термический цикл (нагрев, выдержка и охлаждение) весьма кратковременный и измеряется долями секунды; высокая скорость охлаждения определяется интенсивным отводом теплоты внутрь детали. Эти отличия обуславливают получение особой мелкодисперсной и твёрдой структуры поверхностного слоя, обладающего высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Однако способ ЭМО используется, в основном, для деталей, у которых изношена наружная поверхность.

В производственных условиях наиболее распространен механический способ финишной обработки гильз цилиндров ДВС, который с теоретической точки зрения недостаточно полно изучен.

1. Технология ремонта машин / Е. А. Пучин, В. С. Новикон, Н. А. Очковский и др.; под ред. Е. А. Пучина. – Москва: Колос, 2007. – 488 с.
2. Моисеев О.Н., Богомягих В.А. О взаимосвязи трений скольжения и качения в системе «рабочий элемент инструмента – обрабатываемая поверхность цилиндра» / Международный технико-экономический журнал №4 2010. – с. 73-78.

Полугородник И. Н., Иванов П. А., Шевырев Л. Ю., Моисеев О.Н.
Теоретические предпосылки математического моделирования процесса
финишной обработки гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания

*Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования Донской
государственный аграрный университет
(Россия, Зерноград)*

doi: 10.18411/lj-10-2018-197

idsp: 000001:lj-10-2018-197

Аннотация

В данной статье проведено теоретическое исследование финишной обработки рабочей поверхности цилиндров. Определены условия движения рабочего элемента инструмента и его заклинивания между поверхностью ложе и обрабатываемой рабочей поверхностью цилиндра.

Ключевые слова: математическое моделирование, финишная обработка, двигатель внутреннего сгорания, рабочая поверхность цилиндра.

Для теоретического исследования процесса финишной обработки рабочей поверхности цилиндров работе приняты следующие основные допущения:

1. Шероховатость рабочей поверхности цилиндра после растачивания на последующий ремонтный размер принята в виде одинаковых правильных трёхгранных пирамид (тетраэдров), равномерно распределённых по всей рабочей поверхности цилиндра со среднестатистическим расстоянием между ними.

2. Модуль упругости правильных трёхгранных пирамид меньше модуля упругости рабочего элемента (шарика) инструмента для финишной обработки исходной рабочей поверхности цилиндра, то есть, $E_{\text{тип}} < E_{\text{инстр.}}$

3. Движение рабочего элемента (шарика) по обрабатываемой поверхности цилиндра может происходить дискретно – со скольжением или качением.

4. Трение скольжения рабочего элемента на обрабатываемой поверхности цилиндра сухое и подчиняется закону Кулона – Амонтона.

5. Давление, создаваемое рабочим элементом инструмента на рабочей поверхности цилиндра, прямопропорционально жёсткости и деформации пружины инструмента и не превышает допустимого напряжения на разрыв материала тонкостенного цилиндра.

6. При обработке исходная рабочая поверхность цилиндра находится в вертикальном положении, а обрабатывающий её инструмент – в горизонтальной плоскости.

7. Трение скольжения рабочего элемента о ложе инструмента минимальное и подчиняется закону Амонтона.

8. Деформация микронеровностей обрабатываемой рабочей поверхности принимается упруго – пластической.

Перечисленные допущения реальные и адекватны процессу финишной обработки рабочей поверхности цилиндра и позволяют описывать этот процесс аналитическим путём [1].

Исходя из третьего допущения, процесс финишной обработки рабочей поверхности цилиндра может происходить как со скольжением рабочего элемента инструмента, так и с его качением. Однако, эти два процесса дискретны и не могут наблюдаться одновременно, каким бы малым не был промежуток времени между ними. В связи с этим, рассмотрим эти процессы обработки рабочей поверхности цилиндра раздельно – для случая, когда между рабочим элементом инструмента и обрабатываемой поверхностью превалирует трение скольжения, и для случая, когда между ними доминирует трение качения. С этой целью необходимо определить условия, при которых наблюдается либо трение скольжения, либо трение качения. Рассмотрим систему сил, действующую на рабочий элемент инструмента со стороны обрабатываемой рабочей поверхности цилиндра и поверхности ложе рабочего элемента (рисунок 1).

Рисунок 1 – К определению условий движения рабочего элемента инструмента по исходной поверхности цилиндра

1 – микронеровности шероховатости поверхности в виде тетраэдров; 2 – пружина; 3 – ложе рабочего элемента; 4 – рабочий элемент инструмента

Для решения задачи используем законы теоретической механики с учётом допустимых напряжений контактирующих элементов системы «рабочий элемент инструмента – исходная рабочая поверхность цилиндра».

