

ЛИТЕРАТУРА

1. Пинегин С. В. Научные проблемы прочности и износостойкости в машиностроении, «Вестник машиностроения», 1970, № 3.

2. Райко М. В., Тривайло М. С. Метод измерения толщины смазочного слоя в контакте деталей машин, «Физико-химическая механика материалов», 1965, № 5.

3. Sibly L. B., Austin A. E. An X-ray method for measuring thin lubricant films between rollers «ISA Trans». 1962. 1. № 3.

С. В. ПИНЕГИН, Ю. Н. БЛОХИН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СМАЗКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ КАЧЕНИЮ

В современной технике наиболее распространенные детали машин (шариковые и роликовые подшипники качения, зубчатые и фрикционные передачи), как правило, работают со смазкой. Смазочные вещества выполняют при этом различные функции — обеспечение минимальных потерь на трение, уменьшение износа, отвод тепла и т. д. Влияние масел на износ и трение смазываемых поверхностей зависит от сочетания многочисленных факторов (параметров режима трения, состояния поверхностей, износных, фрикционных и смазочных свойств масел). В данной работе приведены результаты экспериментального исследования влияния смазки на характер и величину изменения сопротивления качению в зависимости от скорости, нагрузки, размеров и формы контактной площадки. Эксперименты проводились на высокоскоростной роликовой установке с изменением скорости качения от 3,5 до 75 м/сек и нормальной нагрузки от 50 до 450 кГ [1]. Установка оборудована измерительными устройствами, позволяющими вести непрерывно регистрацию в ходе эксперимента величины сопротивления качению, нормальной нагрузки, скорости качения и относительного проскальзывания поверхностей. При испытаниях использовались ролики цилиндрической и торoidalной формы с отношением $\frac{R_{*}}{d_{ин}} = \infty; 1; 0,59; 0,515$. Диаметр роликов 140_{-0,01} мм, радиус в плоскости, перпендикулярной качению, $\infty; 5; 5,15; 5,9; 10$ мм. Материал образцов ШХ15, твердость после термической обработки HRC 60—62, чистота рабочей поверхности $\nabla 9$ по ГОСТу 2789—56. Нагрузка на контакте изменялась ступенями 50 кГ; 150; 250; 350; 450 кГ. Вычисление контактных напряжений производилось по известным формулам теории упругости. Расчетные значения максимальных контактных напряжений приведены в таблице 1.

Исследование влияния смазки на сопротивление качению проводилось с последовательным изменением условий проведения эксперимента: а) поверхности сухие, б) обильная подача масла в

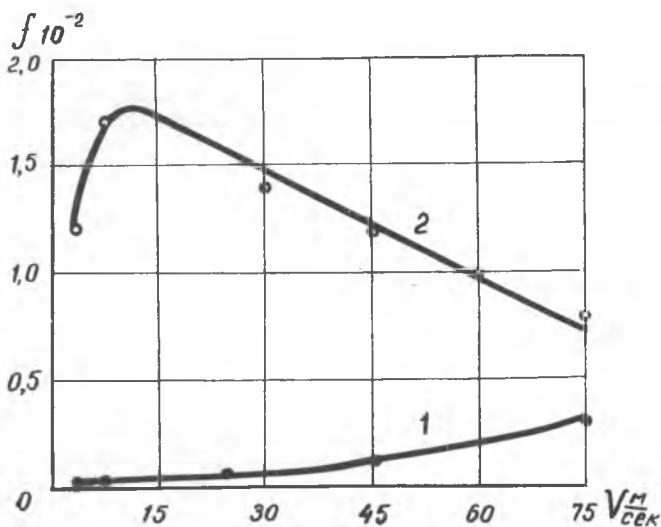


Рис. 1. Влияние смазки на величину коэффициента сопротивления качению цилиндра по цилиндру при контактных напряжениях $\sigma_{z_{\max}} = 27 \text{ кг/мм}^2$

1 — поверхности сухие; 2 — обильная подача масла МС-20 в зону контакта.

