



МЕХАНИКА ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 539.3

В.В. КОМИССАРОВ, канд. техн. наук
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕНИЯ В ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ «РОЛИК — ВАЛ», «РОЛИК — КОЛЬЦО» И «РОЛИК — РОЛИК»

В статье проведено экспериментальное исследование влияния напряжений, обусловленных внеконтактной нагрузкой, на изменение момента трения и параметра трения в трибофатической системе. Показано, что циклические напряжения могут (в зависимости от условий испытания) как повышать, так и снижать величину момента трения и параметра трения до 60 %. Обнаружено, что наибольшее отклонение параметра трения в трибофатической системе от коэффициента сопротивления качению в аналогичной паре трения наблюдается при наибольшем абсолютном значении соотношения амплитуды циклических напряжений и наибольшего значения контактного напряжения.

Ключевые слова: трибофатическая система, контактная нагрузка, внеконтактная нагрузка, напряженно-деформируемое состояние, амплитуда напряжений цикла, коэффициент сопротивления качению, параметр трения

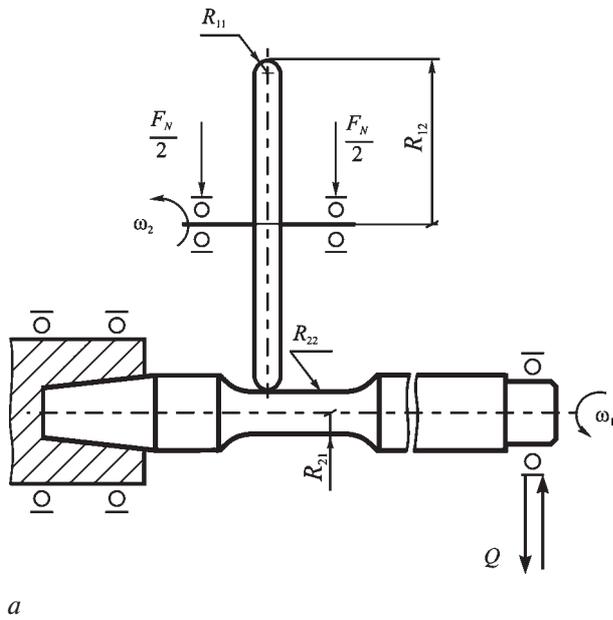
Постановка задачи. В трибологии сила трения считается зависимой лишь от одного силового фактора — нормальной контактной нагрузки [1–3]. При исследовании трибофатических систем, в которых в единой области возбуждается напряженно-деформируемое состояние от действия как контактной, так и объемной нагрузок, вызванные внеконтактной нагрузкой, напряжения и деформации формируют дополнительные граничные условия на поверхности контакта. Это приводит к существенному изменению характеристик трения. В этой связи циклические напряжения могут рассматриваться как управляющий параметр для процессов трения и изнашивания — наравне с контактной нагрузкой [4–6].

Систематические исследования влияния циклических напряжений на изменение силы (и параметра) трения в трибофатической системе до сих пор проведены не были; по этому вопросу известны лишь отдельные работы [7–10]. В связи с интенсификацией исследований по анализу причин колесно-рельсового вируса и эксплуатационных отказов рельсов [11–15], поиску мер эффективной борьбы с ними, актуальной является оценка влияния циклических напряжений на изменение характеристик трения и изнашивания в трибофатических системах (обратный эффект в трибофатике). В этой связи в работе приняты твердотельные модели, которые в