Рабочий элемент инструмента не будет вращаться, если результирующий момент от всех приложенных к нему сил равен нулю (инструмент с рабочим элементом расположен горизонтально) [2]

$$\sum M_{O_1} \leq 0 \quad (1)$$

$$\text{или } F_1 \cdot r + P_1 \cdot r - F_2 \cdot r \leq 0 \quad (2)$$

где Δl – деформация пружины (абсолютная);

$N = c \cdot \Delta l$ – осевое усилие, создаваемое пружиной;

f_1 – внешний коэффициент трения между поверхностью рабочего элемента и обрабатываемой поверхностью цилиндра;

f_2 – внешний коэффициент трения между поверхностью рабочего элемента и контактирующей с ним поверхностью ложе;

c – жёсткость пружины;

S' – вертикальная проекция площади грани тетраэдра (микронеровности, шероховатости);

$[\sigma_{см}]$ – допустимое напряжение на смятие поверхностного слоя материала цилиндра;

P_1 – лобовая сила сопротивления смятию микронеровностей поверхностного слоя материала цилиндра;

Δ – высота микронеровностей поверхностного слоя материала цилиндра;

a – ширина микронеровности (шероховатости).

$$F_1 = N \cdot f_1, \quad F_2 = N \cdot f_2, \quad P_1 = S' \cdot [\sigma_{см}].$$

Площадь S_1 согласно рисунку 1, определяется следующим образом

$$OK = \frac{\Delta}{\sin 60^\circ}, \quad S_1 = \frac{0,5 \cdot 2a \cdot \Delta \cdot \cos 30^\circ}{\sin 60^\circ} = a \cdot \Delta.$$

Тогда, подставляя в формулу (2) вместо F_1 , F_2 и P_1 их значения, получим следующее выражение

$$(f_1 - f_2) \leq \frac{a \cdot \Delta \cdot [\sigma_{см}]}{c \cdot \Delta l}, \quad (3)$$

Это выражение определяет условие заклинивания рабочего элемента между поверхностью ложе и обрабатываемой рабочей поверхностью цилиндра.

При этом условии будет происходить скольжение рабочего элемента по обрабатываемой им рабочей поверхности цилиндра с вероятным его качением.

Чистое скольжение рабочего элемента будет наблюдаться при условии

$$\Delta f = (f_1 - f_2) \leq 0$$

Проанализируем физический смысл формулы (3), приведя её к следующему виду

$$\Delta f \leq \frac{a \cdot \Delta \cdot [\sigma_{см}]}{c \cdot \Delta l}, \quad (4)$$

При $a = \text{const}$; $\Delta = \text{const}$; $[\sigma_{см}] = \text{const}$, если $c \rightarrow \infty$, то $\Delta f \rightarrow \infty$. Это указывает на то, что при $N \rightarrow \infty$ заклинивание рабочего элемента в системе увеличивается и, следовательно, уменьшается его степень свободы относительно его вращения вокруг точки O_1 , что приводит к его скольжению по обрабатываемой поверхности цилиндра.

В случае, если $c = \text{const}$, а $a \rightarrow \infty$ и $\Delta \rightarrow \infty$ то $\Delta f \rightarrow \infty$ и, следовательно, рабочий элемент инструмента получает степень свободы относительно его вращения вокруг точки O_1 .

Высота шероховатости " Δ " рабочей поверхности цилиндра в этом случае обуславливает проворачивание рабочего элемента вокруг его центра O_1 и он производит смятие шероховатости поверхностного слоя методом качения. « Δf » также увеличивается с увеличением ширины шероховатости " a " при основании и при увеличении $[\sigma_{см}]$.

Это связано с повышением лобового сопротивления P_1 шероховатости обрабатываемой исходной поверхности цилиндра.

На рисунке 2 показаны графики функций $\Delta f = f(P_1)$ при $N = \text{const}$ и $\Delta f = f(N)$ при $P_1 = \text{const}$.

При этом, исходя из формулы (3), всегда $N \geq P_1$.

В качестве примера на рисунке 2 показаны эти графики для условий $N \leq 1,0$ и $P_1 \leq N$.

Рисунок 2 – Графики функций $\Delta f = f(P_1)$ и $\Delta f = f(N)$

Из графиков следует, что качение рабочего элемента по обрабатываемой исходной поверхности возможно (для принятых условий примера) при Δf от 0,5 до 1,0. При этом, соотношение P_1/N должно также находиться в диапазоне от 0,5 до 1,0. Скольжение рабочего элемента возможно при значениях Δf от 0 до 0,5 при соотношении P_1/N от 0 до 0,5.

Из указанного анализа следует, что для каждого значения P_1 существует такое N , при котором происходит переход одного вида движения рабочего элемента в другой, то есть, от скольжения к качению или наоборот.

В приведенном случае это наблюдается при $P_1 = N = 0,5 H$ с разницей $\Delta f = 0,5$.

В общем случае это говорит о том, что для множества значений P_1 существует силовое поле гипербол, определяющее вид движения рабочего элемента инструмента по рабочей поверхности цилиндра.

Следует иметь в виду, что f_1 и f_2 – это кинематические коэффициенты трения, которые могут быть определены по формуле

$$f = \frac{1 + 0,0112 \cdot V}{1 + 0,06 \cdot V} \cdot f_0,$$

где V – относительная скорость трущихся пар;

f_0 – статический коэффициент трения трущихся пар.

Данный анализ позволяет непосредственно перейти к исследованию процессов упрочнения исходной поверхности цилиндра способами скольжения и качения по ней рабочего элемента инструмента.

1. Технология ремонта машин / Е. А. Пучин, В. С. Новикон, Н. А. Очковский и др.; под ред. Е. А. Пучина. – Москва: Колос, 2007. – 488 с.
2. Пучин Е. А. Основы теории надёжности и диагностики технических систем / Е. А. Пучин. – Москва: ФГБНУ «Росинформагротех», 2013. – 182 с.