

УДК 621.787

А. П. Минаков, М. Е. Лустенков, Е. В. Ильюшина, А. А. Горшкова

КИНЕМАТИКА, ДИНАМИКА И АЭРОДИНАМИКА ПРОЦЕССА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ПНЕВМОЦЕНТРОБЕЖНОЙ ОБРАБОТКИ ГИЛЬЗ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

UDC 621.787

A. P. Minakov, M. Y. Lustenkov, E. V. Ilyushina, A. A. Gorshkova

KINEMATICS, DYNAMICS AND AERODYNAMICS OF THE PROCESS OF PNEUMATIC-CENTRIFUGAL STRENGTHENING TREATMENT OF CYLINDER LINERS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Аннотация

Представлены кинематика, динамика и аэродинамика процесса упрочняющей пневмоцентробежной обработки. Приведена в первом приближении с допущениями физическая модель процесса, устанавливающая зависимость центробежной силы инерции, развиваемой шарами, от аэродинамических параметров.

Ключевые слова:

упрочняющая пневмоцентробежная обработка, кинематика, динамика, аэродинамика, центробежная сила инерции.

Abstract

Kinematics, dynamics and aerodynamics of the process of pneumatic-centrifugal strengthening treatment are presented. The physical model of the process is given in the first approximation with assumptions, and it ascertains the dependence of the centrifugal force of inertia, developed by balls, upon aerodynamic parameters.

Key words:

pneumatic-centrifugal strengthening treatment, kinematics, dynamics, aerodynamics, centrifugal force of inertia.

Анализ литературных источников показал, что поверхностное пластическое деформирование (ППД) на окончательном этапе обработки зеркала гильз двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в основном и ремонтном производствах предпочтительнее, чем плосковершинное хонингование [1–5]. Разработан способ восстановления рабочей поверхности гильз ДВС в ремонтном производстве, использующий для обработки вместо плосковершинного хонингования упрочняющую пневмоцентробежную обработку (ПЦО) стальными шарами, приводимыми в движение пото-

ком воздуха. В результате прогнозируется увеличение масляной экономичности двигателя, уменьшение расхода топлива и повышение износостойкости.

Реализация процесса упрочняющей ПЦО для обработки отверстий гильз ДВС основана на применении инструмента – двухрядного шарикового накатника пневмоцентробежного действия (рис. 1). Заготовка 7 закрепляется неподвижно на столе, например, вертикально-сверлильного станка. Инструмент располагают соосно заготовке в специальном приспособлении, установленном в шпинделе станка, которое не

позволяет инструменту вращаться.

В процессе обработки накатчик лишь вертикально перемещается вдоль оси заготовки. В корпус 1 инструмента через осевой канал 6 от цеховой системы питания подается сжатый воздух, который, проходя через тангенциальные сопла 8, приводит в движение стальные шары 9, расположенные свободно, насыпью в камере расширения 10. Выпадению шаров 9 из инструмента препят-

ствуют диски 2, 3 и фиксирующие их гайки 4. Шары в инструменте имеют шесть степеней свободы, их движение не ограничивается только вращением, они совершают осциллирующее и радиальное перемещения по отношению к обрабатываемой поверхности гильзы в пределах осевого и радиального зазоров в камере расширения, а также вращаются вокруг собственной оси (главной оси инерции).