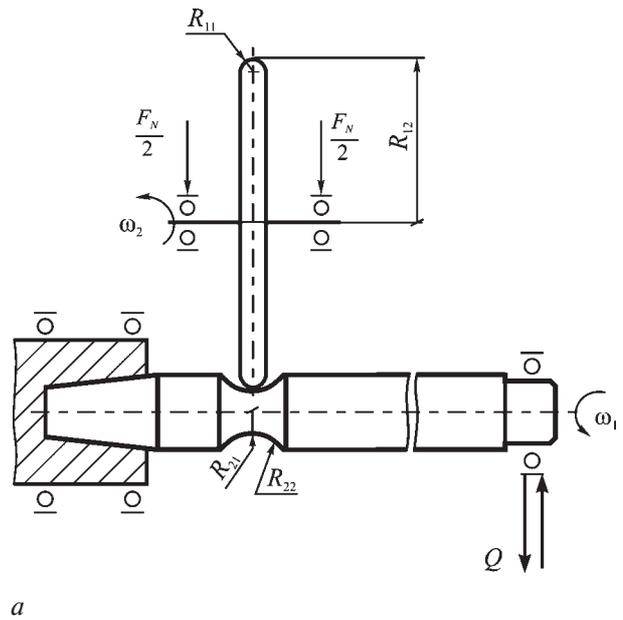
известной степени отражают условия работы системы колесо/рельс в наиболее существенных особенностях. К числу таких особенностей относятся: а) реализация процессов трения качения; б) контактное нагружение; в) объемное циклическое деформирование (например, при изгибе); г) совмещение (в процессе испытаний) зон с наибольшими контактными и изгибными напряжениями, т.е. формирование дорожки катания по изгибаемому элементу. В рассматриваемых моделях ролик имитирует колесо, а изгибаемый вал (кольцо) — рельс.

Испытуемые модели и материалы. Предложены две принципиально разные модели:

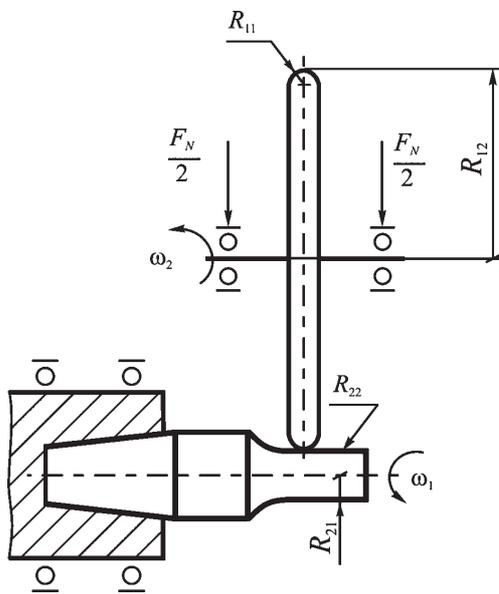
1. Модель «ролик — вал» (модели А и Б) (рисунок 1 и 2). В этой модели ролик имитирует колесо, а изгибаемый вал — рельс. Модели А и Б различаются тем, что в модели А поперечное проскальзывание оказывается свободным, тогда как в модели Б оно является стесненным (ограниченным). Важное достоинство моделей А и Б — возможность независимого регулирования величин контактных и изгибных напряжений, так что в процессе испытаний может быть реализовано любое их соотношение. Кроме того, возможна организация трения качения как в зоне растяжения, так и в зоне сжатия изгибаемого вала; это позволяет оценить (пусть и опосредованно) роль остаточных (растягивающих либо сжимающих) напряжений.



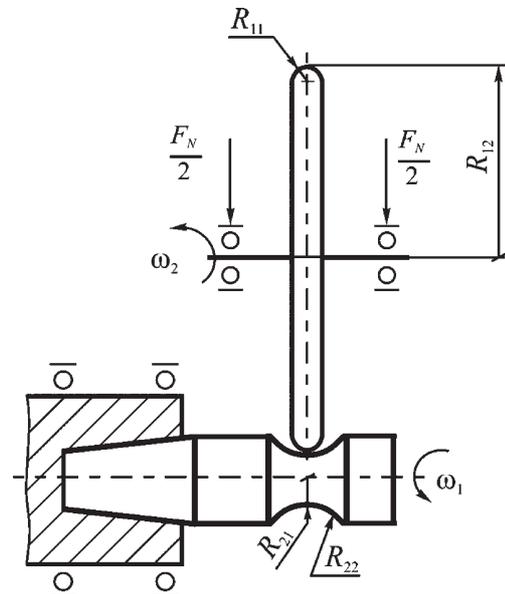
a



a



б



б

Рисунок 1 — Модель А:

a — схема испытаний на контактную усталость;
б — схема испытаний на контактно-механическую усталость

Рисунок 2 — Модель Б:

a — схема испытаний на контактно-механическую усталость;
б — схема испытаний на контактную усталость

2. Модель «ролик — кольцо» (модель В) (рисунок 3). В данном случае контактные и изгибные напряжения возбуждаются единой — контактной (или, как принято говорить в литературе по железнодорожному транспорту — осевой) нагрузкой, т.е. аналогично тому, как это реализуется в условиях эксплуатации. Особенность этой модели: испытания можно проводить только при определенных (и неизменных) соотношениях между контактными и изгибными напряжениями.

