

УДК 621.787

В. К. Шелег, А. М. Довгалев, А. А. Жолобов, Н. А. Леванович, И. А. Тарадейко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ИМПУЛЬСНО-УДАРНЫМ РАСКАТЫВАНИЕМ И ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

UDC 621.787

V. K. Sheleg, A. M. Dovgalev, A. A. Zholobov, N. A. Levanovich, I. A. Taradeiko

MODELING OF THE PROCESS OF COMBINED STRENGTHENING TREATMENT BY IMPULSE-IMPACT ROLLING AND A ROTATING MAGNETIC FIELD

Аннотация

Предложен новый способ формообразования поверхности отверстия цилиндра импульсно-ударным деформированием в магнитном поле. Разработана конструкция инструмента для отделочно-упрочняющей обработки. Выполнено математическое моделирование процесса совмещенной упрочняющей обработки импульсно-ударным деформированием и вращающимся магнитным полем, при котором обеспечивается комбинированное энергетическое воздействие на зону обработки. Получены аналитические зависимости для определения кинетостатических характеристик приводных и деформирующих шаров инструмента.

Ключевые слова:

упрочнение, цилиндр, пластическое деформирование, импульсно-ударное раскатывание, магнитное поле, магнитная система, микрорельеф.

Abstract

A new method for the formation of the surface of a cylinder bore by impulse-impact deformation in the magnetic field is suggested. The tool for finishing-strengthening treatment has been designed. The mathematical modeling of the process of combined strengthening treatment by impulse-impact deformation and a rotating magnetic field has been done, in which a combined energy action on the area of treatment is produced. Analytical dependences to determine kinetostatic characteristics of driving and deformation balls of the tool have been received.

Key words:

impulse-impact rolling, strengthening, cylinder, plastic deformation, pulse-shock rolling, magnetic field, magnetic system, micro-relief.

Введение

Машиностроительная промышленность изготавливает цилиндры, используемые в пневмо- и гидросистемах различных машин и механизмов, к качественным характеристикам внутренней рабочей поверхности которых предъявляются высокие требования.

Повышение качественных и эксплуатационных свойств внутренней по-

верхности цилиндров обеспечивают методами поверхностного пластического деформирования на финишных операциях технологического процесса. Для реализации технологий поверхностного пластического деформирования применяют раскатники жесткого и упругого типов. Наиболее перспективным является упрочнение поверхности цилиндров раскатниками упругого типа, обеспечивающими стабильные силовые па-

раметры процесса и высокие качественные характеристики модифицированного поверхностного слоя [1, 2].

Однако традиционные технологии поверхностного пластического деформирования в определенной мере исчерпали свои технологические возможности. В связи с этим большой научный и практический интерес представляют современные технологии поверхностного пластического деформирования с комбинированным видом энергетического воздействия на упрочняемую поверхность детали, позволяющие получить модифицированный поверхностный слой с уникальными свойствами [3, 4].

К числу перспективных относится технология совмещенной упрочняющей обработки внутренней поверхности цилиндров импульсно-ударным раскатыванием и вращающимся (постоянным или переменным) магнитным полем, позволяющая совместить в один технологический переход три операции: упрочнение поверхностного слоя детали импульсно-ударным раскатыванием, модификацию поверхностного слоя детали вращающимся магнитным полем инструмента, формирование на поверхности детали маслоудерживающего микрорельефа. При этом совмещение во времени процессов магнитного и импульсно-ударного деформирующего воздействий на локальный участок поверхности цилиндра обеспечивает модификацию структуры и фазового состава упрочненного слоя, имеющую технологическое значение и повышающую эксплуатационные характеристики поверхности [5, 6].

Объект исследований

Совмещенную упрочняющую обработку внутренней поверхности цилиндра импульсно-ударным раскатыванием и вращающимся магнитным полем осуществляют комбинированным инструментом, представленным на рис. 1.

Инструмент содержит: оправку 1; шайбы 2, 3, образующие кольцевые камеры 4, 5, соединенные между собой; деформирующие шары 6; приводные шары 7; магнитную систему для окружного перемещения приводных шаров 7, включающую магнитопроводный диск 8, обоймы 9, 10 и постоянные цилиндрические магниты 11, 12. Кольцевая камера 4 выполнена открытой, и в ней свободно расположены деформирующие шары 6. Приводные шары 7 установлены в кольцевой камере 5 с возможностью радиального и окружного перемещения, взаимодействия с деформирующими шарами 6. Цилиндрические постоянные магниты 11, 12 размещены в аксиальных отверстиях обойм 9, 10 и контактируют торцами с магнитопроводным диском 8. Силовые линии магнитного поля от цилиндрических постоянных магнитов 11, 12 проходят через магнитопроводный диск 8 и замыкаются на приводные шары 7. Вследствие этого на приводные шары 7 действует магнитное поле инструмента.