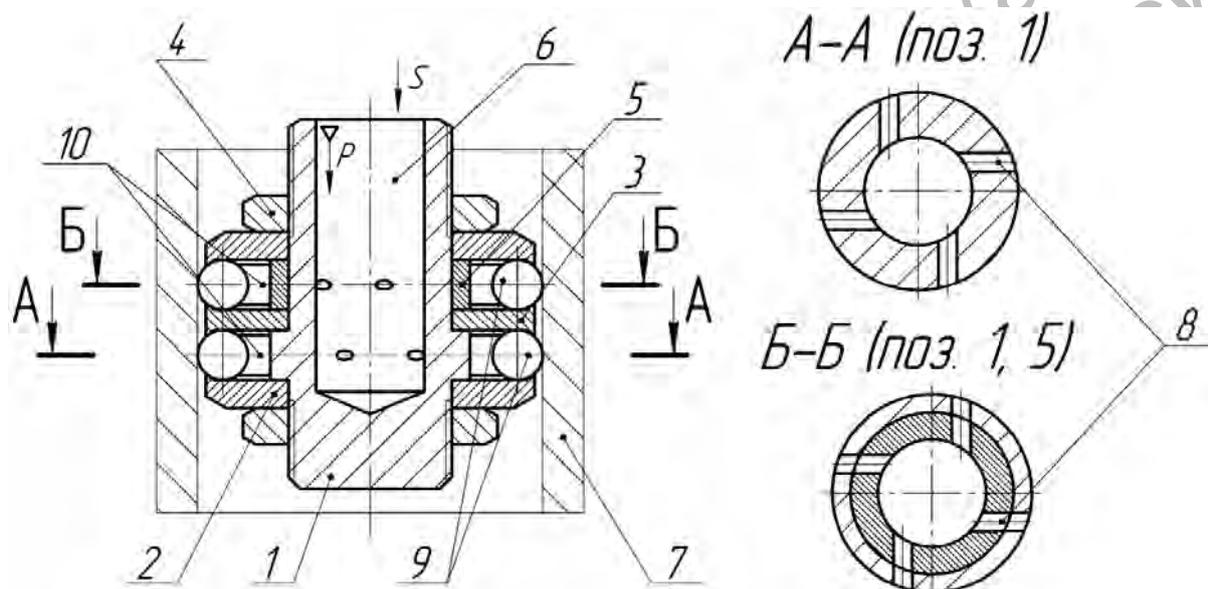


Рис. 1. Схема инструмента для упрочняющей ПЦО гильз ДВС: 1 – корпус; 2, 3 – диски; 4 – гайки; 5 – втулка; 6 – осевой канал; 7 – заготовка; 8 – тангенциальные сопла; 9 – шары; 10 – камера расширения

Под действием центробежной силы, развиваемой шарами, происходит тонкое динамическое упрочнение обрабатываемой поверхности [6, 7]. Сущность процесса упрочняющей ПЦО состоит в разнонаправленном, силовом вибрационном воздействии шаров на исходный микрорельеф, что способствует снижению шероховатости обрабатываемой поверхности. При этом смятие и сглаживание микровыступов происходит в различных направлениях в результате изменения кинетической энергии шаров при постоянном изменении направления вращения.

Локальное кратковременное воз-

действие деформирующих шаров в режиме автоколебательного движения на микронеровности в различных направлениях, согласно дислокационной теории, способствует увеличению количества плоскостей скольжения в блоках в различных направлениях и уменьшению сопротивления развитию очагов деформации. В результате этого поверхность получается не разрыхленной, а цельной. Микротрещины, появившиеся на предшествующих операциях (хонингование), будут закрываться. Устраняются концентраторы напряжений [2, 7].

Поскольку твердость материала шаров (сталь ШХ15) намного больше

твердости материала обрабатываемой заготовки, шары оставляют на поверхности следы в виде отдельных лунок, расположенных хаотично, что подтверждается исследованиями, проведенными на растровом электронном микроскопе [6].

Для описания в первом приближении процесса упрочняющей ПЦО с помощью формул и выражений принимаем следующие допущения:

- 1) шары вращаются с постоянной угловой скоростью $\omega = \text{const}$;
- 2) перемещение инструмента в осевом направлении происходит с равномерной скоростью $v_c^n = \text{const}$, причем $v_c^n \ll v_c^b$;
- 3) зазор между шарами постоянный, и они не контактируют;

4) силы трения в зоне контакта обеспечивают отсутствие кинематического проскальзывания в направлении движения центров шаров;

5) размеры площадки контакта малы по сравнению с диаметром шара;

6) силы трения в зоне контакта постоянны и пропорциональны нормальному давлению;

7) сила воздействия струй сжатого воздуха на поверхность является постоянной и одинаковой;

8) действие сил гравитации не учитывается.

Кинематика движения рабочих элементов (рис. 2) описывается известными уравнениями с учетом принятых допущений и упрощений [2, 7].

