

Кузьменко А.Г.Хмельницкий национальный университет,
г. Хмельницкий, Украина**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ
ПРИ ВНУТРЕННЕМ И НАРУЖНОМ
КАЧЕНИИ ЦИЛИНДРОВ. ЭКСПЕРИМЕНТ
(ЧАСТЬ 1, СМ. [3])****1. Введение**

1.1. Трение и износ в подшипниках качения (ПК) вращающихся колес транспортных средств: автомобиля, трактора, троллейбуса, автобуса и т.д. является без сомнения одним из наиболее ответственных по безопасности узлов машин.

Из эксплуатации известны три основных сопряжения в ПК, выходящие из строя по износу: 1) дорожки качения; 2) износ оси в сопряжении с внутренней поверхностью внутреннего кольца подшипника; 3) износ посадочного места ступицы в сопряжении с наружной поверхностью внешнего кольца ПК.

Максимальный пробег ступичных ПК возможен до 1 млн. км. В то же время реальный пробег ПК до замены находится в пределах 130 - 190 тыс. км в тоже время возможный шум в ПК, требует экстренной замены ПК через 500 - 3000 км.

Укрупнено все причины отказов ступичных подшипников (СПК) можно разделить на два вида: 1) естественный износ при нормальной эксплуатации; 2) нарушение нормальных условий по монтажу, уплотнениям, смазке, дороге и т.д.

Данная работа направлена на исследование износа СПК, работающих в нормальных условиях.

Многочисленные эксплуатационные исследования ПК тяжело нагруженных тракторов типа Т-150 [1] показывают, что изнашиваются не только ступичные ПК, но и практически все подшипники и особенно ПК коробок передач и трансмиссии.

2. Общие задачи исследований. В связи с отмеченным во введении состоянием ПК возникает главная задача: повышение их ресурса различными методами: технологическими, конструкторскими и эксплуатационными.

Решение задачи повышения ресурса ПК состоит из двух основных этапов:

1) разработка мероприятий по повышению ресурса; 2) разработка методов оценки эффективности этих мероприятий; 3) методы оценки эффективности могут быть теоретическими и экспериментальными; 4) комплекс этих методов составляет математическую модель процессов приводящих их к предельному износу; 5) для оценки эффективности моделей в первом приближении можно использовать простую модель изнашивания:

$$u_k = k_w \sigma^m s, \quad (1)$$

где u_w – текущий износ;

k_w, m – параметры модели изнашивания определяемые из эксперимента;

σ – рабочее контактное давление в ПК определяются расчетом;

s – путь трения в изнашиваемых точках, определяемый расчетом и из эксперимента.

3. Экспериментальное определение проскальзывания и пути трения в изнашиваемых сопряжениях ступичных ПК является главной в этой работе.

3.1. Основная сложность в решении этой задачи состоит в том, что искомый путь трения состоит из микропроскальзывания, возникающего при внутреннем качении цилиндров: 1) внешней поверхности наружного кольца ПК и внутренней поверхности ступицы; 2) наружной поверхности внутреннего кольца ПК и внешней поверхности оси ступицы.

Строгое теоретическое определение величины проскальзывания при внутреннем качении цилиндров затруднено.

В данной работе выполнено экспериментальное определение величины проскальзывания, теоретические основы которого предложены в работе [3].

3.2. Методика и результаты испытаний сводится к следующему:

1) выпуклый цилиндр радиуса R_1 вводится в контакт с полым цилиндром R_2 с зазором $\Delta = R_2 - R_1$ и нагружается силой Q ;

2) в специальном приспособлении осуществляется перекачивание цилиндра R_1 по цилиндру R_2 ;

3) в начале испытаний на цилиндрах R_1 и R_2 наносятся друг против друга точки A и B ;

4) в процессе испытаний точки расходятся на величину Δl ; после числа оборотов n точки A и B снова совмещаются;

5) в соответствии с общей теорией на момент совмещения точек A и B общее проскальзывание составляет путь:

$$s_n = 2\pi R; \quad (2)$$

6) проскальзывание за один оборот s , будет равен:

$$s_1 = \frac{2\pi R}{n}; \quad (3)$$

7) относительное проскальзывание ε за один оборот равно:

$$\varepsilon = \frac{s_1}{2\pi R} = \frac{2\pi R}{2\pi R} = \frac{1}{n}, \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{n}; \quad (5)$$

8) результаты испытаний при следующих исходных данных; $R_1 = 17,5$; $2\Delta = 1$ мм; 2 мм; 3 мм; при $Q = 10$ кг на контакт.

