

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ И ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ МИКРОРЕЛЬЕФА ЦИЛИНДРА ДВС

С.В. Путинцев, д.т.н., проф.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

С.А. Аникин, к.т.н., доцент

Тверской государственный технический университет

Предложена и применена новая рабочая гипотеза, объясняющая противоизносное действие микрорельефа повышением гидродинамической несущей способности (ГНС) фрагмента, составленного треугольной канавкой, сопряженной с плоским участком. На основе применения положений гидродинамической теории смазки получены рациональные соотношения для шаговвысотных параметров, способствующих повышению ГНС микрорельефа.

Микрорельеф чаще всего наносят на внутреннюю поверхность (зеркало) цилиндра, реже — на наружную поверхность поршня. Механизм действия микрорельефа по снижению опасности задира, интенсивности изнашивания и трения сопряженных деталей большинство исследователей связывают с повышением так называемой маслоемкости поверхности. Однако применение этого показателя не только весьма спорно, но и совершенно не объясняет проявление указанных выше положительных эффектов ни с позиций физики, ни с позиций гидродинамики [1].

Цель данной работы состояла в исследовании механизма действия микрорельефа на основе применения положений теории гидродинамической смазки.

В качестве рабочей гипотезы приняли, что в условиях молекулярно-механического истирания (при отсутствии коррозионного и абразивного режимов изнашивания) интенсивность изнашивания уменьшается пропорционально сокращению времени контактирования поверхностей [2], что может быть достигнуто максимизацией гидродинамической несущей способности (ГНС) смазываемого сопряжения деталей.

Наиболее подверженным износу традиционно выступает сопряжение поршневое кольцо—цилиндр, причем из-за существенно разной площади, даже при соизмеримом объемном (или весовом) износе определяющий функционирование детали линейный износ поршневого кольца в несколько раз выше, чем линейный износ цилиндра.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- получение аналитической зависимости и исследование условий возникновения максимального значения ГНС для сопряжения поршневое кольцо—цилиндр;
- определение обобщенных соотношений для рациональных шаговвысотных параметров микрорельефа;
- обоснование механизма повышения ГНС при использовании микрорельефа с рациональными шаговвысотными параметрами.

Под рациональностью микрорельефа понимали использование такой его формы и геометрических параметров, которые при прочих равных условиях способствуют повышению ГНС сопряжения цилиндр—поршневое кольцо, снижая тем самым интенсивность контактирования, а значит, изнашивания и трения сопряженных деталей.

Для получения решений в максимально обобщенном, аналитическом виде были приняты следующие упрощающие допущения:

- обращенные друг к другу поверхности поршневого кольца и цилиндра (микрорельефа) составлены из сопряженных участков гладких, плоских, недеформируемых (абсолютно твердых) геометрических тел;
- фрагмент микрорельефа представляет собой сочетание симметричной треугольной канавки с плоским участком, параллельным оси цилиндра;
- пространство между сопряженными поверхностями заполнено вязкой несжимаемой (ньютоновской) жидкостью с динамической вязкостью  $\mu$ ;
- одно из сопряженных тел (применим принцип обратимости движения) движется относительно другого в осевом направлении с постоянной скоростью  $v$ ;
- избыточное гидродинамическое давление на кромках поршневого кольца отсутствует (нулевые граничные условия по давлению).

Расчетная схема для сопряжения поршневое кольцо—цилиндр при наличии микрорельефа на цилиндре может быть представлена фрагментом микрорельефа с канавкой в виде наклонных

участков  $l_1$  и  $l_3$ , с равными по модулю положительным  $\alpha$  и отрицательным  $\beta$  углами атаки и заключенным между ними участком  $l_2$  с нулевым углом атаки, расположенным напротив поршневого кольца, движущегося со скоростью  $v$  на слое жидкости динамической вязкостью  $\mu$  (рис. 1). Ввиду того, что параллельный и расширяющийся участки зазора сопряжения поршневое кольцо—цилиндр при заданных граничных условиях по отдельности не создают несущего гидродинамического давления [3], у микрорельефа эту задачу выполняет участок сужающегося навстречу вектору скорости зазора, характеризующегося входной  $H_2$  и выходной  $H_1$  высотами на шаге микрорельефа  $L$ .

