

## Совершенствование теоретического обеспечения технологических основ упрочняющей пневмоцентробежной обработки внутренних поверхностей вращения

Изложено новое описание кинематики и динамики движения деформирующего элемента — шара при пневмоцентробежной обработке, раскрывающее механизм воздействия на шар силы Кориолиса и переносной центробежной силы, возникающих при обработке поверхности, движущейся встречно или попутно движению шара. Указано на существование критической скорости шара относительно обрабатываемой поверхности, при превышении которой ухудшается качество обрабатываемой поверхности.

Kinematics and dynamics new description of a deformed element motion — a sphere under pneumatic centrifugal treatment is stated. This description shows action of Coriolis force and transfer centrifugal force arising at surface treatment, which moves either towards or on the same way the sphere does. It is stated that there is a critical speed of the sphere relative to the worked surface, and due to overspeeding quality of the surfacing falls behind.

Представленное в работах [1, 2] описание кинематики и динамики движения деформирующего элемента — шара при пневмоцентробежной обработке (ПЦО), являющейся разновидностью пневмовибродинамической обработки (ПВДО) [3], не раскрывает особенностей воздействия на шар силы Кориолиса и переносной центробежной силы, возникающих при ПЦО поверхности, движущейся встречно или попутно движению шара. Кроме того, уравнения движения шара, предлагаемые в работах [1–3], проблематично использовать для определения, даже приблизительного, числовых значений входящих в них величин. Вместе с тем, изложенное в работе [4] решение проблемы теоретического определения скорости шара при ПЦО (на основании учета газодинамических характеристик воздушного потока) открывает возможность вычисления вышеуказанных сил.

Наряду с этим в работе [5] дано приближенное уравнение движения шара в пневматическом механизме, являющемся прототипом инструмента для ПЦО:

$$J_0^* \ddot{\varphi} = \left[ C_x \frac{\rho v_{\text{отн}}^2}{2} S - f m R \omega^2 - m g \cos \varphi \right] R, \quad (1)$$

где  $J_0^*$  — момент инерции шара относительно центра беговой дорожки шара,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $\dot{\varphi}$ ,  $\ddot{\varphi}$  — угловые скорость,  $\text{с}^{-1}$ , и ускорение,  $\text{с}^{-2}$ , шара;  $C_x$  — коэффициент лобового сопротивления шара воздушному потоку;  $f$  — коэффициент трения скольжения;  $m$  — масса шара,  $\text{кг}$ ;  $R$  — радиус беговой дорожки шара,  $\text{м}$ ;  $\omega$  — угловая скорость шара,  $\text{рад}/\text{с} = \text{с}^{-1}$ ;  $\rho$  — плотность воздуха в потоке, воздействующем на шар,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $v_{\text{отн}} = v_{\text{п.в}} - v_{\text{ш}}^*$  — относительная скорость воздушного потока, равная

разности скорости потока воздуха  $v_{\text{п.в}}$  и скорости шара  $v_{\text{ш}}^*$  относительно центра беговой дорожки шара в момент воздействия на него потока,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $S$  — площадь диаметрального сечения шара,  $\text{м}^2$ ;  $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

В начале решения поставленной выше задачи примем следующие допущения:

а) шары совершают круговое движение относительно геометрической оси обрабатываемой внутренней цилиндрической поверхности заготовки (далее по тексту — оси обрабатываемой поверхности) с постоянной угловой скоростью;

б) шары совершают преимущественное скольжение относительно обрабатываемой поверхности и одного из торцов дисков инструмента;

в) перемещением инструмента в осевом направлении пренебрегаем, а контакт шара с торцом диска инструмента учитываем посредством коэффициента трения скольжения [4];

г) сила воздействия воздушного потока на любой из шаров одинакова и постоянна в любой точке траектории движения вдоль образующей обрабатываемой поверхности;

д) контакт между шарами отсутствует;

е) контакт шара с обрабатываемой поверхностью и с одним из торцов дисков инструмента является постоянным;

ж) площадь пятен контакта шара с обрабатываемой поверхностью и с одним из торцов дисков инструмента мала по сравнению с площадью поверхности шара;

з) разнонаправленными колебаниями шара при его движении в турбулентном потоке сжатого воздуха пренебрегаем.

