

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НЕКОТОРЫХ СТАЛЕЙ ПРИ СМАЗКЕ «ОКУНАНИЕМ»

В современных условиях ресурс машины в значительной мере определяется работоспособностью ответственных ее деталей (зубчатые колеса, подшипники качения и др.), зависящей не только от напряжений и деформаций, но и от условий смазки контактирующих поверхностей.

В связи с переходом к рациональному конструированию машин (уменьшение габаритов при увеличении нагрузок и скоростей) роль смазки существенно возросла.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования влияния некоторых масел на контактную прочность и износостойкость сталей 12ХН3А, 18Х2Н4ВА, 25Х2МФА и 40Х. Испытания проводились на установках с использованием принципа «роликовой аналогии». Образцы — ролики работали в условиях переменного соотношения скоростей скольжения и качения, что осуществлялось благодаря конструктивным особенностям привода. Беговая дорожка образца по условиям трения имитировала зубья шестерни и колеса (рис. 1).

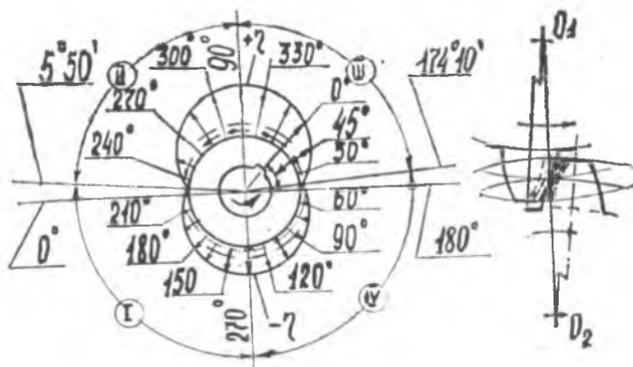


Рис. 1. Зоны испытываемого образца — ролика.

Смазка роликов производилась окунанием их в масляную ванну. Исследовались несколько нефтяных масел с различной вязкостью (индустриальное 20, вазелиновое, велосит, цилиндрическое 24, П-28, цилиндрическое 52, АК-10), смесь масел с антиизносной присадкой (опытное масло) и без присадки, индустриальное 20 с добавкой дисульфида молибдена.

На все стали имелся сертификат, на масла — паспорта и данные по элементарному химсоставу.

При проведении экспериментов замерялись износы, исходная и конечная микротвердость рабочих дорожек образцов и контролировалась температура масляной ванны.

Часть образцов подвергалась металлографическому обследованию, а характерные участки с выкрашиванием рабочих дорожек — фотографировались.

Испытывалось 3 группы образцов:

1. Образцы из сталей 18X2H4BA, 12XH3A и 25X2MФА с HRC 58—62.

2. Образцы из стали 40X с HRC 38—42.

3. Образцы из стали 40X с HB240—260.

Уровни контактных напряжений были приняты:

для образцов 1-й группы —  $12000 \div 23000 \text{ кг/см}^2$ ;

для образцов 2-й группы —  $18000—12000 \text{ кг/см}^2$ .

Для приближенной оценки влияния краевого эффекта на результаты экспериментов одна партия образцов с HRC 58—62 была испытана с различной шириной беговой дорожки. Как следует из опытов, влияние краевого эффекта имелось, но значительно снижалось при уменьшении контактных напряжений и при  $\sigma_k \leq 16000 \text{ кг/см}^2$  практически отсутствовало.

В процессе исследования были отмечены изменения микротвердости рабочих дорожек образцов (повышение — «наклеп» и реже — размягчение).

У большинства образцов «наклеп» достигал 10—16%. Известно, что увеличение микротвердости и сопутствующее ему выравнивание поверхностей увеличивает контактную выносливость деталей. Незначительная разница в «наклепе» рабочих дорожек роликов при смазке их различными маслами позволяет утверждать о приблизительной равноценности масел различной вязкости с этой точки зрения.

Износ образцов, как выявилось в экспериментах, зависит от вязкости и химсостава масел, зоны образца (условий трения) и поверхностной его твердости. Зонами максимального износа оказывались околополюсные участки, соответствующие ведущим (реже — ведомым) ножкам —  $V_{\text{ср}} \approx 0,13—0,26 \text{ м/сек}$ . При использовании масел более высокой вязкости износ чаще всего снижался. Обычно максимальные износы не превышали для различных условий смазки 5—20  $\mu\text{м}$ . В редких случаях износ достигал 50—60  $\mu\text{м}$ .

