

позволяет в ряде случаев рекомендовать смазку деталей маслами меньшей вязкости, что особенно важно при эксплуатации машин в условиях низких температур.

И. Д. РАТНЕР,

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СМАЗКИ НА КОНТАКТНУЮ ВЫНОСЛИВОСТЬ СТАЛЕЙ

Работоспособность зубчатых передач и подшипников качения определяется, в основном, усталостной прочностью их рабочих поверхностей [1], [2]. Одним из факторов, повышающих контактную выносливость зубчатых колес и подшипников, является увеличение толщины смазочной пленки, разделяющей их трущиеся поверхности при работе. Согласно основным положениям контактно-гидродинамической теории смазки, это объясняется устранением металлического соприкосновения шероховатостей рабочих поверхностей, созданием режима жидкостного трения и уменьшением касательных напряжений в зоне контакта [3], [4].

Для качественной и количественной оценки зависимости контактной выносливости материалов зубчатых колес и подшипников качения от толщины смазочной пленки, были проведены экспериментальные исследования с помощью роликовой установки. Программой работ предусматривалось построение кривых усталостной выносливости образцов при различных толщинах смазочного слоя, достигаемых путем изменения температуры смазки, подаваемой в зону контакта.

Для устранения влияния предельного напряжения сдвига в смазочном слое, исследования проводились в условиях «фрикционного» качения образцов без скольжения. Эксперименты проводились на контактно-роликовой установке системы ИМАШ консольного типа с двухцикловым нагружением. Кинематическая схема установки и схема нагружения представлены на рис. 1. В процессе испытаний скорость вращения образцов поддерживалась постоянной и равнялась 6750 об/мин. При этом суммарная скорость качения в зоне контакта была равна 21,34 м/сек. Для получения возможности построения кривых усталостной выносливости образцы испытывались на двух уровнях нагружения, при которых величина максимальных нормальных напряжений в зоне контакта достигала 250 кг/мм² и 300 кг/см² соответственно. Следует отметить, что каждый образец подвергался приработке, при которой нагрузка повышалась постепенно, на 40 кг через 15 минут работы, вплоть до рабочего уровня. Для смазки использовалась масло-смесь из 75% минерального масла МС-20 ГОСТ 1013—49 и 25% трансформаторного масла ГОСТ 982—56.

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА УСТАНОВКИ

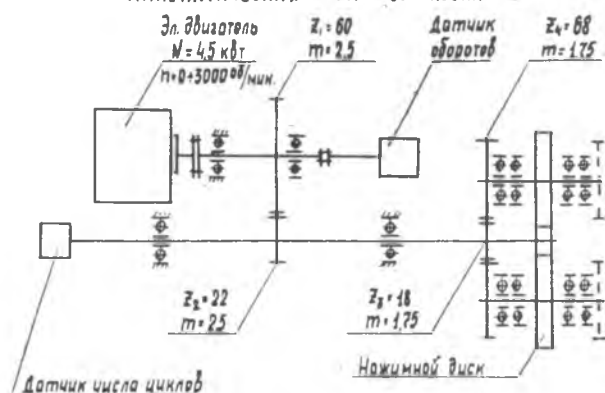


СХЕМА НАГРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦА

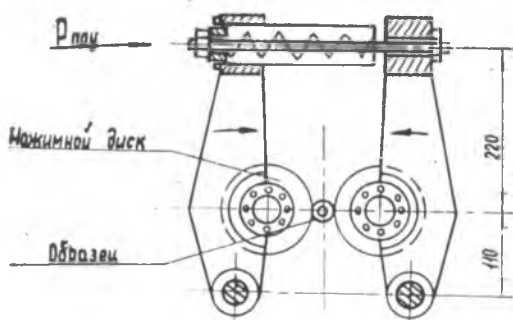
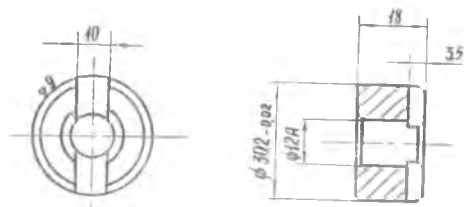


Рис. 1.