Инструмент снабжен магнитной системой для намагничивания поверхностного слоя детали, включающей кольцевые магнитопроводы 13, 14, втулки 15, 16, постоянные цилиндрические магниты 17, 18, установленные с равномерным угловым шагом в аксиальных отверстиях втулок 15, 16 и взаимодействующие с торцами кольцевых магнитопроводов 13, 14. Втулки 15, 16 и кольцевые магнитопроводы 13, 14 закреплены на шайбах 2, 3 соосно оправке 1, симметрично кольцевой камере 4 инструмента. Оправка 1, шайбы 2, 3, обоймы 9, 10 и втулки 15, 16 выполнены из немагнитопроводного материала.

Упрочняющую обработку осуществляют следующим образом. Оправку 1 инструмента закрепляют в шпинделе, а цилиндр 19 – в технологическом приспособлении на столе станка. Ось шпинделя станка совмещают с осью обрабатываемого отверстия.

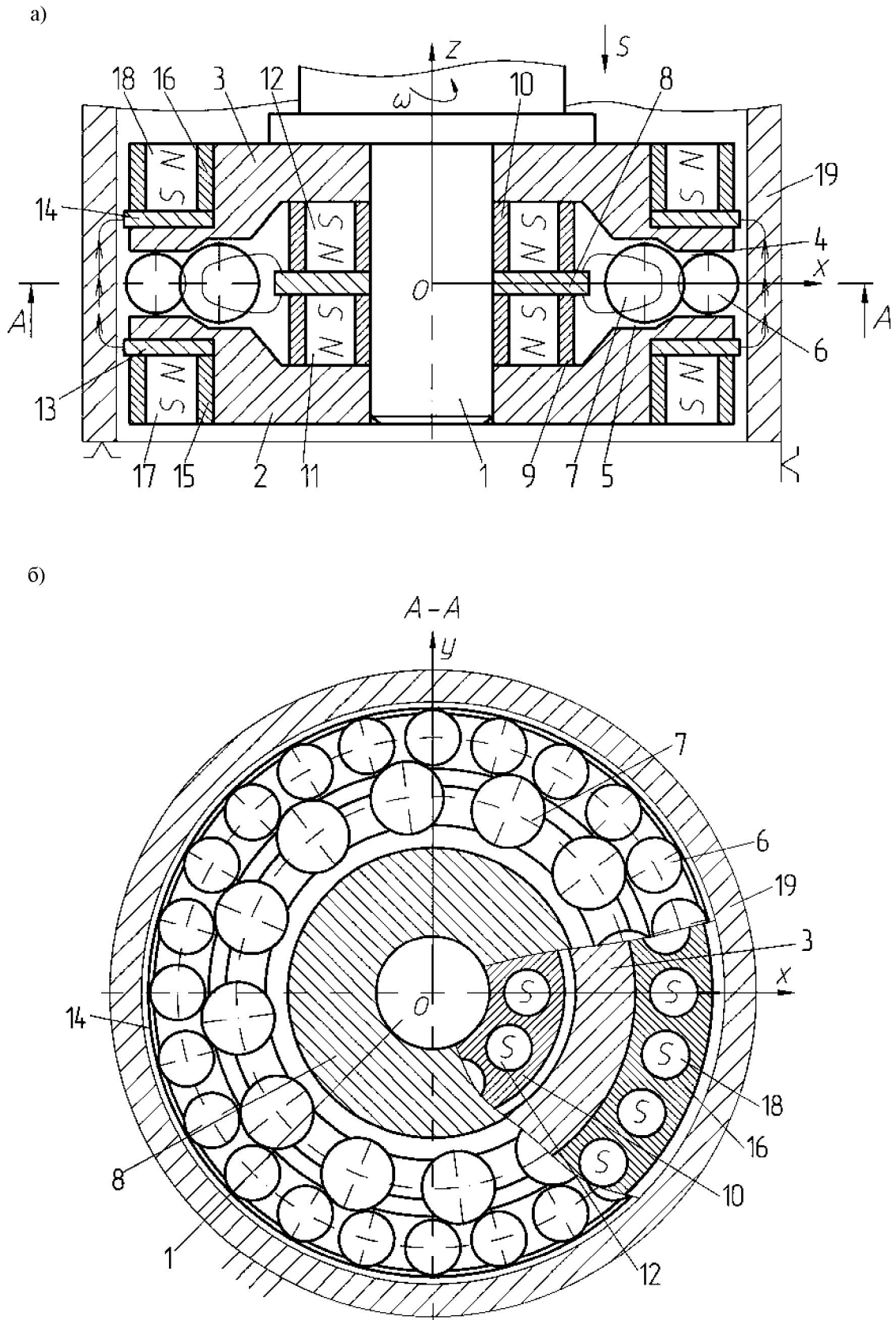


Рис. 1. Схема совмещенной упрочняющей обработки внутренней поверхности цилиндра импульсно-ударным раскатыванием и вращающимся магнитным полем: а – общий вид схемы; б – поперечное сечение комбинированного инструмента

Инструмент вводят в отверстие и совмещают плоскость расположения геометрических центров деформирующихся шаров 6 с торцом цилиндра 19. Инструменту сообщают вращение и перемещают с подачей S вдоль упрочняемой поверхности.

