1 в). Вместе с тем следует отметить, что при испытаниях смазки с добавками УДАГ интенсивность изнашивания испытываемых образцов после пути трения 2500 м резко падает. На этой же стадии испытаний (см. рисунок 1 г) регистрируется и существенное снижение значений коэффициента трения ( $f = 0,068$ ). При использовании смазки Литол-24 интенсивность изнашивания бронзы на протяжении испытаний сохраняется на высоком уровне, а значения коэффициента трения на дальнейших стадиях испытаний даже несколько возрастают и достигают значений 0,110–0,117.

В случае испытаний с контактным давлением 40 МПа комплексной литиевой смазки с УДАГ приводит к существенному снижению интенсивности изнашивания поверхности трения по сравнению с аналогичными испытаниями в среде немодифицированной смаз-

ки (см. рисунок 1 д), а значения коэффициента трения уменьшаются до 0,136 уже на ранних стадиях испытаний (см. рисунок 1 е). Фрикционные испытания в среде смазки Литол-24 с высоким контактным давлением ( $p_a = 40$  МПа) сопровождаются быстрой интенсификацией процессов изнашивания и увеличением значений коэффициента трения до уровня 0,187–0,200 уже на самых ранних стадиях испытаний, по сравнению со значениями при меньшем контактном давлении.

Исследования влияния контактного давления на режим приработки и триботехнические свойства фрикционной пары «бронза — сталь» при работе в среде смазки Литол-24, проведенные при номинальном контактном давлении, равном 10, 20 и 40 МПа, показали, что с повышением удельной нагрузки снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания при использовании комплексной литиевой смазки с УДАГ наблюдается на более ранних стадиях приработки. Одной из возможных причин указанного эффекта является упрочнение поверхностных слоев бронзы за счет их модифицирования частицами ультрадисперсных алмазов в процессе фрикционного взаимодействия [10].

С целью проверки указанного предположения проведены дополнительные триботехнические испытания со смазкой Литол-24 образцов, прошедших предварительную приработку в среде модифицированной смазки.

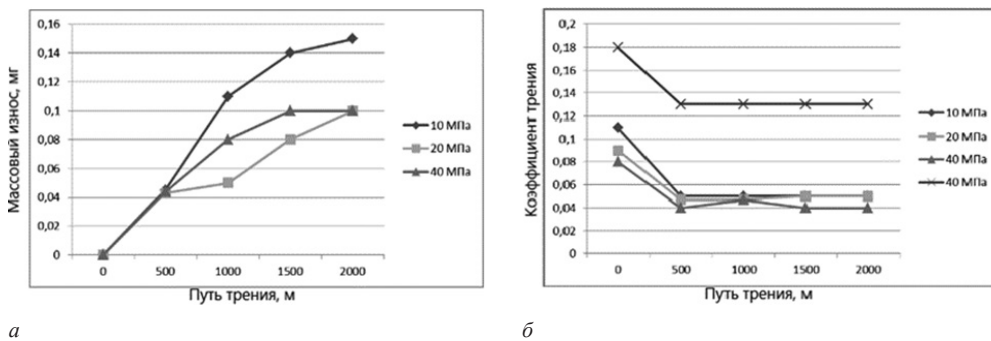


Рисунок 2 — Зависимость массового износа (а) коэффициента трения (б) бронзы БрБ2 от пути трения после приработки при различном контактном давлении: 1, 2, 3 — приработка в комплексной литиевой смазке с УДАГ, 4 — приработка в смазке Литол-24 стандартного состава

Результаты триботехнических испытаний свидетельствуют о сохранении высокой интенсивности изнашивания и низкого коэффициента трения у образцов, подвергнутых предварительной приработке в среде смазки, модифицированной УДАГ (рисунок 2).

**Заключение.** В результате исследования влияния контактного давления на триботехнические свойства фрикционной пары установлено, что в условиях граничного трения пары «бронза — сталь» модифицирование смазочного материала добавками ультрадисперсной алмазографитовой шихты эффективно при давлениях свыше 20 МПа. При этом модифицированную смазку достаточно применять только на стадии приработки, поскольку использование после подобной приработки смазки Литол-24 обеспечивает низкий коэффициент трения ( $f = 0,04-0,05$ ) при практически отсутствующем износе.

### 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. 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. — № 12-4. — С. 729–734.
3. Повышение свойств пластичных смазочных материалов применением ультрадисперсного наполнителя / С.Г. Докшанин // Новые материалы и технологии в машиностроении. — 2012. — № 15. — С. 33–36.
4. Жорник, В.И. Применение терморасширенного графита в пластичных смазочных материалах / В.И. Жорник // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. — Минск, 2013. — Вып. 2. — С. 408–411.
5. 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.
6. Кочанов, Д.И. Наноматериалы и нанотехнологии для машиностроения: состояние и перспективы применения / Д.И. Кочанов // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. — 2010. — № 8(56). — С. 16–21.
7. Бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением. Марки: ГОСТ 18175-78. — Введ. 01.01.1979. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. — 13 с.
8. Смазка Литол-24. Технические условия: ГОСТ 21150-87. — Введ. 01.01.1989. — М.: Стандартинформ, 2006. — 5 с.
9. Формирование износостойких поверхностных структур и механизм их разрушения при трении в среде смазочного материала, модифицированного ультрадисперсными алмазографитовыми добавками. Часть. 2. Модель разрушения / П.А. Витязь [и др.] // Трение и износ. — 2006. — Т. 27, № 2. — С. 196–200.
10. Панин, В.Е. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле / В.Е. Панин, А.В. Панин // Физическая мезомеханика. — 2005. — Т. 8, № 5. — С. 7–15.

Dudan A.V., Gushcha A.A.

### Contact pressure effect on properties of the “bronze — steel” friction surfaces in the lubricant medium with nanoscale additives

The paper presents the results of studies of friction pairs “bronze БрБ2 (BrB2) — steel 45”. To determine the dependence of the influence of the load-speed modes of tribo-interaction, a plastic running-in complex lithium lubricant of the third generation OIMOL KL R 2 was used with an ultrafine diamond-graphite charge with a concentration of nanodiamonds of 0.5 %. Studies have shown that under the boundary friction conditions of the “bronze — steel” pair, the modification of the lubricant with additives of ultrafine diamond-graphite charge is effective at pressures over 20 МПа. It has been established that it is sufficient to use the modified lubricant only at the running-in stage.

Поступила в редакцию 24.08.2021.