Для нахождения погонной (приходящейся на единицу ширины профиля) гидродинамической несущей способности (ПГНС) использовали ранее полученное в работах [4, 5] решение уравнения Рейнольдса в виде распределения по осевой (в направлении вектора скорости  $v$ ) координате  $x$  гидродинамического давления  $p(x)$  для произвольной (интегрируемой) функции зазора  $h(x)$  на длине  $L$ :

$$p(x) = 6\mu v \left[ \int_0^L \frac{dx}{h^2(x)} \int_0^x \frac{dx}{h^3(x)} - \int_0^x \frac{dx}{h^2(x)} \right]. \quad (1)$$

После вычисления интегралов для функции зазора  $h(x)$ , представленной на рис. 1, и выполнения преобразований, выражение ПГНС для рассматриваемого случая было получено в виде

$$\bar{P} = \frac{6\mu v L^2}{H_1^2} g(\lambda, \delta). \quad (2)$$

Здесь

$$g(\lambda, \delta) = \frac{\lambda^2}{\delta^2} [\ln(1 + \delta) - \delta] + \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\delta(1 - 4\lambda^2) + 2\lambda(1 - \lambda)}{2(\delta + 1)^2 - \lambda(\delta^2 + 7\delta + 2)}, \quad (3)$$

где  $\lambda = l_{1,3}/L$  — относительная длина наклонного участка микрорельефа (шаговый параметр);  $\delta = (H_2 - H_1)/H_1$  относительный зазор микрорельефа (высотный параметр).

С учетом геометрии фрагмента микрорельефа (см. рис. 1) область существования значений относительной длины наклонного участка  $\lambda$ :  $0 \leq \lambda \leq 0,5$ . Для относительного перепада высот микрорельефа на основе анализа параметров топографии выполненных конструкций область существования может быть определена как  $0 \leq \delta \leq 5$ . Аналитический способ нахождения глобального

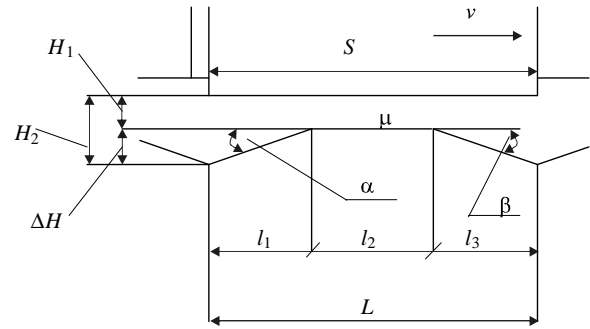


Рис. 1. Расчетная схема сопряжения поршневое кольцо—микрорельеф цилиндра

максимума функции двух переменных  $g(\lambda, \delta)$  весьма трудоемок, поэтому применяли графический прием (рис. 2).

Полученные в результате этого рациональные значения параметров  $\delta$  и  $\lambda$ , а также связанного с ними глобального максимума функции  $g(\lambda, \delta)$  составили:

$$\delta_0 = 1,121; \lambda_0 = 0,344; g(\lambda_0, \delta_0) = 0,011. \quad (4)$$

Из определения относительного перепада высот следует, что глубина канавки равна произведению относительного перепада высот на минимальный зазор:

$$\Delta H = H_2 - H_1 = \delta \cdot H_1. \quad (5)$$

Подставляя в (5) максимизирующее ГНС (рациональное) значение параметра относительного перепада высот из (4), получили рациональное значение глубины канавки:

$$\Delta H = \delta_0 \cdot H_1 = 1,121 \cdot H_1. \quad (6)$$

Из (6) следует, что с учетом малости множителя 1,121 по сравнению с единицей, рациональная глубина канавки  $\Delta H$  в первом приближении может быть принята равной минимальному зазору в сопряжении поршневое кольцо—цилиндр  $H_1$ . Собственно минимальный зазор указанного сопряжения определяется из конструкции ЦПГ как радиальный зазор поршневого кольца в

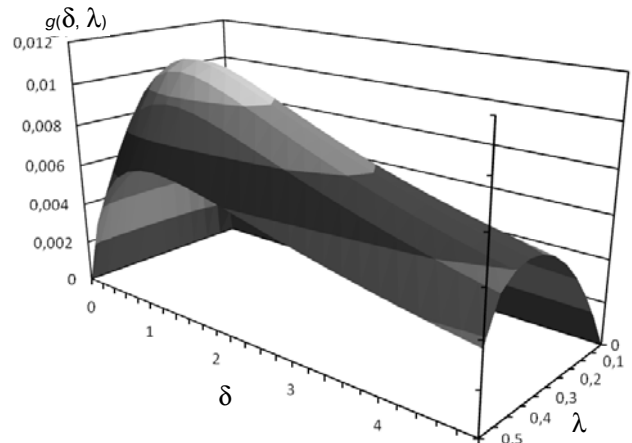


Рис. 2. Поле значений безразмерной функции ПГНС для сопряжения поршневое кольцо—микрорельеф цилиндра

пределах выбора зазора в замке  $\sigma$ :

$$H_1 = \sigma/2\pi \approx \sigma/6,28. \quad (7)$$

Параметр  $H_1$  согласно выражению (7) представляет собой гидродинамически обоснованный высотный параметр микрорельефа предлагаемого устройства и определяется конструктивно задаваемой, известной величиной, а именно значением зазора в замке поршневого кольца  $\sigma$ .