На поверхностный слой ферромагнитной детали действует вращающееся магнитное поле от постоянных цилиндрических магнитов 17, 18, концентрируемых в зоне обработки посредством кольцевых магнитопроводов 13 и 14.

Под действием вращающегося магнитного поля от постоянных цилиндрических магнитов 11, 12 приводные шары 7 получают окружное перемещение вдоль кольцевой камеры 5 инструмента и периодически взаимодействуют с деформирующими шарами 6, которые, в свою очередь, передают энергию импульсно-ударного взаимодействия внутренней намагниченной поверхности цилиндра 19, осуществляя ее пластическое деформирование и формируя на ней микрорельеф в виде сопряжения поверхностей получаемых лунок. Совмещение во времени методов упрочнения поверхностного слоя цилиндра 19 импульсно-ударным деформированием и вращающимся магнитным полем инструмента позволяет использовать положительное влияние процессов друг на друга и получить поверхность с особыми физико-механическими свойствами, которые невозможно обеспечить известными методами поверхностного пластического деформирования.

Процесс совмещенной упрочняющей обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием осуществляется магнитно-механической системой, в состав которой входят: устройство намагничивания поверхностного слоя детали; вращающийся намагниченный магнитопроводный диск инструмента; приводные и деформирующие шары, установленные в сообщающихся кольцевых ка-

мерах инструмента с возможностью взаимодействия; упрочняемый цилиндр.

Постановка задачи исследования

В настоящее время отсутствуют теоретические основы кинематики и динамики процесса совмещенной обработки импульсно-ударным раскатыванием и вращающимся магнитным полем, что вызывает затруднение при назначении режимов комбинированного упрочнения и прогнозировании физико-механических свойств и параметров микрорельефа формируемой поверхности. В связи с этим актуальной является разработка математической модели механической системы, реализующей процесс комбинированной упрочняющей обработки поверхности цилиндра импульсно-ударным раскатыванием в магнитном поле.

Основная часть

Выполним математическое моделирование рассматриваемой магнитно-механической системы. При разработке математической модели введем следующие допущения:

- продольная ось инструмента расположена вертикально, а перемещение приводных и деформирующих шаров осуществляется в горизонтальной плоскости;

- рассматриваем движение одного приводного и одного деформирующего шара, полагая, что все приводные и деформирующие шары инструмента находятся в одинаковых условиях;

- исследуем движение приводного шара в плоскости, нормальной оси вращения Oz инструмента в системе координат Oxy ;

- приводной и деформирующие шары рассматриваем как материальные точки массой m_1 и m_2 , помещенные в центр сфер соответствующих радиусов;

- магнитным взаимодействием приводных и деформирующих шаров, а также магнитным взаимодействием

идентичных шаров друг с другом пренебрегаем;

– магнитопроводный диск инструмента имеет намагниченный поверхностный слой толщиной h с однородными магнитными характеристиками;

– магнитным взаимодействием деформирующих шаров с намагниченной внутренней поверхностью цилиндра пренебрегаем;

– при отрыве природного шара от магнитопроводного диска инструмента оси координат приводного шара смещаются относительно осей координат магнитопроводного диска на сколь угодно малый угол, величину которого не учитываем.

Выполним последовательное моделирование имеющихся в процессе совмещенной упрочняющей обработки фаз движения приводного и деформирующего шаров.

1. Моделирование движения приводного шара от периферийной поверхности магнитопроводного диска до взаимодействия с деформирующим шаром.

Рассмотрим движение приводного шара относительно подвижных осей координат Ox_1y_1 , связанных с центром масс приводного шара (система координат Oxy связана с центром масс магнитопроводного диска) (рис. 2).

Запишем основное уравнение динамики относительного движения приводного шара:

$$m_1 \vec{a}_r = \vec{G} + \vec{N} + \vec{\Phi}_{en} + \vec{\Phi}_{et} + \vec{F}_{тр} + \vec{\Phi}_k + \vec{F}_M, \quad (1)$$

где m_1 – масса приводного шара; \vec{a}_r – относительное ускорение центра масс приводного шара; \vec{G} – сила тяжести приводного шара (лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа); \vec{N} – нормальная реакция, действующая на приводной шар со стороны поверхности шайбы инструмента (лежит в плоскости, перпендикулярной плоско-