Смазка подавалась в зону контакта образцов из специальных форсунок под давлением 1 кг/см^2 в количестве 2 л/мин. Температура смазки регулировалась путем изменения количества охлаждающей воды в змеевиках маслобака и поддона установки. Контроль температуры масла на выходе из зоны контакта осуществлялся специальной термопарой с записью данных на диаграмме прибора ЭПП-09.

Для испытаний были изготовлены опытные образцы — ролики и нажимные кольца — диски из стали 12Х2Н4А и из стали ШХ15, широко применяемых при изготовлении современных высокоскоростных тяжело нагруженных зубчатых передач и подшипников качения. Схематические чертежи роликов и дисков приведены на рис. 2.

а) Ролик - образец



б) Нажимное кольцо - диск

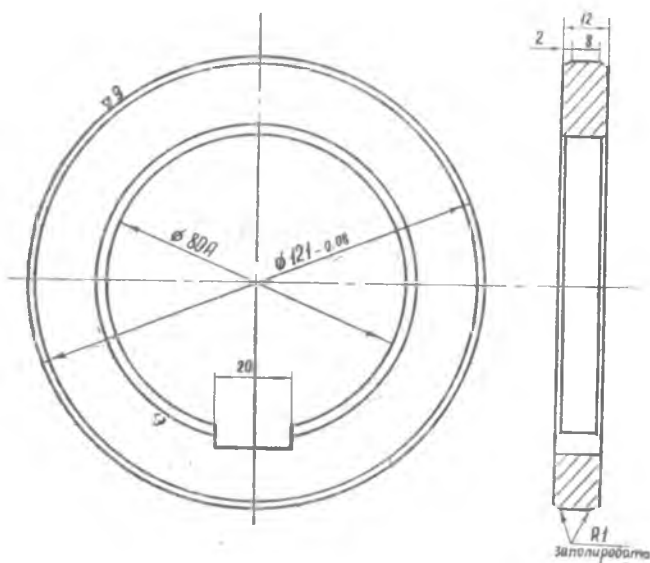


Рис. 2.

Для устранения возможных погрешностей испытаний из-за качества материала, они изготавливались из стали одной плавки, по единой технологии и подвергались термообработке по одинаковому режиму. Образцы и диски из стали 12Х2Н4А подвергались цементации на глубину $1,0 \div 1,3$ мм с последующей закалкой и низким отпуском. При этом твердость поверхности достигла значений $HRC \geq 60$, а твердость сердцевины была равна $HRC 31 \div 41$. Наружные диаметры роликов и дисков после термообработки окончательно шлифовались и подвергались дробеструйной обработке. При этом чистота поверхностей достигала 9 класса, а среднеквадратичная высота микронеровностей равнялась соответственно для

роликов $0,43 \div 0,47$ мк, а для дисков $0,54 \div 0,58$ мк. Ролики и диски из стали ШХ-15 подвергались объемной закалке до твердости $H_v \geq 85$ (HRC 61÷65). Рабочие поверхности роликов и дисков окончательно шлифовались до 9 класса чистоты. При этом среднеквадратичная высота микронеровностей достигала у роликов $0,45 \div 0,49$ мк, а у дисков — $0,54 \div 0,59$ мк.

Следует отметить, что в процессе приработки и испытаний на рабочих режимах в течение 1—2 часов среднеквадратичная высота микронеровностей уменьшалась и становилась для роликов равной $0,38 \div 0,42$ мк, а для дисков — $0,47 \div 0,52$ мк независимо от марки материала.

В ходе отработки методики испытаний было установлено, что стабильность температуры смазки поддерживается с наибольшей точностью при нагреве смазки на выходе из зоны контакта до 50^{+5°C и 85^{+5°C .

При этих температурах выходящей смазки проводились впоследствии все испытания на контактную выносливость.

За момент окончания испытания принималось возникновение ямок выкрашивания в средней части ролика (по ширине) величиной, большей 3 мм^2 . При этом появление следов выкрашивания по краям рабочей зоны на ролике не учитывалось. Обнаружение возникновения выкрашивания производилось при визуальном осмотре образцов через каждый час работы или же по резкому изменению шума в рабочей зоне установки. При этом фиксировалось число циклов нагружения на счетчике.