Поскольку для симметричной канавки  $L = 2l_{1,3} + l_2$ , то, с учетом (4), рациональные значения шаговых параметров (длин характерных участков) микрорельефа при заданном значении шага микрорельефа  $L$  составят

$$l_{1,3} = 0,344L;$$

$$l_2 = 0,312L$$

или, с применением упрощающей замены множителей 0,344 и 0,312 на единый множитель 0,333 —

$$l_{1,2,3} = 0,333L. \quad (8)$$

Из соотношения (8) получаем, что рациональные значения длин участков фрагмента микрорельефа с положительным, отрицательным и нулевым углами атаки должны составлять одну третью часть шага микрорельефа.

Очевидно, что при осевой высоте поршневого кольца  $S$  возможны следующие основные варианты выбора шага микрорельефа  $L$ :

- соизмеримый шаг ( $L \approx S$ );
- увеличенный шаг ( $L > S$ );
- уменьшенный шаг ( $L < S$ ).

В первом варианте в пределах длины поршневого кольца располагается один фрагмент микрорельефа; во втором — определенная его часть; в третьем, наоборот, несколько фрагментов. На практике шаг микрорельефа вообще не увязывают с геометрией поршневого кольца, а назначают исходя из технологических соображений.

В целях гидродинамической обоснованности выбора шага микрорельефа в пределах указанных выше трех вариантов, представленных на рис. 3, были проведены расчеты ГНС по формуле (2), которые показали, что максимальное значение ГНС, при прочих равных условиях, обеспечивает микрорельеф с соизмеримым заданной длине поршневого кольца шагом. Относительное снижение значения ГНС при переходе от соизмеримого шага к увеличенному составило 37 %, к уменьшенному — 58 %.

Таким образом, в первом приближении задавать рациональное значение шага микрорельефа  $L$  следует исходя из осевой высоты поршневого кольца  $S$ , которая является известным конструкционным параметром, при этом рациональное значение  $L$  должно быть соизмеримо т. е. примерно равно величине  $S$ .

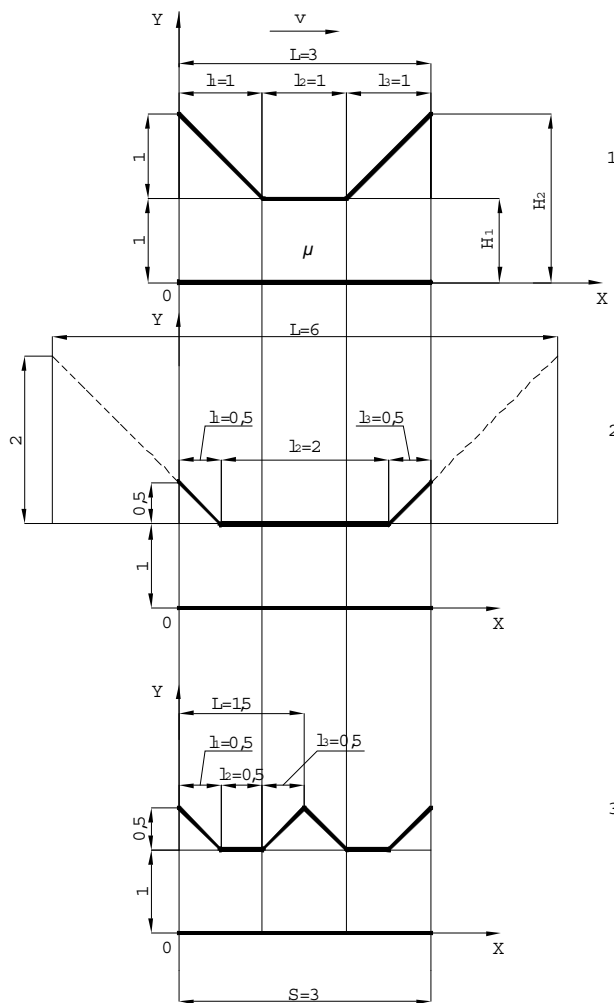
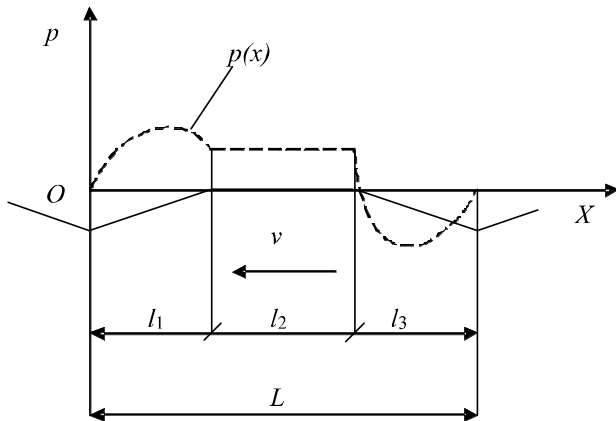


