

МЕТОД ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ И РЕСУРСА ПРЕЦИЗИОННОГО СОПРЯЖЕНИЯ РАСПЫЛИТЕЛЯ ТОПЛИВА В ДИЗЕЛЕ

В.Е. Лазарев, к.т.н., доц., А.А. Малоземов, к.т.н., доц., В.Н. Бондарь, к.т.н., доц.;
Южно-Уральский государственный университет

При работе распылителя происходит преобразование энергии трения на поверхностях направляющего прецизионного сопряжения распылителя, которые воспринимают механические и тепловые нагрузки, деформирующие и прогревающие контактный слой. Интенсивность нагружения оценивается характерными объемами контактного слоя, впоследствии используемыми при оценке ресурса распылителя. При приработке и в основном периоде эксплуатации контактные сопряжения распылителя изнашиваются в результате усталости материала поверхностного слоя при многократном деформировании. Определение интенсивности изнашивания лежит в основе оценки ресурса прецизионных сопряжений распылителя.

Для выявления эффективности новых технических решений по совершенствованию конструкции и установления границ потери работоспособности распылителя необходим метод оценки его ресурса на стадии проектирования, использующий современные способы определения интенсивности изнашивания прецизионных элементов. Важнейшим показателем качества распылителя является гидравлическая плотность, определяемая величиной и характером зазора в направляющем прецизионном сопряжении игла–корпус. Предельное значение диаметрального зазора в результате изнашивания прецизионного сопряжения лежит в интервале 4,5–7,5 мкм [1]. По достижении предельного зазора в сопряжении игла–корпус распылитель теряет работоспособность. В основе определения интенсивности изнашивания поверхностей направляющего прецизионного сопряжения лежат следующие соображения.

При анализе кинетической энергии движения иглы в сопряжении распылителя выделяют две ее составляющие: непреобразуемую энергию перемещения и преобразуемую энергию трения иглы. Преобразуемая энергия трения поглощается поверхностями иглы и корпуса распылителя.

Известно [2, 3], что процесс поглощения преобразуемой энергии трения осуществляется многократным восприятием ее импульсов тонким контактным слоем поверхности. В преобразуемой энергии трения в свою очередь выделяют также две составляющие: аккумулируемую и диссипируемую ее части. Первая, проявляясь в виде механической аккумулируемой энергии, накапливаясь и приводя в итоге к разрушению, описывается распределением деформаций и напряжений в контактном слое сопряжения. Вторая, проявляясь в виде тепловой диссипируемой энергии, описывается распределением температур и их градиентов в контактном слое. Диссипируемая часть в виде тепловой энергии составляет большую долю энергии трения.

Важнейшей характеристикой нагруженности контактного слоя сопряжения является плотность энергии, определяемая как отношение энергии, расходуемой на преодоление трения, к объему контактного слоя элементов, воспринимающего нагрузку при трении [2]. Характерным геометрическим параметром этого слоя является толщина h .

Тепловая энергия рассеивается на шероховатых поверхностях элементов сопряжения, а также в объемах иглы и корпуса распылителя. Распределение тепловой энергии в объеме элементов сопряжения оценивается изменением градиента температуры dT/dh , которое характеризуется интенсивным его снижением с удалением от поверхности трения, а затем наступлением стабилизационного периода. В стабилизационном периоде изменение градиента температуры практически отсутствует ($dT/dh \approx \text{const} \neq 0$), что указывает на равномерное рассеяние теплоты. За толщину интенсивно теплонагруженного слоя принимаем расстояние h_R от поверхности трения до условной границы стабилизационного периода в изменении градиента температур.

Аккумулируемая механическая энергия приводит к накоплению повреждений, а впоследствии к деформированию и разрушению поверхностного слоя. Распределение аккумулируемой энергии в объеме элементов оценивается изменением градиента напряжений, например нормальных,

$d\sigma_y/dh$, которое характеризуется интенсивным снижением его по мере удаления от поверхности трения, а затем наступлением стабилизационного периода. В течение стабилизационного периода изменение градиента напряжений практически отсутствует ($d\sigma_y/dh \approx \text{const} \neq 0$), что указывает на равномерное деформирование материала. За толщину интенсивно деформируемого слоя принимаем расстояние h_D от поверхности трения до условной границы стабилизационного периода в изменении градиента напряжений.

