

*В. Г. Заренбин д. т. н., проф.*

**Ключевые слова:** *двигатель внутреннего сгорания, поршневое кольцо, цилиндр, расчет заедания..*

**Проблема.** Проблема задира с последующим катастрофическим износом узлов трения ряда машин, возникающая при постоянном стремлении к их высоким удельным массогабаритным показателям и интенсификации рабочих процессов, становится все более актуальной.

При проектировании, изготовлении и эксплуатации машин принимаются все меры к повышению сопротивляемости деталей к задиру путем правильного выбора материалов и методов их обработки, оптимизации конструкции, совершенствования приработки, создания гидродинамического режима смазки, улучшения ее противозадирных свойств. Всему этому способствует наличие достаточно надежных расчетно-теоретических методов оценки противозадирной стойкости деталей, обеспечивающих требуемую работоспособность узлов трения.

Общепризнанным направлением дальнейшего развития таких методов расчета является комплексный учет влияния механических, тепловых и кинематических факторов.

В работах [1; 2] приведены критериальные зависимости для оценки противозадирной стойкости трущихся тел, однако в них отсутствуют сведения по расчету параметров комплексов, применительно к условиям трения и режимам работы деталей двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Например, формулы по определению контактных температур, характеристик множественного контакта и т. д.

**Цель работы.** Предложить термовременной метод расчета на заедание деталей ДВС, учитывающий теплофизические и временные факторы в зоне контакта при неустановившемся характере трения.

**Основной материал.** Согласно современным представлениям [2; 3] реализация заедания при граничной смазке происходит в такой последовательности. В начале на части поверхности контакта трущихся тел разрушается граничный слой с образованием адгезионных связей между контактирующими поверхностями. Разрушение этих связей при относительном перемещении тел приводит или к умеренному адгезионному изнашиванию (микросхватывание), или при достижении критического числа адгезионных связей с учетом свойств контактирующих тел к схватыванию двух поверхностей по всей площади номинального контакта, которое сопровождается вырывами и задирами поверхностей.

Если в процессе скольжения участки поверхности, на которых произошло разрушение граничного слоя, будут успевать пассивироваться, т. е. покрываться адсорбированной пленкой смазочной среды при заданной скорости скольжения, то число участков не будет лавинообразно возрастать и схватывание контактирующих поверхностей не произойдет («самозалечивание» участков).

Скорость, с которой образуется граничный смазочный слой на поверхности определяется температурой, нормальной нагрузкой и временем действия смазочной среды.

С учетом изложенного принимаем следующую расчетную модель:

1. При фрикционном взаимодействии шероховатых поверхностей каждый микровыступ испытывает циклическое воздействие со стороны микровыступа контртела (множественный контакт).

2. Максимальная температура на фактическом пятне контакта рассматривается как сумма средней поверхностной температуры  $t_n$  и температурной вспышки  $t_j$  в условиях неустановившегося трения.

3. Учет влияния пленки масла на температуру в контакте осуществляется с помощью приведенных теплофизических характеристик.

4. Доля тепла, идущая в каждое из контактирующих тел, находится из равенства максимальных или средних поверхностных температур соприкасающихся поверхностей.

5. Повышение температуры фрикционного контакта не вызывает дополнительных напряжений и деформаций в зоне контакта.

Представленная схема предусматривает проведение расчетов последовательно в два этапа:

1. Расчет максимальной температуры на контакте  $t_{max}$  и проверка выполнения необходимого условия заедания  $t_{max} \geq t_{кр} / n_3$ , где  $t_{кр}$  – критическая температура заедания, найденная экспериментальным путем при заданных условиях трения;  $n_3$  – коэффициент запаса надежности против заедания, зависящий от конструктивных особенностей, свойств контактируемых материалов, режимов работы, погрешности расчетов и других факторов.

2. Расчет времени  $\tau_{ад}$ , за которое на микровыступе может восстанавливаться адсорбционный слой при его движении между пятнами контакта, и проверка выполнения достаточного условия заедания  $\tau_{ад} \leq [\tau]$ , где  $[\tau]$  – время, достаточное для образования адсорбционного слоя на участках контактирующих поверхностей с разрушенным граничным слоем.