Таблица 1

Измерения при $d_2 = 35$ мм

$2\Delta = d_2 - d_1$, мм	$\psi = \frac{2\Delta}{d} = \frac{\Delta}{R}$	N	ε	при 1 $N = 1/\psi$	ξ , %
0,1	0,00286	400	0,0025	350	1,25
1	0,0285	30	0,033	35	0,4
2	0,0571	17	0,059	17,5	0,3
3	0,0857	12,5	0,08	11,7	0,06

3.3. Обработка результатов измерений

3.3.1. 1) представим зависимость между коэффициентами проскальзывания ε и относительным зазором $\varepsilon = 1/n$ в форме степенной функции

$$\varepsilon = c\psi^\alpha; \quad (6)$$

2) параметры c и α функции (6) определим через две точки экспериментальной зависимости:

$$(\varepsilon_1, \psi_1), (\varepsilon_2, \psi_2),$$

по формуле:

$$\alpha = \frac{\lg \varepsilon_1 / \varepsilon_2}{\lg \psi_1 / \psi_2}, \quad (7)$$

$$c = \frac{\varepsilon_1}{\psi_1^\alpha}. \quad (8)$$

3.3.2. Удобней аппроксимирующей зависимость искать в форме функции

$$1) \quad N = N(\psi),$$

с учетом того, что

$$N = 1/\varepsilon,$$

имеем

$$2) \quad N = c/\psi^\alpha; \quad (9)$$

3) параметры c и α определяем по двум экспериментальным точкам:

$$(N_1, \psi_1), (N_2, \psi_2); \quad (10)$$

4) подставляя (10) в (9) находим:

$$N_1 = c/\psi_1^\alpha, N_2 = c/\psi_2^\alpha; \quad (11)$$

5) отсюда имеем уравнение:

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{\psi_2}{\psi_1} \right)^\alpha; \quad (12)$$

6) из которого имеем параметр α :

$$\alpha = \frac{\lg N_1 / N_2}{\lg \psi_2 / \psi_1}; \quad (13)$$

7) второй параметр C находим из (11):

$$C = N_1 \cdot \psi_1^\alpha. \quad (14)$$

3.3.3. Расчет параметров C , α

1) выбираем базовые точки аппроксимации:

$$N_1 = 17, \quad \psi_1 = 0,0571, \\ N_2 = 400, \quad \psi_2 = 0,00286;$$

2) подставляя в (13) имеем:

$$\alpha = \frac{\lg 17 / 40}{\lg 0,00286 / 0,0571} = 1,055;$$

3) по (14):

$$C = (0,0571)^{1,055} = 0,829;$$

4) учитывая определенную точность экспериментов, приходим к мысли приближенном округлении параметров:

$$C \approx 1, \quad \alpha \approx 1;$$

5) тогда искомая зависимость приобретает компактный вид:

$$N = \frac{1}{\psi} = \frac{1}{\varepsilon}; \quad (15)$$

6) то есть

$$\varepsilon = \psi. \quad (16)$$

Получаем достаточно точное на уровне закона выражение связи величин коэффициента проскальзывания и относительного зазора при внутреннем качении цилиндров:

Закон проскальзывания

Коэффициент проскальзывания равен величине относительного зазора.

4. Элементы механизма проскальзывания при внешнем качении цилиндров

4.1. Методика и порядок испытаний и обработки результатов соответствуют испытаниям при внутреннем качении цилиндров

- 1) цилиндры вводятся в контакт под нагрузкой Q ;
- 2) около точки контакта на цилиндрах наносятся точки A и B ;
- 3) по мере вращения метки расходятся и снова сходятся через n оборотов;
- 4) путь трения за n оборотов точки A и B проходят $2\pi R_1$ или $2\pi R_2$;
- 5) коэффициент проскальзывания при этом равен:

$$\varepsilon = \frac{2\pi R_1}{2\pi R_2} = \frac{1}{n}, \quad \varepsilon = \frac{1}{n}; \quad (17)$$

6) путь проскальзывания за оборот

$$s_1 = 2\pi R \varepsilon. \quad (18)$$

4.2. Условия и результаты испытаний

1) испытываются цилиндры одинаковых радиусов $2R = 35$ мм из стали ШХ15 (наружное кольцо ПК № 1000) при $Q = 20$ кг по сухому и со смазкой солидол Ж-2.

Результаты испытаний в табл. 2. Эксперименты табл. 1 и 2 выполнены при участии магистранта Решетника П.П.