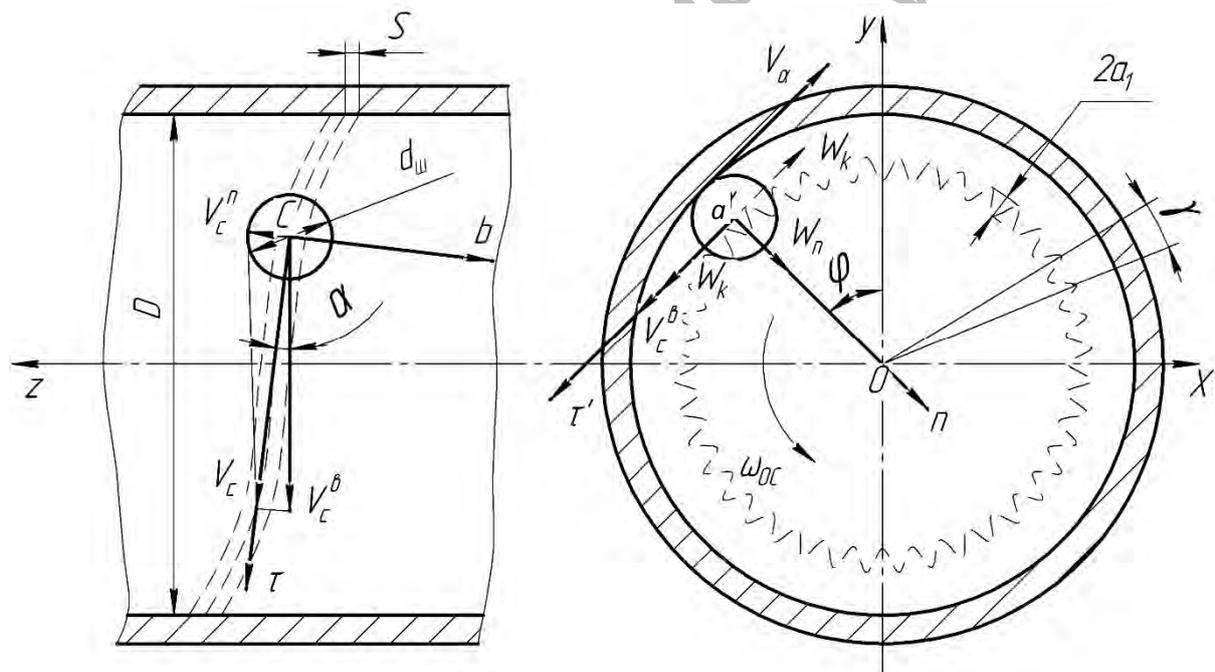


Рис. 2. Кинематика шаров в процессе упрочняющей ПЦО: n, τ, b – нормаль, касательная и бинормаль к траектории центра шара; XOY – оси координат, связанные с вращающейся деталью

Уравнения движения центра масс шара относительно неподвижной системы координат X, Y, Z имеют вид [2, 8]:

$$X = \left(\frac{D - d_{ш}}{2} \right) \sin \left(\frac{2V_c^B}{D - d_{ш}} \right) t; \quad (1)$$

$$Y = \left(\frac{D - d_{ш}}{2} \right) \cos \left(\frac{2V_c^B}{D - d_{ш}} \right) t; \quad (2)$$

$$Z = \frac{S}{2\pi} \left(\frac{2V_c^B}{D - d_{ш}} \right) t, \quad (3)$$

где D – диаметр обрабатываемого отверстия заготовки; $d_{ш}$ – диаметр шара в инструменте; V_c^B – скорость центра шаров при их вращении в воздушном потоке и контактировании с деталью; S – перемещение инструмента в осевом направлении.

Колебательное движение шара вдоль оси \vec{n} описывается уравнением

$$n = a_1 \sin kt, \quad (4)$$

где a_1 – амплитуда колебательного движения шара; k – круговая частота колебаний шара.

Круговая частота колебаний шара определяется по выражению

$$k = b_0 \omega_{OC}, \quad (5)$$

где b_0 – коэффициент, зависящий от микрорельефа обрабатываемой поверхности, давления и расхода сжатого воздуха, массы шара, конструктивных параметров камеры расширения, упругих свойств обрабатываемого материала и т. д., при этом $b_0 \gg 1$; ω_{OC} – угловая скорость шара вокруг оси z .

Траектория центра шара в параметрической форме, используя выражения (1)...(3):

$$X = \left(\frac{D - d_{ш}}{2} - a_1 (1 - \sin kt) \right) \sin(\omega_{OC}) \cdot t; \quad (6)$$

$$Y = \left(\frac{D - d_{ш}}{2} - a_1 (1 - \sin kt) \right) \cos(\omega_{OC}) \cdot t; \quad (7)$$

$$Z = \frac{S}{2\pi} (\omega_{OC}) \cdot t. \quad (8)$$

Траектория центра шара в проекции на плоскость XOY

$$X^2 + Y^2 = \left(\frac{D - d_{ш}}{2} - a_1 (1 - \sin kt) \right)^2. \quad (9)$$

Колебательное движение шара описывается концом вектора, вращающегося с частотой k , длина которого

изменяется от $(D - d_{ш}) / 2$ до $(D - d_{ш}) / 2 - 2a_1$ по синусоидальному закону.

