

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ИЗНАШИВАНИЯ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯХ ДВС НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ДИСЛОКАЦИЙ И ФРАКТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Матвиенко С.А.

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
Макеевка, Россия*

Ключевые слова: трибосопряжение, изнашивание, остаточный ресурс, дислокации, фрактальная геометрия, тип контакта, энергетический баланс.

Аннотация. В работе предложен новый подход к математическому моделированию изнашивания в трибосопряжениях двигателей внутреннего сгорания, основанный на сочетании теории дислокаций, фрактальной геометрии и моделирования энергетического баланса в зоне контакта. Разработаны математические модели изнашивания сопряжений “поршневое кольцо-гильза цилиндра” и “тарелка клапана-седло клапана” с учетом влияния микроструктурных изменений в материале, особенностей топографии поверхности трения, а также параметров смазочного материала на процесс изнашивания.

AN ALTERNATIVE APPROACH TO MODELING WEAR IN INTERNAL COMBUSTION ENGINE TRIBOSYSTEMS BASED ON DISLOCATION THEORY AND FRACTAL GEOMETRY

Matvienko S.A.

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka,
Russia*

Keywords: triboconjugation, wear, residual resource, dislocations, and fractal geometry, type of contact, energy balance.

Abstract. The paper proposes a new approach to mathematical modeling of wear in triboconjugates of internal combustion engines, based on a combination of dislocation theory, fractal geometry, and modeling of the energy balance in the contact zone. Mathematical models of wear in the “piston ring-cylinder liner” and “valve plate-valve seat” triboconjugates have been developed, taking into account the influence of microstructural changes in the material, the topography of the friction surface, and the parameters of the lubricant on the wear process.

Введение

Проблема изнашивания в трибосопряжениях двигателей внутреннего сгорания (ДВС) представляет собой актуальную научно-техническую задачу, поскольку интенсивность изнашивания оказывает существенное влияние на ресурс, экономичность и экологические показатели ДВС [1, 2].

ДВС содержит много трибосопряжений, каждое из которых имеет свои особенности: тип контакта, материалы; условия смазки, нагрузка, температура, механизмы износа. Очевидно, что универсальной модели, которая могла бы адекватно описать все эти особенности, не существует.

Несмотря, на значительное количество исследований в области трибологии, до настоящего времени отсутствует единая общепризнанная

теория изнашивания, способная адекватно учитывать многообразие факторов, определяющих процесс деградации материалов в специфических условиях работы ДВС [3-6]. Существующие подходы, варьирующиеся от эмпирических зависимостей до сложных моделей, основанных на механике разрушения, обладают рядом ограничений, препятствующих точному прогнозированию интенсивности изнашивания в реальных трибосистемах ДВС.

В связи с этим, целью данной работы является разработка альтернативного подхода к моделированию изнашивания в трибосопряжениях ДВС, основанного на сочетании теории дислокаций и фрактальной геометрии, позволяющего учитывать как микроструктурные изменения в материале, так и особенности топографии поверхности трения.

Научная новизна предложенного подхода заключается в следующем:

1. Разработка комплексной модели износа, объединяющей теорию дислокаций, фрактальную геометрию и моделирование энергетического баланса в зоне контакта.
2. Предложение новой структуры уравнения для интенсивности изнашивания, учитывающей суперпозицию различных механизмов, влияние смазки и сопротивление материала изнашивания (связанное с микроструктурой и топографией поверхности);
3. Учет влияния плотности дислокаций и фрактальной размерности на твердость материала и интенсивность тепловыделения при трении.

Предлагаемая математическая модель позволит более точно прогнозировать интенсивность изнашивания за счет учета влияния микроструктуры материала, влияния смазки и стохастического характера нагрузок. Это, в свою очередь, позволит оптимизировать режимы работы ДВС, разрабатывать новые материалы и покрытия с улучшенными трибологическими характеристиками, а также повысить точность прогнозирования остаточного ресурса двигателя.

Математическая модель изнашивания

В данной работе предложены математические модели изнашивания сопряжений “поршневое кольцо – гильза цилиндра” с доминирующим типом контакта – скольжение и “тарелка клапана-седло клапана”, учитывая особенности ударного нагружения и скольжения (табл. 1).

Для решения системы дифференциальных уравнений используется метод Рунге-Кутты 4-го порядка, реализованный в пакете SciPy для языка Python. Для численной реализации модели необходимо определить значения параметров: геометрических (A_0 , Ra_0 , Ra), материала (H_0 , c_1 , c_2 , D_0 , $D_{\max}$, b , k_1 , k_2 , τ , E), трибологических ($K_{абр}$, $K_{адг}$, $K_{уст}$, $C_{абр}$, $C_{адг}$, $E_{адг}$, n , N), смазки (η_0 , B , Rq , C), условий эксплуатации (F , v , T_0 , ΔT , ω).