Уравнение (1) вполне пригодно и для описания движения шара при ПЦО неподвижной заготовки, с той лишь разницей, что вместо  $R$  следует подставить  $R_{\text{ш}} = (D - d_{\text{ш}})/2$ , т. е. радиус расположения центров шаров. Тогда для ПЦО неподвижных заготовок уравнение движения шара примет вид

$$J_0 \ddot{\varphi} = \left[ C_x \frac{\rho (v_{\text{п.в}} - v_{\text{ш}})^2}{2} S - f m \frac{v_{\text{ш}}^2}{R_{\text{ш}}} - m g \cos \varphi \right] R_{\text{ш}}, \quad (2)$$

где  $J_0$  — момент инерции шара относительно оси обрабатываемой поверхности,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $v_{\text{ш}}$  — скорость шара относительно оси обрабатываемой поверхности,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $D$  — диаметр окружности, образующей обрабатываемую внутреннюю цилиндрическую поверхность заготовки,  $\text{м}$ ;  $d_{\text{ш}}$  — диаметр шара,  $\text{м}$ .

Для получения уравнения движения шара при ПЦО движущейся встречно или попутно ему обрабатываемой поверхности учтем в уравнении (2) скорость и направление этого движения. В результате получим искомое общее уравнение движения шара при ПЦО:

$$J_0 \ddot{\phi} = \left[ C_x \frac{\rho(v_{п.в} - (v'_{ш} \pm \omega_d R_d))^2}{2} S - fm \frac{(v'_{ш} \pm \omega_d R_d)^2}{R_{ш}} - mg \cos \phi \right] R_{ш}, \quad (3)$$

где "±" означает, что в уравнение (3) при попутном движении обрабатываемой поверхности следует подставлять знак "+", а при встречном — знак "-";  $v'_{ш}$  — скорость шара относительно обрабатываемой поверхности, м/с;  $\omega_d$  — угловая скорость обрабатываемой поверхности, рад/с =  $c^{-1}$ ;  $R_d$  — радиус обрабатываемой поверхности, м.

Принимая во внимание, что при установившемся движении шара  $\ddot{\phi} = 0$ , так как  $\dot{\phi} = \omega = \text{const}$ , и пренебрегая составляющей веса шара  $mg \cos \phi$ , уравнение (3) можно представить в виде выражения для силы деформационного воздействия шара на обрабатываемую поверхность в функции действующего на шар воздушного потока с учетом коэффициента трения скольжения

$$F = \frac{m(v'_{ш} \pm \omega_d R_d)^2}{R_{ш}} = \frac{C_x}{f} \frac{\rho(v_{п.в} - (v'_{ш} \pm \omega_d R_d))^2}{2} S. \quad (4)$$

При этом одновременно с силой  $F$  на шар действует противоположная ей по направлению, но идентичная по модулю центробежная сила  $F_p$  реакции обрабатываемой поверхности, т. е.  $|\vec{F}| = |\vec{F}_p|$ .

Из выражения (4) в соответствии с работой [4] следует, что при попутном вращении заготовки скорость  $v'_{ш.поп}$  шара относительно обрабатываемой поверхности можно определять по формуле

$$v'_{ш.поп} = v_{п.в} \left( 1 + \sqrt{\frac{2mf}{C_x \rho S R_{ш}}} \right)^{-1} - \omega_d R_d = v_{ш} - \omega_d R_d. \quad (5)$$

При встречном вращении заготовки скорость шара  $v'_{ш.вст}$  относительно обрабатываемой поверхности определяем по формуле

$$v'_{ш.вст} = v_{п.в} \left( 1 + \sqrt{\frac{2mf}{C_x \rho S R_{ш}}} \right)^{-1} + \omega_d R_d = v_{ш} + \omega_d R_d. \quad (6)$$

Определяя по уравнению (4) с помощью выражений (5) и (6) силу  $F$  деформационного воздействия шара на обрабатываемую поверхность, обнаруживаем, что она не зависит не только от направления движения обрабатываемой поверхности по отношению к движению шара,

но и не зависит от движения обрабатываемой поверхности абсолютно, так как:

$$v_{ш.поп} = v'_{ш.поп} + \omega_d R_d = (v_{ш} - \omega_d R_d) + \omega_d R_d = v_{ш}, \quad (7)$$

$$v_{ш.вст} = v'_{ш.вст} - \omega_d R_d = (v_{ш} + \omega_d R_d) - \omega_d R_d = v_{ш}, \quad (8)$$

где  $v_{ш.поп}$ ,  $v_{ш.вст}$  — скорости шара относительно оси обрабатываемой поверхности при попутном и встречном движении обрабатываемой поверхности.

Вместе с тем уравнение (4) позволяет определить силу Кориолиса и переносную центробежную силу, которые возникают при движении обрабатываемой поверхности относительно движения шаров.

На рис. 1 представлены три возможные схемы распределения основных сил, действующих на шар в направлениях, перпендикулярных к обрабатываемой поверхности, в процессе ПЦО.