Рис. 3. Расчетная модель сопряжения поршневое кольцо—микрорельеф цилиндра для различного шага микрорельефа  $L$  по отношению к осевой высоте поршневого кольца  $S$ :

1, 2 и 3 — соизмеримый, увеличенный и уменьшенный шаги

Если рассчитать значения функции  $p(x)$  по формуле (1), то можно наглядно представить распределение гидродинамического давления по длине микрорельефа в виде симметричной треугольной канавки с сопряженным плоским участком (рис. 4).

Как видно из рис. 4, на участке  $l_1$  наклонной плоскости гидродинамическое давление является положительным и нелинейно изменяется, сначала возрастая от нуля в сечении входной кромки до максимума, затем, убывая до некоторого положительного значения в начале участка  $l_2$ , в пределах которого оно остается положительно-постоянным. На участке  $l_3$  давление нелинейно изменяется, переходя через минимум в отрицательной области и возвращаясь в нулевое значение в сечении выходной кромки. При смене направления скорости движения  $v$  эпюры участков  $l_1$  и  $l_3$  зеркально меняются местами. Характер распределения гид-



**Рис. 4.** Характер распределения гидродинамического давления смазочного материала в зазоре по длине фрагмента микро рельефа

родинамического давления (рис. 4) демонстрирует важную роль участка горизонтального удлинения  $l_2$ : этот участок, поддерживая постоянно положительного гидродинамического давления в пределах своей длины, существенно увеличивает ГНС в условиях реверсивного движения.

#### Выводы

1. Анализ предыдущих работ в области микропрофилирования поверхностей трения ДВС показал, что сведение роли микро рельефа к увеличению так называемой маслосъемности поверхности не объясняет механизм его действия по снижению изнашивания.

2. С помощью приложения гидродинамической теории смазки и принятия ряда упрощающих допущений получена аналитическая зависимость и выполнено расчетное исследование сопряжения цилиндр–поршневое кольцо.

3. Выдвинута гипотеза о механизме действия микро рельефа, а также получены в общем виде соотношения для назначения рациональных (с точки зрения гидродинамической несущей способности) шагов высотных параметров микро рельефа внутренней поверхности цилиндра.

#### Литература

1. Аналитический обзор методик определения маслосъемности поверхности зеркала гильзы двигателя внутреннего сгорания/ *А.П. Минаков, О.В. Яцук, В.Н. Соколов и др.*; // Вестник машиностроения. — 1999. — № 10. — С. 14–16.
2. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов/ *Э.Д. Браун, Н.А. Буше, И.А. Буяновский и др.*; под ред. А.В. Чичинадзе. — М.: Наука и техника, 1995.— 778 с.
3. Гидродинамическая теория смазки: Классики естествознания/под ред. и с доп. статьями проф. Л.С. Лейбензона. — М.; Л.: ГТТИ, 1934. — 344 с.
4. *Путинцев С.В.* Развитие расчетного моделирования условий смазки и трения поршневых колец ДВС; Совершенствование тракторных конструкций: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. — М., 1985. — С. 25–26.
5. *Путинцев С.В., Аникин С.А.* Расчетная модель и анализ условий смазки и трения поршневого кольца быстроходного тракторного дизеля // Трение и износ. — 1988. — Т. 9, № 4. — С. 617–626.

### **ПРЕДЛАГАЕМ РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМЫ** **Ориентировочные тарифы на 1 полугодие 2011 г.**

Первая страница обложки	Полноцветная	38 000 руб.
Вторая и третья страницы обложки	Полноцветная	34 000 руб.
Четвертая страница обложки	Полноцветная	36 000 руб.
Внутри журнала из расчета одна страница формата А4	Полноцветная	34 000 руб.
	Черно-белая	30 000 руб.