Вид	n	ϵ	s_1 , мм
Без смазки	6800	$1,47 \cdot 10^{-4}$	0,032
Солидол	4700	$2,13 \cdot 10^{-4}$	0,047

2) путь трения скольжения за один оборот:

$$s_1 = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \epsilon = 2 \cdot \pi \cdot 35 \cdot 1,47 \cdot 10^{-4} = 0,032 \text{ мм.}$$

Из экспериментов следует, что при внешнем качении цилиндров в заданных условиях проскальзывание при введении смазки проскальзывание увеличивается в 1,5 раза.

4.3. Связь параметров проскальзывания с параметрами контакт

Полученные из эксперимента закономерности проскальзывания при качении цилиндров могут быть основной для оценки достоверности механизмов и моделей процессов скольжения.

4.3.1. Понятие о пути трения скольжения для контактирующих тел при качении

1) Путь в начальный момент площадка контакта двух цилиндров равна 2ϵ , и при качении точки поверхности одного тела скользят по точкам поверхности другого тела.

2) по определению: путь трения для контактных точек тела 1 равен пути который скользит проходят контактные точки поверхности тела 2 по контактными точкам тела 1.

4.3.2. Скольжение цилиндра по плоскости

1) для простоты объяснения и сдвинем его на расстояние s .

2) тогда; путь трения для точки A_1 тела 1 равен расстоянию $s_{A1} = s$; путь трения для точки A_2 тел 2 равен:

$$s_{A2} = 2\epsilon, s_{A1} = s. \quad (19)$$

4.3.3. Скольжение при качении

1) происходит только в течении контактирования тел на площадке 2ϵ , только на протяжении контакта на площадке 2ϵ при этом:

$$s_{A1} = 2\epsilon, s_{A2} = 2\epsilon, \quad (20)$$

2) очевидно принципиальное различие в механизме скольжения цилиндра по плоскости от механизма с проскальзыванием двух цилиндров.

4.3.4. Скольжение при полном обороте

1) при повороте на полный оборот точка A перейдет в положение A'_1 не совпадающее с A_1 на Δs , а точка A_2 переходит в A'_2 также не совпадающее с начальными;

2) это несовпадение объясняется проскальзыванием в пределах площадки контакта.

4.3.5. Скольжение через n оборотов:

1) суммарное скольжение приводит к повторному после начала совпадению положений точек A_1 и A_2 .

4.3.6. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов для внешнего цилиндра

1) реальный путь трения за один оборот из эксперимента равен:

$$s_1 = \frac{2\pi R}{n}; \quad (21)$$

2) сравнивая (21), (20) приходим к выводу, что с достаточной точностью проскальзывание точек контакта за один оборот может оцениваться по размеру площадки контакта

$$s_1 = \frac{2\pi R}{n} = 2\epsilon. \quad (22)$$

4.3.7. Сопоставим пути трения скольжения определяемые расчетом по (20) и из эксперимента по (21)

1) сопоставление выполним для контактных условий:

$$R_1 = R_2 = 17,5; Q = 20 \text{ кг}; E = 2 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2; l = 11 \text{ мм.}$$

4.3.8. Расчеты контакта при контакте цилиндров по формуле Герца

1) [5]

$$\sigma = 1,522 \left(\frac{QR^2}{lE2R} \right)^{1/2} = 1,522 \left(\frac{QR}{lE2} \right)^{1/2}; \quad (23)$$

2) по условиям опыта: $R = 17,5$; $Q = 20$ кг; $E = 2 \cdot 10^4$ кг/мм²; $l = 11$ мм

$$\sigma = 1,522 \left(\frac{20 \cdot 17,5}{11 \cdot 2 \cdot 10^4} \right)^{1/2} = 6,07 \cdot 10^{-2} \text{ мм} = 60,7 \text{ мкм};$$

3) по формуле (20) путь за один оборот проскальзывания равен:

$$s_1 = 2\sigma = 2 \cdot 0,0607 \cdot 2 = 0,1214 \text{ мм};$$

4) относительное проскальзывание:

$$\varepsilon = \frac{s_1}{2\pi R} = \frac{0,1214}{2 \cdot \pi \cdot 17,5} = 0,00011, \quad \varepsilon_{расч} = 1,1 \cdot 10^{-4};$$

5) по экспериментальным данным таблица 2 в этих условиях коэффициент проскальзывания для стали ШХ 15 без смазки равен:

$$\varepsilon_{экс} = 1,47 \cdot 10^{-4};$$

6) расхождение составляет:

$$\frac{\varepsilon_{расч} - \varepsilon_{экс}}{\varepsilon_{экс}} = \frac{1,47 - 1,1}{1,47} = 0,25;$$

7) сравнивая расчетные и экспериментальные данные, устанавливаем, прежде всего, точное совпадение порядка (10^{-4}) этих величин.