Шар коснется обрабатываемой поверхности при условии

$$1 - \sin kt = 0. \quad (10)$$

Рассматривая условие (10), получаем

$$kt = \frac{\pi}{2} + 2\pi p = \frac{\pi(1 + 2p)}{2}, \quad (11)$$

где p – количество полных колебаний шара ($p = 0, 1, 2, 3, \dots$).

Время между первым и p -м колебаниями шара с учетом выражения (5) определяем по формуле

$$t_{1-p} = \frac{\pi(1 + 2p)}{2k} = \frac{\pi(1 + 2p)}{2b_0 \omega_{OC}}. \quad (12)$$

Время между двумя соседними соударениями шара о поверхность заготовки или период колебаний

$$T = \frac{3\pi}{2b_0 \omega_{OC}}. \quad (13)$$

Частота соударений шара с обрабатываемой поверхностью определяется из формулы

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{2b_0 \omega_{OC}}{3\pi}. \quad (14)$$

Угол между двумя соседними точками соприкосновения шара с обрабатываемой поверхностью

$$\gamma = \omega_{OC} T = \frac{3\pi}{2b_0}. \quad (15)$$

С учетом выражения (5) уравнение (15) принимает вид:

$$\gamma = \frac{3\pi \omega_{OC}}{2k}. \quad (16)$$

Количество соударений шара с обрабатываемой поверхностью при пово-

роте его на угол 2π (один полный оборот) составляет:

$$N_C = \frac{2\pi}{\gamma} = \frac{4k}{3\omega_{OC}}. \quad (17)$$

Угловая скорость шара складывается из двух составляющих:

$$\omega_{ш} = \sqrt{(\omega_{ш}^B)^2 + (\omega_{ш}^T)^2}, \quad (18)$$

где $\omega_{ш}^B$ – угловая скорость вращения шара вокруг бинормали; $\omega_{ш}^T$ – угловая скорость вращения шара вокруг касательной.

Поскольку шар совершает вращательное движение вокруг оси Z со скоростью ω_{OC} и возвратно-поступательное движение со скоростью \vec{V}_n в направлении, перпендикулярном оси Z , то угол между векторами $(\omega_{OC}, V_n) = 90^\circ$, а вектор ускорения Кориолиса имеет переменное значение и направлен перпендикулярно оси \vec{n} . Его значение определяется из выражения

$$W_K = 2(\omega_{OC} V_n). \quad (19)$$

Выражение (19) преобразуется с учетом уравнения (4) и будет иметь вид:

$$W_K = 2\omega_{OC} a_1 k \cos kt. \quad (20)$$

В результате колебательного движения на шар действует ускорение, равное второй производной от уравнения колебательного движения шара (4):

$$W_n = \ddot{n} = a_1 k^2 \sin kt. \quad (21)$$

Центробежная сила инерции, которую развивают шары при вращении, определяется из выражения

$$F_{ц} = m\omega_{отн.ш}^2 R = \frac{mV_{отн.ш}^2}{R}, \quad (22)$$

где R – радиус беговой дорожки ша-

ра, м; $\omega_{отн.ш}$ – относительная угловая скорость, c^{-1} ; $V_{отн.ш}$ – относительная линейная скорость шаров, м/с.

Радиус беговой дорожки напрямую зависит от диаметра обрабатываемого отверстия и диаметра шаров, используемых в инструменте:

$$R = \frac{D - d_{ш}}{2}. \quad (23)$$

Относительная скорость шара $V_{отн.ш}$ зависит от направления вращения шаров и заготовки в процессе обработки [2, 9]. Так как при упрочняющей ПЦО гильз ДВС заготовка не вращается в процессе обработки, то $V_{отн.ш} = V_{ш}$.

Формула для вычисления центробежной силы (22) будет иметь вид:

$$F_{ц} = \frac{mV_{ш}^2}{R} = \frac{2mV_{ш}^2}{D - d_{ш}}. \quad (24)$$

Переменная сила, действующая на шар вдоль оси \vec{n} в результате его колебательного движения [2]:

$$F = m\ddot{n} = -ma_1 k^2 \sin kt. \quad (25)$$

Максимальная сила, действующая на обрабатываемую поверхность, при каждом соударении шара

$$F_{max} = \frac{2mV_{ш}^2}{D - d_{ш}} + ma_1 k^2. \quad (26)$$

Поскольку вращение шаров в инструменте происходит под действием давления воздушного потока, вытекающего из сопел, то на шар в процессе обработки будет действовать сила воздушного потока $F_{в.п.}$ [10], определяемая по формуле

$$F_{в.п.} = \frac{C\rho v_{отн.ш}^2 S}{2}, \quad (27)$$

где C – коэффициент лобового сопротивления шара; ρ – плотность воздуха в потоке, воздействующем на шар; S –

величина миделевого сечения шара (площадь сечения шара в плоскости, проходящей через его центр), m^2 ; $v_{отн}$ – относительная скорость воздушного потока, м/с:

$$v_{отн} = v_{в.п.} - V_{отн.ш} = v_{в.п.} - V_{ш}, \quad (28)$$

где $v_{в.п.}$ – скорость воздушного потока, м/с.