При работе прецизионного сопряжения распылителя выделяют три периода: приработка, основной период эксплуатации и интенсивное изнашивание.

Отделяемый в период приработки объем поверхностного слоя состоит из продуктов изнашивания — множества мельчайших (элементарных) частиц, образующихся при его разрушающей деформации. Очень тонкий поверхностный слой трущихся элементов называют квазитекучим слоем [2, 4], в котором предполагается стохастический характер движения отдельных групп элементарных частиц.

В процессе изнашивания группы элементарных частиц квазитекучего слоя участвуют с разной функциональной направленностью. Элементарные частицы, выносимые из зоны трения, составляют собственно изношенную часть поверхности трения. Элементарные частицы, внедряющиеся во внешний слой, выполняют функцию частичного восполнения изношенного слоя поверхности трения.

Период приработки трущихся поверхностей характеризуется уменьшением высот микронеровностей в результате их смятия или изнашивания. В период приработки происходит достижение равновесной шероховатости сопрягаемых поверхностей для обеспечения минимального значения коэффициента трения [3]. Без ущерба для эффективности работы трибосопряжения сокращения периода приработки можно достичь воздействием на характер изменения интенсивности изнашивания трущихся поверхностей во времени. Оригинальная зависимость между относительной массой $i = m_B/M$ частиц, выносимых из зоны трения, и относительной продолжительностью t/t_B приработки может быть описана с использованием распределения Вейбулла, предложенным при изучении изнашивания металлов:

$$i = 1 - \exp \left[-4,6 \cdot \left(\frac{t}{t_B} \right)^{\zeta+1} \right], \quad (1)$$

в которой процесс изнашивания в периоде приработки однозначно определяется количественной

(условной продолжительностью — t_B) и качественной (параметром характера изнашивания — ζ) константами.

Продифференцировав уравнение (1) по времени t и определив массовую скорость изнашивания v_m в конце приработки, условие повышения ресурса сопряжения, описанное в работе [3], формализуем в виде

$$M = \frac{v_m \cdot t_B}{0,046 \cdot (\zeta + 1)}. \quad (2)$$

Минимизация массы M изношенного материала сопряжения в период приработки может быть достигнута уменьшением продолжительности периода приработки, массовой скорости изнашивания и изменением характера изнашивания, например, за счет использования специальных прирабочных материалов, присадок к смазочной среде и т. п. Последнее учитывается изменением показателя характера изнашивания ζ .

Основной период эксплуатации контактных поверхностей характеризуется наибольшей продолжительностью и определяет в целом ресурс сопряжения. О высокой концентрации энергии в контактном слое свидетельствуют наблюдаемые по результатам конечно-элементного анализа высокие градиенты температур, напряжений и деформаций. Толщина контактного слоя прецизионного сопряжения распылителя достигает от 0,25 до 50 мкм в зависимости от характера и уровня нагружения (радиальной силы в сопряжении, обусловленной давлением впрыскивания топлива и рабочими температурами элементов сопряжения).

Для характеристики изнашивания поверхностей трения используется интегральная линейная I_h интенсивность изнашивания [3] — отношение толщины изношенного слоя h к пути трения s , на котором произошел этот износ:

$$I_h = \frac{h}{s} = \frac{\Delta V}{s \cdot A_a}, \quad (3)$$

где ΔV — объем материала, удаленного в процессе изнашивания с поверхности трения, м^3 ; A_a — номинальная площадь контакта, м^2 .

Процессы трения и изнашивания и уравнение энергетического баланса для них описаны в работах Г. Фляйшера [2, 5]. В качестве базового понятия использована плотность энергии ω_{DR} , представляющая собой отношение энергии W_R , расходуемой на преодоление силы трения, к объему V_R материала, воспринимающему нагрузку при трении:

$$\omega_{DR} = \frac{W_R}{V_R}. \quad (4)$$

В соответствии с законом сохранения энергии [3]

$$W_R = W_t + W_d + W_{ad} + W_{ab}, \quad (5)$$

где W_t — тепловая часть энергии трения, Дж; W_d — механическая часть энергии трения, Дж; W_{ad} и W_{ab} — молекулярная часть и энергия химических преобразований, Дж.