Принципиальное различие между моделями А и Б, с одной стороны, и моделью В, с другой стороны, состоит в том, что в первом случае качение ортогонально плоскости изгиба, тогда как во втором случае оно сонаправлено с ней.

Выбор материалов для изготовления элементов испытываемых моделей не может ограничиваться только рельсовой и колесной сталями, если ставится задача получить как количественные данные, так и установить основные закономерности влияния циклических напряжений на изменение параметра трения в зависимости от ряда факторов. Свойства принятых для испытания материалов (и их состояний) даны в таблице, там же приведены и их условные обозначения.

На рисунке 4 представлена диаграмма «Наибольшее контактное давление в центре площадки контакта p_0 — сближение осей δ_c ». Из нее видно, что испытания охватывают области как упругого, так и упругопластического контакта. Для контак-

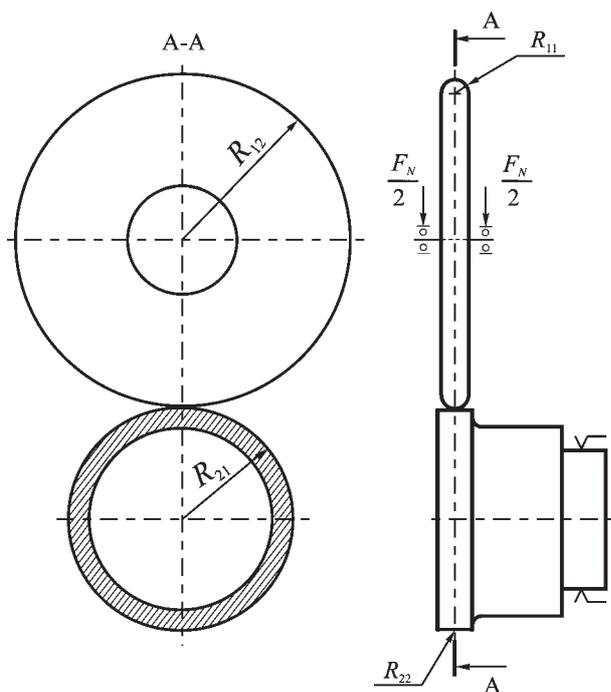


Рисунок 3 — Модель В:
а — схема испытаний на контактную усталость; б — схема испытаний на контактно-механическую усталость

тирующих материалов Ст1/Ст1 и Ст2/Ст2 зона упругости ограничена значениями контактных напряжений p_0 от 0 до 3000 МПа, для моделей Ст4/Ст2 и СтР/СтК — от 0 до 1700 МПа.

Оценка влияния циклических напряжений, обусловленных объемным деформированием, на изменение параметра трения. Изучение закономерностей изменения характеристик трения при качении связано с регистрацией весьма малых величин момента трения. В этой связи в качестве моментомера применен прецизионный и высокоточный датчик Т10F фирмы Hottingen Baldwin Messtechnik. Коэффициент сопротивления качению f_r по результатам

Таблица — Характеристики испытуемых материалов

Материал	Термообработка	Твердость поверхности	σ_1 , МПа*	σ_B , МПа*
Сталь 1	Поверхностная закалка	700 HV	640	1600
Сталь 2	Поверхностная закалка	700 HV	760	1700
Сталь 4	Нормализация	470 HV	270	1500
СтР	Нет	270 HV	300	900
СтК	Нет	280 HV	310	1000

* — справочные данные

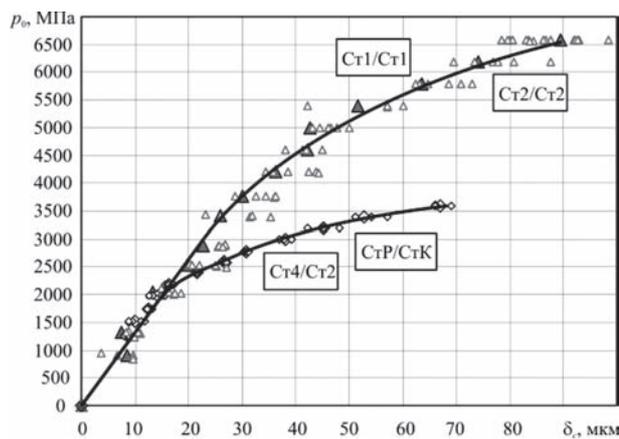


Рисунок 4 — Диаграммы $p_0 - \delta_c$ как характеристики свойств испытуемых материалов