Результаты испытания образцов из обеих марок стали на двух уровнях нагружения при температурах смазки 50°C и 85°C приведены в таблице 1. Следует отметить, что в таблице указаны и результаты испытаний образцов, которые не были учтены при последующей статистической обработке вследствие увеличенного краевого «эффекта» или из-за других дефектов, возникавших при работе.

Статистическая обработка результатов проводилась по методике корреляционного анализа [5], [6] с помощью специальной программы на ЭВМ «Минск-22». По результатам обработки были составлены корреляционные уравнения связи логарифма числа циклов нагружения до появления выкрашивания и логарифма величины максимального нормального напряжения на площадке контакта. Для образцов из стали 12Х2Н4А эти уравнения имеют вид:

а) при температуре масла 50°C

$$x_y = 7,273 - 5,12(y - 2,44);$$

б) при температуре масла 85°C

$$x_y = 6,816 - 5,53(y - 2,437);$$

Для образцов из стали ШХ-15 эти уравнения можно представить в виде:

а) при температуре масла 50°C

$$x_y = 7,125 - 8,22(y - 2,435);$$

б) при температуре масла 85°C

$$x_y = 6,66 - 8,65(y - 2,433);$$

По результатам статистической обработки экспериментов были построены кривые контактной усталости образцов в зависимости от температуры смазки в зоне контакта. В полупологарифмическом виде эти кривые приведены на рис. 3а для стали 12Х2Н4А и на рис. 3б для стали ШХ-15.

Для получения зависимостей контактной выносливости образцов от толщины смазочной пленки были проведены расчеты толщины по ранее разработанной методике [7]. При этом учитывалось, что при одинаковом уровне нагружения и одной и той же температуре смазки в зоне контакта толщина смазочного слоя между образцами и дисками является практически неизменной. Таким образом, в ходе всех испытаний толщина смазочной пленки могла иметь 4 значения в зависимости от нагрузки и температуры масла. Результаты расчетов толщины смазочной пленки приведены в таблице 2. Кроме того, в эту таблицу внесены средние величины среднеквадратичных микронеровностей роликов и дисков (после обработки), величины суммарных среднеквадратичных микронеровностей, которые можно вычислить по уравнению:

$$H_{ск} = \sqrt{H_{скр}^2 + H_{скд}^2} \quad (1)$$

где $H_{скр}$ и $H_{скд}$ — среднеквадратичные высоты микронеровностей роликов и дисков. Здесь же записаны относительные толщины смазочной пленки, определяемые с помощью формулы:

$$H = \frac{h_0}{H_{ск}}; \quad (2)$$

Для сравнения в таблицу 2 внесены средние значения долговечностей для обоих уровней нагружения и обеих температур смазки, а также отношения средних долговечностей при температурах смазки 50°C и 85°C.

Анализируя результаты исследований, можно отметить следующее:

1. С уменьшением температуры смазки в зоне контакта усталостная выносливость образцов из стали 12Х2Н4А и стали ШХ-15 увеличивается.

2. Увеличение долговечности образцов прямо пропорционально увеличению относительной толщины смазочного слоя, что подтверждается результатами других работ [8], [9].

3. Для условий экспериментов это объясняется тем, что с ростом температуры смазки с 50°C до 85°C относительная толщина