Выполнение двух условий приводит к схватыванию и в дальнейшем к задиру, выполнение только первого условия – к образованию отдельных участков микросхватывания и умеренному адгезионному изнашиванию.

Максимальная температура в трибосопряжении поршневое кольцо (ПК) – гильза цилиндра (ГЦ) ДВС при множественном контакте и неустановившемся трении, определяется согласно расчетной схеме (рис. 1) по формулам [4]:

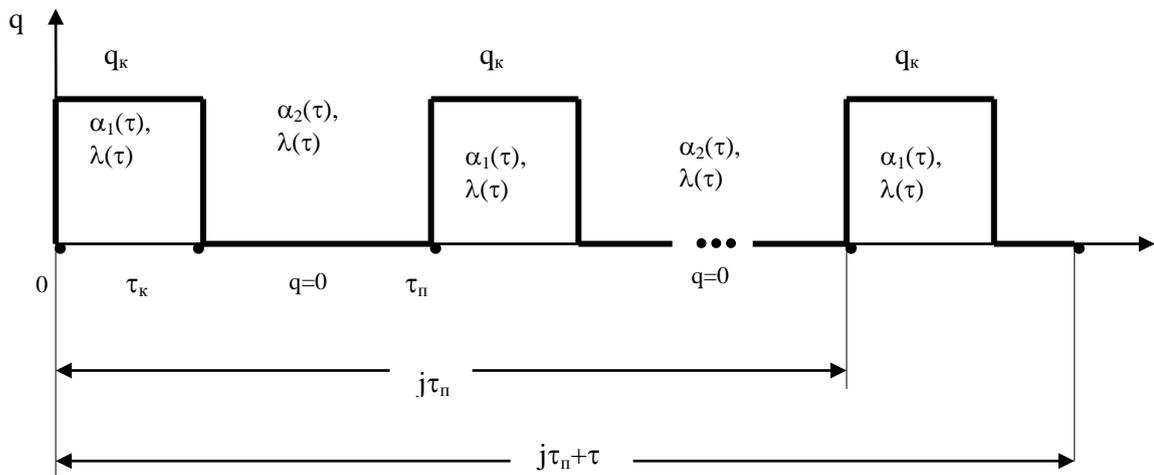


Рис. 1. Расчетная схема теплового взаимодействия неровностей при множественном контакте

$$t_{max} = t_n + t_j,$$

$$t_{j.min} = \frac{q_k d_c}{2} \sum_{j=1}^N \frac{\alpha_{mn,j}}{\lambda_{np,j}} [u(Fo1_j) - u(Fo2_j)], \quad (1)$$

$$t_{j,max} = t_{j,min} + \frac{2\alpha_{np} q_k}{\sqrt{\pi} \cdot \lambda_m} \sqrt{\alpha_m \tau_m}, \quad (2)$$

$$\tau_m = \delta_m^2 / (3a_m),$$

где 
$$\theta(Fo) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{2\sqrt{Fo}} \operatorname{erf}^2\left(\frac{1}{u}\right) du,$$

$\theta(Fo1_j)$ ,  $\theta(Fo2_j)$  – функции при значениях критерия Fo соответственно  $Fo1_j = a_{np,j} \cdot j\tau_n / d_c^2$   $Fo2_j = a_{np,j} \cdot (j\tau_n - \tau_k) / d_c^2$ ;  $\tau_n$  – промежуток времени между двумя последовательными контактами,  $\tau_k$  – длительность контакта,  $d_c$  – средний диаметр пятна контакта;  $a_{np,j}$ ,  $\lambda_{np,j}$  – приведенные коэффициенты температуропроводности и теплопроводности за время действия

теплового потока (ТП) соответствующего  $Fo_j$  [4];  $a_m, \lambda_m$  – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности масляной пленки (МП);  $\delta_m$  – толщина МП,  $q_k$  – интенсивность ТП,  $\alpha_{mn,j}$  – коэффициент распределения ТП,  $N$  – число циклов нагружения.