экспериментальных испытаний рассчитывали по формуле:

$$f_r = \frac{M_T}{F_N \cdot R}, \quad (1)$$

где f_r — коэффициент сопротивления качению; M_T — измеренный момент трения, Н·м; F_N — контактная нагрузка, Н; $R = 50 \text{ мм} = 0,05 \text{ м}$ — радиус контрообразца (ролика).

В паре трения основной характеристикой трения являлся коэффициент сопротивления качению f_r , а в трибофатической системе — параметр трения f_σ . При этом расчет параметра трения f_σ вели по формуле аналогичной формуле (1).

$$f_\sigma = \frac{M_{TF}}{F_N \cdot R}, \quad (2)$$

где M_{TF} — измеренный момент трения в трибофатической системе, Н·м.

Для оценки влияния циклических напряжений на изменение параметра трения проводили три эксперимента.

1. Испытания на контактную усталость (трение качения). Контактная нагрузка являлась постоянной $F_N = \text{const}$, тогда как изгибающая нагрузка $Q = 0$.
2. Испытания на контактно-механическую усталость с той особенностью, что процесс трения реализуется в зоне растяжения испытываемого образца (см. рисунки 1 и 2, Q направлена вниз). Контактная нагрузка являлась постоянной $F_N = \text{const}$. Изгибающую нагрузку Q задавали ступенчато, через 5 минут после начала испытаний. Начальный уровень изгибающей нагрузки $Q = 160 \text{ Н}$ (амплитуда напряжений $\sigma_a = 160 \text{ МПа}$). Интервал приращения изгибных напряжений $\Delta\sigma_i = 40 \text{ МПа} = \text{const}$.
3. Испытания на контактно-механическую усталость с той особенностью, что процесс трения реализуется в зоне сжатия испытываемого образца (см. рисунки 1 и 2, Q направлена вверх). Контактная нагрузка являлась постоянной $F_N = \text{const}$. Изгибающая нагрузка Q (направлена вверх) задавалась ступенчато, через 5 минут после начала испытаний. Начальный уровень изгибаю-

щей нагрузки $Q = 160$ Н (амплитуда напряжений $\sigma_a = 160$ МПа). Интервал приращения изгибных напряжений $\Delta\sigma_i = 40 = \text{МПа} = \text{const}$. В условиях эксперимента амплитуда напряжений не превышала предела выносливости.

Результаты обработки представлены в виде зависимости осредненных значений (порядка 60) коэффициента сопротивления качению \bar{f}_r и параметра трения \bar{f}_σ от амплитуды напряжений цикла σ_a при различных значениях контактных напряжений.

Модель А. Трибофатическая система Ст1/Ст1. Степень проскальзывания при испытаниях составляла $\lambda = 3\%$.

Зависимости коэффициента сопротивления качению \bar{f}_r и параметра трения \bar{f}_σ от амплитуды напряжений цикла σ_a при различных значениях контактных напряжений представлены на рисунке 5. Из анализа рисунка можно сделать следующие заключения.

1. Значения коэффициента сопротивления качению \bar{f}_r при испытаниях на контактную усталость (трение качения) остаются неизменными (пунктир); это согласуется с многочисленными извест-