зону контакта (масло МС-20) Температура масла на входе поддерживалась постоянной и составляла 40°C .

Применение оригинальной конструкции устройства для измерения момента сопротивления качению позволило провести эксперименты в условиях, приближающихся к чистому качению. Результаты экспериментального исследования приведены на рис. 1, 2, 3 и в таблицах 2, 3. На рис. 1 представлены кривые зависимости коэффициента сопротивления качению цилиндра по цилиндру от скорости качения при контактных напряжениях $\sigma_{z_{\max}} = 27 \text{ кг/мм}^2$, где кривая 1 относится к качению сухих поверхностей, а кривая 2 — смазанных поверхностей. Наличие смазки привело к увеличе-

Таблица 1

Контактирующие детали	Цилиндр по цилиндру	Тороид по желобу			
		$\frac{R_{\text{ж}}}{d_{\text{ш}}} = \infty$	$\frac{R_{\text{ж}}}{d_{\text{ш}}} = 1$	$\frac{R_{\text{ж}}}{d_{\text{ш}}} = 0,59$	$\frac{R_{\text{ж}}}{d_{\text{ш}}} = 0,515$
Нагрузка кг	Максимальные контактные напряжения, кг/мм ²				
50	27	220	163	105	65
150	46,5	318	233	152	94
250	60,2	375	280	180	110
350	71,5	420	310	200	125
450	80,5	450	337	220	135

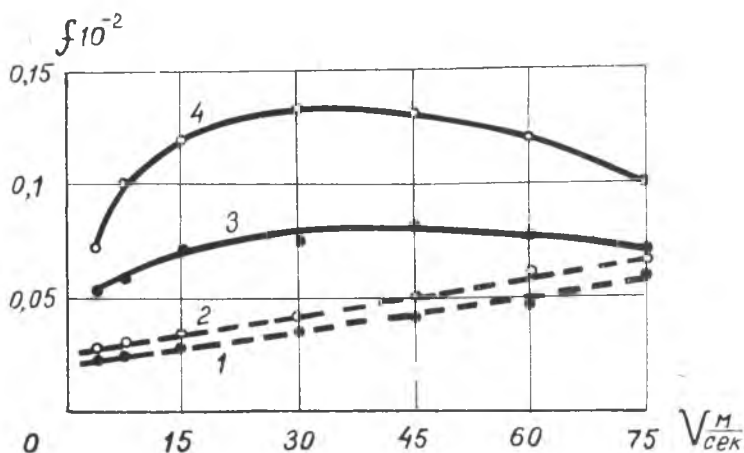


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления качению от скорости качения при различных значениях поперечной кривизны дорожки качения.

Нормальная нагрузка равна 350 кг.

1, 3 $\frac{R_{ж}}{d_{ш}} = 1$; 2, 4 $\frac{R_{ж}}{d_{ш}} = 0,59$

1, 2 — поверхности сухие;

1, 4 — обильная смазка поверхностей.

нию коэффициента сопротивления качению по сравнению с сухими поверхностями в 5—6 раз при скорости качения $V=0,07$ м/сек (на рис. не показано). С увеличением скорости качения величина коэффициента сопротивления качению вначале непрерывно возрастала и при скорости равной 7 м/сек превышала значения коэффициентов при качении сухих поверхностей на два порядка (рис. 1, кривые 1, 2). После перехода через максимум при дальнейшем увеличении скорости качения сопротивление качению начинает заметно уменьшаться. В исследуемом диапазоне скоростей при обильной смазке с увеличением контактного напряжения от 27 кг/мм² до 80 кг/мм² величина коэффициента сопротивления качению уменьшается (табл. 2).