Табл. 1. Математические модели интенсивности изнашивания

№	поршневое кольцо – гильза цилиндра	тарелка клапана – седло клапана
1	Контактное давление [Па]	
	$P(t)=F/(A_0(Ra/Ra_0)^{(-D(t)+2)})$	$P(t)=\exp(-t/\tau_c)P_{\max}$
2	Температура [K]	
	$T(t)=T_0+\Delta T\sin(\omega t)$	$dT/dt=(Q-h_cA_c(T-T_{окр}))/(\rho c_p)$
3	Вязкость масла [Па·с]	
	$\eta(T)=\exp(B/T)\eta_0$	
4	Толщина масляной пленки [м]	
	$H_{cm}=C\eta v/P$	-
5	Параметр Лагварда [безразмерный]	
	$\Lambda=h_{cm}/R_q$	-
6	Функция влияния смазки [безразмерная]	
	$k(\eta,h_{cm})=\exp(-k_{cm}\Lambda)$	-
7	Пластическая деформация [безразмерная]	
	$E_{nл}=\sigma/E$	
8	Фактическая площадь контакта [м ²]	
	$A_{\phi}=A_0(Ra/Ra_0)^{(-D(t)+2)}$	$A_{\phi}=p_i((3FR/(4E'))^{(1/3)})^2(Ra/l_c)^{(D-2)}$
9	Тепловыделение при трении [Вт]	
	$Q_{ск}=h_Q\nu\rho\epsilon_{nл}A_{\phi}$	$Q_{скуд}=\eta_p\Delta E_k+Pv m_u$
10	Твердость материала [Па]	
	$H(\rho,D)=H_0(1+c_1\rho)(1+c_2(D-2))$	$H(\rho,D)=H_0(1+c_1\rho)(1+c_2(D-2))(1+C\ln(\epsilon))(1-T^m)$
11	Интенсивности различных механизмов изнашивания [м ³ /км]	
	$I_{абр}=K_{абр}(Pv)C_{абр}c_{абр}$ $I_{адз}=K_{адз}(Pv)\exp(-E_{адз}/(RT))$ $I_{ycm}=K_{ycm}(\sigma^n N)$	$I_{абр}=K_{абр}(Pv)C_{абр}c_{абр}$ $I_{адз}=K_{адз}(Pv)\exp(-E_{адз}/(RT))$
12	Общая интенсивность изнашивания [м ³ /км]	
	$I=(I_{абр}+I_{адз}+I_{ycm})k(\eta,h_{cm})/H(\rho,D)$	$I=(I_{абр}+I_{ycm})k(\eta,h_{cm})/H(\rho,D)$
13	Эволюция плотности дислокаций [м ⁻² /с]	
	$d\rho/dt=(k_1\sigma\nu\rho^{(1/2)})-(\tau\rho k_2)$	$d\rho/dt=(k_{1(\epsilon)}\sigma\nu\rho^{(1/2)})-(k_{2(\epsilon)}\tau\rho)$
14	Эволюция фрактальной размерности [безразмерная величина]	
	$D(t)=D_0+(D_{\max}-D_0)(1-\exp(-bp(t)))$	

Параметры: F – нормальная сила [Н]; A_0 – номинальная площадь контакта [м²]; Ra – текущая шероховатость [м]; Ra_0 – начальная шероховатость [м]; T_0 – средняя температура [K]; ΔT – амплитуда колебаний температуры [K]; ω – угловая частота [рад/с]; η_0 – вязкость при референсной температуре [Па·с]; B – константа, зависящая от типа масла [K]; C – коэффициент, зависящий от геометрии контакта [без.]; η – вязкость масла [Па·с]; R_q – среднеквадратичная шероховатость [м]; k_{cm} – эмпирический коэффициент, характеризующий влияние смазки [безр.]; E – модуль Юнга [Па]; A_0 – номинальная площадь контакта [м²]; h_Q – коэффициент, характеризующий эффективность преобразования энергии пластической деформации в тепло [безр.]; A_{ϕ} – фактическая площадь контакта [м²]; H_0 – базовая твердость материала [Па]; c_1 , c_2 – эмпирические коэффициенты [безр.];

$C_{абр}$ – концентрация абразивных частиц [м^{-3}]; $c_{абр}$ – размер абразивных частиц [м]; $E_{адг}$ – энергия активации адгезионного износа [Дж]; R – универсальная газовая постоянная [$\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$]; T – температура [К]; N – количество циклов нагружения [безр.]; k_1 , $k_{1(e)}$ – коэффициент, характеризующий генерацию дислокаций [$\text{м}^3/(\text{Дж} \cdot \text{с})$]; v – скорость скольжения [$\text{м}/\text{с}$]; k_2 , $k_{2(e)}$ – коэффициенты аннигиляции дислокаций [$\text{м}/(\text{Па} \cdot \text{с})$]; τ – энергия, необходимая для аннигиляции дислокации [Дж]; D_0 – начальная фрактальная размерность [безр.]; $D_{\max}$ – максимальная фрактальная размерность [безр.]; b – коэффициент изменения фрактальной размерности [м^2]; $\rho(t)$ – плотность дислокаций [м^{-2}]; Q – общее тепловыделение (Вт); h_c – коэффициент теплопередачи ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$); A_c – площадь теплопередающей поверхности (м^2); $T_{окр}$ – температура окружающей среды (К); m – масса клапана (кг); c_p – удельная теплоемкость материала клапана ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$); η_p – коэффициент, характеризующий долю кинетической энергии, переходящей в тепло; ΔE_k – изменение кинетической энергии при ударе; m_u – коэффициент трения; T^* – гомологическая температура; C , t – параметры материала.