сти чертежа). Силы \vec{G} и \vec{N} уравновешивают друг друга; $\vec{\Phi}_{en}$ – нормальная составляющая переносной силы инерции,

$$\Phi_{en} = m_1 \omega^2 x; \quad (2)$$

$\vec{\Phi}_{et}$ – касательная составляющая переносной силы инерции,

$$\Phi_{et} = m_1 \varepsilon r_n; \quad (3)$$

ω – угловая скорость вращения магнитопроводного диска (при установившемся режиме $\dot{\omega} = \text{const}$, $\varepsilon = 0$, $\vec{\Phi}_{et} = 0$);

r_n – начальное расстояние между геометрическими центрами магнитопроводного диска и приводного шара; $r_n = r_1 + r_3$; r_1, r_3 – радиусы приводного шара и магнитопроводного диска соответственно; $\vec{F}_{тр}$ – сила трения скольжения приводного шара о поверхность шайбы,

$$\vec{F}_{тр} = -fN \frac{\vec{V}_r}{V_r} = -fm_1 g \frac{\dot{x}\vec{i} + \dot{y}\vec{j}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}, \quad (4)$$

где f – коэффициент трения скольжения приводного шара о поверхность шайбы инструмента; \vec{V}_r – вектор относительной скорости приводного шара; V_r – модуль вектора относительной скорости приводного шара; $\vec{\Phi}_k$ – кориолисова сила инерции. Значения кориолисовой силы инерции $\vec{\Phi}_k$ в проекциях на оси x, y :

$$\Phi_{kx} = 2m_1 \omega \dot{y}, \quad (5)$$

$$\Phi_{ky} = -2m_1 \omega \dot{x}; \quad (6)$$

\vec{F}_M – сила магнитного притяжения приводного шара к периферийной поверхности намагниченного магнитопроводного диска.

Рассмотрим силу магнитного притяжения приводного шара \vec{F}_M в проекциях на оси координат x, y в соответствии с рис. 3.

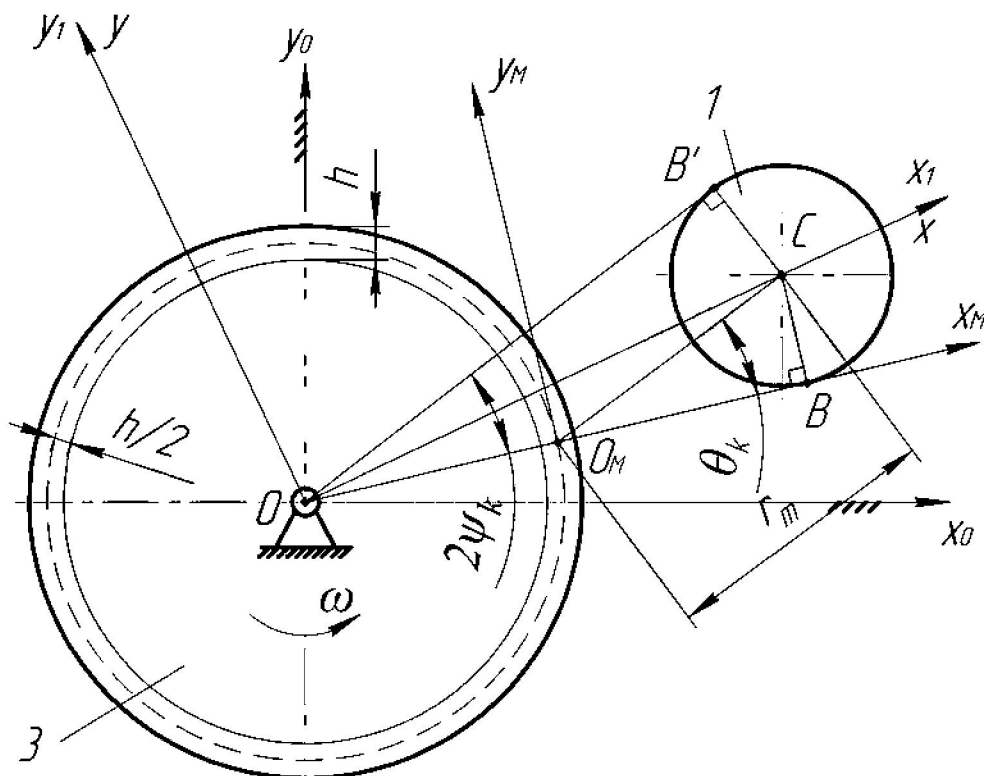


Рис. 3. Расчетная схема определения величины магнитной силы, действующей на приводной шар