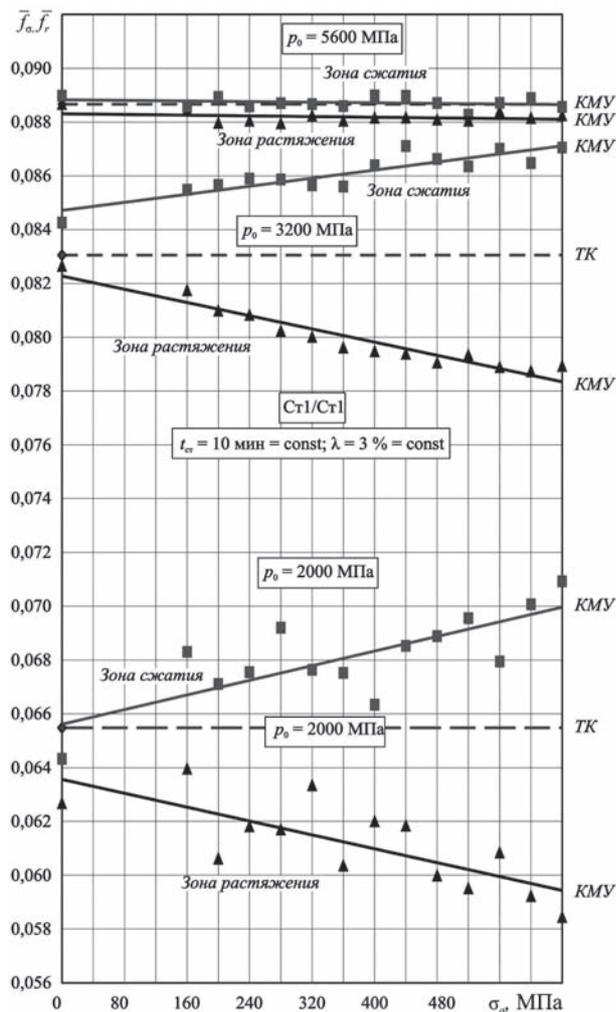


Рисунок 5 — Модель А: трибофатическая система Ст1/Ст1. Зависимость средних значений коэффициента сопротивления качению \bar{f}_r и параметра трения \bar{f}_σ от амплитуды напряжений цикла σ_a

ными данными. В зависимости от уровня контактных напряжений значения \bar{f}_σ составляют:

- при $p_0 = 2000$ МПа — 0,0655 (упругий контакт);
- при $p_0 = 3200$ МПа — 0,0830 (упругопластический контакт);
- при $p_0 = 5600$ МПа — 0,0887 (упругопластический контакт).

Таким образом, при качении рост контактных напряжений ведет к увеличению коэффициента сопротивления качению в связи с развитием упругопластических деформаций.

2. Значения параметра трения \bar{f}_σ при трении в зоне растяжения (испытания на контактно-механическую усталость) уменьшаются. Увеличение изгибных напряжений σ_a от 0 до 640 МПа ведет к снижению параметра трения \bar{f}_σ :

- при $p_0 = 2000$ МПа — на 9 %;
- при $p_0 = 3200$ МПа — на 6 %;
- при $p_0 = 5600$ МПа — на 1 %.

3. Значения параметра трения \bar{f}_σ при трении в зоне сжатия (испытания на контактно-механическую усталость) возрастают. Увеличение изгибных напряжений σ_a от 0 до 640 МПа ведет к повышению параметра трения \bar{f}_σ :

- при $p_0 = 2000$ МПа — на 6 %;
- при $p_0 = 3200$ МПа — на 5 %;
- при $p_0 = 5600$ МПа — на 1 %.

4. Наиболее значительное влияние σ_a на параметр трения наблюдается в зоне упругости (p_0 до 3200 МПа).

Модель Б. Трибофатическая система Ст4/Ст2. Степень проскальзывания в ходе испытаний составляла $\lambda = 5\%$.

Из данных, представленных на рисунке 6, можно сделать следующие заключения.

1. При испытаниях на контактную усталость (трение качения) значения коэффициента сопротивления качению \bar{f}_r остаются постоянными (пунктир). В зависимости от уровня контактных напряжений значения \bar{f}_σ составляют:

- при $p_0 = 1200$ МПа — 0,0310 (упругий контакт);
- при $p_0 = 2400$ МПа — 0,0665 (упругопластический контакт);
- при $p_0 = 3200$ МПа — 0,0740 (упругопластический контакт).

Следовательно, при качении рост контактных напряжений ведет к увеличению коэффициента сопротивления качению при переходе от упругого к упругопластическому контакту.

2. Значения параметра трения \bar{f}_σ при трении в зоне растяжения (испытания на контактно-механическую усталость) уменьшаются. Увеличение изгибных напряжений σ_a от 0 до 360 МПа ведет к снижению параметра трения \bar{f}_σ :

- при $p_0 = 1200$ МПа — на 66 %;
- при $p_0 = 2400$ МПа — на 5 %;
- при $p_0 = 3200$ МПа — на 4 %.