В проводимых экспериментах исследовалось также влияние добавки  $\text{MoS}_2$  (1,5% по весу) в масло «индустриальное 20» на долговечность и износостойкость образцов из стали 40X (HB 240—260). Значительный эффект был получен при  $\sigma_k \leq 8000 \text{ кг/см}^2$  (долговечность возросла на 35—40%, износы — снизились).

Сравнительно высокие износостойкость и контактная выносливость образцов даже при неблагоприятных условиях (малые размеры контактной площадки, небольшие окружные скорости и вяз-

кость смазки) позволяют предположить, что толщины реальных масляных пленок в контакте выше расчетных\*.

Приближенная проверка этого предположения производилась следующим образом:

применительно к нашим роликовым стелдам и условиям работы были подсчитаны для конкретных условий толщины масляных пленок в контакте по формулам А. Н. Грубина, А. И. Петрусевича, Д. С. Коднира, Дауссона и Хиггинсона.

$$h = 0,168 \frac{(\nu_0 \cdot U_{\Sigma})^{0,77}}{\sigma_K^{0,182}}$$

$$h = 374 \cdot 10^{-5} (\nu_0 \cdot U_{\Sigma})^{0,625} \sigma_K^{0,125}$$

$$h = 288,3 \frac{(\nu_0 \cdot U_{\Sigma})^{0,75} n^{0,6}}{\sigma_K^{0,3}}$$

$$h = 0,21 \frac{(\nu_0 \cdot U_{\Sigma})^{0,7}}{\sigma_K^{0,36}}$$

Затем, на основании этих зависимостей и полученных нами в экспериментах уравнений усталостных кривых определялись числа циклов нагружений по следующим формулам:

$$N_{ц} = A \left[ \frac{h}{0,168 (\nu_0 \cdot U_{\Sigma})^{0,727}} \right]^{6,05m}$$

$$N_{ц} = A \left[ \frac{374 \cdot 10^{-5} (\nu_0 \cdot U_{\Sigma})^{0,625}}{h} \right]^{8m}$$

$$N_{ц} = A \left[ \frac{h}{288,3 (\nu_0 \cdot U_{\Sigma})^{0,75} n^{0,6}} \right]^{3,34m}$$

$$N_{ц} = A \left[ \frac{h}{0,21 (\nu_0 \cdot U_{\Sigma})^{0,7}} \right]^{3,85m}$$

В этих формулах: «А» и «m» соответственно константа и степень в уравнении  $\sigma_K^m \cdot N_{ц} = A$ . Подсчитанные числа циклов сравнивались с действительным (из экспериментов).

Расхождение между расчетной и действительной долговечностью соответственно получалось следующим — 10,4%, +3%, +14,5% и —30,5%.

Таким образом, ф-лы А. Н. Грубина, А. И. Петрусевича и Д. С. Коднира дают (с учетом погрешностей расчета и неизбежного разброса экспериментальных данных) — довольно близкие ре-

\* Это подтверждается экспериментами М. В. Райко.

зультаты, хотя наиболее близкой к реальной толщина масляной пленки получилась по формуле Д. С. Коднира.

Контактная выносливость образцов из сталей 18Х2Н4ВА, 12ХН3А и 25Х2МФА при прочих равных условиях оказалась различной. Это указывает на доминирующее влияние химсостава стали на ее питтингостойкость.

На рис. 2 приведены наклонные ветви усталостных кривых (испытания—сравнительные) для некоторых вариантов испытаний. Статистическая обработка экспериментальных данных позволила получить уравнения усталостных кривых и уточнить значения показателя степени « $m$ ». В наших экспериментах « $m$ » принимало значения в интервале 1,5—10. На ЭВМ «ПромИнь» на основании полученных результатов были подсчитаны значения коэффициентов, уточняющих допускаемые контактные напряжения в интервале  $m=1,5-10$ , чисел циклов  $N_{ц}=10^3-10^9$  и базовых чисел циклов  $N_{оп}=(1,5-25)10^7$ .

Металлографические исследования нескольких образцов позволили установить, что глубина предпиттинговых микротрещин зависит от параметров смазки и увеличивается с уменьшением вязкости. Кроме того, отмечено, что заглужение трещин будет более значительным при наличии структурных дефектов (карбидная сетка и т. п.).

Максимальная глубина микротрещин обычно не превышала 10—50 мкм (рис. 3).

Несмотря на то, что эксперименты проводились на образцах, а не на «натурных» деталях, результаты их близки к реальному и внешний вид повреждений (питтинг) аналогичен встречающемуся на практике. (рис. 4).

## ВЫВОДЫ

1. Выявлено незначительное влияние параметров масел на изменения микротвердости контактирующих поверхностей.