Разобьем участок намагниченного слоя магнитопроводного диска, ограниченный произвольным углом $2\psi_k$, на множество участков, каждый из которых представляет собой элементарный постоянный магнит. Так как расстояние между геометрическими центрами такого элементарного магнита и приводного шара превышает размеры самого магнита, то справедливы формулы [7]:

$$\frac{dF_{Mx}(r_m, \theta, \alpha)}{d\psi} = \frac{3\mu_0 p_{m1} p_{m2}}{4\pi r_m^4} \times [2 \cos \theta \cos(\theta - \alpha) - \sin \theta \sin(\theta - \alpha)];$$

$$\begin{aligned} \frac{dF_{My}(r_m, \theta, \alpha)}{d\psi} &= \\ &= \frac{3\mu_0 p_{m1} p_{m2}}{4\pi r_m^4} \sin(\theta - \alpha), \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} dF_{Mx}(r_m, \theta, \alpha) &= \frac{3\mu_0 p_{m1} p_{m2}}{4\pi r_m^4} \times \\ &\times [2 \cos \theta \cos(\theta - \alpha) - \sin \theta \sin(\theta - \alpha)] d\psi; \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dF_{My}(r_m, \theta, \alpha) &= \\ &= \frac{3\mu_0 p_{m1} p_{m2}}{4\pi r_m^4} \sin(\theta - \alpha) d\psi, \quad (8) \end{aligned}$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; p_{m1} – магнитный момент элементарного постоянного магнита; p_{m2} – магнитный момент приводного шара; θ – угол смещения приводного шара относительно оси $O_M x_M$ (см. рис. 3); α – угол, определяющий положение вектора \vec{p}_{m2} [7],

$$\alpha = \arctg\left(\frac{3 \cos \theta \sin \theta}{3 \cos^2 \theta - 1}\right); \quad (9)$$

r_m – расстояние между геометрическими центрами элементарного постоянного магнита и приводного шара.

Согласно рис. 3 из ΔO_MCB следует, что

$$r_m = \frac{O_M B}{\cos \theta_k}, \quad (10)$$

где θ_k – угол, определяющий положение радиуса-вектора \vec{r}_m , соединяющего геометрические центры крайнего элементарного постоянного магнита и приводного шара.

Из ΔOCB находим $O_M B$:

$$\begin{aligned} O_M B &= OC \cdot \cos \Psi_k - r_3 + \frac{h}{2} = \\ &= x \cdot \cos \Psi_k - r_3 + \frac{h}{2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Магнитный момент элементарного постоянного магнита определяем по зависимости [7]

$$p_{m1} = \frac{4\pi B \left(\frac{h}{2}\right)^3}{2\mu_0}, \quad (12)$$

где B и h – величина магнитной индукции и толщина намагниченного поверхностного слоя магнитопроводного диска соответственно.

Магнитный момент приводного шара [7]

$$p_{m2} = \frac{(\mu - 1) H r_1^3}{\mu + 2}, \quad (13)$$

где μ – магнитная проницаемость среды; H – напряженность магнитного поля в точке, определяющей положение геометрического центра приводного шара.

При определении пределов интегрирования выражений (7) и (8) учитываем, что величина магнитной силы, действующей на приводной шар, зависит от расстояния между геометрическими центрами элементарного постоянного магнита и приводного шара. С достаточной степенью точности предел

интегрирования принимаем равным $\pm \Psi_k$. Из ΔOCB следует, что

$$\Psi_k = \arcsin \frac{r_1}{OC}, \quad (14)$$

где Ψ_k – угол, определяющий положение крайнего элементарного постоянного магнита (для произвольного элементарного постоянного магнита $\Psi_k = \Psi$; $\theta_k = \theta$).

Установим зависимость между углами Ψ_k и θ_k . Для этого рассмотрим крайний по расположению элементарный постоянный магнит (см. рис. 3).

Из ΔOCB следует, что

$$CB = OC \cdot \sin \Psi_k.$$

Выразим CB из ΔO_MCB :

$$CB = O_M B \cdot \operatorname{tg} \theta_k.$$

Тогда угол θ_k определится как

$$\theta_k = \operatorname{arctg} \left(\frac{OC \cdot \sin \Psi_k}{O_M B} \right). \quad (15)$$

Проекция суммарной магнитной силы, действующей на приводной шар со стороны рассматриваемых элементарных постоянных магнитов магнитопроводного диска, на оси Ox и Oy :

$$\begin{aligned} \int_0^{F_{Mx}} dF_{Mx} &= \frac{3\mu_0 p_{m1} p_{m2}}{4\pi} \times \\ &\times \int_{-\Psi_k}^{\Psi_k} \frac{1}{r_m^4} [2 \cos \theta \cos(\theta - \alpha) - \\ &- \sin \theta \sin(\theta - \alpha)] d\Psi; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \int_0^{F_{My}} dF_{My} &= \frac{3\mu_0 p_{m1} p_{m2}}{4\pi} \times \\ &\times \int_{-\Psi_k}^{\Psi_k} \frac{1}{r_m^4} \sin(\theta - \alpha) d\Psi = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