Это принципиально важный результат. При этом расхождении в 25 % не носит принципиального характера.

Выводы

1. Разработана методика экспериментального определения коэффициентов проскальзывания:

1.1. при внешнем перекачивании цилиндров;

1.2. при внутреннем перекачивании цилиндров.

2. Проведены испытания и установлено, что:

2.1. при внутреннем качении в диапазоне относительного зазора 0,057 - 0,0057 коэффициент проскальзывания находится в пределах $\varepsilon = 0,033 - 0,048$;2.2. при внешнем перекачивании цилиндров получено $\varepsilon = 1,47 \cdot 10^{-4} - 2,13 \cdot 10^{-4}$ 1,47 .3. Для внутреннего перекачивания цилиндров установлена гиперболическая зависимость коэффициента проскальзывания ε от относительности зазора:

$$\varepsilon = \frac{c}{\psi^n}.$$

3.1. С достаточной для практики точностью для условий выполненного эксперимента $c = n = 1$;3.2. экспериментально **установлен закон равенства коэффициента проскальзывания ε и относительного зазора ψ** :

$$\varepsilon = \psi.$$

4. Для внешнего перекачивания цилиндров установлено что:

4.1. **Величина пути трения проскальзывания за один оборот s_1 равна размеру площадки контакта по Герцу**

$$s_1 = 2\sigma;$$

4.2. **Величина коэффициента проскальзывания**

$$\varepsilon = \frac{s_1}{2\pi R} = \frac{2\sigma}{2\pi R} = \frac{\sigma}{\pi R};$$

4.3. **Значения теоретического и экспериментального проскальзывания совпадают по порядку 10^{-4} и на 25 % расходятся по конкретным числам.**

5. Для получения теоретических значений коэффициента проскальзывания при внутреннем качении цилиндров, определяемых с малым зазором необходимы дополнительные специальные исследования.

5.1. Механизм проскальзывания поверхностей при внутреннем качении цилиндров сопрягаемых с малым зазором существенно более сложней, чем механизм внешнего качения цилиндров.

Первая сложность состоит в том, что контактные давления в этом случае не определяются по формулам Герца. В этом случае может быть использован метод эквивалентной податливости изложенный в монографии [4].

Вторая сложность состоит в кинематике качения с потерей равновесия в касательном направлении.

5.2. Для изучения теоретического изучения механики проскальзывания поверхностей при внутреннем качении цилиндров необходимо проведение специальных исследований.

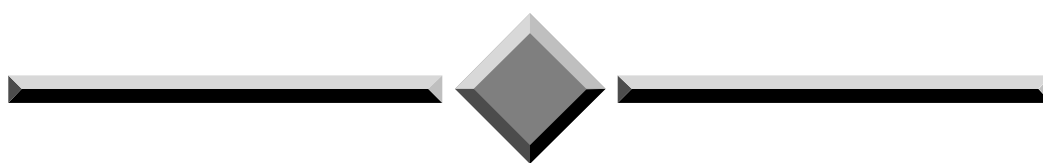
Кроме того необходимо расширение экспериментальных и теоретических исследований влияния на проскальзывание смазки, нагрузки, покрытий. Формы контактирующих тел в осевом сечении, соединений типа шпоночные и д.т.

5.3. Изучить перспективы перенесения закономерностей проскальзывания при внутреннем качении цилиндров на закономерности проскальзывания в подшипниках качения (учет зазора в ПК на ϵ в ПК).

Литература

1. Ухтов В.Г. Долговечность деталей шасси колесных тракторов. – Харьков, АВДУ, 2001.
2. Уктусов С. Диагностика неисправностей ступичных подшипников // Автомастер. – 2008. – № 1-2. – С. 1-16.
3. Кузьменко А.Г. Скольжение трение и износ при качении цилиндров с проскальзыванием // Проблемы трибологии.
4. Кузьменко А.Г. Метод алгебраических уравнений в контактной механике. – Хмельницкий: ХНУ. 2006. – 448.
5. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Наукова думка, 1988. – 536с.

Надійшла 16.04.2012



ЧИТАЙТЕ

журнал

“Problems of Tribology”

во всемирной сети

INTERNET !

<http://www.tup.km.ua/science/journals/tribology/>