С увеличением контактных напряжений до 220—450 кг/мм² влияние смазки на сопротивление качению значительно уменьшилось. Например, при качении тороида по цилиндру применение

Таблица 2

$\sigma_{z \max}$ кг/мм ²	27	46	60	71	80
V м/сек	Коэффициент сопротивления качению $f \cdot 10^{-2}$				
3,5	1,2	0,44	0,29	0,22	0,19
30	1,4	0,50	0,32	0,22	0,19
75	0,82	0,30	0,20	0,14	0,12

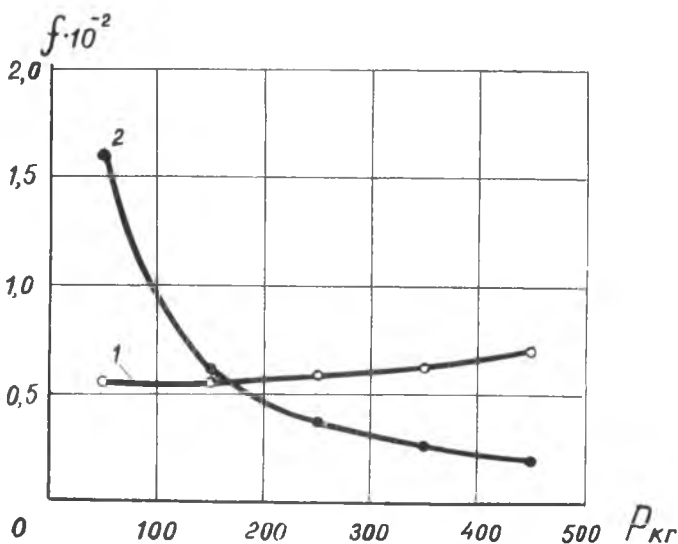


Рис. 3. Влияние смазки на коэффициент сопротивления качению тороида по желобу с отношением $\frac{R_{ж}}{R_{ш}} = 0,515$ в зависимости от величины нагрузки.

1 — поверхности сухие; 2 — обильная подача смазки в зону контакта

смазки привело лишь к слабому увеличению коэффициента сопротивления качению. Падение степени влияния смазки на увеличение потерь на трение при качении тороида по цилиндру объясняется отсутствием сплошного гидродинамически образованного масляного слоя между соприкасающимися поверхностями при высоких давлениях. Результаты экспериментального исследования приведены в таблице 3, где в числителе значения коэффициентов для сухих поверхностей, в знаменателе — для смазанных.

Опытами установлено, что по мере увеличения в определенных пределах поперечной кривизны дорожек качения потери, обусловленные присутствием смазки в зоне контакта, возрастают независимо от эффекта дифференциального трения. На рис. 2 представлены экспериментально полученные кривые зависимости коэффициента сопротивления качению от скорости качения при различных значениях отношения $\frac{R_{ж}}{d_{ш}}$ для сухих (кривые 1, 2) и смазанных (кривые 3, 4) поверхностей. При рассмотрении рис. 2 можно отметить, что смазка повышает сопротивление качению тороида по желобу с отношением $\frac{R_{ж}}{d_{ш}}$ 1 и 0,59 (кривые 3, 4) в отличие от потерь при качении сухих поверхностей (кривые 1, 2).

Наиболее сильно смазка увеличивала сопротивление при качении тороида по желобу с отношением $\frac{R_{ж}}{d_{ш}} = 0,59$ (кривая 4).