При интегрировании выражений (16) и (17) учитываем значения параметров α , θ , r_m и $O_M B$, сведенных в систему (18):

$$\left\{ \begin{aligned} F_{Mx} &= \frac{3\mu p_{m1} p_{m2}}{2\pi} \times \\ &\times \int_0^{\Psi_k} \frac{1}{r_m^4} 2 \cos \theta \cos(\theta - \alpha) d\Psi; \\ \alpha &= \arctg \left(\frac{3 \cos \theta \sin \theta}{3 \cos^2 \theta - 1} \right); \\ \theta &= \arctg \left(\frac{OC \cdot \sin \Psi}{O_M B} \right); \\ r_m &= \frac{O_M B}{\cos \theta}; \\ O_M B &= x \cdot \cos \Psi - r_1 + \frac{h}{2}. \end{aligned} \right. \quad (18)$$

Так как угол $\Psi = f(x)$, то введем следующее обозначение:

$$F_{Mx} = m_1 A F_M(x), \quad (19)$$

где A – постоянная величина,

$$A = \frac{3\mu_0 p_{m1} p_{m2}}{2\pi \cdot m_1}. \quad (20)$$

После преобразований запишем уравнение (1) в проекциях на оси координат Oxy в форме Коши:

$$\left\{ \begin{aligned} \ddot{x} &= \omega^2 x + 2\omega \dot{y} - \\ &- A F_M(x) - fg \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}; \\ \ddot{y} &= -2\omega \dot{x} - fg \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}. \end{aligned} \right. \quad (21)$$

При решении системы (21) методами численного интегрирования следует соблюдать краевые условия координат центра масс и скорости приводного шара:

– начальные

$$t = t_0; x = x_0; y = 0;$$

$$\dot{x} = \dot{x}_0; \dot{y} = \dot{y}_0; \sqrt{x_0^2 + y_0^2} = r_1 + r_3;$$

– текущие

$$t = t; x = x; y = 0;$$

$$\dot{x} = \dot{x}; \dot{y} = \dot{y}; \sqrt{x_0^2 + y_0^2} = x;$$

– конечные

$$t = t_k; x = x_k; y = 0;$$

$$\dot{x} = \dot{x}_k; \dot{y} = \dot{y}_k; \sqrt{x_k^2 + y_k^2} = x_k,$$

где t_0 , t_k , x_0 , x_k , y_0 , y_k , \dot{x}_0 , \dot{x}_k , \dot{y}_0 , \dot{y}_k – время, координаты центра приводного шара и проекции скорости приводного шара на оси Ox и Oy в начальный и конечный моменты фазы движения приводного шара от магнитопроводного диска до взаимодействия с деформирующим шаром соответственно.

При численном интегрировании следует соблюдать условие

$$\sqrt{x_k^2 + y_k^2} \leq OC_{\max},$$

где OC_{\max} – максимально возможное расстояние между геометрическими центрами магнитопроводного диска и приводного шара (определяется конструкцией инструмента).

2. Моделирование взаимодействия приводного и деформирующего шаров.

Вращаясь с угловой скоростью ω вдоль кольцевой камеры инструмента, приводной шар периодически взаимодействует с деформирующим шаром. При этом считаем, что имеет место косо-центральный удар (импульсы силы направлены по линии, соединяющей геометрические центры взаимодействующих шаров), а в зоне взаимодействия шаров ударное трение отсутствует.

Для исследования ударного взаимодействия приводного шара с деформирующим шаром (рис. 4) определим коэффициент восстановления при ударе [8]:

$$K = \frac{\operatorname{tg}\alpha_1}{\operatorname{tg}\alpha_2}, \quad (22)$$

где K – коэффициент восстановления; α_1, α_2 – углы падения и отражения приводного шара, равные углам $(\vec{v}_{c1} \wedge \vec{n})$ и $(\vec{u}_{c1} \wedge \vec{n})$ соответственно (\vec{v}_{c1} – век-

тор скорости центра масс приводного шара в момент начала удара; \vec{u}_{c1} – вектор скорости центра масс приводного шара в момент окончания удара); \vec{n} – вектор нормали, проведенной к поверхности приводного и деформирующего шаров в точке их соприкосновения.