При малых значениях критерия Фурье ( $Fo < 0,1$ ) формулу (1) можно упростить

$$t_{j,min} = \frac{2q_k}{\sqrt{\pi}} \sum_{j=1}^N \alpha_{mn,j} \left[ \frac{\sqrt{a_{np,j} \cdot j\tau_n} - \sqrt{a_{np,j}(j\tau_n - \tau_k)}}{\lambda_{np,j}} \right]. \quad (3)$$

При  $\lambda_{np,j} = \lambda_n; a_{np,j} = a_n$ :

$$t_{min,j} = \frac{2\alpha_{mn}q_k}{\lambda_n} \left( \frac{a_n}{\pi} \right)^{0,5} \sum_{j=1}^N \left( \sqrt{j\tau_n} - \sqrt{j\tau_n - \tau_k} \right),$$

что совпадает с выражением, приведенным в работе [5].

Время охлаждения микровыступа рассчитывается как

$$\tau_{ad} = \frac{s - d_{cp}}{V_{ck}},$$

где  $s$  – среднее расстояние между пятнами контакта,  $V_{ck}$  – скорость скольжения ПК.

Для упругого контакта [6; 8]

$$s_y = \frac{\sqrt{2\pi} \cdot r \cdot \Delta^{1,5\nu}}{\sqrt{\nu} \cdot \left( \frac{2\sqrt{\pi}}{kv} \cdot p_c \cdot \Theta \right)^{\frac{\nu-1}{2\nu+1}}}, \quad (4)$$

для пластического контакта

$$s_n = \frac{\sqrt{2\pi} \cdot r \cdot \Delta^{0,5}}{\sqrt{\nu} \cdot (p_c / HB_u)^{\frac{\nu-1}{2\nu}}}; \quad (5)$$

где  $\Delta = \frac{R_{max}}{r \cdot \sigma^{1/\nu}}$  – комплексная характеристика шероховатостей ПК и ГЦ;

$\Theta = \frac{1 - \mu_k^2}{E_k} + \frac{1 - \mu_u^2}{E_u}$  – обобщенная упругая постоянная;

$r = \frac{r_k \cdot r_{ц}}{r_k + r_{ц}}$  – приведенный радиус закругления вершин неровностей;

$R_{max} = R_{max,k} + R_{max,ц}$  – наибольшая суммарная высота неровностей;

$\nu = \nu_k + \nu_{ц}$ ,

$\sigma = kv \cdot \sigma_k \cdot \sigma_u \cdot \frac{(R_{max,k} + R_{max,ц})^\nu}{R_{max,k}^{\frac{1}{\nu_k}} + R_{max,ц}^{\frac{1}{\nu_{ц}}}}$  – параметры опорной кривой для случая контакта гладкой и шероховатой поверхностей [8];

$$kv = \frac{\nu_k \cdot \nu_{ц}}{\nu_k + \nu_{ц}} \cdot \frac{\Gamma(\nu_k) \cdot \Gamma(\nu_{ц})}{\Gamma(\nu_k + \nu_{ц})},$$

$\Gamma(\nu)$  – числовые коэффициенты, выраженные через Гамма-функции;  $\mu, E, HB_{ц}$  – коэффициент Пуассона, модуль упругости и твердость материала ГЦ.

Для расчета времени восстановления адсорбционного слоя  $\tau_{ад}$  предполагается, что

температура заедания  $T_{кр1}$  определяет момент разрушения масляной пленки и образование очагов микросхватывания на поверхности микровыступа. Согласно Кингсбюри [7] связь между долей  $\alpha_1$  металлического контакта при граничной смазке и энергией активации десорбции  $U$  описывается уравнением

$$\alpha_1 = 1 - e^{-k_1 \tau}, \quad (6)$$

где

$$k_1 = A \cdot e^{-U/RT} \quad (7)$$

$A$  – предэкспоненциальный член уравнения Аррениуса, связанный с периодом колебаний адсорбированной молекулы в направлении, перпендикулярном к поверхности, и с расстоянием между адсорбционными центрами;  $T$  – абсолютная температура,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\tau$  – время.

