

Жиенкулов С.А., Каржаубаев А.С.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ВОССТАНОВЛЕННЫХ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

S.A. Zhienkulov, A.S. Karzhaubaev

METHODOLOGICAL BASES OF CALCULATION OF REDUCED WEAR OF CRANKSHAFTS

УДК 621.791.92

В этой статье приведены теоретические основы износа в парах трения коленчатых валов и изложена расчетные формулы для определения износа наплавленных шеек валов.

In this clause the theoretical bases of deterioration in pairs of friction cranked shaft are given and is stated the settlement formulas for definition of deterioration of fused shaft journal.

Под изнашиванием подразумевается процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющегося в постепенном измерении размеров и (или) формы тела. Износ является результатом изнашивания, определяемого в установленных единицах. В соответствии с ГОСТ 23.002-78 различают свыше десяти видов изнашивания.

Наиболее распространенное изнашивание при механическом взаимодействии поверхностей. Оно подразделяется на абразивное изнашивание, за счет схватывания, усталостных явлений, коррозионно-механических воздействий, электрических и др. абразивное изнашивание во многих механизмах является ведущим.

Этим же стандартом (ГОСТ 23.002-78) устанавливаются некоторые определения характеристик износа. К ним относятся:

- а) предельный износ – износ, соответствующий предельному состоянию;
- б) допустимый износ – износ, при котором изделие сохраняет работоспособность;
- в) местный износ – износ на отдельном участке;
- г) эпюра износа – графическое изображение распределения местного износа по поверхности трения или по определенному ее сечению.

Как правило, в процессе трения одновременно наблюдается несколько видов изнашивания. Тем не менее, в большинстве случаев проявляется ведущий вид изнашивания, ответственный за характер и размер износа.

В процессе изнашивания образуются единичные разрушения в малом объеме материала, который удаляется из зоны трения в виде частиц износа. Различают износ при трении без смазки, при граничной смазке и абразивное изнашивание.

По характеру деформирования износ протекает при упругом контакте, пластическом и в условиях микрорезания.

Шейки коленчатого вала машин подвержены объемному механическому износу, которой вызывается истиранием и абразивному износом. Процесс истирания тесно связан с характером процесса трения в машинах.

Схема износа и распределение работы трения на шатунной шейке коленчатого вала показаны на рисунке 1.

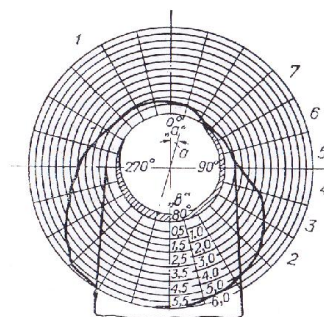


Рис. 1. Схема износа и распределения работы трения на поверхности шатунной шейки коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53.

Внутренняя сторона шатунной шейки (к оси коленчатого вала) изнашиваются значительно больше, чем наружная. Такое распределение изношенных поверхностей по окружности шатунных шеек наблюдается при износе коленчатых валов автотракторных всех марок: шатунные шейки коленчатых валов изнашиваются неравномерно не только по окружности, и по длине.

На поверхностях шатунных шеек, расположенных с наружной стороны, при износе появляются характерные матовые участки, расположение которых показано на макрофотографиях (рисунк 2).



Рис. 2. Макрофотографии изнашивающихся поверхностей шатунных шеек коленчатых валов.

Микроструктура поверхностных слоев изнашивающейся шатунной шейки после травления 4% раствором азотной кислоты в этиловом спирте показана на рисунке 3. На микрофотографиях сечений поверхностных слоев изнашивающейся шейки показаны отпечатки измерения микротвердости, выполненного при нагрузке 50г. Микротвердость наплавленных слоев равна (55-60) HRC.

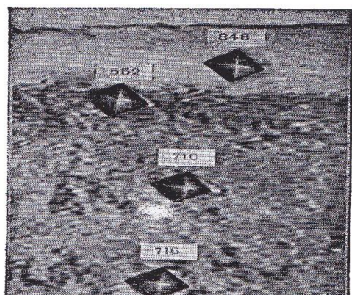


Рис. 3. Микроструктура наплавленного металла

Количественной относительной характеристикой износа является интенсивность изнашивания, которая определяется как отношение значения износа к обусловленному пути, на котором произошло изнашивание или объему выполненной работы.