Результаты испытаний образцов на контактную выносливость

Образцы из стали 12Х2Н1А										Образцы из стали ШХ-15				
$t_M = 50^\circ\text{C}$					$t_M = 85^\circ\text{C}$					$t_M = 50^\circ\text{C}$				
№ обр.	$\sigma_{\max}$ МПа	$N_{\text{цикл}}$ ($\times 10^{-6}$)	Прим.	№ обр.	$\sigma_{\max}$ МПа	$N_{\text{цикл}}$ ($\times 10^{-6}$)	Прим.	№ обр.	$\sigma_{\max}$ МПа	$N_{\text{цикл}}$ ($\times 10^{-6}$)	Прим.	№ обр.	$\sigma_{\max}$ МПа	$N_{\text{цикл}}$ ($\times 10^{-6}$)
1	300	7,9	краев.	21	300	4,13		1	300	6,03		21	300	1,24
2	»	11,85	эффект	22	»	4,80		2	»	6,67		22	»	2,28
3	»	11,77		23	»	2,8	краев.	3	»	7,38		23	»	2,73
4	»	12,89		24	»	4,34	эффект	4	»	5,59		24	»	1,19
5	»	6,5	краев.	25	»	3,58		5	»	6,42		25	»	1,87
6	»	13,18	эффект	26	»	3,12		6	»	4,71		26	»	2,64
7	»	11,29		27	»	2,3	поломка	7	»	6,95		27	»	2,37
8	»	12,65		28	»	3,85	диска	8	»	2,90		28	»	3,05
9	»	10,83		29	»	4,51		9	»	4,82		29	»	1,33
10	»	12,38		30	»	3,47		10	»	5,97		30	250	8,24
11	»	4,8	поломка	31	250	10,87		11	250	24,75		31	»	10,38
12	250	23,76	диска	32	»	9,71		12	»	30,84		32	»	8,96
13	»	31,71		33	»	3,8	поломка	13	»	26,53		33	»	7,49
14	»	24,3	краев.	34	»	11,05	образца	14	»	23,20		34	»	8,86
15	»	30,84	эффект	35	»	11,84		15	»	28,30		35	»	10,55
16	»	32,62		36	»	10,25		16	»	30,57		36	»	10,15
17	»	28,93		37	»	11,39		17	»	25,79		37	»	7,84
18	»	14,9	поломка	38	»	5,9	краев.	18	»	28,91		38	»	11,19
19	»	32,16	диска	39	»	10,63	эффект	19	»	26,17		39	»	9,41
20	»	31,43		40	»	11,61		20	»	29,67		40	»	10,92

Относительные толщины смазочной пленки и относительные долговечности

Температура смазки	Марка материала	Образцы из стали 12Х2Н4А				Образцы из стали ШХ-15			
		$t_M = 50^\circ \text{C}$		$t_M = 85^\circ \text{C}$		$t_M = 50^\circ \text{C}$		$t_M = 85^\circ \text{C}$	
Максимальные нормальные напряжения		300 кг/мм ²	250 кг/мм ²	300 кг/мм ²	250 кг/мм ²	300 кг/мм ²	250 кг/мм ²	300 кг/мм ²	250 кг/мм ²
Толщина смазочной пленки, мк		1,66	1,75	0,547	0,579	1,66	1,75	0,547	0,579
Высота шероховатостей роликов, мк		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Высота шероховатостей дисков, мк		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Суммарная высота шероховатостей, мк		0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
$H = \frac{h_0}{H_{\text{ср}}}$		2,59	2,72	0,855	0,904	2,59	2,72	0,855	0,904
Долговечность (средняя) млн. циклов		12,0	31,9	4,0	10,8	6,0	27,4	1,97	9,2
$\frac{N_{\text{цикл}}(t_M = 50^\circ \text{C})}{N_{\text{цикл}}(t_M = 85^\circ \text{C})}$		3,0	2,95	—	—	3,05	2,98	—	—
$\frac{H(t_M = 50^\circ \text{C})}{H(t_M = 85^\circ \text{C})}$		3,03	3,00	—	—	3,03	3,00	—	—