Допуская, что  $T=T_{кр1}$  при  $\alpha \approx 0,5$  [7], из выражения (6) получим для константы скорости образования металлических связей

$$k_1 = \frac{\ln 2}{\tau_k}, \quad (8)$$

где  $\tau_k = d_c / V_{ск}$

Величина  $U$  определяется из формулы Эйкина [7]

$$\alpha_1 = 1 - \exp \left[ \frac{\exp(-U/RT)}{3,2 \cdot 10^5 \cdot V_{ск} \cdot (M/T_M)^{0,5}} \right],$$

где  $M$  – молекулярная масса,  $T_M$  – температура плавления смазочного материала.

Отсюда при  $\alpha=0,5$  энергия активации

$$U = -\ln \left\{ \ln 2 \left[ 3,2 \cdot 10^5 \cdot V_{ск} \cdot (M/T_M)^{0,5} \right] \right\} RT_{кр1}. \quad (9)$$

Таким образом, величину  $U$  можно найти из экспериментальных значений  $T_{кр1}$  при различных скоростях скольжения  $V_{ск}$ .

Если принять, что скорость адсорбции молекул на поверхность микровыступа с разрушенным граничным слоем при его последующем движении между пятнами контакта пропорциональна доле  $(1-\alpha_2)$  металлического контакта, т. е.

$$\frac{d\alpha_2}{d\tau} = k_2(1-\alpha_2),$$

тогда

$$\alpha_2 = 1 - e^{-k_2 \tau} \quad (10)$$

где  $\alpha_2$  – доля поверхности микровыступа, занятая адсорбционным слоем,  $k_2$  – константа скорости образования адсорбционных связей.

Допуская значения  $A$  и  $U$  при нагреве и охлаждении микровыступа в достаточной степени близкими между собой, можно записать

$$k_2 = A \cdot e^{-U/RT_n}, \quad (11)$$

где  $T_n$  – средняя поверхностная температура.

Полагая, что времени достаточному для образования адсорбционного слоя на поверхности микровыступа соответствует  $\alpha_2 = 0,95$  найдем

$$[\tau] = \frac{\ln(0,05)}{k_2}. \quad (12)$$

В качестве примера термовременного расчета на заедание рассмотрено трибосопряжение ПК-ГЦ быстроходного дизеля 8Ч 12/12 в условиях трения на номинальном режиме работы. Основные исходные данные:  $R_{\max,k}=1,6 \cdot 10^{-6}$  м,  $R_{\max,\mu}=1,44 \cdot 10^{-6}$  м,  $r_k=270 \cdot 10^{-6}$  м,  $r_\mu=1000 \cdot 10^{-6}$  м,  $v_k=1,6$ ,  $v_\mu=2$ ,  $v_k=2,16$ ,  $v_\mu=2,37$ ,  $H_{\mu}=4$  ГПа,  $E_k=210$  ГПа,  $E_\mu=110$  ГПа,  $p_c=3,3$  МПа,  $\mu_k=\mu_\mu=0,23$ ,  $a_k=2,18 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с,  $a_\mu=8,64 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с,  $\lambda_k=70$  Вт/(мК),  $\lambda_\mu=0,14$  Вт/(мК),  $n=2600$  мин<sup>-1</sup>,  $q=2,52 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>; при угле поворота коленчатого вала  $\varphi=370^\circ$  п.к.в.,  $\delta_m=0,1 \cdot 10^{-6}$  м;  $t_n=160^\circ\text{C}$ ,  $N=2$ .

Среднее расстояние между пятнами контакта согласно формуле (4)

$$s = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Используя известное выражение для среднего диаметра пятна контакта из работы [8] находим

$$d_c = 9,5 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

$$\text{Тогда } \tau_p = \frac{s}{V_{ск}} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}, \quad \tau_k = \frac{d_c}{V_{ск}} = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

и соответственно по уравнениям (1) и (2)  $t_{\min}=160,4^\circ\text{C}$ ,  $t_{\max}=218^\circ\text{C}$ .