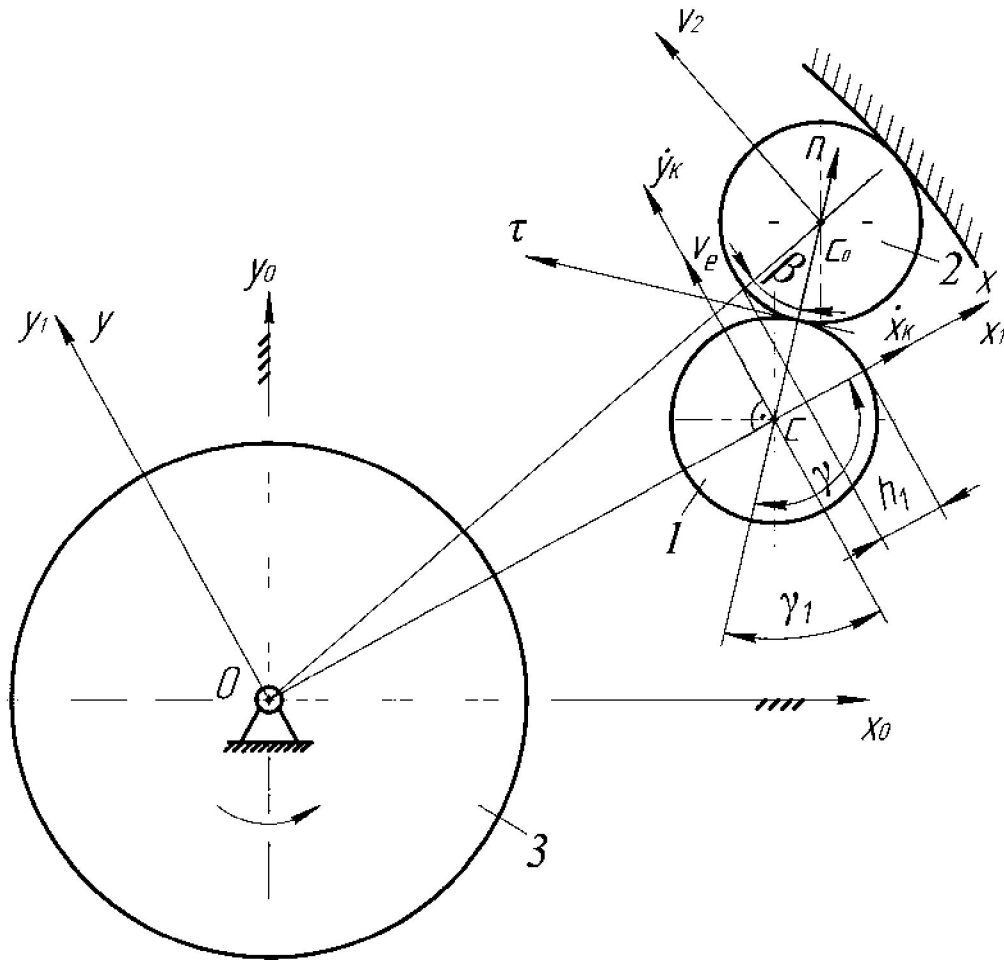


Рис. 4. Расчетная схема ударного взаимодействия приводного шара с деформирующим шаром: 1 – приводной шар; 2 – деформирующий шар; 3 – поперечное сечение намагниченного вращающегося магнитопроводного диска

Определим проекции скорости приводного шара на оси n и τ в начальный момент удара приводного шара о деформирующий шар:

$$\begin{aligned} v_{1\tau} &= (v_e + \dot{y}_k) \sin \gamma_1 - \dot{x}_k \cos \gamma_1; \\ v_{1n} &= (v_e + \dot{y}_k) \cos \gamma_1 + \dot{x}_k \sin \gamma_1, \end{aligned} \quad (23)$$

где v_e – переносная скорость центра приводного шара, $v_e = \omega \cdot OC$.

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_1 &= \frac{v_{1\tau}}{v_{1n}} = \\ &= \frac{(\omega \cdot OC + \dot{y}_k) \sin \gamma_1 - \dot{x}_k \cos \gamma_1}{(\omega \cdot OC + \dot{y}_k) \cos \gamma_1 + \dot{x}_k \sin \gamma_1}. \end{aligned} \quad (24)$$

Тогда угол отражения

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{(\omega \cdot OC + \dot{y}_k) \sin \gamma_1 - \dot{x}_k \cos \gamma_1}{(\omega \cdot OC + \dot{y}_k) \cos \gamma_1 + \dot{x}_k \sin \gamma_1} \cdot \frac{1}{K}, \quad (25)$$

где γ_1 – угол между нормалью n и осью Oy ; \dot{x}_k, \dot{y}_k – проекции вектора скорости центра масс приводного шара на оси Ox и Oy в момент удара.

Согласно рис. 4, угол $\gamma_1 = \gamma - \pi/2$.

Из треугольника OC_0C следует, что

$$\gamma = \arccos \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab},$$

где $a = OC = f(h_1)$; $b = CC_0$; $c = OC_0$.

Для определения OC запишем равенство

$$OC_0 - r_2 + h_1 = OC + r_1,$$

откуда

$$OC = OC_0 - r_2 - r_1 + h_1, \quad (26)$$

где γ – тупой угол треугольника OC_0C ; h_1 – натяг между приводным и деформирующим шарами (величина перекрытия вершин контактирующих шаров).

Запишем проекции скорости центра масс деформирующего шара на оси n и τ :

$$v_{2\tau} = v_2 \cos \beta, \quad (27)$$

$$v_{2n} = v_2 \sin \beta, \quad (28)$$

где v_2 – скорость центра масс деформирующего шара; β – угол между прямой OC_0 и нормалью n .