3. Значения параметра трения \bar{f}_σ (испытания на контактно-механическую усталость) в зоне сжатия воз-

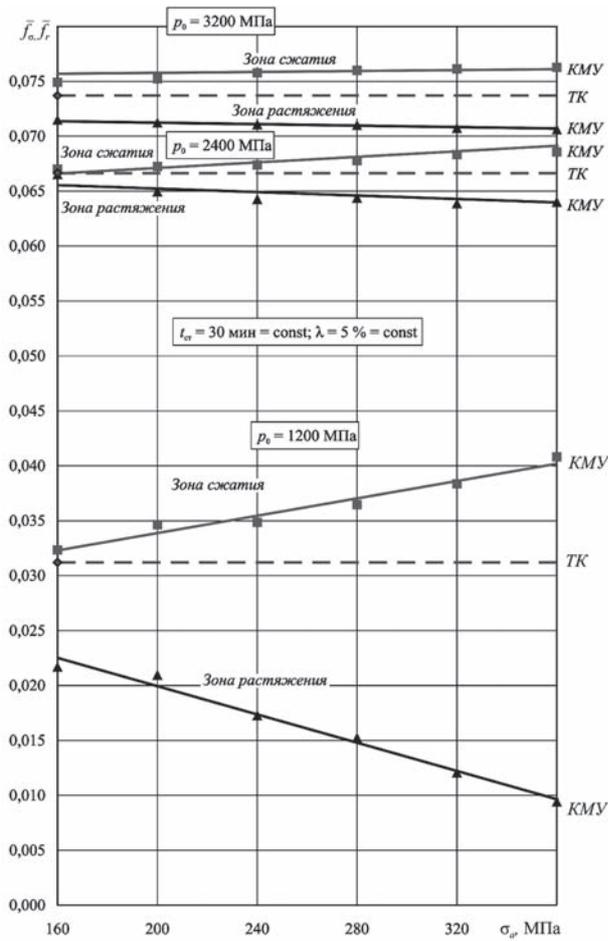


Рисунок 6 — Модель Б: трибофатическая система Ст4/Ст2. Зависимость средних значений коэффициента сопротивления качению \bar{f}_r и параметра трения \bar{f}_o от амплитуды напряжений цикла σ_a

растают. Увеличение изгибных напряжений σ_a от 0 до 360 МПа ведет к повышению параметра трения f_σ :
 - при $p_0 = 1200$ МПа — на 29 %;
 - при $p_0 = 2400$ МПа — на 4 %;
 - при $p_0 = 3200$ МПа — на 3 %.

4. Наиболее значительное влияние циклических напряжений на параметр трения наблюдается в зоне упругости (p_0 до 1700 МПа).

Модель В. Трибофатическая система СтР/СтК. Изменение параметра трения от циклических напряжений при испытаниях моделей А и Б позволило ожидать изменения данного параметра в зависимости от толщины кольца (h) (изменения величины нормальных напряжений). Это предположение подтверждается полученными в работе зависимостями (рисунок 7).

При постоянной контактной нагрузке $F_N = 300 \text{ Н} = \text{const}$ на ступени нагружения диапазон измеренного коэффициента сопротивления качению для пары трения «ролик — ролик» лежит в пределах $0,0799 \div 0,0879$, а для трибофатической системы «ролик — кольцо» при $h = 1,5 \text{ мм}$ — в пределах $0,0429 \div 0,0751$; при $h = 1,0 \text{ мм}$ — в пределах $0,004 \div 0,04$. Видно, что чем меньше толщина кольца h , тем мень-

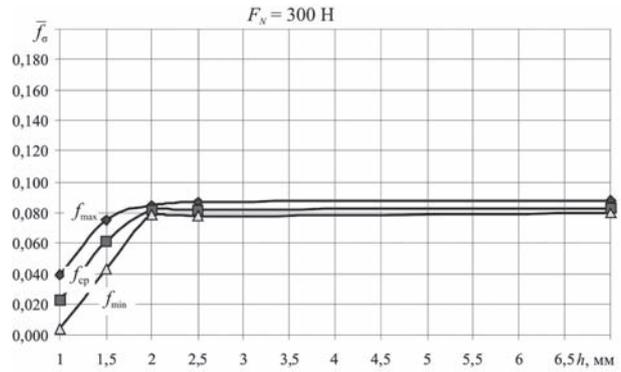


Рисунок 7 — Зависимость параметра трения от толщины кольца при $F_N = 300 \text{ Н} = \text{const}$

ше среднее значения коэффициента трения на ступени нагружения и больше рассеяние. При этом, уже начиная с толщины кольца 2 мм, влияния h практически не наблюдается, т.е. при данной толщине кольца наблюдается, по существу, переход от трибофатической системы к паре трения.