Т а б л и ц а 3

V м/сек	3,5	7,0	24	46	75
$\sigma_{z_{max}}$ кг/мм ²	Коэффициент сопротивления качению $\lambda \cdot 10^{-3}$				
220	0,26	0,26	0,48	0,72	1,5
	0,44	0,48	0,56	0,88	1,9
450	0,28	0,28	0,33	0,36	0,57
	0,28	0,33	0,40	0,41	0,58

В рассмотренных выше случаях силы трения, возникающие на контакте от дифференциального проскальзывания, были сравнительно невысоки и не вызывали нагрева контактируемых поверхностей, работающих в условиях, приближающихся к условиям сухого трения. Смазка вызывала лишь дополнительные механические потери. При значительном уменьшении радиуса желоба (качение тороида по желобу с отношением $\frac{R_{ж}}{d_{ш}} = 0,515$) силы трения на контакте, обусловленные дифференциальным скольжением поверхностей, достигали высоких значений и способствовали интенсивному нагреву и сильному износу поверхностей. Экспериментальное определение сопротивления качению при этих условиях выполнено в диапазоне скоростей качения от 3,5 до 15 м/сек. Получено, что с увеличением нагрузки от 50 до 450 кг, а контактного давления от 63 до 137 кг/мм² сопротивление качению возросло в 25 раз при скорости качения равной 7,5 м/сек. С повышением скорости качения от 3,5 до 15 м/сек при контактном давлении равном 65 кг/мм² коэффициент сопротивления качению увеличился от $0,13 \cdot 10^{-2}$ до $0,55 \cdot 10^{-2}$. Проведено также экспериментальное исследование сопротивления качению тороида по желобу с отношением $\frac{R_{ж}}{d_{ш}} = 0,515$ при обильной подаче смазочной жидкости в зону контакта. Результаты экспериментов приведены на рис. 3, где кривая 1 относится к качению сухих поверхностей, а 2 — к смазанным поверхностям. Применение смазки в этом случае способствовало уменьшению сопротивления качению. Смазка не только снижала сопротивление качению, но и эффективно отводила тепло, что позволило провести эксперименты в диапазоне скоростей качения от 3,5 до 75 м/сек.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что смазка существенно увеличивает сопротивление качению при средних контактных давлениях и малой величине сил трения скольжения на контакте по сравнению с условиями, когда обкатываются технически чистые поверхности.

2. При наличии на контакте значительных по величине сил трения скольжения смазка уменьшает сопротивление качению (качение тороида по желобу с отношением $\frac{R_{ж}}{d_{ш}} = 0,515$).

3. На кривой зависимости коэффициента сопротивления качению смазанных поверхностей от скорости качения отмечено наличие максимума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пинегин С. В. и др. «Влияние внешних факторов на контактную прочность при качении». Изд-во «НАУКА», Москва, 1972 г.

С. В. ФЕДОТОВА, Г. А. ЛОБАНОВ, И. С. ЛЕСНИЦКИЙ

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ РАДИАЛЬНО-УПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ С ТРЕХТОЧЕЧНЫМ КОНТАКТОМ ПРИ ДВУХ- И ТРЕХТОЧЕЧНОМ КАСАНИИ ШАРОВ С ЖЕЛОБАМИ

В опорах роторов газотурбинных двигателей и в редукторах очень широко применяются радиальноупорные подшипники трехточечного контакта. В серийных изделиях и в изделиях, находящихся в доводке, нами использовано 15 типоразмеров подшипников трехточечного контакта особо легкой и легкой серии с внутренними диаметрами от 35 до 180 мм, причем на самых разнообразных скоростных режимах и при различных сочетаниях радиальных и осевых нагрузок.

Считается, что трехточечные подшипники работают надежно лишь при явном преобладании осевой нагрузки над радиальной, т. к. такое соотношение сил обеспечивает двухточечный контакт шаров с беговыми дорожками в процессе работы.

Однако практика двигателестроения показывает, что достижение такого соотношения не всегда возможно.

В современных многорежимных ГТД давления в газовых полостях, определяющие величину и направление действия осевых сил, могут изменяться в очень широком диапазоне при переходе двигателя с режима на режим. Это приводит к изменению величины осевых сил, действующих на подшипники и, главное, к изменению соотношения между осевыми и радиальными силами.

Мало того, дальнейшее усложнение функций ГТД и связанное с этим изменение их конструкций привело к тому, что в ряде