Учитывая, что $W_t \gg W_d + W_{ad} + W_{ab}$, можно допустить равенство $W_R = W_t$.

Если энергию W_R отнести к объему ΔV изношенного материала, то получим критическую плотность энергии ω_{DR}^* , которая при данных условиях приводит к разрушению элементов при трении. Таким образом, критическая плотность энергии ω_{DR}^* :

$$\omega_{DR}^* = \frac{W_R}{\Delta V}. \quad (6)$$

Взаимосвязь между силой трения F_T и удельной силой трения τ , а также интенсивностью изнашивания I_h следующая:

$$\tau = \frac{F_T}{A_a} = \frac{F_T \cdot s \cdot I_h}{\Delta V} = \frac{W_R \cdot I_h}{\Delta V} = \omega_{DR}^* \cdot I_h. \quad (7)$$

Это — основное энергетическое уравнение изнашивания [2].

Плотность ω_{DR} энергии W_R (на единицу объема) определяется по результатам анализа тепловых и механических процессов, протекающих при трении иглы по поверхности отверстия в корпусе распылителя. При решении тепловых задач для оценки температурного состояния контактного слоя плотность энергии определяется по зависимости (6), а при решении механических задач для оценки энергии микродеформирования, например, при линейном напряженно-деформированном состоянии контактного слоя в виде

$$\omega_{DR} = \frac{\sigma^2}{2 \cdot E}, \quad (8)$$

где σ — действительное нормальное контактное напряжение, определяемое по результатам конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния контактного слоя.

Используя зависимость (8) можно определить энергию микродеформирования:

$$W_d = \omega_{DR} \cdot V_d, \quad (9)$$

где V_d — деформируемый объем, определяемый по результатам конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния контактного слоя, м³.

Энергия, эквивалентная работе трения при перемещении поверхностей сопряжения относительно друг друга, определяется из уравнения

$$W_R = q \cdot A_r \cdot t, \quad (10)$$

где q — плотность теплового потока, Вт/м²; A_r — фактическая площадь контакта, м²; t — время трения, с.

Согласно энергетической теории трения и изнашивания при достижении критической плотности энергии в сопряжении игла-корпус распылителя происходит отделение частиц контактного слоя. Если в процессе преобразования энергии при трении ее плотность менее критической, то часть энергии W_{sp} необратимо аккумулируется в контактном слое, а оставшаяся большая часть W_{dis} рассеивается в виде тепловой энергии [2]:

$$W_R = W_{sp} + W_{dis}, \quad (11)$$

где $W_{sp} = W_d = \rho_R \cdot W_R$, ρ_R — коэффициент аккумуляции энергии трения.

Аккумулируемая контактным слоем энергия за цикл нагружения составляет $\rho_R \cdot W_R$, а за n циклов нагружения —

$$n \cdot W_{sp} = n \cdot W_d = n \cdot \rho_R \cdot W_R. \quad (12)$$

Плотность энергии разрушения, приводящая к разрушению контактного слоя, может быть определена при $\sigma = \sigma_{вр}$:

$$\omega_{DRB}^* = \frac{\sigma_{вр}^2}{2 \cdot E}, \quad (13)$$

где $\sigma_{вр}$ — предел прочности материала, Па.

Энергетический баланс при разрушении контактного слоя поверхностей сопряжения, можно представить в виде

$$W_R^* = W_R + n_{кр} \cdot W_{sp}, \quad (14)$$

где W_R^* — ($W_R^* = \omega_{DRB}^* \cdot V_R$) энергия разрушения, Дж; $n_{кр}$ — критическое число циклов нагружения.

Из выражения (14), учитывая зависимости (8) и (13), можно определить $n_{кр}$ до разрушения контактного слоя:

$$n_{кр} = \frac{\left(\frac{\sigma_{вр}}{\sigma}\right)^2 \cdot W_R - W_R}{\rho_R \cdot W_R} = \frac{\left(\frac{\sigma_{вр}}{\sigma}\right)^2 - 1}{\rho_R}. \quad (15)$$

Изношенный объем контактного слоя, согласно молекулярно-механической теории трения и изнашивания по И.В. Крагельскому [3], составляет:

$$\Delta V = \frac{V_d}{n_{кр}}. \quad (16)$$

Затем, используя зависимость (7), определяем линейную интенсивность изнашивания контактного слоя прецизионного сопряжения распылителя.