Из теоремы синусов следует, что

$$\frac{\sin \beta}{OC} = \frac{\sin \gamma}{OC_0},$$

откуда

$$\sin \beta = \frac{OC \sin \gamma}{OC_0}.$$

Из тригонометрической формулы

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta}.$$

Проекции вектора скорости центра масс приводного и деформирующего шаров на нормаль n в конце удара [8]:

$$u_{1n} = v_{cn} + K(v_{cn} - v_{1n}); \quad (29)$$

$$u_{2n} = v_{cn} + K(v_{cn} - v_{2n}), \quad (30)$$

где v_{cn} – скорость центра масс системы,

$$v_{cn} = \frac{m_1 v_{1n} + m_2 v_{2n}}{m_1 + m_2}, \quad (31)$$

где m_1, m_2 – массы приводного и деформирующего шаров соответственно.

Так как векторы ударного импульса направлены по общей нормали n к поверхностям соударяющихся шаров, то проекции вектора скорости центра масс приводного и деформирующего шаров на касательную τ до и после удара остаются неизменными:

$$v_{1\tau} = u_{1\tau}; \quad v_{2\tau} = u_{2\tau}, \quad (32)$$

где $u_{1\tau}, u_{2\tau}$ – проекции вектора скорости центра масс приводного и деформирующего шаров на касательную τ после удара соответственно.

Тогда

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{u_{1\tau}}{u_{1n}}. \quad (33)$$

Абсолютные скорости приводного и деформирующего шаров после удара:

$$u_1 = \sqrt{u_{1n}^2 + u_{1\tau}^2}; \quad (34)$$

$$u_2 = \sqrt{u_{2n}^2 + u_{2\tau}^2}. \quad (35)$$

Заключение

В статье представлен новый способ формообразования внутренней поверхности цилиндра импульсно-ударным раскатыванием в магнитном поле. Разработана конструкция комбиниро-

ванного двухрядного магнитно-динамического инструмента для отделочно-упрочняющей обработки. Получены системы дифференциальных уравнений, описывающие кинематику движения приводного шара и его взаимодействие с деформирующим шаром при совмещенной упрочняющей обработке импульсно-ударным раскатыванием и вращающимся магнитным полем. Найдены начальные и конечные условия для численного интегрирования диффе-

ренциальных уравнений и определения кинематических характеристик приводного шара при различных режимах комбинированной отделочно-упрочняющей обработки и конструктивных параметрах магнитно-динамического инструмента. Получены аналитические зависимости для определения скорости деформирующего шара в момент его взаимодействия с упрочняемой внутренней поверхностью цилиндра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ящерицин, П. И.** Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении / П. И. Ящерицин, А. П. Минаков. – Минск : Наука и техника, 1989. – 215 с.
2. **Минаков, А. П.** Технологические основы пневмовибродинамической обработки нежестких деталей / А. П. Минаков, А. А. Бунос ; под ред. П. И. Ящерицина. – Минск : Наука и техника, 1995. – 304 с.
3. **Чистосердов, П. С.** Комбинированные инструменты для отделочно-упрочняющей обработки / П. С. Чистосердов. – Минск : Беларусь, 1977. – 124 с.
4. **Таранов, А. С.** Упрочнение валов методом ППД в ПМП / А. С. Таранов // Тракторы и сельхозмашины. – 2003. – № 2. – С. 44–45.
5. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления : пат. 2089373 Рос. Федерации, МКИ 6 В 24 В 39 / 02 / А. М. Довгалева (РБ). – № 4924841/02; заявл. 05.04.91; опубл. 10.09.97, Бюл. № 25. – 4 с.
6. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2068770 Рос. Федерации, МКИ 6 В 24 В 39 / 02 / А. М. Довгалева (РБ). – № 4922542/27; заявл. 29.03.91 ; опубл. 10.11.96, Бюл. № 31. – 14 с.
7. **Довгалева, А. М.** Взаимодействие деформирующего шара с источником магнитного поля динамического раскатника / А. М. Довгалева, В. В. Глущенко, Д. М. Свирица // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2013 г.: в 2 ч. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2012. – Ч. 1. – С. 33–34.
8. **Лойцанский, Л. Г.** Курс теоретической механики : в 2 т. / Л. Г. Лойцанский, А. И. Лурье. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1983. – Т. 2. – 640 с.

Статья сдана в редакцию 31 декабря 2013 года

Валерий Константинович Шелег, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. Тел.: 8-0172-92-74-54.

Александр Михайлович Довгалева, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: ret@br.u.by.

Александр Алексеевич Жолобов, канд. техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8 0222-23-04-51.

Николай Андреевич Леванович, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-22-41-59.

Иван Анатольевич Тарадейко, студент, Белорусско-Российский университет.

Valery Konstantinovich Sheleg, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. Phone: 8 -0172-92-74-54.

Aleksandr Mikhailovich Dovgalev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: ret@br.u.by.

Aleksandr Alekseyevich Zholobov, PhD (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-23-04-51.

Nikolai Andreyevich Levanovich, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-22-41-59.

Ivan Anatolyevich Taradeiko, student, Belarusian-Russian University.