Согласно работе [9] и нашим исследованиям критическая температура для масла М-10Г<sub>2</sub> составляет  $t_{кр1}=230\dots 240^\circ\text{C}$ .

Следовательно, при данных параметрах трения необходимое условие заедания не соблюдается, и сопряжение ПК-ГЦ будет работать в режиме граничной смазки, хотя с учетом погрешности расчетов (10 %) коэффициент запаса надежности против заедания будет минимальным.

Энергия активации при  $V_{ск}=3,6$  м/с и  $t_{кр1}=240^\circ\text{C}$  из уравнения (9) будет

$$U=38560 \text{ Дж/моль}$$

и согласно уравнениям (8) и (7)

$$\text{при } \tau_{ад} = \frac{s-d_c}{V_{ск}} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}, \quad k_1 = 2,657 \cdot 10^5, \quad A = 2,681 \cdot 10^5.$$

Константа скорости образования адсорбционных связей при  $t_n=160^\circ\text{C}$  и  $\tau_{ад} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$  из выражения (11) равна  $k_2 = 2,653 \cdot 10^5$ .

Тогда время, достаточное для образования адсорбционного слоя, по формуле (12)  $[\tau] = 1,13 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ .

Таким образом,  $\tau_{ад}$  больше  $[\tau]$  и поэтому достаточное условие заедания не выполняется. Полученные результаты расчетов на заедание трущейся пары ПК-ГЦ подтверждаются работоспособностью дизеля 8Ч 12/12 в условиях номинальной нагрузки.

В заключение следует отметить, что ближайшей задачей совершенствования расчета является дальнейшая разработка экспериментально-теоретических методов оценки энергии активации процессов образования и разрушения граничных слоев моторных масел, а также переходных температур.

**Выводы.** 1. Предложен термовременной метод расчета на заедание деталей двигателя внутреннего сгорания, учитывающий теплофизические и временные факторы в зоне контакта при неустановившемся характере трения.

2. Приведены формулы для расчета на заедание трибосопряжения поршневое кольцо-гильза цилиндра ДВС в условиях повторно-кратковременного режиме трения.

3. Дан пример расчета на заедание пары трения поршневое кольцо-гильза цилиндра быстроходного дизеля, результаты которого подтверждаются экспериментальными данными.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов Ю. Н. и др. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник / Ю. Н. Дроздов, В. Г. Павлов, В. Н. Пучков. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
2. Федоров С. В. Термодинамические представления о процессе схватывания металлов при граничной смазке // Трение и износ, 1988. – т. 9. – № 3. – С. 403 – 413.
3. Буяновский И. А. Температурно-кинетический метод оценки температурных пределов работоспособности смазочных материалов при тяжелых режимах граничной смазки // Трение и износ, 1993. – т. 14. – № 1. – С. 129 – 142.
4. Расчет температурной вспышки при множественном контакте и граничной смазке / В. Г. Заренбин // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2011. – № 6 – 7. – С. 12 – 16.
5. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.
6. Оценка среднего расстояния между пятнами контакта в паре трения гильза цилиндра-поршневое кольцо двигателя внутреннего сгорания. / В. Г. Заренбин, Г. Г. Карасев // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2009. – № 10 – С. 23 – 28.
7. Буяновский И. А. Энергия активации процессов реализации переходных температур

при граничной смазке // Трение и износ. – 1991. – т. 12. – № 6. – С. 1094 – 1107.

8. **Крагельский И. В., Добычи М. Н., Комбалов В. С.** Основы расчетов на трение и износ. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.

9. Влияние температуры на трение и задир при возвратно-поступательном скольжении образцов / Р. М. Матвеевский, В. И. Комендант // Сб. исследование смазочных материалов при трении. – М. : Наука, 1981. – С. 89 – 96.