На рисунках 8 и 9 показана зависимость коэффициента сопротивления качению и параметра трения от контактной нагрузки для систем «ролик — ролик» и «ролик — кольцо» при $h = 1,5 \text{ мм}$. Для пары трения «ролик — ролик» влияние контактной нагрузки на коэффициент сопротивления качению не наблюдается, и максимальное рассеяние значений относительно среднего составляет порядка 7 %. Для трибофатической системы «ролик — кольцо» при $h = 1,5 \text{ мм}$ наблюдается такая же зависимость, однако рассеяние значений доходит до 70 %. Это, по-видимому, объясняется влиянием изгиба кольца.

Заключение. Выполнен комплекс экспериментальных исследований по изучению закономерностей

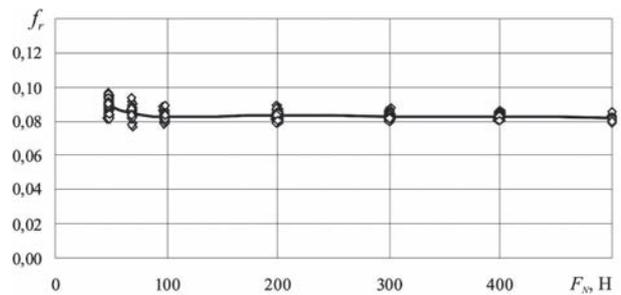


Рисунок 8 — Зависимость коэффициента сопротивления качению от контактной нагрузки для пары трения «ролик — ролик»

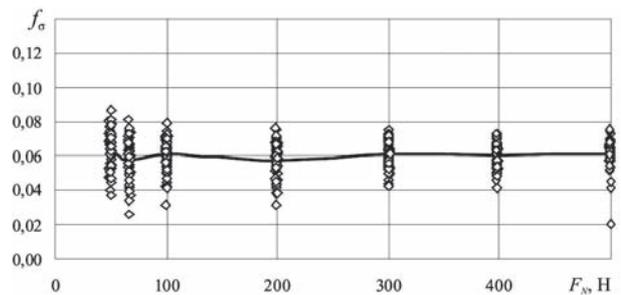


Рисунок 9 — Зависимость параметра трения от контактной нагрузки для трибофатической системы «ролик — кольцо» ($h = 1,5 \text{ мм}$)

стей влияния циклических напряжений σ на изменение коэффициента сопротивления качению и параметра трения. Установлено, что:

- чем больше величина σ (и, следовательно, чем больше соотношение σ/p_0), тем сильнее изменяется коэффициент сопротивления качению; такая закономерность наблюдается и при упругом, и при упругопластическом контакте;

- в условиях опытов, когда значение σ не превышает предела выносливости ($\sigma \leq \sigma_{-1}$), изменение f_σ при варьировании σ достигало 60 % и более при упругом контакте и до 8 % — в условиях упругопластического контакта, при этом значения σ не превышали 40 % контактных напряжений;

- циклические напряжения сильнее изменяют величину f_σ , когда трение организуется в зоне растяжения изгибаемого образца — по сравнению со случаем, когда оно организуется в зоне сжатия, и эта закономерность соблюдается как при упругом, так и при упругопластическом деформировании, но в условиях упругого контакта она выражена более сильно;

- при испытаниях трибофатической системы «ролик — кольцо» обнаруживается асимптотическая зависимость параметра трения от толщины кольца; при увеличении толщины наблюдается переход от трибофатической системе к паре трения;

- для системы «ролик — кольцо» наблюдается снижение параметра трения с ростом контактной нагрузки, что обусловлено влиянием изгиба кольца; при этом увеличивается и рассеяние значений f_σ , что, по-видимому, обусловлено возбуждением колебаний в системе.