Интенсивность линейного износа I_h определяется толщиной изношенного слоя, Δh приходящейся на единицу пути трения L_t

$$I_h = \frac{\Delta h}{L_t}, \quad (1)$$

или по изменению объема или массы истираемого тела:

$$I_h = \frac{\Delta V}{L_t A_t}, \quad (2)$$

$$I_h = \frac{\Delta M}{\rho L_t A_t}, \quad (3)$$

где ρ – плотность изнашиваемого материала; ΔV , ΔM – изменение объема и массы истираемого тела (абсолютный износ); A_t - площадь поверхности истираемого элемента.

При неизменном значении площади изнашивания, например на участке стационарного износа, целесообразно пользоваться интенсивностью износа по массе:

$$L_t = \frac{\Delta M}{L_t}, \quad (4)$$

или по объему:

$$I_V = \frac{\Delta V}{L_t}, \quad (5)$$

Интенсивность линейного, объемного и массового износов находится между собой в следующей зависимости:

$$I_h = \frac{I_v}{A_t} = \frac{I_t}{\rho A_t}, \quad (6)$$

При разработке методов расчета износостойкости исходят из различных физических концепций механизма изнашивания. При абразивном изнашивании М.М. Хрущев, считая, что износ является в основном следствием микрорезания, определил, что интенсивность изнашивания обратно пропорциональна твердости. Им установлено много закономерностей и расчетных характеристик этого вида изнашивания.

В последнее время все более пристально рассматривают механизмы износа, исходя из энергетических представлений. При этом предлагается ряд инвариантных критериев поверхностного разрушения. В их число входят:

- удельная работа изнашивания, определяемая как отношение мощности трения N_t к интенсивности I_h . Б.И.Костецким и В.А. Ляшко установлено, что критерий удельной работы изнашивания сохраняет свою инвариантность только в пределах одного вида износа, характеризуемого определенным (неизменным) структурным механизмом поверхностного разрушения. Это критерий для различного вида изнашивания (абразивного, окислительного, механического, фретинга и др.) может различаться на несколько порядков;

- критическая плотность энергии деформации, критерий, предложенный Л.И. Погодаевым применительно к поверхностному разрушению материалов при изнашивании в жидких средах, разработанный в развитии структурно-энергетического подхода И.А.Одинга и В.С.Ивановой;

- критическая плотность внутренней энергии, критерий, предложенный В.В.Федоровым. Им экспериментально установлена независимость критической плотности внутренней энергии и ее связь с энергией, расходуемой на нагрев металла и его плавление;

- критерии, основанные на оценке значения поверхностной энергии как работы, затрачиваемой на образование новой поверхности (Е.Рабинович, Г. Флейшер, В.Д.Кузнецов, В.В. Копытко и другие);

- энтропийно - энергетические критерии успешно разработанные Л.И. Бершадским. Эти критерии являются дальнейшим развитием структурно-энергетического подхода, поскольку энтропия является прямой количественной мерой структурной разупорядочности.

С учетом энергетических представлений предложены расчетные формулы для прогнозирования износа трудящихся пар (В.С.Хачатурян, В.В.Федоров и другие). Однако наибольшее распространение получил метод расчета и расчетные характеристики, предложенные И.В.Крагельским. Им и его сотрудниками приведены доказательства необходимости учитывать усталостные механизмы

разрушения поверхностных слоёв при трении независимо от вида изнашивания.

Контактирование при трении осуществляется по поверхностям, шероховатость которых определяется параметрами и кривой опорной поверхности, рассмотренных в [1]. Расчётные формулы, выведенные И.В. Крагельским, предусматривают трение и изнашивание по поверхности упругодеформируемого тела. Шероховатость моделируется набором шаровых сегментов одинакового радиуса, расположенных по высоте таким образом, что распределение в слое модели и реальной поверхности описывается одинаковой опорной кривой. Основное уравнение для расчёта износа при множественном контакте по методу И.В. Крагельским имеет вид [2]:

$$I = k_1 \alpha \sqrt{\frac{h}{R}} \frac{\rho_a}{\rho_r} \frac{1}{n}, \quad (7)$$

где k_1 – множитель, определяемый геометрической конфигурацией и расположением по высоте единичных неровностей на поверхностях;

обычно $k_1 = 0,2$; $\alpha = \frac{A_a}{A_r}$ – коэффициент перекрытия;

ρ_a – давление на площади A_a (номинальный);

ρ_r – давление на площади A_r (фактического контакта); h – глубина внедрения;

R – радиус единичной микронеровности;

n – число циклов, приводящих к разрушению деформируемого объёма. Интенсивность изнашивания по методу И.В. Крагельского может изменяться в пределах от 10^{-3} до 10^{-12} .