Так, в соответствии с формулой (4) сила деформационного воздействия шара на обрабатываемую поверхность определяется по формуле:

а) при попутном движении обрабатываемой поверхности

$$F = \frac{m(v'_{ш.поп})^2}{R_{ш}} + 2mv'_{ш.поп} \omega_d \frac{R_d}{R_{ш}} + m\omega_d^2 \frac{R_d^2}{R_{ш}} = F'_{цб} + F_K + F_{пер.цб}; \quad (9)$$

б) при встречном движении обрабатываемой поверхности

$$F = \frac{m(v'_{ш.вст})^2}{R_{ш}} - 2mv'_{ш.вст} \omega_d \frac{R_d}{R_{ш}} + m\omega_d^2 \frac{R_d^2}{R_{ш}} = F'_{цб} - F_K + F_{пер.цб}, \quad (10)$$

где  $F'_{цб} = m(v'_{ш.поп})^2/R_{ш}$  или  $m(v'_{ш.вст})^2/R_{ш}$  — центробежная сила, действующая на шар при его движении относительно обрабатываемой поверхности, движущейся

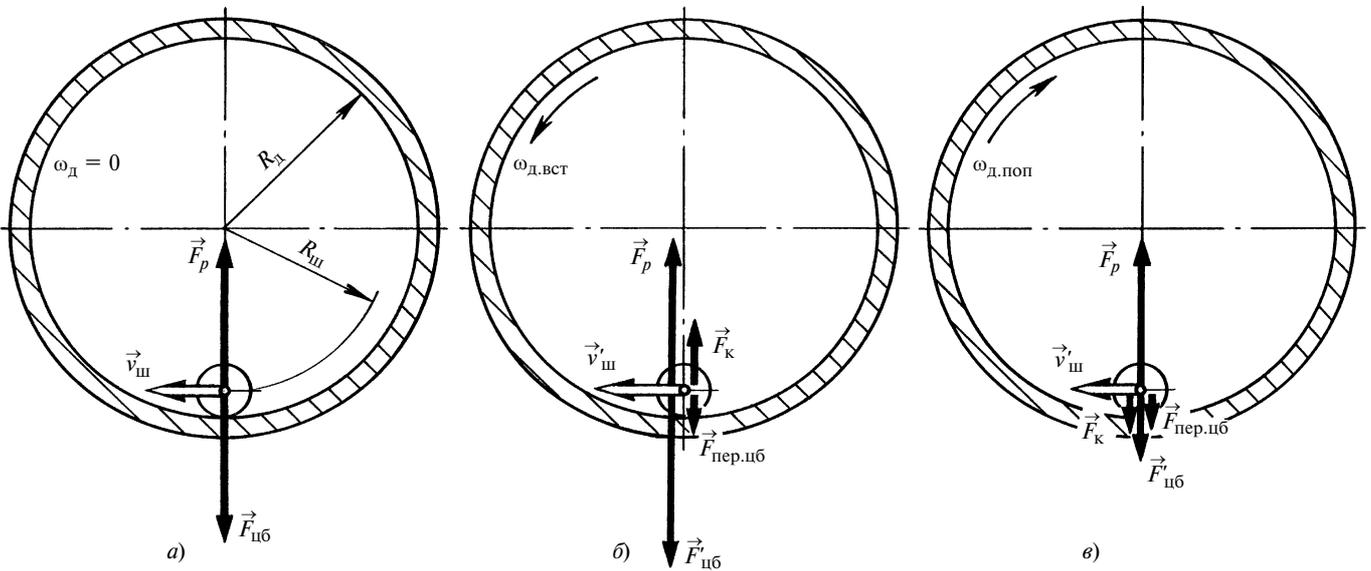
попутно или встречно шару;  $F_K = 2mv'_{ш.поп} \omega_d \frac{R_d}{R_{ш}}$  или

$2mv'_{ш.вст} \omega_d \frac{R_d}{R_{ш}}$  — сила Кориолиса;  $F_{пер.цб} = m\omega_d^2 \frac{R_d^2}{R_{ш}}$  —

переносная центробежная сила.

По выражениям (9) и (10) можно определить числовые значения и направления действия сил  $F'_{цб}$ ,  $F_K$ ,  $F_{пер.цб}$ , которые, однако, для вычисления суммарной силы по уравнению (4) не имеют практического значения, так как  $F = \text{const}$  и не зависит, как это указывалось выше, от движения обрабатываемой поверхности.

Выражение (7) указывает на существование условия невозможности ПЦО при попутном вращении заготовки, когда  $v'_{ш.поп} = 0$  или  $v_{ш} = v_{д.поп} = \omega_d R_d$ , где  $v_{д.поп}$  — скорость попутного движения обрабатываемой поверхности относительно собственной оси.