В результате решения математической модели, отображаются следующие графики:

1. Плотность дислокаций (ρ) от времени (t). Форма графика дает информацию о преобладающих механизмах деформации.

2. Фрактальная размерность (D) от времени (t). Форма графика дает информацию о преобладающих механизмах изнашивания.

3. Контактное давление (P) от времени (t). Изменение давления во времени может быть связано с изменением нагрузки, шероховатости поверхности или других факторов.

4. Температура (T) от времени (t). Колебания температуры могут быть связаны с циклическим характером нагружения.

5. Вязкость масла (η) от времени (t). Изменение вязкости влияет на толщину масляной пленки и интенсивность изнашивания.

6. Параметр Лагварда (Λ) от времени (t). Изменение Λ показывает изменение режима смазки во времени.

7. Функция влияния смазки ($k_{см}$) от времени (t).

8. Тепловыделение (Q) от времени (t).

9. Интенсивность изнашивания (I) от времени (t).

Выводы. В настоящей работе предложен новый подход к моделированию износа в трибосопряжениях ДВС, основанный на сочетании теории дислокаций, фрактальной геометрии и моделирования энергетического баланса в зоне контакта. Предложенный подход может быть использован для более точного прогнозирования ресурса трибосопряжений ДВС и разработки эффективных стратегий повышения износостойкости деталей.

В дальнейшем планируется провести экспериментальную проверку и валидацию разработанных моделей на реальных трибосопряжениях ДВС. Кроме того, предполагается разработка упрощенных версий модели, пригодных для практического применения в инженерных расчетах, а также изучение влияния различных типов смазочных материалов на интенсивность износа.

Список литературы

1. Лазарев В.Е., Гаврилов К.В., Дойкин А.А., Секвард-Бэйж Й. Модифицированная энергетическая модель трения и изнашивания применительно к трибосопряжениям ДВС // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – №3(51). – С. 58-66. – DOI: 10.12737/22010.
2. Проватар А.Г., Дорохов А.Ф. Задачи обеспечения износостойкости зеркала цилиндрических втулок судовых двигателей внутреннего сгорания // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2016. – №3. – С. 43-48.
3. Шабанов А.Ю., Черепанов Д.А. Развитие расчетно-экспериментального метода прогнозирования износа трибологических сопряжений двигателей внутреннего сгорания // Resources and Technology. – 2003. – Т. 4. – С. 157-159.
4. Basinski Z.S. Dislocation behaviour in face-centred cubic metals // Australian Journal of Physics. 1960, no. 13, 354 p.
5. Bhushan B. Introduction to Tribology. – John Wiley & Sons, 2013. – 744 p.
6. Persson B.N.J. Contact mechanics for randomly rough surfaces // Surface Science Reports. 2006, no. 61, pp. 201-227.

References

1. Lazarev V.E., Gavrilov K.V., Doikin A.A., Sekward-Baj J. Modified Energy Model of Friction and Wear in Relation to Triboconjugations of Internal Combustion Engines // Bulletin of Bryansk State Technical University. 2016, no. 3(51), pp. 58-66. DOI: 10.12737/22010.
2. Provatar A.G., Dorokhov A.F. Tasks of Ensuring the Wear Resistance of the Mirror of Cylinder Bushing of Marine Internal Combustion Engines // Bulletin of Astrakhan State Technical University. 2016, no. 3, pp. 43-48.
3. Shabanov A.Yu., and Cherepanov D.A. Development of a Calculation and Experimental Method for Predicting Wear of Tribological Joints in Internal Combustion Engines // Resources and Technology. 2003, vol. 4, pp. 157-159.
4. Basinski Z.S. Dislocation behaviour in face-centred cubic metals // Australian Journal of Physics. 1960, no. 13, 354 p.
5. Bhushan B. Introduction to Tribology. – John Wiley & Sons, 2013. – 744 p.
6. Persson B.N.J. Contact mechanics for randomly rough surfaces // Surface Science Reports. 2006, no. 61, pp. 201-227.

Матвиенко Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации serge-matvienko@yandex.ru	Matvienko Sergey Anatolyevich –candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of motor transport, service and operation
---	--

Received 10.08.2025