Анализ данных об износостойкости различных пар трения позволил И.В. Крагельскому и Г.М. Харачу составить следующие классы износостойкости (таблица - 1) [3].

Таблица 1

Классы износостойкости пар трения

Параметры износа	Классы износостойкости пар трения									
	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
$Lg I_{\min}$	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4
$Lg I_{\max}$	12	11	10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3

Классы износостойкости определяют О-V – упругое деформирование при контактном взаимодействии; VI, VII – упругое пластическое деформирование; VIII, IX – микрорезание.

В формуле (7) каждый из членов имеет своё физическое значение. Первый член $\sqrt{h/R}$ выражает относительную глубину внедрения неровностей поверхностей, значение которой определяет вид контактирования. При упругом контакте для чёрных

металлов это значение составляет менее 10^{-2} и для цветных – 10^{-4} .

Второй член – отношение $\frac{\rho_a}{\rho_r}$ – определяет отношение площади фактического касания к номинальной, так как $\rho_a A_a = \rho_r A_r$, то отношение $\frac{\rho_a}{\rho_r}$ всегда меньше 1. Для металлов оно находится в пределах 10^{-4} - 10^{-2} , для эластомеров (полимеры, резины) – 10^{-2} - 10^{-1} .

Третий член уравнения $\frac{1}{n}$ определяет способность материала к разрушению при повторном воздействии, т.е. определяет сопротивляемость усталости. Это отношение зависит от сорта материала, действующих напряжений. Наличия смазочной среды и др. Оно изменяется в пределах 10^{-2} - 10^{-10} .

Вычисление безразмерных значений уравнения (7) осуществляется для случая взаимодействия абсолютно жёсткой шероховатой, не имеющей волнистости поверхности с учетом параметров кривой опорной поверхности с упруго деформированным телом. Первое безразмерное отношение:

$$\sqrt{\frac{h}{R}} = \left(2 \frac{\rho_c}{\rho_r} \right)^{\frac{1}{2\nu}} \Delta^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

где ρ_c – давление на контурную площадь; $\Delta = \frac{R_{\max}}{R_b^{\frac{1}{\nu}}}$

комплексная характеристика шероховатости;

$R = \frac{R_n R_{np}}{R_n + R_{np}}$ – приведённый радиус неровностей;

R_n – радиус неровностей в поперечном сечении;

R_{np} – радиус неровностей в продольном сечении.

Второе отношение $\frac{\rho_c}{\rho_r}$ раскрывают следующим образом:

$$\rho_r = 0,5 E^{2\nu+1} \Delta^{\frac{\nu}{2\nu+1}}, \quad (9)$$

$$\rho_c = 0,2 E^{0,8} \left(\frac{HB}{R_B} \right)^{0,4} \rho_a^{0,2}, \quad (10)$$

где E – модуль упругости; R_B – радиус волны; HB – твердость по Бринеллю.

Третий множитель $\frac{1}{n}$ вычисляется с учётом того, что число циклов до разрушения убывает по мере увеличения действующих амплитудных значений напряжения. Кривую усталости для упругого контакта описывают эмпирически формулами степенного вида [3].

$$n = \left(\frac{\sigma_b}{\sigma_{np}} \right) \cdot t_y, \quad (11)$$

где σ_b - предел прочности при растяжении; σ_{np} - действующее напряжение; t_y - параметр кривой фрикционной усталости.

Таким образом, изложенные теоретические основы износа используются при экспериментальной оценке износа, наплавленных шеек чугуновых коленчатых валов.

Литература:

1. Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах. Транспортная техника. М.: 1987. – 223 с.
2. Какуевичкий В.А. Износостойкость коленчатых валов, восстановленных различными способами// Сварочное производство, 1988, № 5, С.26-28.
3. Каржаубаев А.С. Восстановления чугуновых коленчатых валов автомобильных двигателей: - Монография. Алматы 2010, С.148.

Рецензент: д.т.н., профессор Поветкин В.В.