Таким образом, согласно экспериментальным данным, в зависимости от условий трения (испытаний) может выполняться неравенство $f_\sigma(p, \sigma) \geq f_r(p)$. Т.е. циклические напряжения могут, в зависимости от условий испытания (эксплуатации) как повышать, так и снижать коэффициент сопротивления качению. Это позволяет ставить и решать задачу об эффективном управлении параметром

трения в трибофатической системе нетрадиционным способом — за счет изменения изгибных напряжений.

Список литературы

1. Фролов, К.В. Современная трибология: Итоги и перспективы / К.В. Фролов [и др.]. — М.: Машиностроение, 2008. — 480 с.
2. Чичинадзе, А.В. Основы трибологии: учеб. / А.В. Чичинадзе [и др.] / под ред. А.В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 2001. — 663 с.
3. Мышкин, Н.К. Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.И. Петраковец. — Гомель: ИММС НАНБ, 2002. — 304 с.
4. Сосновский, Л.А. Основы трибофатики / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2003. — Т. 1. — 246 с. — Т. 2. — 234 с.
5. Сосновский, Л.А. Сюрпризы трибофатики / Л.А. Сосновский, С.С. Щербаков. — Гомель: БелГУТ, 2005. — 192 с.
6. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2007. — 434 с.
7. Щербаков, С.С. Расчетная оценка силы трения в силовой системе / С.С. Щербаков // Актуальные проблемы развития транспортных систем и строительного комплекса: тр. Междунар. науч.-практич. конф. — Гомель: БелГУТ, 2001. — С. 348—349.
8. Щербаков, С.С. Трение в силовой системе: прямой и обратный эффекты / С.С. Щербаков // Тр. IV Междунар. симпози. по трибофатике (ISTF 4), 23—27 сент. 2002 г., г. Тернополь (Украина); отв. ред. В.Т. Трошенко. — Тернополь: Тернопольский гос. технич. ун-т им. Ивана Пулюя, 2002. — Т. 2. — С. 791—793.
9. Сосновский, Л.А. Влияние внеконтактной нагрузки на изменение силы трения и коэффициента сопротивления качению / Л.А. Сосновский, В.В. Комиссаров, С.С. Щербаков // Поликомтриб-2009: тез. докл. Междунар. науч.-технич. конф., 22—25 июня 2009 г. — Гомель, 2009. — С. 214.
10. Щербаков, С.С. Влияние циклических напряжений от внеконтактной нагрузки на изменение характеристик трения / С.С. Щербаков, В.В. Комиссаров // Поликомтриб — 2011 [Электронный ресурс]; тез. докл. Междунар. науч.-технич. конф., 27—30 июня 2011 г. — Гомель, 2011. — С. 232.
11. Ахметзянов, М.Х. О механизме развития контактно-усталостных повреждений в рельсах / М.Х. Ахметзянов // Вестн. ВНИИЖТ. — 2003. — № 2. — С. 41—45.
12. Кузнецов, В.В. Причины и механизм контактно-усталостных отказов рельсов Р65 / В.В. Кузнецов, В.С. Лысюк // Вестн. ВНИИЖТ. — 2000. — № 6. — С. 33—39.
13. Вериго, М.Ф. Еще раз о причинах и механизмах контактно-усталостных отказов рельсов / М.Ф. Вериго // Вестн. ВНИИЖТ. — 2001. — № 5. — С. 21—26.
14. Лысюк, В.С. Повреждение рельсов и износ колес / В.С. Лысюк, Г.Г. Желнин, С.Н. Шарапов // Путь и путевое хозяйство. — 1997. — № 6. — С. 4—8.
15. Марков, Д.П. Контактно-усталостные повреждения колес и рельсов / Д.П. Марков // Трение и износ. — 2002. — Т. 23, № 1. — С. 437—447.

Komissarov V.V.

Experimental investigation of friction characteristics in tribo-fatigue systems «roller — shaft», «roller — ring», «roller — roller»

In article the experimental analysis of laws of influence of the pressure caused by extracontact loading, on change of the moment of a friction and rolling resistance coefficient is carried out. It is shown that cyclic pressure can (depending on test conditions) both to raise, and to reduce rolling resistance coefficient (to 60 %). It is revealed that the greatest deviation of rolling resistance coefficient in tribo-fatigue system from rolling resistance coefficient in similar pair of a friction is observed at the greatest absolute value of a parity of amplitude of cyclic pressure and the greatest value of contact pressure.

Поступила в редакцию 16.01.2012.