Механические свойства материалов иглы и корпуса различны, следовательно, степень износа иглы и корпуса распылителя неодинакова. Предельная суммарная глубина H износа элементов сопряжения:

$$H = h_n + h_k, \quad (17)$$

где h_n, h_k — глубина износа иглы и корпуса распылителя, мкм.

Соотношение между глубинами изношенных слоев и критическими числами циклов нагружения принято:

$$\frac{h_n}{h_k} = \frac{n_k}{n_n}, \quad (18)$$

где n_n, n_k — критические числа циклов нагружения иглы и корпуса.

Время изнашивания t элементов сопряжения до предельного суммарного зазора, определяющее ресурс распылителя, может быть принято прямо пропорциональным пути трения и обратно пропорциональным скорости скольжения иглы в корпусе распылителя при условии равномерного ее движения. При оценке ресурса распылителя в моточасах, что является традиционным для моторостроения, необходимо учесть дискретность работы распылителя и, следовательно, дискретность реализации пути трения.

Время изнашивания (ресурс) слоя глубиной h определяется:

$$t = \frac{h}{I_h \cdot v}, \quad (19)$$

где I_h — интенсивность изнашивания, м/м; v — скорость скольжения, м/с.

Моторесурс t_m , мч, элементов прецизионного сопряжения распылителя можно определить:

$$t_m = \frac{h}{30 \cdot n \cdot I_h \cdot v \cdot t_t} = \frac{h}{30 \cdot n \cdot I_h \cdot s_t}, \quad (20)$$

где s_t — путь трения в течение рабочего цикла, равный подъему h_i иглы распылителя, м.

Уравнение (20) свидетельствует, что помимо интенсивности изнашивания на моторесурс элементов прецизионных сопряжений распыли-

теля оказывают влияние частота вращения коленчатого вала дизеля и величина подъема иглы распылителя. В быстроходных транспортных дизелях целесообразно использование распылителей с уменьшенным подъемом иглы для сохранения моторесурса элементов прецизионных сопряжений.

Для определения моторесурса элементов распылителя следует задаться глубиной h контактного слоя, который будет изношен за искомое время моторесурса. Такой глубиной может быть, например, значение предельного зазора в цилиндрическом направляющем сопряжении, исключая технологическое его значение.

Используя предлагаемый метод оценки интенсивности изнашивания и ресурса распылителей, определены значения линейной интегральной интенсивности изнашивания распылителя дизеля 4ЧН15/20,5, которые составляют для иглы и корпуса распылителя соответственно $3,95 \cdot 10^{-11}$ и $3,58 \cdot 10^{-10}$ м/м на номинальном режиме работы. Условные значения массовой скорости изнашивания при этом составляют для иглы и корпуса распылителя соответственно $1,78 \cdot 10^{-3}$ и $16,2 \cdot 10^{-3}$ мг/мч.

Ресурс распылителя с учетом загрузки дизеля 4ЧН15/20,5 промышленного трактора на режиме бульдозирования по результатам расчета составил 1284,69 мч.

Литература

1. *Файнлейб Б.Н.* Топливная аппаратура авто-тракторных дизелей: справочник. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л. : Машиностроение, 1990. — 362 с.
2. *Польцер Г., Майсснер Ф.* Основы трения и изнашивания / Пер. с нем. О.Н. Озерского, В.Н. Пальянова. — М. : Машиностроение, 1984. — 264 с.
3. *Крагельский И.В., Михин Н.М.* Узлы трения машин: Справочник. — М. : Машиностроение, 1984. — 280 с.
4. *Popov V.L., Psakhie S.G., Dmitriev A., Shilko E.* Quasi-fluid nano-layers at the interface between rubbing bodies // Simulation by movable cellular automata. *Wear.* — 2003. — 254 (9). — P. 901–906.
5. *Fleischer G.* Energetische methode der Bestimmung des Verschleisses // *Schmierungs-technik.* — 1973. — Band 4. — S. 9–12.