2. Установлены зоны максимального износа — зоны с

$$V_{ск} = 0,13 - 0,26 \text{ м/сек.}$$

3. Контактная выносливость различных сталей при прочих равных условиях в первую очередь зависит от химсостава этих сталей.

4. С ростом контактных напряжений влияние вязкости смазки на питтингостойкость сталей возрастает.

5. Получены уравнения усталостных кривых, значения показателя степени « $m$ » для различных случаев и подсчитаны коэффициенты, уточняющие величину допускаемых контактных напряжений в широком диапазоне условий.

6. Сравнительно высокая износостойкость и контактная выносливость испытанных сталей на маловязких маслах, объясняемая тем, что реальные толщины масляных пленок больше расчетных,

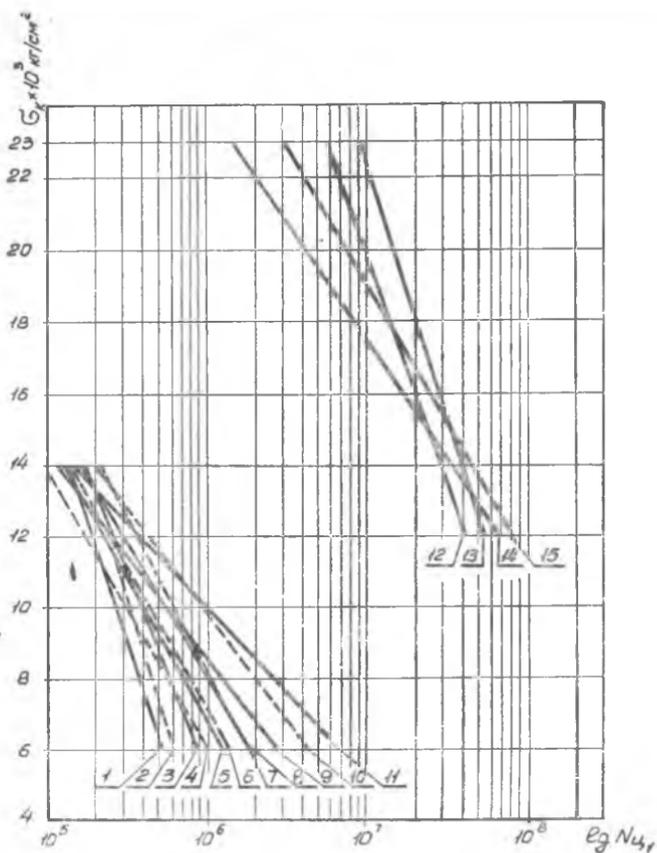


Рис. 2. Наклонные участки усталостных кривых:  
Сталь 40X (HB240—260):

1 —  $L_K$  (длина контактной линии) = 4 мм. Масло «Индустриальное 20»; 2 —  $L_K = 2$  мм. Масло «опытное» с присадкой; 3 —  $L_K = 2$  мм. Масло «опытное» без присадки; 4 —  $L_K = 4$  мм. Масло «индустриальное 20» с добавкой; 5 —  $L_K = 4$  мм. Масло «АК-10»; 6 —  $L_K = 4$  мм. Масло «П-28»; 7 —  $L_K = 4$  мм. Масло «цилиндровое 24»; 8 —  $L_K = 4$  мм. Масло «цилиндровое 52»; 9 —  $L_K = 4$  мм. Масло «опытное» с присадкой.

Сталь 40X (HRC 38—42):

10 —  $L_K = 4$  мм. Масло «цилиндровое 52»; 11 —  $L_K = 4$  мм. Масло «цилиндровое 24».

HRC 58—62;  $L_K = 2$  мм:

12 — сталь 12ХН3А. Масло «цилиндровое 52»; 13 — сталь 18Х2Н4ВА масло «велосит»; 14 — сталь 18Х2Н4ВА масло «цилиндровое 52»; 15 — сталь 12ХН3А масло «велосит».



*Рис. 3.* Шлиф образца из стали 12ХН3А с микротрещиной (Х500).



*Рис. 4.* Образец из стали 40Х (НВ240—260) с пittingом на беговой дорожке.

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  $6750 \text{ об/мин}$ . При этом суммарная скорость качения в зоне контакта была равна  $21,34 \text{ м/сек}$ . Для получения возможности построения кривых усталостной выносливости образцы испытывались на двух уровнях нагружения, при которых величина максимальных нормальных напряжений в зоне контакта достигала  $250 \text{ кг/мм}^2$  и  $300 \text{ кг/см}^2$  соответственно. Следует отметить, что каждый образец подвергался приработке, при которой нагрузка повышалась постепенно, на  $40 \text{ кг}$  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.