Усталостная выносливость образцов в зависимости от температуры смазки

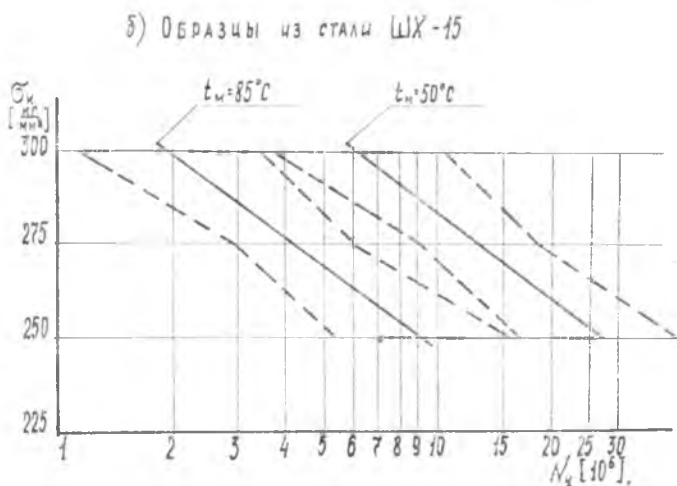
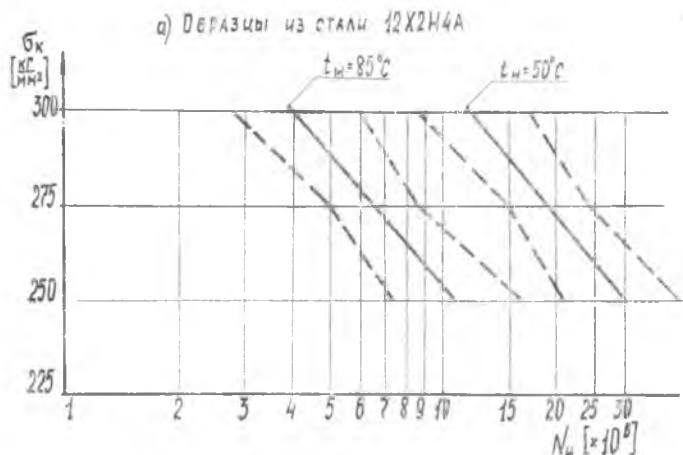


Рис. 3.

смазочного слоя становилась ниже 1, что означало переход от жидкостного трения к смешанному и приводило к значительному увеличению уровня касательных напряжений на площадке контакта.

4. Уменьшение толщины смазочного слоя связано с резким уменьшением вязкости смазки и ее пьезокоэффициента при повышении температуры маслосмеси с $50^\circ C$ до $85^\circ C$. Следует отметить, что дальнейшее увеличение температуры смазки окажет значительно меньшее влияние на долговечность рабочих поверхностей в свя-

зи с тем, что относительная толщина пленки останется меньше 1, т. е. будет сохранен режим полужидкостного трения.

Из заключения можно сделать вывод, что обеспечение жидкостного трения на рабочих поверхностях зубчатых колес и подшипников качения позволит значительно увеличить их работоспособность.

Проведение сравнительных расчетов относительных толщин смазочной пленки при разработке и доводочных работах в эксплуатации позволит с большей эффективностью оценить долговечность и надежность деталей и узлов машин и механизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрусевич А. И. Зубчатые и червячные передачи. Энциклопедический справочник «Машиностроение», т. 2, Машгиз, 1948.
2. Нинегин С. Б. Работоспособность деталей подшипников. Труды ЭИППП, выпуск 2, Машгиз, 1949.
3. Коднир Д. С. Контактно-гидродинамическая теория смазки. Куйбышевское книжное издательство, 1963.
4. Розенберг Ю. А. Влияние смазочных масел на долговечность и надежность деталей машин, «Наука», 1970.
5. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятности и математической статистики для технических приложений. «Наука», Москва, 1969.
6. Некоторые вопросы усталостной прочности стали. Машгиз, 1970.
7. Коднир Д. С., Курушин М. И., Ратнер И. Д. Расчет толщины смазочного слоя в зубчатых передачах и подшипниках качения. Труды Куйбышевского авиационного института, выпуск 40, Куйбышев, 1969.
8. Bartz W. I. Zur Bedeutung der Elastohydrodynamik für das Auslegen von Zahnradpaarungen. Konstruktion, № 7, 1971.
9. Danner Charles H. Fatigue life of tapered roller bearings under minimal lubricant films. ASLE Trans. № 4, 1970.

И. Д. РАТНЕР

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ТОЛЩИНУ СМАЗОЧНОЙ ПЛЕНКИ В ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧАХ

Нормальная работа современных высокоскоростных тяжело нагруженных зубчатых передач обеспечивается при условии обильной смазки поверхностей зубьев. При взаимном качении со скольжением рабочих профилей зубьев между ними образуется смазочная пленка, которая обеспечивает жидкостный режим трения и осуществляет теплоотвод из зоны контакта. Согласно основным положениям контактно-гидродинамической теории смазки, увеличение толщины смазочной пленки в зоне зацепления существенно улучшает работоспособность зубчатых передач, благодаря повышению их износостойкости и контактной выносливости.