Уравнение движения шара в инструменте для упрочняющей ПЦО можно выразить основным законом динамики вращательного движения

$$J\ddot{\phi} = M_{внешн.}, \quad (29)$$

где J – момент инерции шара относительно центра, $кг \cdot м^2$; $\ddot{\phi}$ – угловое ускорение шара, $с^{-2}$; $M_{внешн.}$ – суммарный момент всех внешних сил, действующих на тело.

При упрочняющей ПЦО внешние силы, действующие на шар, – это центробежная сила, сила колебательного движения, сила воздушного потока и сила тяжести. Тогда выражение (29) примет вид:

$$J\ddot{\phi} = \left[\begin{array}{c} \frac{C_p(v_{в.п.} - V_{ш})^2 S}{2} - \frac{2mfV_{ш}^2}{D - d_{ш}} \\ - ma_1k^2 - mg \cos \phi \end{array} \right] R, \quad (30)$$

где f – коэффициент трения скольжения; m – масса шара, кг; g – ускорение свободного падения, $м/с^2$; $\dot{\phi}$ – угловая скорость шара, $с^{-1}$.

Пренебрегая составляющей массы шара и полагая, что при установившемся движении шара, когда $\dot{\phi} = \omega = const$, то $\ddot{\phi} = 0$, выражение (30) принимает вид:

$$F_{ц} = \frac{2mfV_{ш}^2}{D - d_{ш}} = \frac{C_p(v_{в.п.} - V_{ш})^2 S}{2} - ma_1k^2. \quad (31)$$

Предложенная физическая модель формирования микрорельефа обработанной поверхности в процессе упрочняющей ПЦО устанавливает зависимость центробежной силы инерции, развиваемой шарами в режиме автоколебаний, от аэродинамических параметров процесса: относительной скорости и плотности воздушного потока, скорости шаров в инструменте, величины миделевого сечения шара и коэффициента лобового сопротивления шара при неподвижной заготовке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнейдер, Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю. Г. Шнейдер. – Л. : Машиностроение, 1982. – 246 с.
2. Минаков, А. П. Технологические основы пневмовибродинамической обработки нежестких деталей / А. П. Минаков, А. А. Бунос ; под ред. П. И. Ящерицына. – Минск : Наука і тэхніка, 1995. – 304 с.
3. Елизаветин, М. А. Технологические способы повышения долговечности машин / М. А. Елизаветин, Э. А. Сатель. – М. : Машиностроение, 1969. – 400 с.
4. Николаев, В. В. Технологическое обеспечение износостойкости раскатыванием и накатыванием (на примере пары цилиндр – поршневое кольцо) : дис. ... канд. техн. наук / В. В. Николаев. – Владимир, 1986. – 192 л.
5. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием : справочник / Л. Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.
6. Ящерицын, П. И. Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков. – Минск : Наука и техника, 1986. – 215 с.
7. Минаков, А. П. Технологические основы пневмовибродинамической обработки нежестких деталей : дис. ... д-ра техн. наук : защищена 05.03.01 : утв. 05.02.08. – Могилев, 1996. – 416 л.

8. **Воронков, И. М.** Курс теоретической механики / И. М. Воронков. – 11-е изд. – М. : Наука, 1964. – 596 с.

9. **Ильюшина, Е. В.** Суперфинишная пневмоцентробежная обработка гильз гидроцилиндров : дис. ... канд. техн. наук : защищена 05.02.083. – Могилев, 2009. – 157 л.

10. **Карпин, Е. Б.** Расчет и конструирование весоизмерительных механизмов / Е. Б. Карпин. – М. : Машгиз, 1963. – 524 с.

Статья сдана в редакцию 26 февраля 2013 года

Анатолий Петрович Минаков, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

Михаил Евгеньевич Лустенков, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Елена Валерьевна Ильюшина, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-298-45-25-55.

Анна Александровна Горшкова, преподаватель, Белорусско-Российский университет.

Anatoly Petrovich Minakov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

Mikhail Yevgenyevich Lustenkov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

Elena Valeryevna Ilyushina, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Tel.: +375-298 45 25 55.

Anna Aleksandrovna Gorshkova, lecturer, Belarusian-Russian University.