**Рис. 1. Схемы распределения основных сил, действующих на деформирующий элемент-шар в направлениях, перпендикулярных к обрабатываемой поверхности, в процессе ПЦО:**

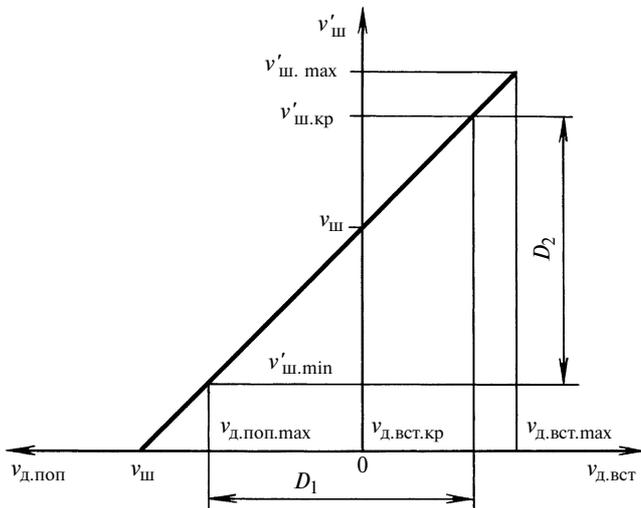
а) при неподвижной обрабатываемой поверхности  $|\vec{v}_{ш}|, |\vec{F}_p| = |\vec{F}| = |\vec{F}_{цб}|$ ; б) при встречном движении обрабатываемой поверхности  $|\vec{v}_{ш.вст}| = |\vec{v}'_{ш.вст}| - |\vec{v}_д| = |\vec{v}_{ш}|, |\vec{F}_p| = |\vec{F}| = |\vec{F}'_{цб}| - |\vec{F}_к| + |\vec{F}_{пер.цб}|$ ; в) при попутном движении обрабатываемой поверхности  $|\vec{v}_{ш.поп}| = |\vec{v}'_{ш.поп}| + |\vec{v}_д| = |\vec{v}_{ш}|, |\vec{F}_p| = |\vec{F}| = |\vec{F}'_{цб}| + |\vec{F}_к| + |\vec{F}_{пер.цб}|$

Используя выражения (7) и (8), для каждого конкретного случая ПЦО можно построить графическую зависимость  $v'_{ш} = f(v_д)$ , позволяющую определять границы диапазона возможных направлений и числовых значений скорости  $v_д$  движения обрабатываемой поверхности в зависимости от скорости  $v_{ш}$ , развиваемой шаром при неподвижной заготовке (рис. 2). Принимая во внимание, что для конкретных условий обработки с учетом материала, микротвердости и диаметра обраба-

тываемой поверхности необходим экспериментальный поиск режимов ПЦО, при которых обеспечивается наиболее эффективное снижение исходной шероховатости обрабатываемой поверхности, использование графика  $v'_{ш} = f(v_д)$  будет способствовать уменьшению объема экспериментальных работ. При этом необходимо учитывать существование критической скорости шара  $v'_{ш.кр}$ , когда начинается разрушение поверхности шаров из-за возрастания мгновенной температуры в зоне контакта шара с обрабатываемой поверхностью, что проявляется в замеченном на практике, ярко выраженном потемнении шаров. Это косвенно подтверждается У. В. Пильвре, доказавшим наличие мгновенных температур порядка  $687 \div 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  в зоне сухого удара шара  $\varnothing 2 \text{ мм}$  со скоростью  $40 \text{ м/с}$  о пластину из стали, когда на фотографии были отчетливо видны капли металла на дне лунки после сухой дробеструйной обработки стального образца [6]. Для приближенных вычислений, например, при ПЦО стальных нетермообработанных заготовок с внутренним диаметром до  $100 \text{ мм}$  можно допустить, что теоретическое значение  $v'_{ш.кр} \approx 25 \text{ м/с}$ .

## Выводы

1. Новое описание кинематики и динамики движения деформирующего элемента-шара при ПЦО раскрывает механизм воздействия на шар силы Кориолиса и переносной центробежной силы, позволяет вычислить их, доказывает отсутствие влияния перечисленных сил на числовое значение суммарной силы деформационного воздействия шара на обрабатываемую поверхность вне зависимости от направления и скорости ее движения.



**Рис. 2. Обобщенная графическая зависимость скорости  $v'_{ш}$  шара относительно обрабатываемой поверхности от направления движения и скорости  $v_д$  обрабатываемой поверхности:**  $D_1$  — диапазон рациональных направлений и значений  $v_д$ ;  $D_2$  — диапазон рациональных значений  $v'_{ш}$